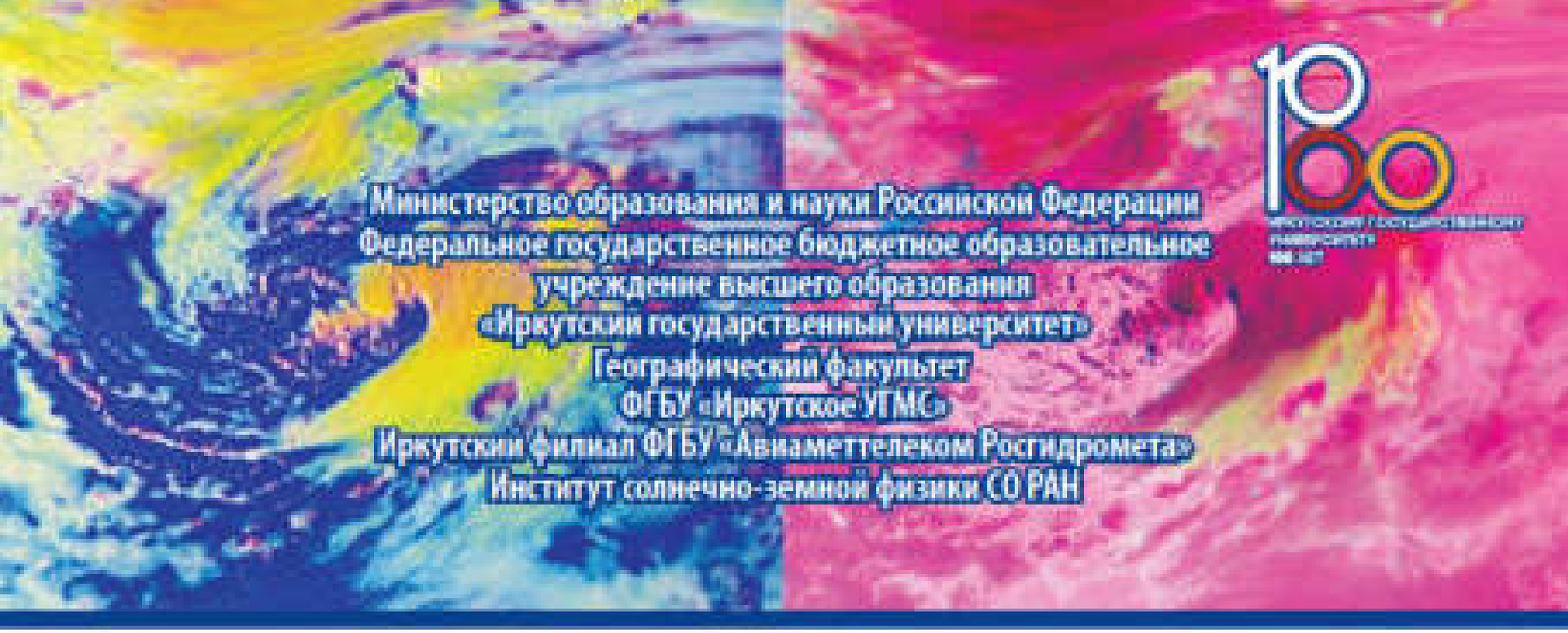


СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ В РОССИИ



ISBN 978-5-9624-1595-6

УДК 551.5(470)(063)
ББК 26.23(2Р)л0

Редакционная коллегия:
Е. Н. Сутырина, канд. геогр. наук; И. В. Латышева, канд. геогр. наук;
С. Ж. Вологжина, канд. геогр. наук

Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России [Электронный ресурс] : материалы Всерос. науч.-практ. конф. Иркутск, 21–23 марта 2018 г. / ФГБОУ ВО «ИГУ». – Иркутск : Изд-во ИГУ, 2018. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Заглавие с этикетки диска.

ISBN 978-5-9624-1595-6

Материалы содержат результаты исследований по направлениям: «Погода и климат: мониторинг и прогнозирование»; «Мониторинг, моделирование и прогнозирование состояния водных объектов суши»; «Опасные гидрометеорологические явления и процессы»; «Региональные особенности атмосферных процессов»; «Дистанционное зондирование гидрометеорологических явлений».

Предназначены на специалистов в области гидрометеорологии, работников научных и образовательных учреждений, аспирантов и студентов.

Материалы публикуются в авторской редакции. Ответственность за содержание материалов несут авторы.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Иркутский государственный университет»
664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1; тел. (3952) 24-34-53

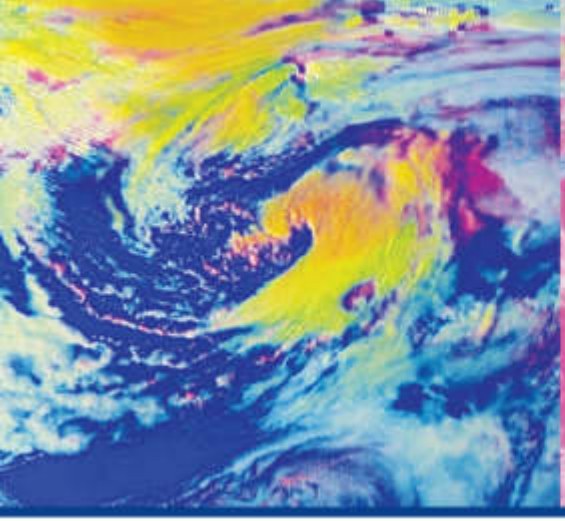
Издательство ИГУ
664074, Иркутск, ул. Лермонтова, 124, офис 214; тел.: (3952) 52-18-53

Подписано к использованию 29. 05.2018. Тираж 30 экз. Заказ 67. Объем 105 Мб.

Тип компьютера, процессор, частота:	32-разрядный процессор, 1 ГГц или выше
Оперативная память (RAM):	256 МБ
Необходимо на винчестере:	320 МБ
Операционные системы:	ОС Microsoft® Windows® XP, 7, 8 или 8.1. ОС Mac OS X
Видеосистема:	Разрешение экрана 1024x768
Акустическая система:	Не требуется
Дополнительное оборудование:	Не требуется
Дополнительные программные средства:	Adobe Reader 6 или выше

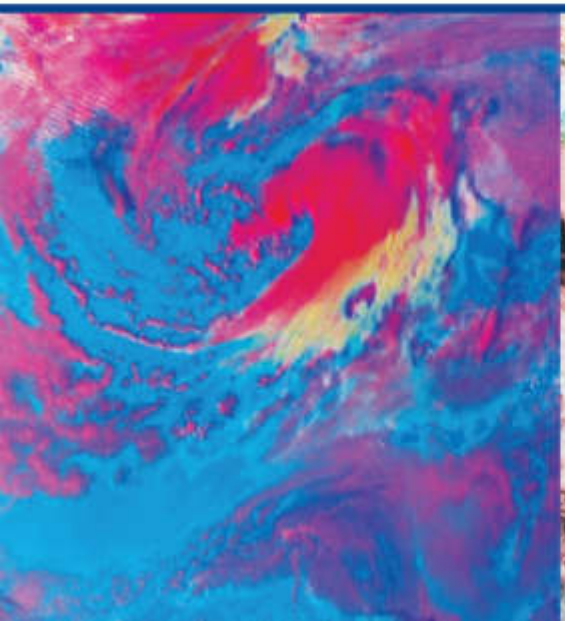
© ФГБОУ ВО «ИГУ», 2018

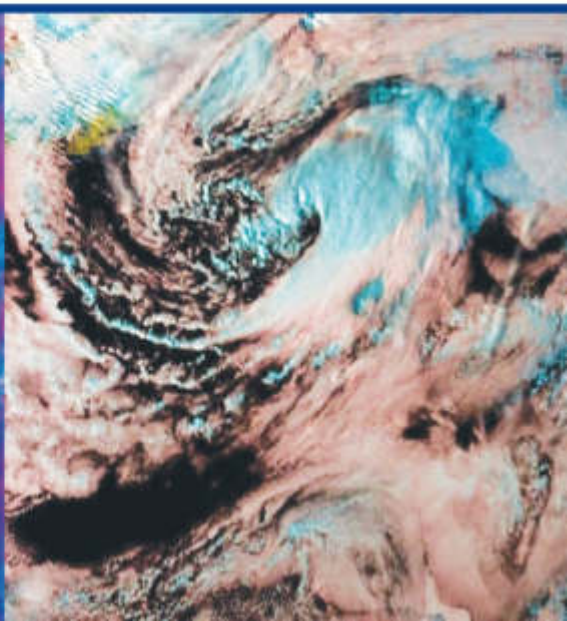

ISBN 978-5-9624-1595-6
СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ
И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ
В РОССИИ



ISBN 978-5-9624-1595-6

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ В РОССИИ





ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

Зимина Т. Ю.
К семидесятилетию географического факультета 10

Горбатенко В. П.
Актуальные проблемы диагноза и прогноза опасных конвективных явлений и пути их решения 13

Кононова Н. К.
Изменение характера циркуляции атмосферы и климата за период 1899–2016 гг. 21

Корольков В. А., Тихомиров А. А., Тельминов А. Е., Богушевич А. Я.
Измерительно-вычислительная система для метеорологического и экологического мониторинга атмосферного пограничного слоя 30

Переведенцев Ю. П., Шанталинский К. М., Гурьянов В. В.
Климатические изменения в тропо-стратосфере Северного полушария в современный период 38

Пищальникова Е. В., Калинин Н. А., Шихов А. Н., Быков А. В.
Сравнительная оценка краткосрочного прогноза осадков в холодный период года на Урале по модели WRF разных версий 46

Эдельштейн К. К., Даценко Ю. С., Гончаров А. В., Гречушникова М. Г., Пуклаков В. В.
Параметризация внутрисуточных, внутригодовых и межгодовых колебаний характеристик гидрологического и экологического режима долинного водохранилища .. 50

Секция

ПОГОДА И КЛИМАТ. МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ

Алёхин С. Г., Кулешов Ю. В., Туркин А. А., Шемелов В. А.
Сравнительный анализ методов прогнозирования обледенения в интересах метеорологического обеспечения беспилотных летательных аппаратов 60

Анискина О. Г., Моцаков М. А.
Гидродинамическое моделирование полярных циклонов 70

Ануфриенко Т. В., Кочугова Е. А.
Особенности изменения экстремальных температур в Иркутске 76

Ахтиманкина А. В.
Загрязнение атмосферного воздуха г. Ангарска с учётом неблагоприятных климатических условий 84

Богушевич А. Я.
Сверхкраткосрочные прогнозы в режиме online для метеорологических параметров в приземной атмосфере по текущим данным измерений ультразвуковой метеостанции АМК-03 90

Винокурова Е. В. , Лященко С. А.
Исследование региональных особенностей глобального потепления климата в Якутии ... 98

Воробьева О. В.
Статистическая обработка результатов моделирования для улучшения качества гидрометеорологического прогноза 104

Глушкова Е. А.
Режим увлажнения на территории юго-востока Западной Сибири 106

Горбатенко В. П.
Изменение климата Западной Сибири как фактор устойчивого развития региона 112

Горяшина Д. М.
Задачи и проблемы климатического обслуживания 121

Грицевич Ю. А. , Кижнер Л. И.
О существовании острова тепла в г. Томске 125

Васильев Р. В., Девятова Е. В., Мордвинов В. И., Антохина О. Ю.
Комплексный анализ динамики тропосферы-стратосферы-мезосферы в зимний период 2016/2017 по данным интерферометра Фабри – Перро (ИСЗФ СО РАН) и ECMWF ERA-Interim 130

Домбровская Н. С. , Лощенко К. А.
Оценка континентальности климата на территории Иркутской области 136

Жигачева Е. С. , Громов С. А.
Оценка поступления соединений серы и азота с осадками на территорию водосбора реки дождевого питания в Приморье по данным многолетнего мониторинга EANET 141

Завазиева Д.-С. М. , Воропай Н. Н.
Влияние природно-климатических факторов на изменение влажности почвы 145

Зоркальцева О. С., Мордвинов В. И. , Кандиева К. К., Погорельцев А. И.
Динамика возмущений в стратомезосфере при разных фазах квазидвухлетнего колебания 148

Крючков А. Д.
Динамика основных характеристик снежного покрова на территории Пермского края за период 1950–2017 гг. 157

Латышева И. В. , Будуева И. С. , Вушнаева А. С.
Климатические условия на территории Иркутской области 162

Лукин И. Л.
Особенности генерации доступной потенциальной энергии вследствие притоков коротковолновой радиации в атмосфере 168

Максютова Е. В.
Климат города Иркутска: современные колебания температурных характеристик последних десятилетий 169

Найденов П. А.
Исследование мезометеорологических процессов самоочищения воздушной среды Байкальской котловины 171

Обухова М. Н.
Методические работы, проведенные в Иркутском филиале ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета» по повышению качества прогнозирования в 2017 г. 176

Парежева Т. В., Воропай Н. Н.
Мониторинг составляющих радиационного баланса в коротковолновой части спектра на территории Тункинской котловины 183

Петровский А. Б.
Новые формы работы с потребителями авиационной метеорологической информации 187

Седых П. А. , Лобычева И. Ю.
Глобальная электрическая схема цепи магнитосферно-ионосферно-атмосферного взаимодействия 190

Седых П. А. , Лобычева И. Ю.
Методика исследования влияния магнитосферных возмущений на метеорологические процессы в нижней атмосфере 194

Симакин М. Д.
Формирование и динамика температурного режима приземного слоя атмосферы Ямало-Ненецкого автономного округа 200

Худякова Т. А., Мартынова Ю. В.
Вариация площади снежного покрова осенью и Арктическое колебание последующей зимой в Сибири 207

Царенкова Д. В.
Мезометеорологические особенности побережья оз. Байкал по данным прогностической модели GFS 213

Чупина О. С., Воропай Н. Н.
Тенденции изменения температуры воздуха на территории Сибири в XX–XXI вв. 217

МОНИТОРИНГ, МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ СУШИ

Амосова И. Ю., Е. А. Ильичева
Динамическая модель речных систем бассейна озера Байкал 223

Бархатова О. А., Журавлев П. А., Жданова Г. О., Вятчина О. Ф., Горбунова Ю. О., Плеханов С. Е.
Микробные топливные элементы как альтернативный способ очистки сточных вод 226

Бабарико А. А., Баженова О. П., Иванова Н. В.
Возможности программы Canoco для анализа и обработки гидрохимических и гидрологических данных на примере реки Иртыш (Омская область) 234

Гречушникова М. Г., Репина И. А., Степаненко В. М., Артамонов А. Ю., Казанцев В. С., Ломов В. А.
К вопросу о параметризации эмиссии метана с поверхности водохранилищ 239

Жоров В. А., Ловцкая О. В., Постнова И. С., Яковченко С. Г.
Оценка пойменного регулирования на участке Верхней Оби 247

Зуев В. В., Кураков С. А., Уйманова В. А.
Гидрометеорологические наблюдения на р. Майма (Горный Алтай) за 2016–2017 гг. с помощью автоматизированного комплекса ИМКЭС СО РАН 254

Ильичёва Е. А., Павлов М. В.
Морфологические типы устьевых систем оз. Байкал 259

Кичигина Н. В.
Некоторые ландшафтно-гидрологические свойства стока малых горных водотоков Байкальского региона 262

Кольцов И. В., Ямских Г. Ю.
Мониторинг состояния Богучанского водохранилища в 2012–2017 гг. 266

Котова В. Е., Андреев Ю. А., Черновьянц М. С.
Хроматографические методы определения содержания и установление источников поступления компонентов нефтепродуктов в донные отложения озера Байкал 272

Котова Н. А., Иванов Н. А.
Особенности формирования и прогнозирование характеристик весеннего половодья на реках Иркутской области 280

Магрицкий Д. В.
Климатические обусловленные и антропогенные изменения стока воды основных рек Российской Федерации в их низовьях и морских устьях 285

Матвеев М. О., Бархатова О. А.
Проблемы и перспективы развития службы гидрологических прогнозов на примере Иркутского УГМС 294

Потапова Е. В.
Проблемы содержания водоохранных зон рек 301

Резников С. А., Якунина О. В., Матвеев А. А., Аджиев Р. А.
Элементы биогеохимического мониторинга озера Байкал: накопление ПАУ в обрастаниях в мелководной части побережья, в районе бывшего БЦБК 306

Рогачёв А. П., Ильичёва Е. А.
Распределение стока взвешенных наносов в дельте реки Селенги 309

Ролдугин В. В., Кац В. Е., Кочеева Н. А., Больбух Т. В., Баташурова А. К.
Мониторинг состояния природных вод и водных объектов в Республике Алтай 316

Серова О. А., Тимофеева Л. А., Решин Н. А.
ГИС-анализ ландшафтно-гидрологического подобия речных бассейнов 321

Синюкович В. Н., Чернышов М. С.
Гидрометеорологический мониторинг и достоверность расчетов элементов водного баланса оз. Байкал 329

Сутырина Е. Н.
Изменчивость климатических факторов формирования стока рек водосборного бассейна оз. Байкал 334

Тамбиева Н. С., Михайленко О. А., Котова В. Е.
Фториды в природных, питьевых водах и атмосферных осадках г. Ростов-на-Дону и Ростовской области 340

Терехова Р. А.
Состояние гидрометеорологической сети в Арктической зоне Российской Федерации 346

Чулунов М. А., Параев М.
Изучение формирования стока малых рек Республики Алтай 353

Шишковский М. В., Казакова В. М., Бархатова О. А.
Гидрологическое обоснование мостового перехода через р. Витим 358

Щевьёв В. А.
Роль приливообразующих сил Луны и Солнца в образовании крупномасштабных циркуляций в океанах, морях и крупных озерах 363

ОПАСНЫЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ И ПРОЦЕССЫ

Антонова К. С.
Метеорологические и синоптические условия сильного ветра на АМСГ Братск 370

Волкова М. А., Чередько Н. Н.
Динамика и условия формирования опасных явлений на территории Томской области ... 376

Газимов Т. Ф., Волкова М. А.
Характеристика турбулентности на аэродроме Томск 384

Коробейникова Л. Г.
Погодные аномалии на территории Ханты-Мансийского автономного округа – Югры 387

Курдюков В. Н. , Латышева И. В.
Природные факторы возникновения лесных пожаров на территориях проживания коренных малочисленных народов в Иркутской области, Республике Бурятия и Забайкальском крае 398

Ощоров А. М.-Д., Лощенко К. А.
Анализ опасных явлений погоды в горных районах Восточных Саян по космическим снимкам облачности и синоптическим картам 405

Скидоненко С. Л., Точенова О. А.
Анализ и рекомендации к прогнозу грозовой деятельности в районе аэродрома Сургут .. 409

Сметанин Г. С.
Исследование опасных явлений погоды на восточной периферии антициклона в районе аэродрома Иркутск 415

Тарабукина Л. Д., Кононова Н. К., Козлов В. И.
Сопоставление грозовой активности в некоторых регионах Северной Азии со сменой атмосферной циркуляции в летние сезоны 2009–2016 гг. 420

Шанкибаева М. Х., Каранина С. Ю., Кочеева Н. А.
Изучение характера проявления гроз в горах Юга Западной Сибири 428

Шанкибаева М. Х., Кочеева Н. А.
К вопросу о регистрации неблагоприятных явлений погоды на АМСГ Горно-Алтайск 433

Шахаев И. В., Щеблыкин А. С.
Опасные явления погоды для авиации на территории Иркутской области 437

Секция

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ АТМОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ

Антохина О. Ю., Антохин П. Н.
Исследование долговременных изменений и особенностей выпадения атмосферных осадков в бассейне р. Селенги в середине летнего сезона (июль) 441

Антохина О. Ю., Антохин П. Н., Девятова Е. В., Мордвинов В. И.
Особенности атмосферной циркуляции над Сибирью и Дальним Востоком и режимы осадков в бассейне реки Селенги в летний период 450

Астафьева Н. В., Латышева И. В.
Южные циклоны и их влияние на погодные условия территории Иркутской области 458

Вологжина С. Ж., Макухин В. Л., Голубева Л. В.
Мезомасштабные факторы загрязнения атмосферного воздуха на территории Иркутской области и Забайкалья 465

Гаращук С. А.
Исследование ныряющих циклонов по данным Реанализа и глобальной прогностической модели GFS 477

Куприянович О. В., Лощенко К. А.
Динамика Азиатского антициклона 480

Максютова Е. В., Латышева И. В.
Циркуляционные факторы засушливости на территории Иркутской области 485

Холопцев А. В.
Изменения суммарной продолжительности существования летом антициклонов над южными регионами Сибири в период с 1948 по 2017 г. 493

Секция

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ

Белов С. Ю.
Дистанционная диагностика состояния объектов суши в коротковолновом диапазоне радиоволн с использованием аппаратуры когерентного приёма 500

Богушевич А. Я., Азбукин А. А., Гондаренко А. Е., Корольков В. А., Краснолобов И. М.
Аппаратно-программный комплекс для исследований пространственно-временной структуры турбулентных флуктуаций температуры и ветра 510

Варенцов М. В., Грищенко М. Ю.
Использование климатической модели и тепловых космических снимков для исследования острова тепла Москвы (лето 2015 г.) 519

Васильев М. С.
Результаты исследований атмосферных параметров в Якутии методами спектральной солнечной фотометрии 522

Дюкарев Е. А., Кураков С. А., Киселев М. В., Макеев Е. А.
Исследование температурного режима болот Западной Сибири с применением автоматических атмосферно-почвенных измерительных комплексов 529

Евстигнеев В. П., Мишин Д. В., Остроумова Л. П.
Особенности расчета величины слоя осадков над акваторией Азовского моря с использованием данных дистанционного зондирования 538

Жохова Д. А., Кужевская И. В., Пустовалов К. Н.
Характеристики мезомасштабных объектов на территории Западной Сибири, восстановленные инструментами ATOVS 543

Киселев М. В., Воропай Н. Н.
Сравнительный анализ результатов измерения температуры почвогрунтов с использованием атмосферно-почвенного измерительного комплекса и вытяжных термометров..... 551

Корольков В. А., Тихомиров А. А., Тельминов А. Е., Пустовалов К. П., Мордус Р. В., Азбукин А. А.
Комбинированный агрометеорологический комплекс КАМК 555

Корольков В. А., Кальчихин В. В., Кобзев А. А., Тихомиров А. А.
Оптический осадкомер для решения задачи автоматизации измерения характеристик атмосферных осадков 562

Куракова П. С., Воропай Н. Н.
Сравнительный анализ данных измерения температуры воздуха психрометрическим термометром и атмосферно-почвенным измерительным комплексом 570

Мальцева П. В., Переладова Л. В.
Верификация показаний автоматического метеорологического комплекса (АМК) и психрометрической пары по данным агрометеорологической станции города Тюмень 573

Машталер О. В., Волобуева О. В.
Выявление и исследование условий возникновения полярных циклонов в европейских морях Северного Ледовитого океана 581

Пустовалов К. Н., Кобзев А. А., Корольков В. А., Нагорский П. М., Тельминов А. Е.
Использование данных об электрическом состоянии приземного слоя для оценки метеорологических условий 586

Пустовалов К. Н., Корольков В. А., Тельминов А. Е., Загорулько В. А.
Использование летательных аппаратов для мониторинга пограничного слоя атмосферы . 592

Сутырина Е. Н.
Динамические явления синоптического масштаба в оз. Хубсугул по данным AVHRR 599

Сутырина Е. Н., Тимофеева С. С.
Изучение возможности восстановления распределения температуры поверхности воды оз. Байкал с применением интерполяции спутниковых снимков AVHRR 604

Сутырина Е. Н.
Оценка экологически значимых параметров водной среды оз. Байкал по данным AVHRR 609

Федосеева Н. В., Ефимова Ю. В., Лопуха В. О.
Использование данных спутниковой мультиспектральной съемки при анализе облачных систем полярных циклонов 615

Guotao Yang, Lifang Du, Xuewu Cheng, Yuan Xia, Faquan Li, Jihong Wang, Yong Yang
Developments of Doppler wind Lidar and all solid-state sodium temperature/wind lidar at YanQing Station 624

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

УДК 910

К семидесятилетию географического факультета

Т. Ю. Зимина

Иркутский государственный университет, Иркутск

Аннотация. Приводится исторический очерк, посвященный 70-летнему юбилею географического факультета Иркутского государственного университета.

Ключевые слова: географический факультет, юбилей

В 2018 году отмечается не только столетний юбилей Иркутского государственного университета, семьдесят лет назад Министерством высшего образования СССР было принято решение (22 декабря 1948 г.) о создании нового самостоятельного структурного подразделения университета – географического факультета.

Следует отметить, что географические знания всегда были неотъемлемой частью базового образования выпускника высшей школы, поэтому географические дисциплины преподавались как общенаучные (в рамках изучения естественно-географического цикла) студентам разных специальностей практически с момента основания ИГУ. Уже в 1920 г. была создана и первая в Сибири кафедра экономической географии и статистики, в архивах есть данные, подтверждающие, что в 1923 г. уже существовала кафедра землеведения. Когда в стране заметно возросла потребность в географах-преподавателях и исследователях, был проведен и первый набор на специальность « География» (1932 г.), в этом же году была основана кафедра геодезии и картографии. Становление факультета, как и всего университета в 20–30-е гг. шло трудным путем структурных преобразований и поиска оптимальных по тому времени форм. Несмотря на многие издержки и « болезни роста» именно в это время будущим географам преподавали замечательные учёные, многие из которых имели энциклопедические знания, европейское образование, а их исследования принесли им всероссийскую известность. Трудно даже представить, какую титаническую работу проводили тогда эти люди, участвовавшие в многочисленных экспедициях, ставшие первооткрывателями месторождений и даже географических объектов, создававшие первые детальные карты региона и, одновременно, проводившие не только педагогическую, но и огромную организационную работу. Вот только некоторые имена этих профессоров: К. Н. Миротворцев, М. К. Азадовский, В. Ч. Дорогостайский, В. К. Абольд, Б. Э. Петри, А. В. Львов, И. Ф. Молодых, Г. Цыбиков. Благодаря усилиям этих сотрудников в мае 1933 г. открывается геолого-почвенно-географический факультет университета. Первый выпуск специалистов географов состоялся весной 1936 г., в этом же году была создана кафедра физической географии, а по некоторым архивным данным уже работала и кафедра гидрологии, обучение географов стало вестись не только на дневном, но и на заочном отделении.

Несмотря на то что в довоенные годы основной задачей была подготовка учителей географии, преподаватели и студенты были активно заняты научно-исследовательской работой. Если в начале 20-х гг. основные исследования проводились в области краеведения, этнографии, археологии и статистики, то к началу 30-х – приоритетным стали комплексные географические, гидрографические, гидрологические изыскания. Трудно представить, но ведь на картах того времени в обширном и труднодоступном регионе Северо-Восточной Сибири

очертания рек, хребтов и равнин часто были схематичными и соседствовали с белыми пятнами неизведанных территорий. Преподаватели и студенты участвовали в топографической съёмке районов Прибайкалья, тесно сотрудничали с Географическим обществом СССР.

В годы Великой Отечественной войны были изменены не только структуры учебных планов и программы, но и целевое направление научных исследований – всё было направлено на нужды обороны. Именно в это время началось изучение энергетических ресурсов сибирских рек – Ангары, Ии, Селенги; был составлен проект организации службы времени и широт; заложены основы атласного картографирования. В ряды Советской Армии ушло 40 студентов-географов, многие из них погибли в боях за Родину.

Известно, что развитие комплекса наук о Земле всегда тесно связано с насущными потребностями промышленности, сельского хозяйства и науки, поэтому, в период интенсивного послевоенного восстановления народного хозяйства университет организовал свыше 100 геолого-географических, ботанических и зоологических экспедиций. Именно в это время, когда остро ощущалась потребность в специалистах с углублёнными знаниями, и было принято решение вместо единого геолого-почвенно-географического факультета создать три самостоятельных факультета. Первый набор на географический факультет был осуществлён 1 сентября 1949 г. В состав факультета входили три кафедры: физической географии, экономической географии, геодезии и картографии. Первым деканом факультета был избран проф. Б. В. Зонов, сыгравший выдающуюся роль в развитии географии в университете и участвовавший во многих гидрологических исследованиях на территории Сибири и Заполярья.

С 60-х гг. в Восточной Сибири шло активное освоение природных ресурсов региона, велось грандиозное строительство, увеличился объём воздушных и водных перевозок. В связи с этим, для работы в гидрометеорологической службе и проектно-изыскательских институтах необходимы были высококвалифицированные инженерные кадры. В 1961 г. был проведен первый набор на специальность « Метеорология», а в 1963 г. создана первая инженерная кафедра факультета – кафедра метеорологии. Годом позже (1964 г.) факультет стал готовить инженеров гидрологов, и была открыта кафедра гидрологии суши.

Три последующих десятилетия факультет рос и развивался; открывались новые кафедры (1972 г. – кафедра геоморфологии, 1989 г. – кафедра охраны природы), новые специализации (геоморфология, охрана природы). Много внимания уделялось материально-техническому обеспечению и совершенствованию работы учебных баз практик в посёлках Б. Коты и Аршан. Факультет располагал и своим учебно-научным стационаром в пос. Маритуй. В это время все кафедры факультета вели активную научную работу, выполнялся большой объём хоздоговорных и госбюджетных работ, что, несомненно, способствовало укреплению контактов с ведущими вузами и научными центрами страны. Прежде всего, факультет поддерживал тесную связь с научно-исследовательскими институтами Сибирского отделения РАН – Лимнологическим институтом, Институтом географии, Институтом земной коры, Институтом солнечной и земной физики и т. д. Студенты, аспиранты, преподаватели участвовали в экспедициях на БАМ, КАТЭК, проектируемый каскад Ангарских ГЭС. Спектр научных интересов сотрудников факультета был необычайно широк – от теоретических работ (по неотектонике и геоморфологии, вопросам атмосферного электричества, топонимике) до решения сугубо прикладных задач (оценке водного баланса оз. Байкал, оценке возможности добычи мелкого россыпного золота, расчётам по загрязнению атмосферы и водных объектов). Большой объём изысканий и научных обобщений был выполнен учёными факультета при разработках проектов по водоснабжению городов и посёлков, реконструкции систем водоотведения и водопотребления, мелиорации земель, экологической оценке воздействия на водные объекты при строительстве и эксплуатации промышленных объектов, экологические паспорта предприятий. Сотрудники факультета принимали участие в создании ряда тематических и специальных карт региона, атласов Иркутской области, созданная ими карта Новейшей тектоники Юга Восточной Сибири была отмечена как важное достижение отечественной и зарубежной геологии и авторский коллектив получил серебряную медаль ВДНХ. Необходимо отметить и научную работу, осуществляемую в рамках Советско-Монгольской

комплексной Хубсугульской экспедиции (организована в 1978 г.). Этот период истории факультета, когда государство имело возможности финансировать географические исследования и факультет располагал высококвалифицированными кадрами, способными проводить такую работу.

К сожалению, социально-экономические и политические преобразования в России в 90-х гг. привели к необходимости пересмотра учебных планов специальностей и специализаций, факультет был вынужден объединить ряд кафедр. Но в качестве позитивного момента следует отметить получение в 1995 г. лицензии на открытие новых специальностей « Природопользование» и « Геоэкологии». Первый выпуск экологов-природопользователей состоялся в 1999 г.

Новое тысячелетие, безусловно, продиктовало и новые требования к подготовке кадров географического профиля. Факультет – центр подготовки специалистов в области разработки комплексных исследований природных ресурсов, географических основ устойчивого развития природы и общества. Сейчас факультет перешёл на стандарты подготовки кадров нового поколения, разработаны концепции преподавания ряда новых дисциплин, активно внедряются инновационные методы обучения. Значительно изменилась техническая база факультета – непрерывно идёт переоснащение компьютерных классов и кафедр самой совершенной техникой.

Преподаватели трёх факультетских кафедр (Кафедра географии картографии и геосистемных технологий, Кафедра гидрологии и природопользования, Кафедра метеорологии и охраны атмосферы) ведут подготовку бакалавров, магистров по трём направлениям:

1) ГЕОГРАФИЯ (профиль « Общая география» и направленность « Географические основы территориального планирования»);

2) ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ (профили « Гидрология» , « Метеорология»);

3) ЭКОЛОГИЯ и ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ (профиль « Природопользование»).

В настоящее время на факультете работает 17 докторов и 22 кандидата наук. К процессу преподавания привлекаются ведущие специалисты научно исследовательских институтов СО РАН.

Весь 80-летний путь развития географического факультета основным направлением научной деятельности его сотрудников является изучение и оценка природных и социально-экономических ресурсов Восточной Сибири и прилегающих территорий. За время работы факультета менялись акценты и аспекты рассматриваемой проблематики, но общая направленность и преемственность научной деятельности остаётся неизменной. Кадры молодых преподавателей, защитивших свои диссертации в последнее десятилетие, к традиционным методам изучения подключают методы моделирование мезомасштабных процессов в атмосфере и гидросфере, методы дистанционного изучения Земли, ГИС-технологии.

Географический факультет по праву гордится своими выпускниками, среди которых больше сотни специалистов, защитивших кандидатские диссертации, больше двух десятков стали докторами географических наук, два академиками. Но главное наше достояние – рядовые учителя, преподающие даже в самых отдалённых сельских школах; синоптики, предсказывающие погоду в тяжелых климатических условиях Заполярья; инженеры-гидрологи, участвующие в подготовке проектов строительства мостовых переходов на сибирских реках и трасс нефте-газопроводов; экологи-природопользователи, которые занимаются природоохранной деятельностью на крупнейших нефтегазовых и золоторудных месторождениях региона, работают в отделах охраны природы на многих промышленных предприятиях Сибири, ставших флагманами в своих отраслях.

Мы надеемся, что в будущем стабилизация экономического положения страны позволит руководству Министерства образования РФ уделить должное внимание решению проблем высшей школы в регионах и вспомнить, что география наравне с историей и литературой формирует мировоззрение гражданина страны.

УДК 551.501.8+551.509.326

Актуальные проблемы диагноза и прогноза опасных конвективных явлений и пути их решения

В. П. Горбатенко (vpgor@tpu.ru)

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск

Аннотация. Представлены основные результаты прогноза развития опасных конвективных явлений с использование индексов неустойчивости атмосферы и идентификации пространственного положения конвективных кластеров по данным спутникового мониторинга и численного моделирования.

Ключевые слова: опасные конвективные явления, прогноз, индексы неустойчивости, MODIS, ПЛАВ

Опасные явления погоды, к числу которых относят ливни, грозы, град, шквалы, наносят ощутимый ущерб экономике, поэтому изучение условий их образования и возможность улучшения качества их прогноза являются актуальными задачами метеорологии. Эти явления погоды связаны с зонами активной конвекции и относятся к мезомасштабным метеорологическим явлениям. Они образуются в результате сложного взаимодействия атмосферных процессов синоптического масштаба и подстилающей поверхности. Известно, что горизонтальные размеры конвективных зон во много раз меньше расстояния между метеорологическими станциями, на которых производят их наблюдения. Сравнительно невелика и продолжительность гроз и ливней. Все это и определяет трудности в регистрации, изучении и в прогнозировании опасных явлений погоды, связанных с зонами активной конвекции. На основе существующих методов прогноза гроз, града, шквалов невозможно с высокой вероятностью предсказать их пространственную локализацию. Практикуемые в России методы разработаны и внедрены в практику, как правило, более 40 лет назад и основаны на информации о структуре атмосферы в дни с опасными конвективными явлениями и без них. Для анализа конвективного потенциала атмосферы активно используется аэрологическая диаграмма, построенная по результатам аэрологического зондирования атмосферы.

Нельзя не упомянуть, что для уточнения прогноза давно и активно используются данные метеорологических радиолокаторов и снимки спутников. Однако объединенная сеть радиолокационных исследований атмосферы в Сибири пока не сформирована, а методы спутниковой идентификации грозовой облачности находятся на стадии разработки [1–3].

Активно разрабатываемым сегодня [12; 14] численным методам прогноза грозы и града до внедрения в оперативную практику необходимо уточнить параметризации основных характеристик, используемых в прогнозах, что само по себе является труднейшей задачей.

Целью настоящей работы является обзор дополнительных возможностей уточнения прогноза опасных конвективных явлений, активно развиваемых сегодня, с акцентом на использование возможностей зондирования атмосферы с помощью ИСЗ.

В 1940–50-е гг. для оценки вероятности грозы по характеристикам профиля атмосферы, получаемого в результате аэрологического зондирования, были разработаны индексы неустойчивости атмосферы, характеризующие ее термодинамические параметры [16]. Сегодня для построения численных моделей и составления прогнозов ряда метеорологических характеристик и явлений используется более 20 параметров состояния атмосферы, рассчитанных на основе аэрологического зондирования [6; 7; 13] атмосферы. Рассмотрим индексы, наиболее часто используемые в прогнозе опасных конвективных явлений. Первую группу составляют индексы, которые описывают латентную нестабильность атмосферы, определяемую стратификацией температуры воздуха: Lifted index (LIFT) и Showalter index (SHOW).

$$LIFT = T_{500} - T_{parcel}, \quad (1)$$

$$SHOW = T_{500} - T_{parcel2}, \quad (2)$$

где T_{500} – температура окружающей среды на уровне 500 гПа (ºС); T_{parcel} – температура частицы на уровне 500 гПа, поднявшейся с уровня 500 м над земной поверхностью при сред-

нем давлении, температуре и точке росы (ºС); $T_{parcel2}$ – температура частицы на уровне 500 гПа, поднявшейся с уровня 850 гПа (ºС).

Поскольку степень развития вынужденной конвекции и вероятность развития опасных конвективных явлений зависит от толщины влажнонеустойчиво стратифицированных слоев, важно учитывать и характеристики влажности. Поэтому вторую группу индексов представляют индексы, в которых, кроме стратификации температуры, присутствуют значения температуры точки росы: Total Totals index (TOTL) и K-index (KIND):

$$TOTL = (T_{850} - T_{500}) + (TD_{850} - T_{500}), \quad (3)$$

$$KIND = (T_{850} - T_{500}) + TD_{850} - (T_{700} - TD_{700}), \quad (4)$$

где T_{500} – температура окружающей среды на уровне 500 гПа (ºС); T_{850} – температура на уровне 850 гПа (ºС); TD_{850} – температура точки росы на уровне 850 гПа (ºС); T_{700} – температура на уровне 700 гПа (ºС); TD_{700} – температура точки росы на уровне 700 гПа (ºС).

Существует и третья группа индексов, которая оценивает энергию конвективного потенциала атмосферы. Величина энергии неустойчивости является неизменным предиктором в прогнозе опасных явлений, связанных с конвекцией. Высокий уровень потенциальной энергии атмосферы является непременным условием того, что поднимающаяся частица достигнет значительно больших высот, чем уровень свободной конвекции. Эту характеристику состояния атмосферы достаточно эффективно отражает индекс CAPE (Convective available potential energy – потенциальная конвективная энергия атмосферы). Значения индекса CAPE (Дж/кг) определяются по следующему уравнению:

$$CAPE = g \int_{LFCT}^{EQLV} dz * (Tp - Te) / Te, \quad (5)$$

где Tp – температура частицы, поднимающейся с уровня 500 метров над земной поверхностью до уровня конденсации сухоадиабатически, выше уровня конденсации влажноадиабатически (ºС); Te – температура окружающей среды, (ºС); LFCT – уровень с которого начинается конвекция (гПа); EQLV – уровень равновесия, на котором конвекция прекращается (гПа); g – ускорение свободного падения (м/с$^{2)}$; dz – толщина слоя между уровнями LFCT и EQLV (гПа).

Постоянно дополняется и активно используется четвертая группа индексов, которая оценивает совокупность температурно-влажностных и динамических характеристик. Наиболее популярным из них является индекс « суровости погоды» SWEAT. Индекс SWEAT оценивает вероятность развития опасных конвективных явлений, объединяя несколько параметров в одном индексе: и толщину влажно-неустойчивого слоя, и неустойчивость как следствие стратификации температуры, и скорости ветра на уровнях 850 и 500 гПа. Таким образом, это попытка объединить кинематическую и термодинамическую информацию в одном индексе:

$$SWEAT = 12TD_{850} + 20(TOTL - 49) + 2SKT_{850} + SKT_{500} + SHEAR, \quad (6)$$

где TD_{850} – температура точки росы на уровне 850 гПа (ºС); SKT_{850} – скорость ветра в узлах на уровне 850 гПа; SKT_{500} – скорость ветра в узлах на уровне 500 гПа; SHEAR – сдвиг ветра между уровнями 500 и 850 гПа.

По значениям индексов определяют степень неустойчивости атмосферы и вероятность развития опасных конвективных явлений над территорией обслуживаемой аэрологической станцией (табл. 1). Значения индексов перспективны в составлении альтернативных прогнозов грозы или града в заданном пункте. Например, в рамках настоящих исследований анализировались значения индексов в дни с грозой по результатам аэрологического зондирования в ряде пунктов Западной и Восточной Сибири, Дальнего Востока, Алтая, Хакасии. Получено [5; 6; 13], что индексы SHOW, LIFT, KIND, TOTL и SWEAT, с учетом выделенных пределов для каждого из явлений, перспективны для использования при составлении прогноза альтернативного прогноза грозы и града над юго-восточной территорией Западной Сибири [4; 15].

В тоже время замечено, что пороговые значения индексов, при достижении которых прогнозируют развитие того или иного конвективного явления над территорией Западной Сибири существенно ниже, чем те, что приводятся в зарубежной научной литературе [3]. Полученный результат объясним: наша территория расположена в более высоких широтах с другим конвективным потенциалом атмосферы.

В рамках представляемых исследований были рассчитаны пороговые значения индексов, при достижении которых в районах, обслуживаемых аэрологическими станциями, регистрировались грозы (табл. 1). Приведенные в таблице пороговые значения индексов достаточно хорошо описывают степень неустойчивости атмосферы и позволяют определить вероятность развития грозы с разной вероятностью.

Таблица 1

Значения индексов неустойчивости атмосферы, при достижении которых с различной степенью вероятности развиваются грозы в районе указанных аэрологических станций

Индекс	50 %	70 %	90 %	50 %	70 %	90 %
	Омск			Александровское (Томская обл.)		
SHOW	< 2,5	< 1	< -1	< 2	< 1	< -0,5
LIFT	< 1	< -0,5	< -2,5	< 0,5	< -1	< -3
SWEAT	> 150	> 180	> 240	> 170	> 200	> 270
KIND	> 30	> 33	> 35	> 30,5	> 32,5	> 34,5
TOTL	> 49	> 50	> 53	> 50	> 51,5	> 54
CAPE	> 200	> 400	> 900	> 300	> 550	> 1100
Индекс	50 %	70 %	90 %	50 %	70 %	90 %
	Барнаул			Абакан (Хакассия)		
SHOW	< 3	< 1,5	< 0,5	< 2,5	< 0,5	< -0,5
LIFT	< 2,5	< 1	< -2,5	< 0	< -1	< -2,5
SWEAT	> 140	> 170	> 220	> 165	> 175	> 260
KIND	> 28	> 30,5	> 34	> 32	> 34,5	> 37
TOTL	> 47,5	> 49,5	> 52	> 49	> 51,5	> 54
CAPE	–	> 400	> 900	> 400	> 600	> 1000
Индекс	50 %	70 %	90 %	50 %	70 %	90 %
	Емельяново (Красноярский край)			Братск		
SHOW	< 2	< 1	< -1	< 1,5	< 0,5	< -2
LIFT	< 0,5	< -1	< -3	< 0	< -1,5	< -3,5
SWEAT	> 160	> 190	> 250	> 170	> 200	> 270
KIND	> 31	> 33	> 36	> 32	> 33,5	> 35
TOTL	> 49	> 51	> 53	> 49	> 50,5	> 53,5
CAPE	> 200	> 500	> 1300	> 250	> 350	> 1000

Однако для прогноза пространственной локализации грозовых кластеров с помощью аэрологической сети есть ограничения. В том числе существуют и региональные проблемы: редкая сеть аэрологических станций не позволяет судить о пространственном масштабе зоны глубокой конвекции. А время проведения стандартных аэрологических наблюдений над Западной Сибирью не захватывает пик максимального развития конвекции в атмосфере. Конвективным ячейкам, образующим конвективный кластер, присущи небольшие размеры. Пространственные размеры конвективных кластеров, содержащих ячейки очень глубокой конвекции, трудно оценить по данным аэрологического зондирования. Например, развитие конвекции над Томской областью можно прогнозировать только по результатам температурно-ветрового зондирования двух станций – Новосибирск и Колпашево, расстояние между которыми более 360 км по прямой. Далеко не каждая линия шквала, не говоря о мезомасштабных конвективных кластерах, способных продуцировать град или грозу, образовавшихся на этой дистанции могут быть зарегистрированы имеющимся арсеналом технических средств. Более того, термодинамические параметры атмосферы в районе аэрологического зондирования могут существенно отличаться от тех, что характерны для атмосферы в районе метеорологического наблюдения опасного конвективного явления.

Только по этой причине было невозможно предсказать небывало крупный град, выпавший 14 августа 2012 г. в г. Междуреченске Кемеровской области и другие непредвиденные опасные конвективные явления. Анализ результатов аэрологического зондирования ближайших станций (Абакан, Новосибирск и Барнаул) не позволял выявить столь мощное развитие конвекции в Кемеровской области. Например, самая неустойчивая атмосфера, судя по данным аэрологического зондирования, была в районе станции Барнаул (табл. 2). Неустойчивость атмосферы разной степени в этот день в анализируемом районе потенциально могли идентифицировать результаты аэрологического зондирования атмосферы станциям Барнаул и Абакан, Новосибирск. Город Междуреченск, наиболее пострадавший от градобития, расположен между этими пунктами на большом удалении. По меньшей мере, значения четырех индексов, а именно: LIFT, SWEAT, KIND и TOTL (табл. 2) указывали высокую вероятность развития опасных конвективных явлений на линии Барнаул-Абакан, но пространственную локализацию зоны наиболее глубокой конвекции без дополнительных источников информации обнаружить и предсказать было невозможно (рис. 1). На Алтае в этот день тоже выпал достаточно крупный град до 5 мм в диаметре. Но по значениям индексов в районе станций Барнаул и Абакан невозможно было судить о том, что в Кемеровской области град будет еще бóльшей величины, поскольку основной очаг неустойчивости был достаточно далеко и методами аэрологического зондирования охвачен не был. Следовательно, одна из проблем прогноза – редкая сеть зондирования и недостаточно хорошая привязка результатов аэрологического зондирования к данным спутникового.

Таблица 2

Значения индексов неустойчивости атмосферы за 14 августа 2012 г.

Станция	Значение индекса					
	LIFT	SWEAT	KIND	TOTL	SHOW	CAPE
Барнаул	-3,4	203	34	50	-0,8	750
Абакан	-1,2	241	36	52	-1,7	130
Новосибирск	5,0	103	13	42	5,8	0

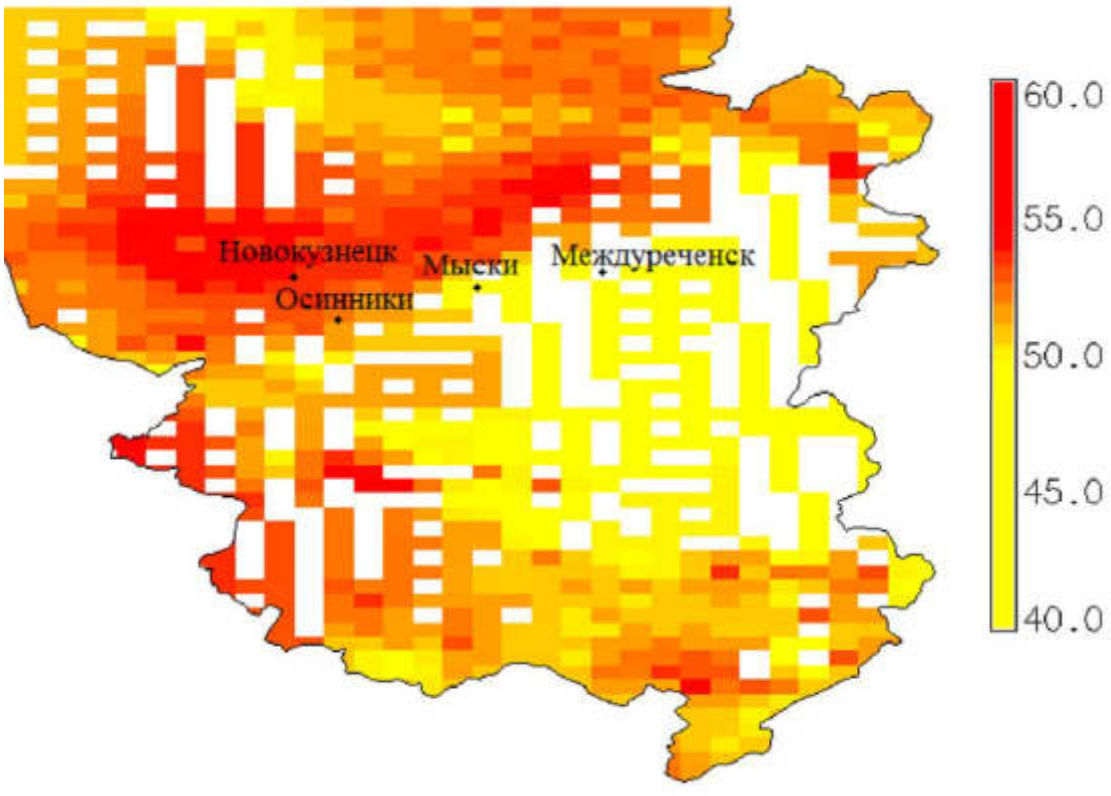


Рис. 1. Значения индекса TOTL в атмосфере над Кемеровской областью за 14 августа 2012 г. по данным измерений спектрорадиометра MODIS (Terra)

Чтобы улучшить прогноз гроз и града, необходимо изучать региональные особенности формирования конвективных облаков и их динамику, и в том числе понимать, при каких фоновых значениях параметров конвекции над территориями с разной орографией можно ожидать ее усиления.

Заметим, что упомянутые выше индексы неустойчивости атмосферы являются универсальным инструментом, позволяющим сравнить параметры конвекции над разными регионами Земного шара и изучить их динамику в процессах образования и развития опасных конвективных явлений (грозы, града, ливня, шквала). Решение этой фундаментальной задачи позволит найти общие (универсальные) подходы к решению актуальнейшей проблемы – успешному прогнозированию времени и места развития опасных конвективных явлений погоды.

Использование вышеперечисленных индексов для прогноза опасных конвективных явлений возможно и актуально в двух аспектах: диагностирование динамики мезомасштабных кластеров с использованием данных ИСЗ и для численного моделирования. Остановимся подробнее на этих направлениях.

Диагностирование динамики мезомасштабных кластеров с помощью ИСЗ

На слабо освещенных наблюдениями территориях Западной Сибири и Дальнего Востока использование данных дистанционного зондирования позволяют уточнять как временную, так и пространственную локализацию конвективных ячеек и оценить вероятность развития опасных конвективных явлений. Предыдущие исследования позволяют утверждать, что тепмературно-влажностный профиль атмосферы, восстанавливаемый по данным спутникового зондирования, достаточно хорошо совпадает с результатами аэрологического зондирования в нужном для прогноза слое атмосферы [9, 11]. Например, положение очагов высокой степени неустойчивости атмосферы и их динамику можно отслеживать с помощью спектрорадиометра MODIS (MODerate resolution Imaging Spectroradiometer), установленного на космических платформах EOS AM-1 (Terra) и EOS PM-1 (Aqua).

Для этого необходимо сделать ряд предварительных исследований:

1. Рассчитать значения индексов неустойчивости атмосферы, описывающих латентную нестабильность атмосферы, конвективный потенциал, наличие сдвигов ветра в средней тропосфере, комплексные характеристики, содержащие одновременно информацию о стабильности и влагосодержании атмосферы над обслуживаемой территорией при наличии в атмосфере опасных конвективных явлений разной степени развития: ливня, грозы, града, шквала.

2. По интервалам значений индексов, зарегистрированных при наличии тех или иных явлений, классифицировать состояние атмосферной неустойчивости. Например, степень развития неустойчивости следует качественно поделить на ряд этапов: слабо неустойчивая (наличие ливней), неустойчивая (наличие ливней и отдельных гроз), сильно неустойчива (на всей территории регистрируются грозы), крайне неустойчивая (гроза, град) и экстремально неустойчивая (гроза, град, шквал).

3. Уточнить пороговые значения индексов, при достижении которых с разной вероятностью формируются грозы, град, смерч.

4. Картированные значения индексов позволяют оценить вероятность грозы и града и отследить пространственное расположение и динамику развития конвективных кластеров. На рис. 2 приведено расположение очагов крайней неустойчивости атмосферы, определенных по значениям индекса TOTL (°C), которые были восстановлены по данным продукта MOD07_L2 за 13 июля 2014 года (06:00 UTC) для юго-востока Западной Сибири. В этот день наблюдали неспрогнозированные синоптиками опасные явления погоды, повлекшие человеческие жертвы: гроза, шквалистый ветер и град размером с перепелиное, а иногда и с голубиное яйцо. Линия шквала на рис. 2 обозначена положением конвективных ячеек, со значениями индекса TOTL в интервале 50–60 °C. Заметим, что над исследуемой территорией значения индекса TOTL, превышающие порог в 54 °C, свидетельствуют о вероятности грозы с градом не менее 90 %.

Характеристики состояния атмосферы, получаемые с помощью спектрорадиометра MODIS позволяют оценивать значения ряда индексов неустойчивости атмосферы. В перечень продуктов, создаваемых по данным MODIS, входит продукт MOD07_L2 (Atmosphere Profile Product), в котором содержится информация о значениях трех индексов неустойчивости атмосферы: TOTL, LIFT и KIND. Данные имеют высокое пространственное разрешение 5 × 5 км (в надире). Аналогичные исследования широко распространены за рубежом, но развиваются и в России, особенно активно в последние годы [8, 11, 13]. Тем более что спутники нового поколения способны предоставлять более подробную информацию о стратификации температуры и параметрах влажности в разных слоях атмосферы.

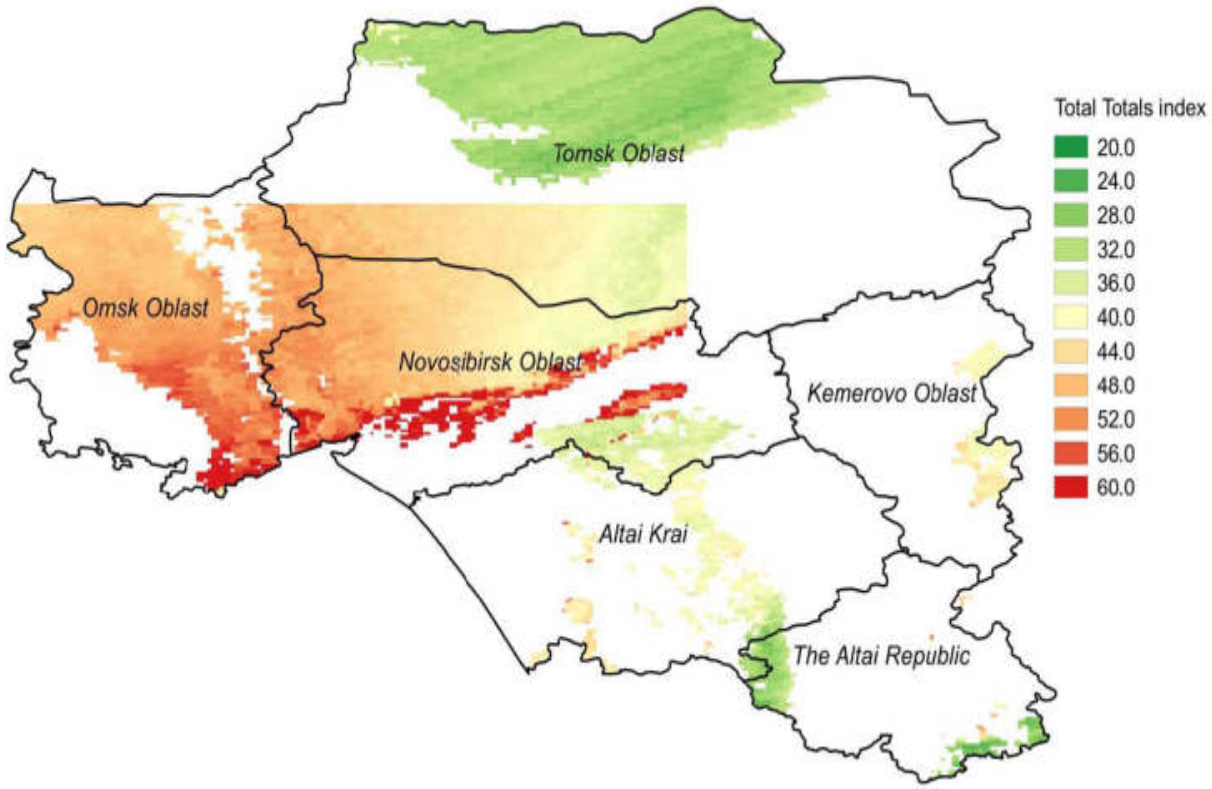


Рис. 2. Значения индекса TOTL в атмосфере юго-востока Западной Сибири 13 июля 2014 г. (06:00 UTC)

Второй способ использования индексов связан с использованием термодинамических параметров атмосферы в численном моделировании конвективных процессов, являющихся необходимым условием возникновения гроз. Разработка метода прогноза развития конвекции осуществляется с применением средств статистической интерпретации численных характеристик прогностических полей по мезомасштабным моделям (например, модели MM5 V2 (PUS/NCAR) или WRF).

Прогноз пространственной локализации конвективных кластеров по данным глобальной модели прогноза ПЛАВ

Прогноз динамики и пространственной локализации развитых конвективных кластеров имеет важнейшее значение для территорий, слабо освещенных данными наземных наблюдений.

В рамках представляемых исследований сделана попытка построения WRF модели пространственного положения одного их конвективных кластеров, продуцировавшего грозу и град. Модель основана на численном решении системы уравнений гидротермодинамики атмосферы. Положение кластера оценивалось по индексу неустойчивости TOTL, верифицирование границ конвекции произведено с использованием данных спектрорадиометра MODIS, установленного на спутнике Terra. Было показано, что модель дает удовлетворительные результаты при прогнозе ряда метеорологических параметров. Материалом для моделирования послужили расчетные прогностические данные поля распределения значений

индекса TOTL за 14 августа 2012 г. Результаты сравнивались с результатами восстановления данных продукта MOD07_L2.

В качестве начальных и граничных условий в модели WRF использовались результаты численного прогноза по глобальной модели ПЛАВ ГУ Гидрометцентра России. Выходной продукцией модели WRF являются ежечасные прогностические поля метеовеличин.

Данные оперативного прогноза ПЛАВ представляются в виде файлов в формате grib на географической сетке: от 49,68 ° до 63,36 ° северной широты с шагом 0,72 ° и от 80,1 ° до 97,2 ° восточной долготы с шагом 0,9 °. Вертикальная сетка неравномерная, сгущается к поверхности и соответствует следующим уровням давления: 1000, 925, 850, 700, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 20 и 10 гПа. В файлах содержится информация о следующих метеорологических характеристиках: температура воздуха, относительная влажность, северная и восточная компоненты вектора ветра, давление на поверхности, аккумулированные за 6 часов осадки, давление на уровне моря, влажность и температура почвы, высота геопотенциала [15]. Модель включает в себя параметризацию процессов подсеточного масштаба (коротко- и длинноволновая радиация, глубокая и мелкая конвекция, планетарный пограничный слой, тепло- и влагообмен с подстилающей поверхностью), разработанную в Метео-Франс для модели оперативного прогноза ARPEGE/IFS [17].

Для моделирования был выбран описанный выше случай образования крупного града, выпавшего 14 августа 2012 г. и определено поле распределения индекса неустойчивости TOTL (рис. 1). Значения TOTL соответствует наличию мощной конвекции в районах обозначенных населенных пунктов. При этом для Междуреченска значения индекса неустойчивости спектрорадиометром MODIS не были восстановлены. Однако в окрестностях имеются пиксели с высокими показателями неустойчивости атмосферы, что позволяет [8] при интерполяции значений индексов в окрестностях Междуреченска и наличии пороговых значений индекса TOTL прогнозировать развитие грозы и града.

Результаты расчета глобальной модели ПЛАВ (рис. 3) также выделяют зону со значениями индекса TOTL>50 °C, указывающими на развитие сильных гроз и града, однако зона конвективной активности по площади больше, по сравнению с данными MOD07_L2 [10]. Тем не менее, в заключении можно отметить, что приведенный пример иллюстрирует перспективу метода комплексного использования космических снимков и численных моделей прогноза погоды, который позволит успешнее прогнозировать динамику и пространственную локализацию развитых конвективных кластеров для территории Западной Сибири.

Несмотря на то, что применение моделей типа WRF для прогноза погоды в России находятся на стадии адаптации к региональным особенностям, определение пороговых значений индексов, характеризующих степень развития конвекции над регионами России, может способствовать созданию новых методик распознавания гроз и града.

Подводя итог, можно сказать, что внедрение современных прогностических систем и комплексное использование данных искусственных спутников Земли позволит успешнее прогнозировать динамику и пространственную локализацию развитых конвективных кластеров для территории России и позволит повысить качество прогноза ОКЯ.

Таким образом, уже сегодня есть платформа для создания новых методов прогноза ливней, гроз, града, смерча. Перспективными для реализации в ближайшей будущем видятся следующие направления:

1. Использование космических снимков спектрорадиометра MODIS, позволяющие определять пространственное положение конвективных кластеров, способных с высокой вероятностью продуцировать опасные конвективные явления.

2. Оптимизация мезомасштабных моделей (например, модели ММ5) для прогноза пространственной локализации конвективных ячеек.

3. Корректировка альтернативных прогнозов опасных конвективных явлений над обслуживаемым районом, с учетом результатов последнего аэрологического зондирования и пороговых значений индексов неустойчивости.

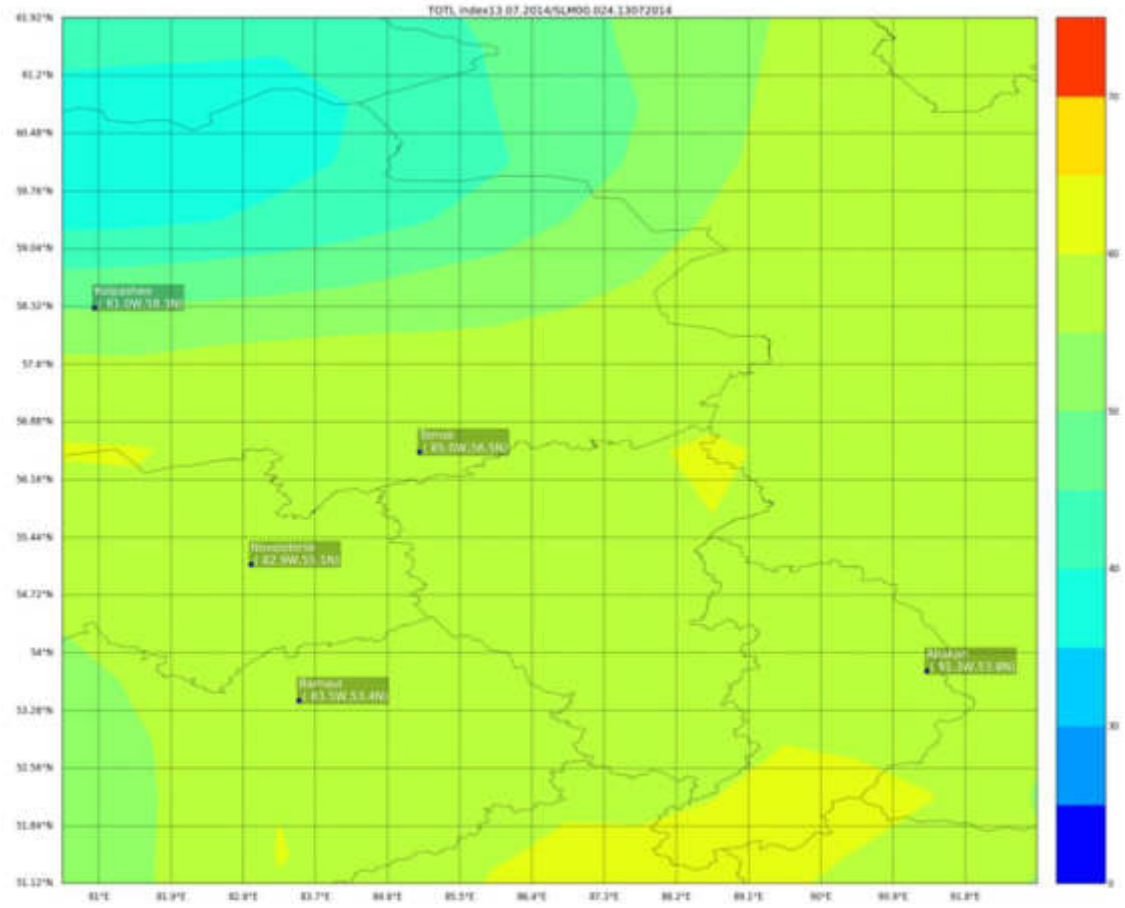


Рис. 3. Поле значений индекса TOTL по данным модели ПЛАВ 14 августа 2012 г.

Список литературы

1. Алексеева А. А. Распознавание конвективных стихийных явлений погоды на основе цифровой информации с ИСЗ с целью их сверхкраткосрочного прогноза // Тр. Гидрометцентра России. 2000. Вып. 335. С. 59–73.
2. Бухаров М. В. Диагноз вероятности гроз по спутниковой информации // Метеорология и гидрология. 2013. № 8. С. 5–16.
3. Волкова Е. В., Успенский А. Б. Детектирование облачности и выделение зон осадков регионального масштаба по данным полярно-орбитальных метеорологических ИСЗ // Метеорология и гидрология. 2002. № 4. С. 28–38.
4. Горбатенко В. П., Нечепуренко О. Е. Идентификация пространственной локализации грозы и града по данным метеорологических спутников // Глобальная электрическая цепь : материалы Третьей всерос. конф. Ярославль : Филигрань, 2017. С. 82–83.
5. Горбатенко В. П., Громницкая А. А., Золотухина О. И. Термодинамические условия образования опасных конвективных явлений в районе космодрома « Восточный» // Вестн. Том. гос. ун-та. 2015. № 400. С. 330–336.
6. Горбатенко В. П., Константинова Д. А. Конвекция в атмосфере над юго-востоком Западной Сибири // Оптика атмосферы и океана. 2009. Т. 22, № 12. С. 17–21.
7. Термодинамические условия формирования мезомасштабной конвекции в атмосфере западной Сибири / В. П. Горбатенко, Д. А. Константинова, О. И. Золотухина, Е. Л. Тунаев // Изв. вузов. Физика. 2011. Т. 54, № 11/3. С. 148–155.
8. Сравнение индексов неустойчивости атмосферы, восстанавливаемых по данным радиозондирования и спектрорадиометра MODIS в дни с грозами, над территорией Западной Сибири / В. П. Горбатенко, С. Ю. Кречетова, М. Ю. Беликова, О. Е. Нечепуренко // Метеорология и гидрология. 2015. № 5. С. 10–19.
9. Идентификация мезомасштабной конвекции и гроз по данным MODIS и аэрологического зондирования / В. П. Горбатенко, С. Ю. Кречетова, М. Ю. Беликова, О. В. Разумова // Вестн. Том. гос. ун-та. 2012. № 365. С. 169–174.
10. Прогноз пространственной локализации конвективных кластеров по данным глобальной модели прогноза ПЛАВ [Электронный ресурс] / В. П. Горбатенко, О. Е. Нечепуренко, А. А. Барт, М. Ю. Беликова //

Материалы XXII Междунар. симп. « Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» . Томск : Изд-во ИОА СО РАН, 2016. С. D11–D14.

11. Верификация параметров неустойчивости атмосферы, восстановленных по данным спектрорадиометра MODIS/Terra данными аэрологического зондирования / В. П. Горбатенко, О. Е. Нечепуренко, С. Ю. Кречетова, М. Ю. Беликова // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29, № 7. С. 603–607.

12. Губенко И. М., Рубинштейн К. Г., Анализ результатов расчета грозовой активности с помощью индексов неустойчивости атмосферы по данным численной модели WRF – ARW // Метеорология и гидрология. 2015. № 1. С. 27–37.

13. Ершова Т. В., Горбатенко В. П., Клипова О. А. Термодинамические параметры атмосферы при грозах и ливнях // Вестн. Том. гос. пед. ун-та. 2012. № 122, вып. 7. С. 9–13.

14. Калинин Н. А., Шихов А. Н., Быков А. В. Прогноз мезомасштабных конвективных систем на Урале с помощью модели WRF и данных дистанционного зондирования // Метеорология и гидрология. 2017. № 1. С. 16–28.

15. Пороговые значения индексов неустойчивости атмосферы при грозах над Сибирью / О. Е. Нечепуренко, В. П. Горбатенко, Д. А. Константинова, Т. В. Ершова // Глобальная электрическая цепь : материалы Третьей всерос. конф. Ярославль : Филигрань, 2017. С. 89–90.

16. Andersson T. A. M. J. C. N. S. Thermodynamic indices for forecasting thunderstorms in southern Sweden // Meteorololgy Magazine. 1989. Vol. 116. P. 141–146.

17. Déqué M., Dreveton C., Braun A., Cariolle D. The ARPEGE/IFS atmosphere model: a contribution to the French community climate modelling // Climate Dynamics. 1994. Vol. 10, Issue 4–5. P. 249–266.

УДК 551.583

Изменение характера циркуляции атмосферы и климата за период 1899–2016 гг.

Н. К. Кононова (NinaKononova@yandex.ru)

Институт географии РАН, Москва

Аннотация. Проведен анализ глобальной циркуляции атмосферы в типизации Б. Л. Дзердзеевского, В. М. Курганской и З. М. Витвицкой. Выявлены многолетние колебания циркуляции атмосферы и климата Северного полушария, а также системы океан – атмосфера, получены количественные характеристики отклика циркуляции атмосферы на геомагнитную возмущенность. Приведены даты смены циркуляционных эпох. Показана связь с ними глобальной температуры воздуха и температуры воздуха Северного полушария, а также дат смены и продолжительности циркуляционных сезонов. Особое внимание уделено колебаниям циркуляции атмосферы и климата Восточной Сибири.

Ключевые слова: колебания, глобальная циркуляция атмосферы, температура воздуха, океан – атмосфера, геомагнитная возмущённость, циркуляционные эпохи, циркуляционные сезоны, Северное полушарие, Восточная Сибирь.

Введение

Задача работы – дать оценку современному состоянию циркуляции атмосферы и климата на фоне их многолетних колебаний.

Материалы и методы

Для анализа использована типизация циркуляции атмосферы Северного полушария, разработанная под руководством Б. Л. Дзердзеевского [6]. В ней всё многообразие процессов разделено на 4 группы циркуляции, 13 типов и 41 элементарный циркуляционный механизм, сокращённо ЭЦМ. ЭЦМ различаются циркуляцией в районе полюса (циклонической или антициклонической). В случае наличия на полюсе циклона, пополняемого выходами южных циклонов в трёх (зимой) – четырёх (летом) секторах полушария, формируется меридиональная южная группа циркуляции. Эту группу открыл Борис Львович, когда обслуживал прогнозами папаннпскую экспедицию [24]. При антициклоне в районе полюса и отсутствии арктических вторжений, соединяющих арктический антициклон с субтропическим (блокирующих процессов), формируется зональная группа циркуляции. При наличии одного блокиру-

ющего процесса формируется группа нарушения зональности, при наличии двух – четырёх блокирующих процессов – меридиональная северная группа циркуляции [6; 18].

На каждый ЭЦМ по ежедневным сборно-кинематическим картам была разработана динамическая схема, показывающая пути перемещения циклонов и места стационирования антициклонов [5; 6]. Позднее [35] аналогичные схемы были построены по осреднённым за период 1970–1978 гг. данным давления на метеорологических станциях для каждого ЭЦМ. Благодаря наличию динамических схем, для каждой точки Северного полушария можно определить характер циркуляции атмосферы при любом ЭЦМ.

Каждый ЭЦМ длится несколько дней. Даты смены ЭЦМ отмечены в Календаре последовательной смены ЭЦМ, который ведётся с 1899 г. По Календарю рассчитана ежемесячная и ежегодная продолжительность каждого ЭЦМ [7].

Выявлены циркуляционные эпохи – периоды смены преобладания ежегодной продолжительности одной группы циркуляции над другими и дана их климатическая характеристика для Северного полушария в целом [1; 21; 22; 33; 34; 43; 44; 47; 48], по секторам [4; 40; 41] и внутри секторов, в частности, для Восточной Сибири [11; 12; 15].

Были выделены 6 циркуляционных сезонов года: предвесенье, весна, лето, осень, предзимье, зима, определён набор ЭЦМ, характерный для каждого сезона, и построены схемы циркуляционных сезонов года [2]. В соответствии с ними, определены даты смены циркуляционных сезонов и рассчитана их продолжительность в каждом году. Определен также сезонный набор ЭЦМ и отмечены ежегодные границы циркуляционных сезонов для Восточной Сибири [8–10].

Все материалы типизации размещены в открытом доступе на сайте [7].

В 1967 г. [3] Б. Л. Дзердзеевский заметил, что, если арктических вторжений, соединяющих арктический антициклон с субтропическим, нет в Северном полушарии, то их нет и в Южном, а, если они есть, то их количество в северном и Южном полушарии одинаково, и они идут навстречу друг другу, в одних и тех же долготах. Так начался анализ глобальной циркуляции атмосферы [23; 31; 37; 42].

Полученные результаты

Флуктуации глобальной циркуляции атмосферы и температуры воздуха

Поскольку одновременно в каждом полушарии появляются сезонные разновидности одного и того же типа циркуляции, на продолжительности групп циркуляции это не сказывается, поэтому циркуляционные эпохи, определённые для Северного полушария, являются и глобальными (рис. 1).

На рис. 1 выделяются 3 закончившиеся циркуляционные эпохи и одна недавно начавшаяся. Первая эпоха (1899–1915 гг.) меридиональная северная: продолжительность меридиональной северной циркуляции больше других. Это эпоха похолодания: средняя глобальная температура воздуха, как и средняя температура воздуха Северного полушария, ниже средней многолетней [46] (рис. 2). Вторая эпоха (1915–1956 гг.) зональная, продолжительность зональной циркуляции превосходит продолжительность других групп. Это эпоха первого глобального потепления в XX веке, вошедшего в историю как потепление Арктики. Третья эпоха (1957–2004 гг.) меридиональная южная.

В отличие от первых двух, она распадается на периоды. 1957–1969 гг. отличаются наибольшей продолжительностью меридиональной северной циркуляции, отмечалось похолодание. В период 1870 – 1980 гг. произошло увеличение продолжительности зональной циркуляции. Кроме того, в этот период продолжительность всех групп была близка к средней. Можно предположить, что и динамические схемы, построенные за 1970–1978 гг. [35], наилучшим образом отражают среднее положение циклонов и антициклонов при каждом ЭЦМ. В период 1981–1997 гг. стремительно увеличивалась продолжительность меридиональной южной циркуляции. Так же стремительно росла температура воздуха, достигшая максимума в 1998 г. С этого года продолжительность меридиональной южной циркуляции стала уменьшаться, а меридиональной северной расти. Правда, сейчас меридиональная се-

верная циркуляция растёт в основном за счёт ЭЦМ с четырьмя блокирующими процессами и четырьмя выходами южных циклонов, так что число выходов южных циклонов, особенно летом, не изменилось (рис. 3, 4), поэтому и температура не понизилась, а колебалась на самом высоком уровне вплоть до 2015 г., когда из-за роста продолжительности южных циклонов и потепления Арктики она снова выросла.

Период 2005–2014 гг. был периодом преобладания меридиональной северной циркуляции (рис. 1), хотя, поскольку положительные отклонения от средней многолетней обеих групп были приблизительно одинаковы, я бы назвала этот период периодом меридиональной северной + меридиональной южной циркуляции. В 2015–2016 гг. преобладают южные циклоны. Возможно, смена преобладания этих групп продолжится.

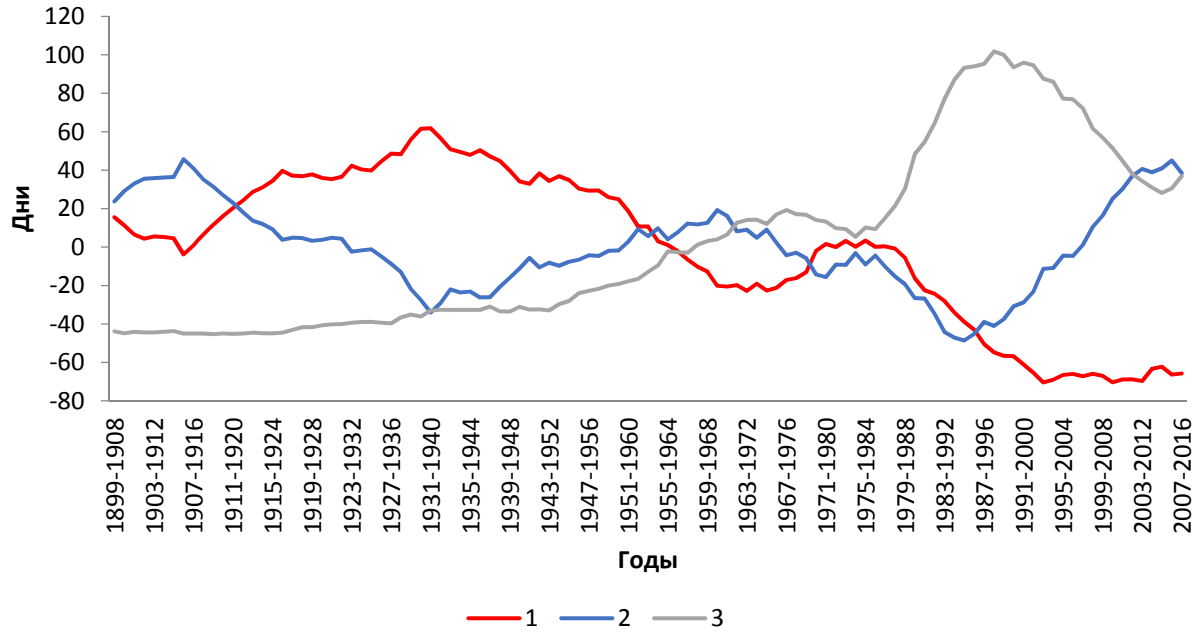


Рис. 1. Отклонения продолжительности групп циркуляции от средней за 1899–2016 гг.:
1 – зональная + нарушение зональности, 2 – меридиональная северная, 3 – меридиональная южная

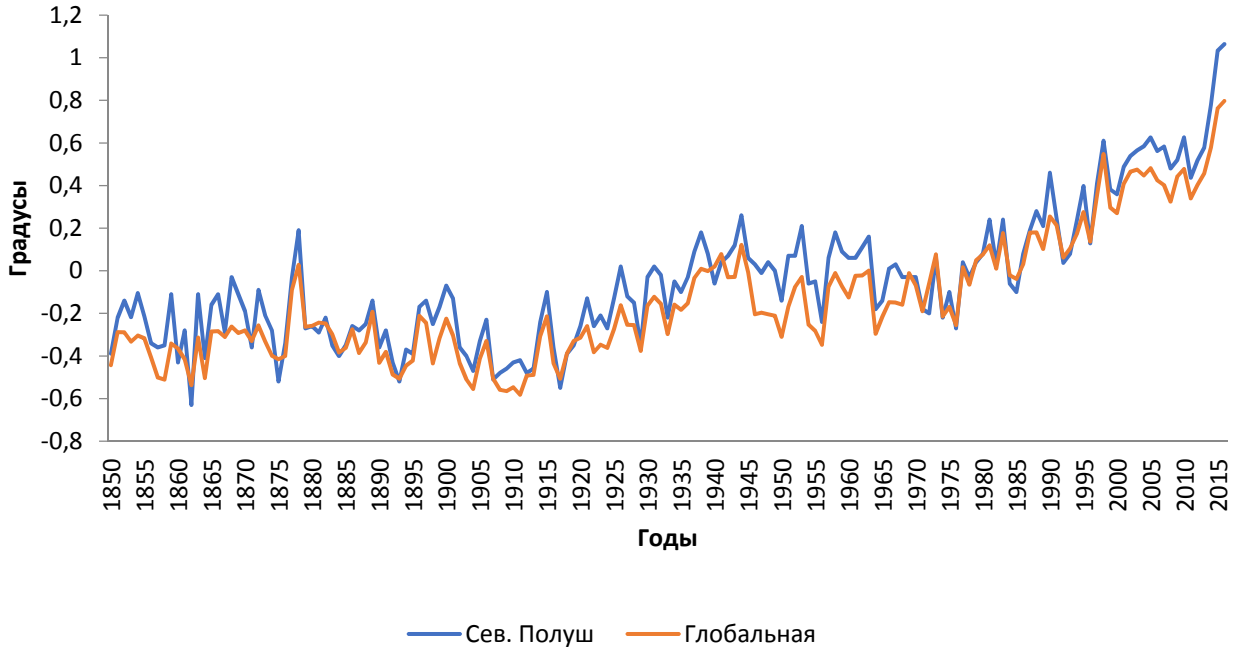
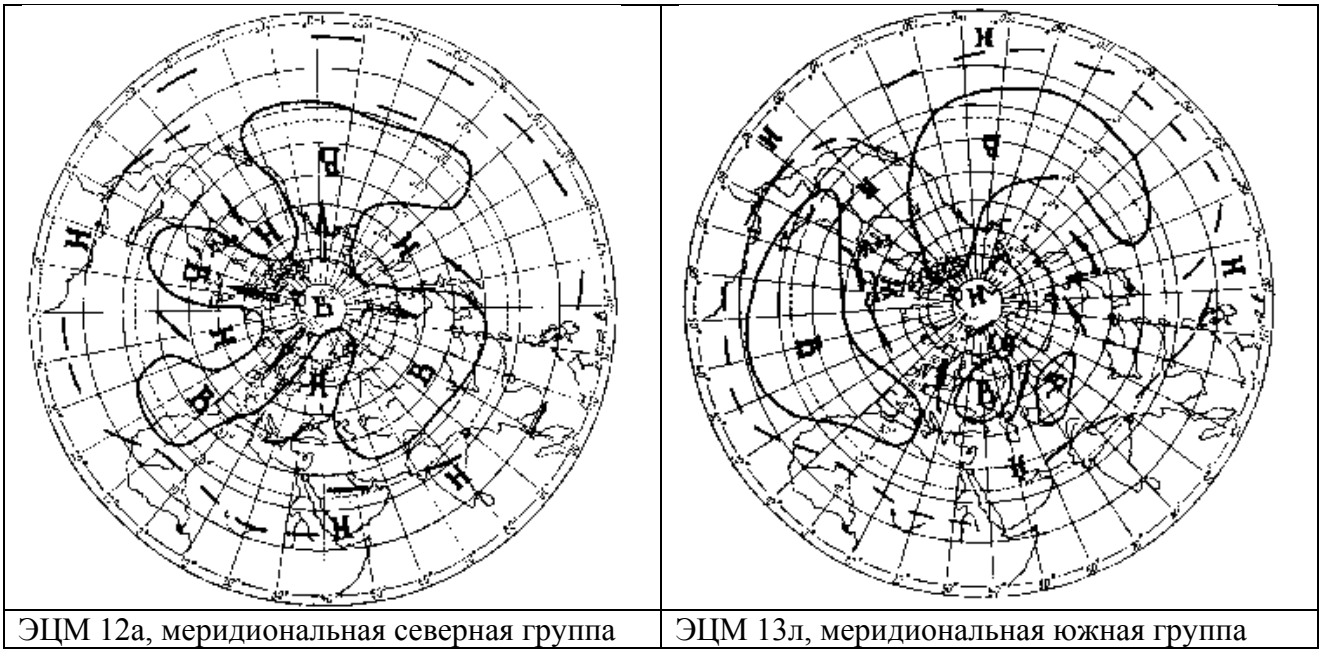


Рис. 2. Отклонения среднегодовой температуры воздуха за 1850–2016 гг. от средней за 1961–1990 гг.



ЭЦМ 12а, меридиональная северная группа	ЭЦМ 13л, меридиональная южная группа

Рис. 3. ЭЦМ 12а, меридиональная северная группа и ЭЦМ 13л, меридиональная южная группа

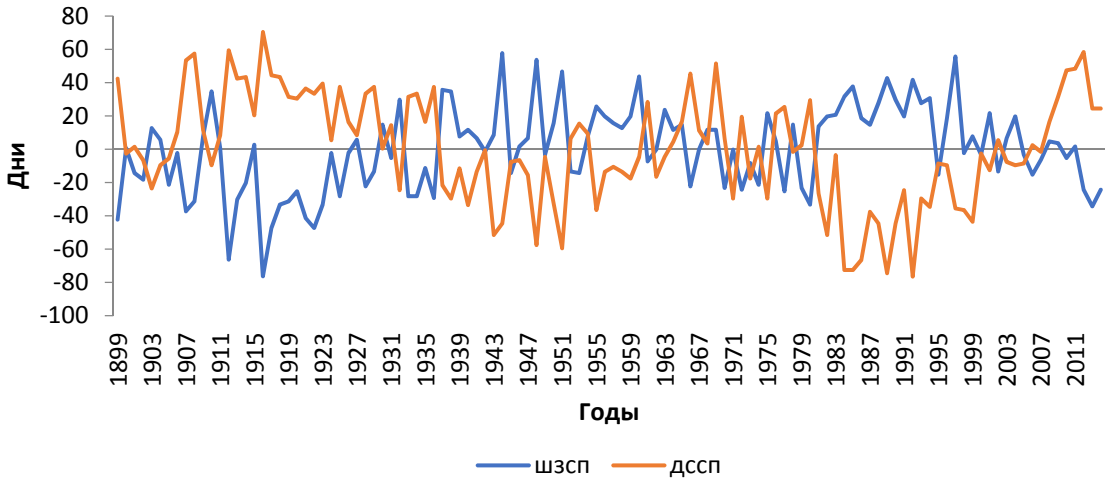


Рис. 4. Отклонения продолжительности групп циркуляции в Восточной Сибири в холодном полугодии от их средних

Связь температуры поверхности океана (ТПО) с ЭЦМ

Известно, что длительные атмосферные процессы во многом определяются характером взаимодействия между океаном и атмосферой. В [37] рассматривается связь теплового состояния Северной Атлантики в январе-феврале с повторяемостью ЭЦМ в марте-апреле на материале 1960–2010 гг. Выявлено, что при холодном океане преобладающий по повторяемости ЭЦМ 8а приводит к смещению на ЕТР и в Западную Сибирь южных циклонов из района Средиземноморья. Следовательно, здесь в марте-апреле погода будет преимущественно теплой, с избытком осадков. При теплом океане преобладающий по повторяемости ЭЦМ 10а обусловливает частые вторжения на ЕТР и в Западную Сибирь арктических антициклонов. Следовательно, здесь погода марта-апреля будет холодной с дефицитом осадков. Иными словами, холодная зимняя Атлантика приводит к тёплой весне, а теплая Атлантика – к холодной. С точки зрения крупномасштабного взаимодействия океана и атмосферы такой результат вполне закономерен.

Отклик циркуляции атмосферы на геомагнитную возмущённость.

В [45] отмечается тенденции нарастания турбулентных ЭЦМ при прохождении магнитных бурь. Самые турбулентные ЭЦМ – 12а, 13л, 13з, 9а, 12бз.

Флуктуации циркуляции атмосферы и температуры воздуха в Восточной Сибири

Поскольку при одном и том же ЭЦМ в разных частях полушария возникают различные потоки, циркуляционные эпохи также меняются не одновременно. Набор ЭЦМ, относящихся к разным группам циркуляции, также различен. Для Восточной Сибири по траекториям барических образований выделено 4 группы циркуляции для тёплого полугодия и две для холодного. Ниже представлено колебание отклонений продолжительности групп циркуляции холодного и тёплого полугодий от их средних.

В холодное полугодие циркуляция с арктическими вторжениями преобладала в начале XX века, в 60-е годы и в XXI веке. В 2012 г. её продолжительность достигла 194 дней при средней 136 дней. Рост продолжительности ЭЦМ без арктических вторжений на Восточную Сибирь отмечался в 40–50-е и в 80–90-е годы. В 1944 г., в период максимума развития зональных процессов на полушарии, она достигла 141 дня при средней 83 дня, а в 1997 г., в период максимальной продолжительности меридиональной южной циркуляции на полушарии, она составляла 139 дней.

В тёплое полугодие в 1913–1920 и 1930–1950 гг. преобладала широтная западная циркуляция с антициклоном на юге и выходом южных циклонов (шзспдю) (рис. 5). В 1916 и 1917 гг. она составляла 114 дней при средней 71 день, а в 1932 и 1945 гг. 116 дней. Повышенной продолжительностью в 1902–1926 гг., 1941–1943 гг. и 1958 -2014 гг. отличалась также группа долготная северная в сочетании с долготной южной (дсдю). При средней продолжительности 21 день за сезон её продолжительность в 1902–1907 гг. превышала 30 дней, в 1907, 1943, 1961 и 1966 гг. составила 43 дня, в 1999 г. 49 дней, в 2009 г. 52 дня, а в 1921 г. 60 дней.

Во второй половине XX века преобладала широтная циркуляция в сочетании с долготной южной. При средней продолжительности 45 дней в 1989 г. она составляла 134 дня, в 2014 г. 63 дня.

В XXI веке чередуются группы долготная северная в сочетании с долготной южной и широтная западная в сочетании с долготной южной. В 2014 г. продолжительность последней составила 63 дня. Активная циклоническая деятельность и избыток осадков способствовали формированию селевых потоков и разрушению посёлка Аршан [32], а также наводнениям в Якутии и Магаданской области. В 1015 г. формирование антициклонических областей при вторжении сухого арктического воздуха создало условия для природных пожаров на обширной территории Восточной Сибири.

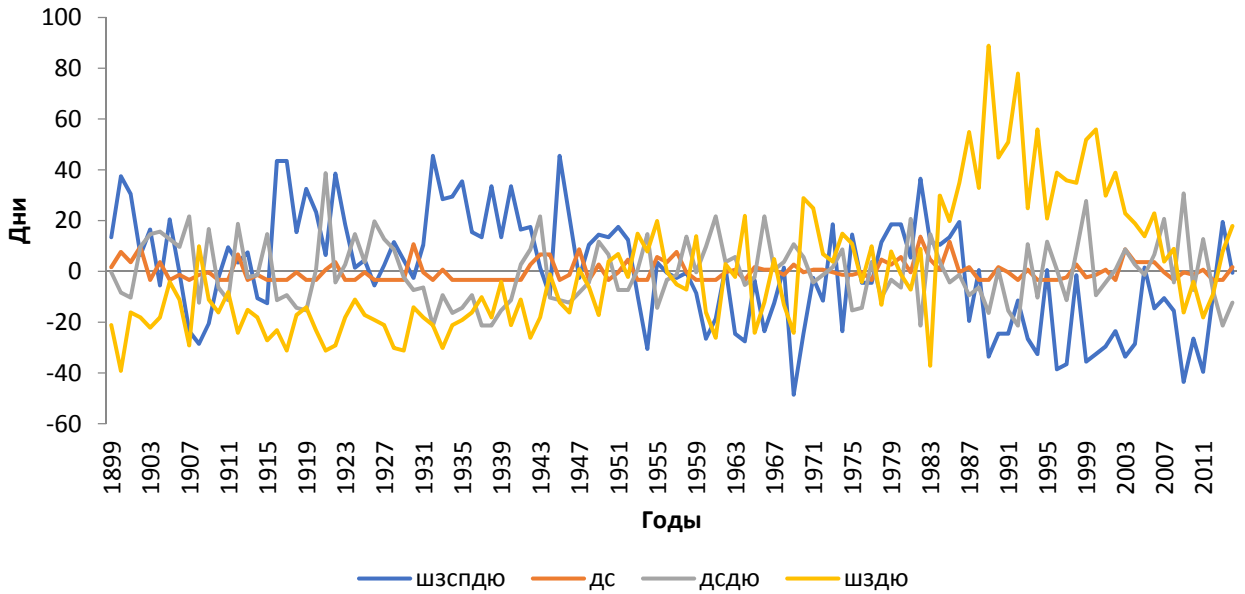


Рис. 5. Отклонения продолжительности групп циркуляции в Восточной Сибири в тёплом полугодии от их средних

Для Восточной Сибири характерно большее развитие антициклонической циркуляции в первой половине XX века и в современный период, по сравнению со второй половиной XX века. Этим объясняется увеличение повторяемости в современный период сильных морозов зимой [25; 27] и засух и лесных пожаров летом. Недобор твёрдых осадков отрицательно сказывается на жизни ледников [19; 20; 26; 29; 30; 36; 38].

Особенностью тёплого времени года современного периода оказывается также устойчивое перемещение южных циклонов в одних регионах сектора и столь же устойчивая повторяемость арктических вторжений в соседних, в результате чего соседствуют регионы с избытком и недостатком осадков.

В высоких широтах Сибири господствуют атлантические циклоны, что обеспечивает положительные аномалии температуры воздуха в холодное полугодие и отсутствие дефицита осадков в течение всего года [16].

Границы и продолжительность циркуляционных сезонов

Важной характеристикой климата является время наступления и продолжительность циркуляционных сезонов. Они меняются вместе с изменением характера циркуляции атмосферы [7].

Предвесенье начинается в среднем 10 марта. Самая ранняя дата начала предвесенья (5 февраля) приходится на 1902 г. Вместе с тем именно в меридиональную северную эпоху предвесенье начиналось наиболее поздно, в третьей декаде марта, а самая поздняя дата (28 марта) приходится на 1915 и 1923 гг. Это самый конец меридиональной и начало зональной эпохи, когда зимний сибирский антициклон был наиболее устойчив. Ранние даты начала предвесенья приходятся на зональную эпоху (1929–1936 гг.) и период повышения зональной циркуляции в меридиональную южную эпоху. Самая ранняя дата в этот период (11 февраля) приходится на 1972 г.

Весна в среднем начинается 9 апреля. Весна начинается поздно в меридиональную северную и первую половину зональной эпохи. Самая поздняя дата (1 мая) приходится на 1914 и 1923 гг. Затем вплоть до 2007 г. она начинается раньше средней даты и только в конце периода начинается всё позже.

Лето в среднем начинается 24 мая. Позднее этой даты оно начиналось вплоть до конца зональной эпохи, исключая период с 1928 по 1943 г. В меридиональную южную эпоху оно начиналось раньше средней даты. Самая ранняя дата (23 апреля) пришлась на 1992 г. После этого лето стало начинаться всё позднее.

Осень начинается в среднем 1 сентября. Раньше этой даты осень начиналась в меридиональную северную циркуляционную эпоху. Самая ранняя дата (1 августа) пришлась на 1902 г. В зональную эпоху осень начиналась в основном похоже средней даты, самая поздняя дата в это время (4 октября) пришлась на 1947 г. В период роста продолжительности меридиональной северной циркуляции осень, как и в меридиональную северную эпоху, начиналась раньше положенного. Самая ранняя дата в этот период (2 августа) пришлась на 1966 г. В меридиональную южную циркуляционную эпоху осень снова стала начинаться позже средней даты вплоть до 1996 г., затем последовало колебание около средней. Самая поздняя дата начала осени за весь период (14 октября) приходится на 1985 г.

Средняя дата начала предзимья 9 октября. В меридиональную северную эпоху и в период увеличения продолжительности меридиональной циркуляции в 60-е годы предзимье начиналось раньше положенного. Самая ранняя дата (14 сентября) пришлась на 1963 г. В зональную эпоху и особенно в меридиональную южную предзимье начиналось позже средней даты. Самая поздняя дата (13 ноября) отмечалась в 1982 г.

Средняя дата начала зимы 26 ноября. Раннее начало зимы отмечается в меридиональную северную эпоху, позднее – в зональную, снова раннее в меридиональную южную, до зимы 2004/2005 гг., а в современный период отмечается позднее начало зимы.

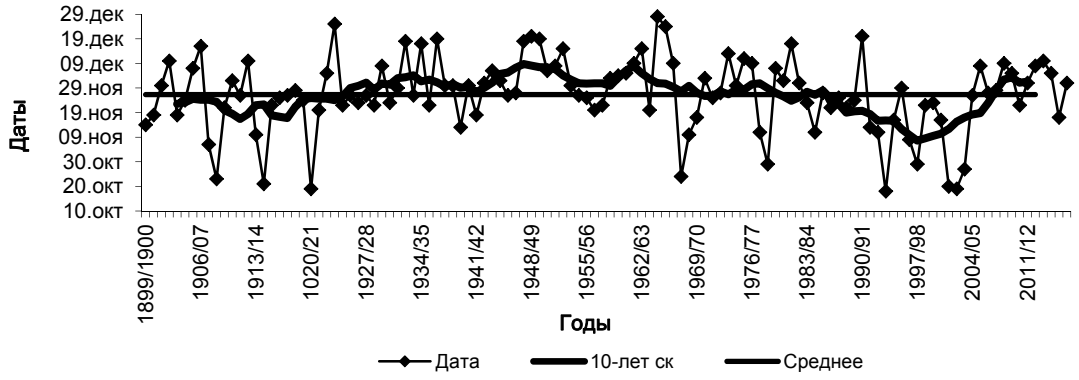
С датами начала сезонов неразрывно связана их продолжительность [7]. В современный (после 2004 г.) период продолжительность предвесенья превышает среднюю, весны –

колеблется около средней, лета – меньше средней и продолжает уменьшаться, осень стабильно меньше средней, продолжительность предзимья растёт, зимы – уменьшается.

Таким образом, за счёт увеличения продолжительности предвесенья и предзимья продолжительность холодного периода растёт, а за счёт уменьшения длительности лета и осени продолжительность тёплого периода уменьшается.

Приводим изменение дат начала и продолжительности зимы (рис. 6).

а)



б)

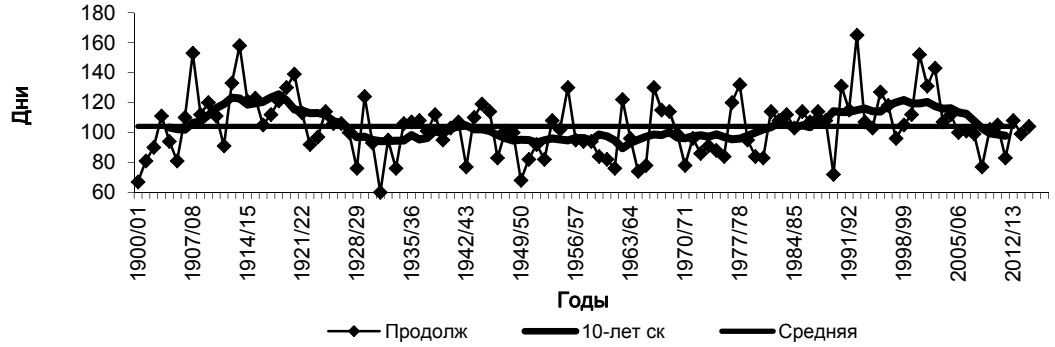


Рис. 6. Латы начала (а) и продолжительность (б) циркуляционного сезона зимы Аналогичные графики для других сезонов и таблицы, по которым они построены, приведены на сайте [7]

Заключение

Начатое в 1946 г. исследование циркуляции атмосферы Северного полушария продолжается по сей день. Календарь последовательной смены ЭЦМ и таблицы продолжительности ЭЦМ по месяцам и годам насчитывают 118 лет. На этом материале выявлены многолетние колебания циркуляции атмосферы и климата Северного полушария, а также системы океан – атмосфера, получены количественные характеристики отклика циркуляции атмосферы на геомагнитную возмущенность, определены типы циркуляции, ответственные за те или иные метеорологические и природные экстремумы в разных регионах Северного полушария, а также исследуется сопряженность циркуляции атмосферы Северного и Южного полушарий. Начало всем этим работам было положено в 50–60-е гг. прошлого века в Отделе климатологии Института географии Б. Л. Дзердзеевским.

Список литературы

1. Дзердзеевский Б. Л. Проблема колебаний общей циркуляции атмосферы и климата // Воейков А. И. Современные проблемы климатологии. Л. : Гидрометеоиздат, 1956. С. 109–122.

2. Дзердзеевский Б. Л. Циркуляционные схемы сезонов года в северном полушарии // Известия АН СССР. Сер. геогр. 1957. № 1. С. 36–55.

3. Дзердзеевский Б. Л. Сравнение главнейших закономерностей циркуляции атмосферы над Северным и Южным полушариями // Информ. Бюл. Советской Антарктической экспедиции. 1967. № 65. . 58–68.

4. Дзердзеевский Б. Л. Сопоставление характеристик атмосферной циркуляции над северным полушарием и его секторами // Материалы метеорологических исследований. М. : Изд-во ИГ АН СССР и Междувед. геофиз. ком. при Президиуме АН СССР, 1970. С. 7–14.

5. Дзердзеевский Б. Л. Избранные труды. Общая циркуляция атмосферы и климат. М. : Наука, 1975. С. 288 с.

6. Дзердзеевский Б. Л., Курганская В. М., Витвицкая З. М. Типизация циркуляционных механизмов в северном полушарии и характеристика синоптических сезонов // Тр. Науч.-ислед. учреждений Гл. упр. гидрометеорол. службы при Совете Министров СССР. Сер. 2, Синоптическая метеорология. Л. : Гидрометиздат, 1946. Вып. 21 : Центральный институт прогнозов. С. 80.

7. Колебания циркуляции атмосферы Северного полушария в XX – начале XXI века. URL: http://www.atmospheric-circulation. ru

8. Кононова Н. К. Границы естественных сезонов в Восточной Сибири // Известия АН СССР. Сер. геогр. 1961. № 6. С. 67–72.

9. Кононова Н. К. О смещении направлений арктических вторжений в Восточной Сибири // Изв. Всесоюз. геогр. о-ва. 1962. Т. 94, вып. 3. С. 255–257.

10. Кононова Н. К. Изменение структуры циркуляционных сезонов в Восточной Сибири в первой половине XX века // Известия АН СССР. Сер. геогр. 1963. № 4. С. 60–67.

11. Кононова Н. К. Флуктуации циркуляции атмосферы и температуры воздуха в Восточной Сибири // Результаты исследований по международным геофиз. проектам. Метеорологические исследования « Циркуляционные и климатические эпохи северного полушария в первой половине XX века» : сб. ст. № 13 / Междувед. геофиз. комитет при Президиуме АН СССР. М. : Наука, 1968. С. 82–102.

12. Кононова Н. К. О причинах изменения количества осадков в Восточной Сибири // Результаты исследований по международным геофиз. проектам. Метеорологические исследования « Циркуляционные и климатические эпохи северного полушария в первой половине XX века» : сб. ст. № 13 / Междувед. геофиз. комитет при Президиуме АН СССР. М. : Наука,1968. С. 103–112.

13. Кононова Н. К. Циркуляционные и климатические особенности зимних сезонов в Восточной Сибири в первой половине XX века // Изв. Забайкал. фил. Геогр. о-ва СССР. 1970. Т. 6, вып. 3. С. 31–50.

14. Кононова Н. К. Связь атмосферных осадков с типами циркуляции (для района Иркутска) // Исследования генезиса климата / АН СССР. М. : Ин-т географии, 1974. С. 129–143.

15. Кононова Н. К. Связь колебаний климата в Восточной Сибири с флуктуациями циркуляции атмосферы // Циркуляционные механизмы современных колебаний климата. М. : Наука, 1987. С. 92–102.

16. Кононова Н. К. Изменение характера циркуляции атмосферы в последние десятилетия как фактор изменения климатических и ледовых условий Арктики // Материалы гляциологических исследований. 2006. № 100. С. 191–199.

17. Кононова Н. К. Рост внутрисуточной амплитуды колебаний температуры воздуха в арктическом регионе в конце XX – начале XXI века как фактор риска возникновения чрезвычайных ситуаций // Обеспечение комплексной безопасности северных регионов Российской Федерации : материалы науч.-практ. конф. 22 апр. 2008 г. М. : НЦУКС МЧС России, 2008. С. 115–121.

18. Кононова Н. К. Классификация циркуляционных механизмов Северного полушария по Дзердзеевскому Б. Л. М. : Воентехиниздат, 2009. 372 с.

19. Кононова Н. К. Изменение осадков холодного периода и продолжительности макроциркуляционных процессов, обусловливающих их выпадение в различных регионах Восточной Сибири // Лёд и снег. 2010. № 3 (111). С. 47–57.

20. Кононова Н. К. Влияние циркуляции атмосферы на формирование снежного покрова на северо-востоке Сибири // Лёд и снег. 2012. № 1 (117). С. 38–53.

21. Кононова Н. К. Особенности циркуляции атмосферы Северного полушария
в конце XX – начале XXI века и их отражение в климате // Сложные системы. 2014. № 2 (11). С. 11–35.

22. Кононова Н. К. Изменения циркуляции атмосферы Северного полушария в XX–XXI столетиях и их последствия для климата // Фундам. и прикладная климатология. 2015. № 1. С. 127–156.

23. Кононова Н. К. Флуктуации глобальной циркуляции атмосферы в XX–XXI вв. // Сложные системы. 2016. № 1 (18). С. 22–37.

24. Кононова Н. К. Экспедиция « Северный полюс» и глобальная типизация циркуляции атмосферы // Жизнь Земли. 2017. Т. 39, № 4. С. 429 – 443.

25. Циркуляционные условия аномально холодной зимы 2005/2006 гг. над Сибирью / И. В. Латышева, Е. П. Белоусова, А. С. Иванова, В. Л. Потемкин // Метеорология и гидрология. 2007. № 9. С. 36–40.

26. Современные особенности распределения потоков влаги на территории Евразии / И. В. Латышева, Е. П. Белоусова, С. В. Олемской, С. В. Латышев, К. А. Лощенко // Известия Иркутского государственного университета. Сер. Науки о Земле. 2010. № 1. С. 62–79.

27. Латышева И. В., Белоусова Е. П., Олемской С. В., Лощенко К. А. Современные изменения климата на территории Иркутской области // Известия Иркутского государственного университета. Серия науки о Земле. 2010. Т. 3, № 2. С. 110–126.

28. Исследование динамики струйных течений в различные периоды последней циркуляционной эпохи / И. В. Латышева, С. В. Латышев, К. А. Лощенко, Е. П. Белоусова, С. В. Олемской. М. : Метеоспектр, 2010. С. 103–113.

29. Современные изменения температурно-влажностного режима на территории Евразии / И. В. Латышева, К. А. Лощенко, Е. П. Белоусова, С. В. Олемской. М. : Метеоспектр, 2010. С. 106–119.

30. Лобановская Ю. А. Связь многолетних колебаний аномалий температуры воздуха и осадков с циркуляцией атмосферы (на примере Иркутской области) // Многолетние колебания циркуляции атмосферы и климата в северном полушарии в XX столетии : материалы метеорол. исслед. 1982. № 96. С. 90–95.

31. Логинов В. Ф. Глобальные и региональные изменения климата: причины и следствия. М., 2008. С. 288.

32. Мальнева И. В., Кононова Н. К., Крестин Б. М. Оценка опасности проявления селей в Южном Прибайкалье в современный период // ГеоРиск. 2017. № 2. С. 56–61.

33. Мордвинов В. И. Долговременные вариации изменчивости циркуляции атмосферы по типизации Дзердзеевского и данным архива NCEP/NCAR Reanalysis // Тр. Междунар. науч. конф. « Исследование изменений климата с использованием методов классификации режимов циркуляции атмосферы» , 16–18 мая 2016 г. С. 49–53. URL: http:// www.atmospheric-circulation.ru.

34. Мордвинов В. И., Хамчич В. Н. Сопоставление колебаний арктической осцилляции со сменой типов циркуляции Дзердзеевского // Изв. РАН. Сер. геогр. 2010. № 5. С. 52–60.

35. Савина С. С., Хмелевская Л. В. (1984). Динамика атмосферных процессов северного полушария в XX столетии // Материалы метеорологических исследований / Междувед. геофиз. ком. при Президиуме АН СССР. 1984. № 9. С. 146.

36. Титкова Т. Б., Кононова Н. К. Связь аномалий накопления снега и общей циркуляции атмосферы // Известия РАН. Сер. геогр. 2006. № 1. С. 35–46.

37. Угрюмов А. И. Повторяемость элементарных циркуляционных механизмов атмосферы как следствие взаимодействия океана и атмосферы // Тр. Междунар. науч. конф. « Исследование изменений климата с использованием методов классификации режимов циркуляции атмосферы» , 16–18 мая 2016 г. С. 38–41. URL: http://www.atmospheric-circulation.ru.

38. Федоров В. М. Динамика баланса массы ледников в связи с макроциркуляционными процессами в атмосфере. М. : Физматлит, 2011. 376 с.

39. Харламова И. В., Кононова Н. К. Влияние особенностей атмосферной циркуляции на активность селевых процессов в зоне БАМа Инженерно-геологические и гидрогеологические условия территории, прилегающей к трассе БАМа. ВСЕГЕИ,1982. С. 43–47.

40. Хуторянская Д. Ф. Некоторые статистические характеристика временной изменчивости циркуляции атмосферы в Сибирском секторе // Многолетние колебания циркуляции атмосферы и климата в северном полушарии в XX столетии : материалы метеорол. исслед. 1982. № 6. С. 56–60.

41. Хуторянская Д. Ф. Основные тенденции многолетних колебаний циркуляционных процессов в Сибирском секторе // Многолетние колебания циркуляции атмосферы и климата в северном полушарии в XX столетии : материалы метеорол. исслед. 1982. № 6. С. 77–90.

42. Чаплыгина А. С. Флуктуации циркуляции атмосферы и климатического режима Земли // Физическая и динамическая климатология. 1974. С. 209–217.

43. Barry R. G., Perry A. H. Synoptic Climatology Methods and Applications. London : Methuen & Co Ltd., 1973. P. 555.

44. Brencic M. Some results of statistical analyses on elementary circulation mechanisms according to Dzerdzeevskii // Труды Междунар. науч. конф. « Исследование изменений климата с использованием методов классификации режимов циркуляции атмосферы» , 16–18 мая 2016 г. С. 17–22. URL: http:// www.atmospheric-circulation.ru.

45. Chernavskaya M. M., Kononova N. K., Val`chuk T. E. Correlation between atmospheric circulation processes over the northern hemisphere and parameter of solar variability during 1899–2003 // Advances in Space Research (JASR). 2006. Vol. 37, Issue 8. P. 1640–1645

46. Climatic Research Unit Data. – URL: http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature/.

47. Dzerdzeevskii B. Fluctuations of Climate and of General Circulation of the Atmosphere in extra-tropical latitudes of the Northern Hemisphere and some problems of dynamic climatology // TELLUS. 1962. Vol. XIV, N 3. P. 328–336.

48. Hoy A. Dzerdzeevski´s atmospheric circulation classification and it´s applicability to northern-hemispheric climate variations (preliminary results) // Тр. Междунар. науч. конф. « Исследование изменений климата с использованием методов классификации режимов циркуляции атмосферы» , 16–18 мая 2016 г. С. 83–87. URL: http:// www.atmospheric-circulation.ru

УДК 504.064.36:551.508

Измерительно-вычислительная система для метеорологического и экологического мониторинга атмосферного пограничного слоя

В. А. Корольков (kor@imces.ru), А. А. Тихомиров (tikhomirov.43@mail.ru),
А. Е. Тельминов (talexey@sibmail.com), А. Я. Богушевич (bay@imces.ru)

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск

Аннотация. Представлено описание созданной измерительно-вычислительной системы (ИВС) для метеорологического и экологического мониторинга атмосферного пограничного слоя. ИВС включает: пространственно разнесенные стационарные посты с трехуровневыми ультразвуковыми АМС, мобильный измерительный комплекс (МИК) и центр обработки данных. В состав МИК входят: многокомпонентный оптический газоанализатор, анализатор паров ртути, оптический измеритель осадков, двухуровневая ультразвуковая АМС, метеостанции, размещенные на гексакоптере и привязном аэростате. Приведены некоторые результаты измерений, полученные составными частями ИВС.

Ключевые слова: измерительно-вычислительная система, стационарные посты, мобильный измерительный комплекс, метеорологический и экологический мониторинг атмосферного пограничного слоя.

Введение

Состояние атмосферного пограничного слоя (АПС) оказывает существенное влияние на самые различные стороны человеческой деятельности. Метеорологические факторы во многом определяют эффективность и безопасность функционирования транспортных и энергетических систем, систем связи, большинства отраслей промышленности и т. п. От экологического состояния окружающей среды (загрязнения ее токсичными газами) зависит существование биосферы Земли, включая жизнь и здоровье человека. В связи с этим, актуальной задачей является организация комплексного, долговременного и непрерывного мониторинга метеорологических и экологических параметров АПС.

Мониторинг состояния АПС, в том числе и приземного слоя, осуществлялся (и осуществляется) на основе данных метеорологических постов, образующих государственные и мировую измерительные сети. Существенными недостатками таких систем являются редкая сеть измерительных постов и низкая периодичность выполнения измерений: один раз в три часа для характеристик приземного слоя атмосферы и один-два раза в сутки – для характеристик АПС на ограниченном числе постов (аэрологическое зондирование). Ограниченность получаемой такими системами информации не позволяет осуществлять оперативный контроль и сверхкраткосрочное прогнозирование метеорологической и экологической ситуации на локальных территориях масштаба города или отдельного крупного технологического объекта (транспортного узла, промышленного комбината, сельскохозяйственного агрокомплекса и т. п.), что является не менее актуальной задачей, чем долговременные метеорологические прогнозы регионального масштаба.

Для решения задач мезомасштабного метеорологического и экологического мониторинга на территориях, составляющих десятки тысяч квадратных километров, разрабатываются и внедряются автоматические и полуавтоматические системы, использующие современные измерительные средства и технологии обработки и интерпретации получаемых данных [4; 6; 7; 11]. Такие комплексы и системы могут осуществлять непрерывные автоматические измерения характеристик воздушной среды и обработку информации в режиме реального времени.

В ИМКЭС СО РАН в течение последнего десятилетия разрабатываются различные варианты инструментальных измерительно-вычислительных систем для непрерывного мониторинга АПС и прогноза опасных метеорологических явлений [4; 6; 8; 11], а также для экологического мониторинга приземного слоя атмосферы [12].

В статье представлено описание последнего варианта созданного экспериментального образца ИВС и некоторые результаты ее опытной эксплуатации.

1. Описание системы

1.1. Состав ИВС

Созданный экспериментальный образец ИВС предназначен для отработки технологии непрерывного мониторинга состояния АПС над мезомасштабными объектами и последующего прогнозирования развития метеорологической и экологической ситуации.

ИВС включает: а) измерительную сеть, образованную территориально разнесенными постами стационарного измерительного комплекса (СТИК); б) мобильный измерительный комплекс (МИК); в) центр обработки данных (ЦОД) с программным обеспечением и базой хранения результатов измерений (рис. 1). Посты СТИК размещаются на расстоянии нескольких десятков километров, что позволяет охватывать мониторингом территорию размером в сотни и тысячи квадратных километров. Мобильный измерительный комплекс, размещенный на транспортном средстве, позволяет проводить измерения метеорологических и экологических характеристик атмосферы как внутри территории, охваченной постами СТИК, так и за пределами этой территории в произвольной транспортно-доступной точке и, таким образом, изменять конфигурацию ИВС, адаптируя ее под решение конкретной задачи (рис. 2).

Ниже представлены описания основных устройств ИВС и их составных частей.

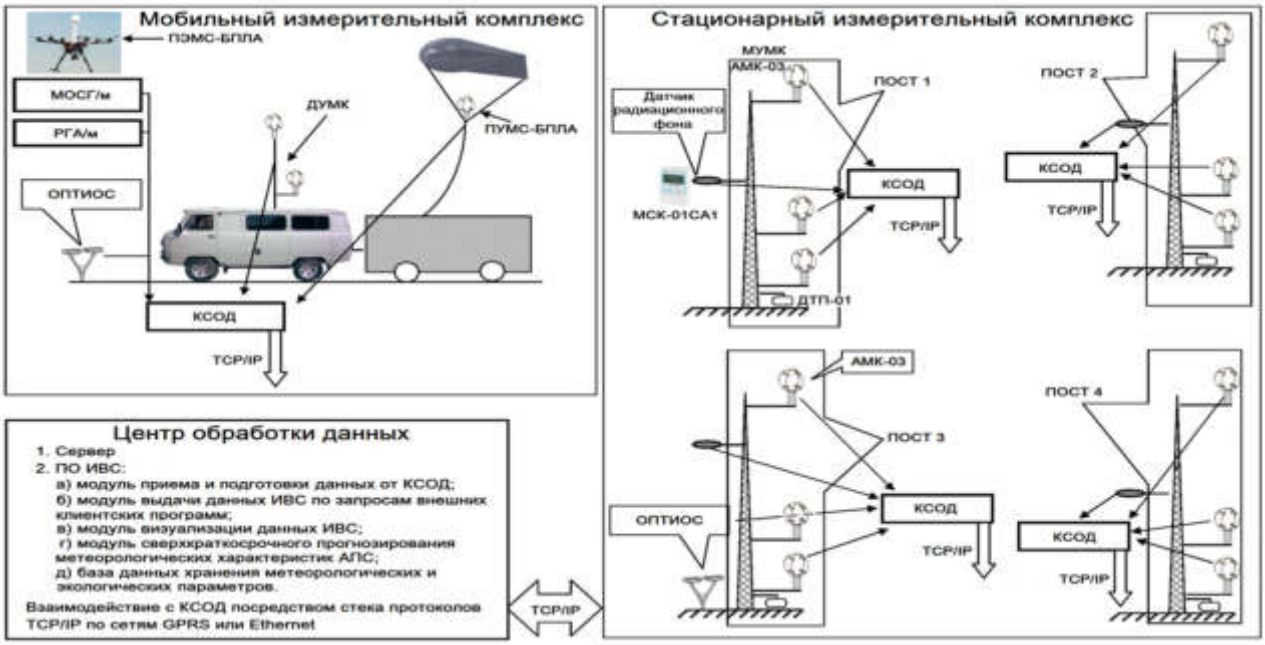


Рис. 1. Функциональная схема ИВС

1.2. Стационарный измерительный комплекс

СТИК состоит из четырех постов, пространственно разнесенных друг от друга на несколько десятков километров на контролируемой территории (рисунки 1, 2). Каждый пост представляет собой многоуровневый метеорологический комплекс (МУМК) и включает мачту МАРС-3–15, на которой установлены 3 ультразвуковые автоматические метеостанции (УАМС) АМК-03 [1] (на высотах 2, 10 и 30 м). На уровне земли каждая из мачт дополнена датчиком ДПТ-01 на основе контактных сенсоров, установленных в радиационной защите и измеряющих температуру, давление и влажность воздуха вблизи поверхности земли. АМК-03 занесены в Государственный реестр средств измерений (Сертификат RU.C.28.007.A № 29530) и измеряют основные метеорологические величины: трехкомпонентный вектор скорости ветра, температуру, давление и влажность воздуха с частотой опроса датчиков до 80 Гц. Это обеспечивает вычисление энергических и спектральных параметров турбулентности в АПС, необходимых для определения типа стратификации и восстановления вертикальных профилей скорости ветра, температуры и влажности воздуха. Максимальная высота, до которой могут восстанавливаться профили метеорологических величин используемыми ме-

тодиками, зависит от типа стратификации, наблюдаемой в приземном слое атмосферы. В случае нейтральной или неустойчивой стратификации она может достигать 100 м и более, а при устойчивой стратификации она ограничивается либо верхней границей приземной температурной инверсии, либо ее нижней границей, если инверсионный слой находится выше измерительных датчиков.

В общем случае количество стационарных постов и удаленность их друг от друга с одной стороны определяется масштабом контролируемой территории, с другой – ограничивается наличием корреляции измеряемых метеорологических величин между постами [6]. Кроме того, места расположения постов выбираются, исходя из нескольких критериев: 1) нахождение в розе основных ветров контролируемого регионального центра или крупного промышленного объекта; 2) близостью расположения к стационарным источникам питания; 3) возможностью использования сотовой связи для передачи данных с постов МУМК на центральный сервер сбора информации; 4) вандалозащищенностью мест установки аппаратуры.

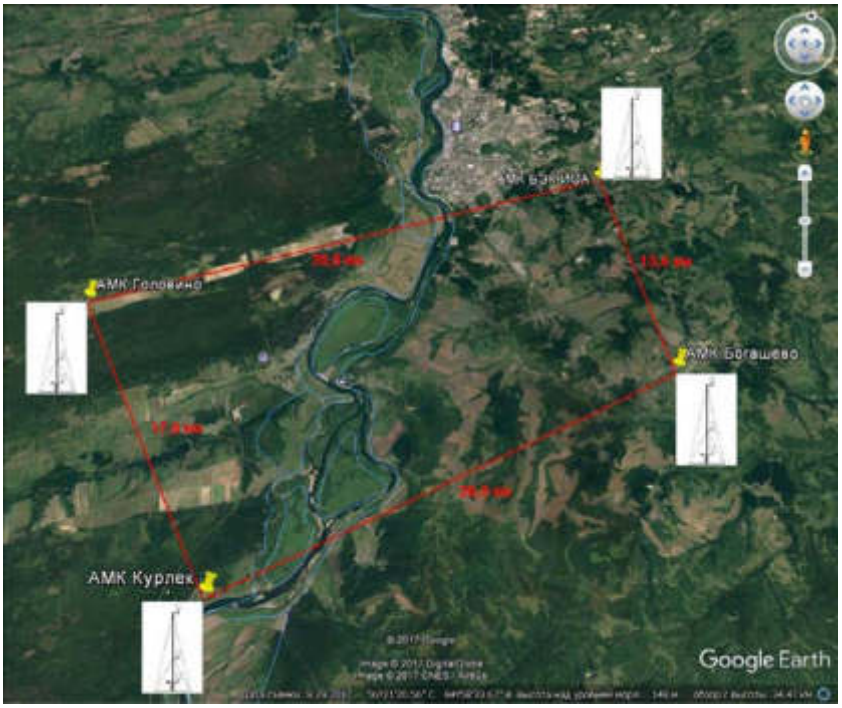


Рис. 2. Схема размещения постов СТИК на контролируемой территории

Дополнительно на всех МУМК установлены датчики радиационного фона МСК-01СА1, а на одном из постов размещен оптический осадкомер ОПТИОС. Его работа основана на методе получения и анализа теневых изображений частиц атмосферных осадков, который обеспечивает измерение как интегральных характеристик выпавших осадков (количество и интенсивность) так и структурных (распределение частиц по размерам и скорость их падения) [9].

1.3. Мобильный измерительный комплекс

МИК позволяет расширить площадь охвата и оперативного мониторинга в других точках территории, контролируемой ИВС. Аппаратура, входящая в состав МИК базируется на автомобиле повышенной проходимости ГАЗ-22177–245 (« Соболь»), в его состав входят: двухуровневый метеорологический комплекс (ДУМК) на основе ультразвуковых метеостанций АМК-03, располагаемых на уровнях 6,5 и 2 м, оборудование для контактного измерения профилей метеовеличин до высот 500 м и анализа газовых примесей в атмосфере. Для подъема АМС на необходимые высоты используются беспилотные летательные аппараты (БПЛА) гексакоптерного типа (DJI S900) и привязной аэростат гибридного типа (К-25М/А) [10]. Дополнительное метеорологическое оборудование представлено вторым экземпляром осадкомера ОПТИОС. Метеорологическая часть МИК показана на рис. 3.



а *б*

Рис. 3. Метеорологическая часть МИК: *а* – автомобиль «Соболь» с развернутой АМК-03Б (на крыше), слева внизу – ОПТИОС, справа – АМС на БПЛА; *б* – развернутая УАМС АМК-03П (полная высота 4 м)

ДУМК состоит из двух частей. Одна из них – АМК-03Б представляет собой бортовой вариант АМК-03, размещаемый на транспортном средстве и имеющий автоматически разворачиваемую мачту. В транспортном положении ультразвуковой термоанемометр ДСВ-15, являющийся основой АМК-03, укладывается в контейнер, который также служит камерой « нулевого» ветра и обеспечивает (при необходимости) автоматическую калибровку ДСВ-15 перед развертыванием [3]. Вторая часть – АМК-03П является портативной УАМС, которая размещается в переносном ранце и имеет разборную мачту, обеспечивающую установку ДСВ-15 на высоте 2 или 4 м от поверхности земли [2]. На фото рис. 3, *а* представлены также одна из модификаций ОПТИОС (у заднего колеса автомобиля) и электронная АМС на гексакоптере (у переднего колеса).

В состав МИК также входит оборудование для экологического мониторинга состояния АПС: многокомпонентная оптическая система газоанализа (МОСГ/м) на эффекте спонтанного комбинационного рассеяния (СКР) [14] и переносной измеритель концентрации паров ртути РГА/м [13] на основе поперечного эффекта Зеемана. МОСГ/м измеряет концентрации загрязняющих газов: CO, CO_2 NO, NO_2, CH_4, CH_3OH, SO_2, NH_3, HCHO, $C_6H_6C_6$, H_5CH_3 на уровне ПДК (50÷100 ppb). Особенностью этого газоанализатора является возможность расширения контролируемых газов без изменения аппаратной части системы, путем внесения эталонных спектров СКР конкретного газа в базу данных. Чувствительность РГА/м при измерении концентрации паров ртути в атмосферном воздухе 30 нг/м^3.

1.4. Центр обработки данных

Все функционально завершенные компоненты ИВС (рис. 1) обеспечены контроллерами сбора и обработки данных (КСОД) на основе промышленного компьютера NISE-2200. Каждый КСОД (см. рис. 1) принимает данные измерений от составных частей подсистемы, производит вычисления метеорологических и турбулентных параметров атмосферы, выполняет их предварительную статистическую обработку и передает данные в окончательном виде (в виде XML-файлов) в центр обработки данных (ЦОД). Все измерительные датчики со-

единяются с КСОД через порты RS-485 (проводной) или XBee (беспроводной). Кроме того, КСОД, входящий в состав МИК, может быть использован для непосредственной визуализации измерительных данных на экране монитора. Связь между каждым КСОД и сервером ЦОД осуществляется по протоколу TPC/IP через мобильную связь и Интернет.

ЦОД состоит из сервера HP ProLiant DL585 G7 на базе четырех процессоров Opteron 6386SE и программного обеспечения (ПО). ПО включает следующие модули: 1) приема и подготовка данных; 2) выдачи данных по запросам внешних клиентских программ; 3) визуализации данных; 4) сверхкраткосрочного прогнозирования метеорологических характеристик (методами Калмановской фильтрации на 4 часа вперед) и базу данных хранения измеренных метеорологических и экологических параметров АПС. Аппаратная часть ЦОД позволит использовать для прогнозирования не только статистические, но и гидродинамические модели прогнозирования.

2. Некоторые результаты опытной эксплуатации ИВС

2.1. Определение термодинамического состояния АПС, высотных профилей метеорологических параметров и их вертикальных градиентов на основе данных измерений на постах СТИК

Статистическая обработка в КСОД результатов измерений мгновенных значений температуры T и трех ортогональных компонент скорости ветра v_x, v_y, v_z, измеряемых УАМС, размещенных на 3-х высотных уровнях, позволяет оценивать динамический режим турбулентности в АПС и определять класс устойчивости атмосферной стратификации. При этом вначале вычисляются средние значения измеряемых величин и временные ряды турбулентных пульсаций температуры T' и компонент скорости ветра (вертикальных w', продольных u' и поперечных υ' относительно направления среднего вектора горизонтального ветра $\mathbf{v}_h$). На следующем этапе, используя стандартные формулы из теории атмосферной турбулентности, вычисляются различные статистические моменты обрабатываемых случайных величин и из них числовые параметры, описывающие энергетические и спектральные характеристики температурных и ветровых флуктуаций в АПС [5]. Наиболее важными из них для оценивания термодинамического состояния АПС являются значения вертикальных потоков тепла H и импульса τ, масштаба Монина-Обухова L^*.

Восстановление (модельный прогноз) высотных профилей температуры, скорости ветра, относительной влажности на основе данных измерений на 3-х высотных уровнях МУМК выполняется с применением комбинированных математических алгоритмов. В них используется как статистический подход на основе интегрирования по высоте h универсальных функций подобия от числа Монина-Обухова $\xi = h/L^*$ для выявленного класса устойчивости АПС, так и фактически измеренные средние значения температуры и скорости ветра на четырех высотах, включая приповерхностные показания датчика ДТП-01, в качестве опорных точек.

На рис. 4 приведены в качестве примеров высотные профили температуры воздуха и скорости ветра, полученные для двух различных сроков метеорологических наблюдений. В первом примере (*а*) показан случай тонкой приземной температурной инверсии высотой не более 6–8 м, выше которой наблюдается нейтральная стратификация АПС. При этом из данных измерений на высоте 2 м было вычислено значение L^*, равное +5,8 м, которое соответствует сильно устойчивому состоянию атмосферы внутри слоя температурной инверсии. Измеренная средняя температура воздуха на высоте 10 м (–23,46 °С) была больше, чем аналогично измеренные ее значения как на уровне 2 м (–23,53 °С), так и на уровне 30 м (–23,67 °С). Измеренная в этот же срок средняя скорость ветра на уровнях 2, 10 и 30 м составила 2,91, 3,30 и 3,81 м/с, т. е. хотя она монотонно возрастала с высотой, но заметно слабее, чем по логарифмическому закону.

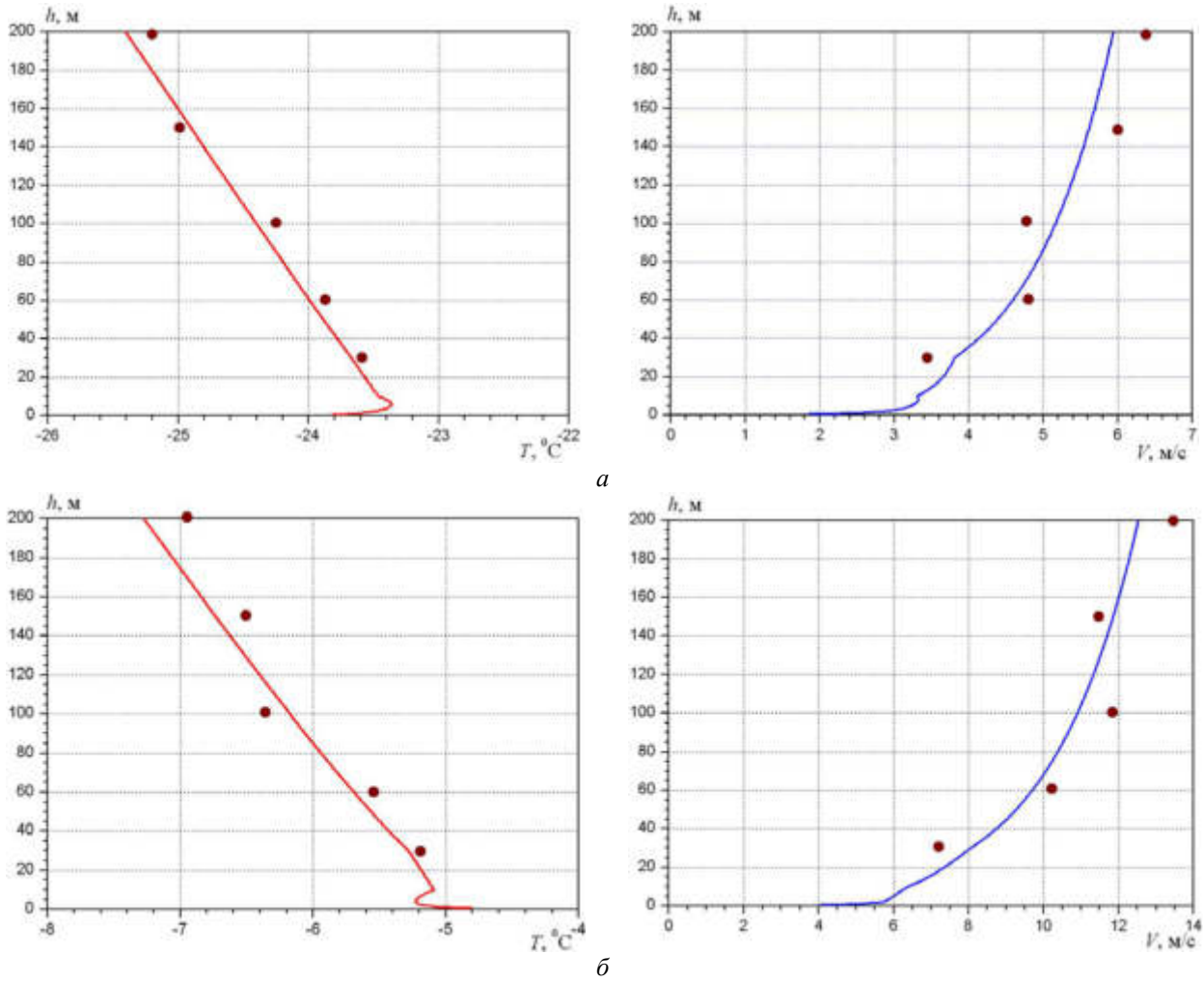


Рис. 4. Восстановленные высотные профили температуры воздуха (слева) и скорости ветра (справа) по данным измерений на посту СТИК ИВС, выполненных в 2 срока наблюдений: а) – в 16 час 30 мин 19.11.2016; б) – в 16 час 30 мин 26. 11. 2016. Дополнительно кружками обозначены значения метеорологических параметров, полученные из дополнительных измерений с помощью ПУМС-БПЛА на высотах 30, 60, 100, 150 и 200 м

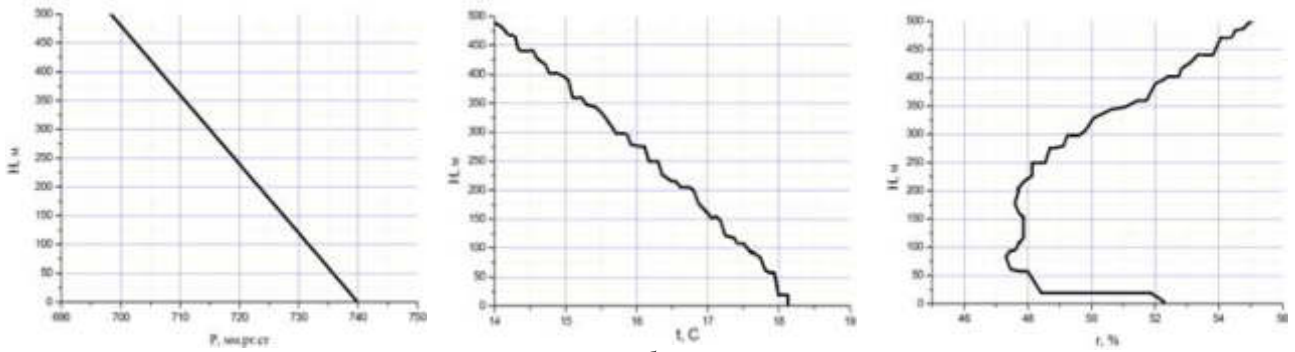
Во втором примере (рис. 4*б*) показан случай приземной слабой неустойчивости АПС, переходящей выше 10 м к нейтральному состоянию. При этом значения средней температуры воздуха, измеренные на уровнях 2 и 10 м, отличались между собой не более 0,08 °С, т. е. на величину меньшую, чем паспортная погрешность УАМС АМК-03 при измерениях данного метеорологического параметра. Выше 10 м температура убывала с высотой практически по линейному закону. Профиль скорости ветра в этом случае был близок к логарифмическому, но и здесь скорость возрастания ветра с высотой зависела от абсолютного значения L^*, вычисленного из данных измерений АМК-03 на уровне 30 м.

2.2. Результаты измерения высотных профилей метеорологических величин с помощью ПЭМС-БПЛА

На рисунке 5 показаны результаты непрерывных измерений давления, температуры и влажности атмосферного воздуха при подъеме БПЛА до высоты 500 м. Скорость подъема составляла 2 м/с и контролировалась пультом управления. Для контроля положения в пространстве БПЛА поднимался в режиме стабилизации GPS. Эксперименты проводились 16 сентября 2016 г. на метеоплощадке ИМКЭС СО РАН.

При подъеме БПЛА до высоты 500 м давление и температура воздуха линейно уменьшались с высотой, а влажность воздуха сначала уменьшалась до 25 м, затем начала возрастать линейно. Уменьшение влажности на первых 25 м можно объяснить инерционностью датчика влажности и увеличенной аспирацией при воздействии воздушных потоков от

винтов БПЛА. Поэтому при проведении сравнительных экспериментов необходимо зависание БПЛА на фиксированных высотах.



а *б* *в*

Рис. 5. Профили давления (*а*), температуры воздуха (*б*) и относительной влажности воздуха (*в*), измеренные ПЭМС-БПЛА

2.3. Измерение интегральных и структурных характеристик дождевых осадков с помощью ОПТИОС

Результаты измерения дождевых осадков оптическим осадкомером ОПТИОС [9] представлены на рис. 6. Данные измерений ОПТИОС через КСОД передавались в ЦОД ИВС, где вычислялись значения интегральных (текущая интенсивность и суммарное количество с момента начала измерений) и структурных (количество, средний размер, средний объем и средняя скорость падения частиц) характеристик измеряемых осадков. Данные измерений, хранящиеся в базе данных ЦОД ИВС, с помощью модуля визуализации доступны как в виде графиков, так и в табличном виде.

На рис. 6 приведены графики, построенные на основе взятых из базы данных ЦОД ИВС результатов измерений характеристик дождевых осадков, выпавших в г. Томск 23. 08. 2016 с 15:30 до 16:40 (по UTC).

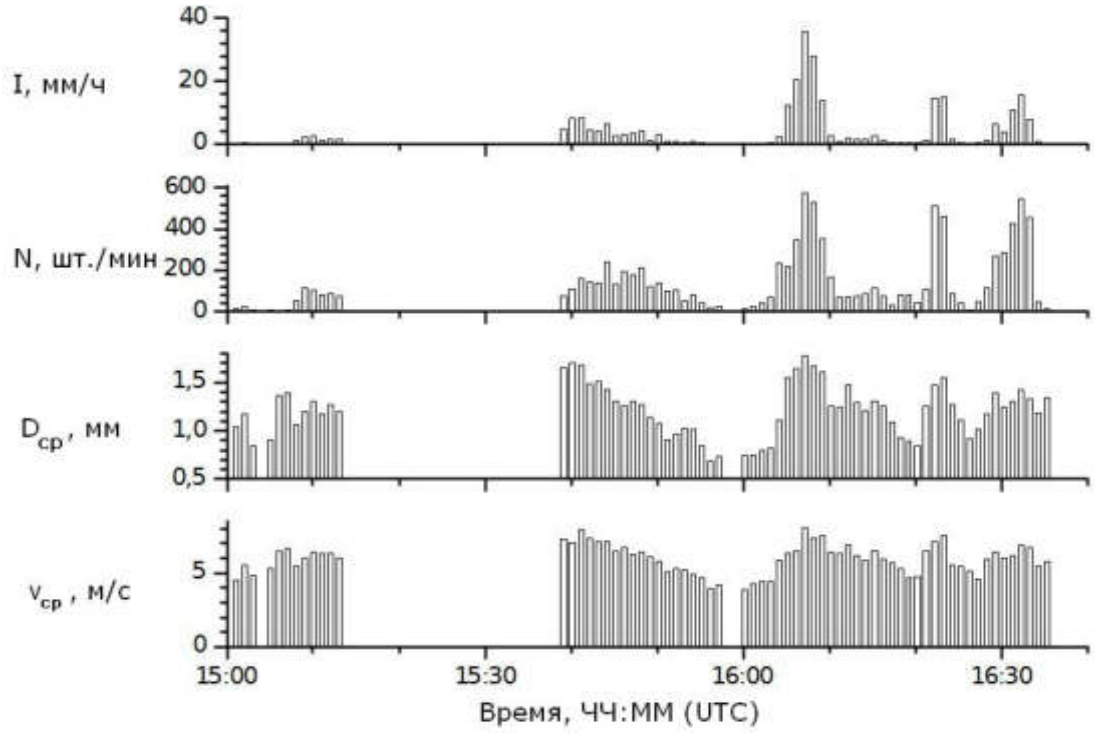


Рис. 6. Характеристики дождевых осадков, выпавших 23.08.2016 в г. Томске:
I, мм/ч – интенсивность осадков; *N*, шт. /мин – количество капель, зарегистрированных за 1 мин;
$D_{ср}$, мм – средний диаметр капель; $v_{ср}$, м/с – средняя скорость падения капель

Заключение

Изложенная концепция измерительно-вычислительной системы, на основе использования существующих алгоритмов обработки данных непрерывных измерений, должна обеспечить контроль полей метеорологических параметров как на пространстве, ограниченном постами МУМК, так и его восстановление (экстраполяцию) на пространстве, находящемся за пределами постов – на внешней, «метеорологически неосвещенной» территории. Глубина возможной экстраполяции внешнего поля метеопараметров определяется шагом измерительной сети и орографией местности и может достигать десятков километров.

Посты МУМК, обеспечивающие измерение энергических и спектральных параметров турбулентности в приземном слое (до 30 м), совместно с АМС, размещаемыми на БПЛА, позволят отработать методику определения типа стратификации и восстановления профилей метеорологических величин до высот 100–150 метров. Такие многоуровневые АМС могут также послужить основой для создания отечественной аэродромной системы типа LLWAS (Low Level Wind Shear Alert System) [15, 16] для регистрации приземных сдвигов ветровых потоков, влияющих на условия посадки самолетов.

Наличие в составе системы мониторинга мобильного измерительного комплекса позволяет, в определенных пределах, трансформировать конфигурацию измерительной сети, адаптируя ее к возникающей обстановке, а также выполнять контрольные измерения при апробации и испытании методик прогнозирования. Кроме того, мобильный вариант системы мониторинга может быть использован для решения ряда специальных задач, требующих использования подвижной сети измерительных станций. К таким задачам относится, например, контроль удаленной, не охваченной стационарной сетью, территории, на которой произошли природные или техногенный аварии.

Работа выполнялась в рамках базовых проектов СО РАН №№ VII.66.1.2, VIII.80.2.2, госзадания № IX.138.2.3, а также была поддержана Соглашением № 14.607.21.0030 от 05.06. 2014 (уникальный идентификатор ПНИ RFMEFI60714X0030) в рамках ФЦП ИР на 2014–2020 годы.

Список литературы

1. Автоматизированный ультразвуковой метеорологический комплекс АМК-03 / А. А. Азбукин, А. Я. Богушевич, В. С. Ильичевский, В. А. Корольков, А. А. Тихомиров, В. Д. Шелевой // Метеорология и гидрология. 2006. № 11. С. 89–97.

2. Экспедиционный метеорологический комплекс « ЭКСМЕТЕО-01» / А. А. Азбукин, А. Я. Богушевич, В. А. Корольков, А. А. Тихомиров, В. Д. Шелевой // Приборы и техника эксперимента. 2008. № 3. С. 163–164.

3. Бортовой метеорологический комплекс на базе многоцелевых гусеничных и колесных машин / А. А. Азбукин, А. Я. Богушевич, В. А. Корольков, А. А. Тихомиров, В. Д. Шелевой // Вестник академии военных наук. 2008. № 3 (24). С. 144–148.

4. Информационно-измерительная система для регионального мониторинга и прогноза опасных метеорологических явлений / В. Ю. Богомолов, А. Я. Богушевич, Е. П. Гордов, В. А. Корольков, В. Н. Крупчатников, А. А. Тихомиров // Оптика атмосферы и океана. 2011. Т. 24, № 1. С. 52–59.

5. Богушевич А. Я. Ультразвуковые методы оценивания метеорологических и турбулентных параметров атмосферы // Оптика атмосферы и океана. 1999. Т. 12, № 2. С. 170–175.

6. Богушевич А. Я., Корольков В. А., Тихомиров А. А. Некоторые результаты работы территориально-распределенной измерительной системы на основе сети постов ультразвуковых АМС // Метеорология и гидрология. 2015. № 10. С. 85–95.

7. Государственный экологический мониторинг в Москве [Электронный ресурс]. URL: http://www.mosecom.ru/about/mosecom (дата обращения: 10.03.2015).

8. Ипполитов И. И., Кабанов М. В., Смирнов С. В. Концепция сетевого мониторинга природно-климатических процессов в Сибири // Оптика атмосферы и океана. 2011. Т. 24, № 1. С. 7–14.

9. Определение микроструктурных характеристик жидких атмосферных осадков с помощью оптического осадкомера / В. В. Кальчихин, А. А. Кобзев, В. А. Корольков, А. А. Тихомиров // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28, № 7. С. 669–672.

10. Корольков В. А., Тельминов А. Е., Тихомиров А. А. АМС на БПЛА для измерения вертикальных профилей метеорологических и турбулентных характеристик атмосферы / Методологические аспекты развития метеорологии специального назначения, экологии систем аэрокосмического мониторинга // Сб. науч. ст. по материалам III всерос. науч.-практ. конф. (24–25 мая 2016 г.). Воронеж : ВУНЦ ВВС « ВВА» , 2016. С. 73–77.

11. Региональная информационно-измерительная система для непрерывного мониторинга атмосферного приземного слоя и прогноза опасных метеорологических явлений / А. А. Тихомиров, А. Я. Богушевич, В. А. Корольков, А. А. Кобзев // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2012. № 5. С. 398–405.

12. Информационно-вычислительная система для непрерывного эколого-метеорологического мониторинга атмосферного пограничного слоя / А. А. Тихомиров, А. Я. Богушевич, В. А. Корольков, А. Е. Тельминов // Методологические аспекты развития метеорологии специального назначения, экологии систем аэрокосмического мониторинга : сб. науч. ст. по материалам III всерос. науч.-практ. конф. (24–25 мая 2016 г.). Воронеж : ВУНЦ ВВС» ВВА» , 2016. С. 135–139.

13. Portable mercury gas analyzer with a lamp filled with natural mercury isotope mixture / A. I. Abramochkin, V. A. Korolkov, N. G. Mutnitsky, V. V. Tatur, A. A. Tikhomirov // Proc. of SPIE. 2015. Vol. 9680. P. 96803D-1÷96803D-4.

14. Petrov D. V., Matrosov I. I., Tikhomirov A. A. Raman gas analyzer applicability to monitoring of gaseous air pollution // Proc. of SPIE. 2015. Vol. 9880. P. 96803C-1÷96803C-5.

15. LLWAS Technology Servises. URL: http://llwas-technology.net/introduction/f/f-3/ (date of access: 19.12.2015).

16. URL: http://www.climatronics.com/pdf_pn/Systems/LLWAS %20Brochure.pdf (date of access: 19.12.2015).

УДК 551.501.7

Климатические изменения в тропо-стратосфере Северного полушария в современный период

Ю. П. Переведенцев (ypereved@kpfu.ru), К. М. Шанталинский, В. В. Гурьянов

Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань

Аннотация. Рассмотрены изменения характеристик температурного режима в слое атмосферы от 1000 до 0,1 гПа по данным реанализа. Показано, что в период 1979–2016 гг. в январе и июле в тропосфере температура растет, в стратосфере происходит охлаждение и в нижней мезосфере вновь наблюдается нагревание воздуха в летний период. В верхней стратосфере и нижней мезосфере наблюдаются наиболее выраженные долгопериодные циклические изменения температуры, в средней стратосфере отношения смеси озона.

Ключевые слова: изменения климата, тропосфера, стратосфера, температура воздуха, линейный тренд, отношение смеси озона.

Введение

Проблема глобальных и региональных изменений окружающей среды и климата стала в настоящее время как никогда актуальной в связи с усиливающимся влиянием различных факторов антропогенного и естественного происхождения. Глобальное потепление – одна из наиболее обсуждаемых экологических проблем [4]. По современным представлениям климат отражает физическое, химическое и биологическое состояние компонентов земной климатической системы (атмосферы, океана, суши, криосферы, биоты) и поэтому для понимания его изменчивости необходима оценка динамики их параметров [3]. По существу, понятие климатической системы становится сейчас адекватным понятию окружающей природной среды. Причем эволюция этой сложной самоорганизующейся системы определяется, с одной стороны, взаимодействием ее природных сред, а с другой стороны, непрерывным воздействием на нее человека. Поэтому те глобальные и региональные изменения, которые в последние годы происходят в окружающей среде, несомненно, должны найти отражение и в состоянии климата [8].

Современные измерительные и информационные технологии позволяют анализировать атмосферные процессы до больших высот. Здесь рассматриваются особенности термического режима в тропосфере, стратосфере и нижней мезосфере. Известно, что воздух в тропосфере нагревается от земной поверхности, в стратосфере нагревание происходит вследствие поглощения молекулами озона ультрафиолетовой радиации. И если в тропосфере тем-

пература воздуха понижается с высотой, то в стратосфере, наоборот, повышается, а в мезосфере снова понижается. Согласно [16], тропосфера, стратосфера и мезосфера имеют фундаментальные различия с точки зрения радиационного режима, вертикального распределения температуры, химического состава. В частности, в работе [10] исследована чувствительность состава и температуры стратосферы к вариациям спектральных потоков солнечной радиации, обусловленных 11-летним циклом солнечной активности. Вопросы стратосферно-тропосферного обмена рассмотрены в обзорной статье [5]. В ней отмечено, что через тропопаузу происходит постоянный обмен массой и энергией между тропосферой и стратосферой, что оказывает большое влияние на бюджеты атмосферной химии, энергии и глобальный климат. Важным параметром атмосферы и климатической системы в целом является вертикальный температурный градиент γ, характеризующий статическую устойчивость атмосферы. От величины γ зависят условия реализации бароклинной неустойчивости и тем самым циклонической активности в атмосфере [6]. В этой статье отмечается, что в условиях антропогенного потепления климата тропосфера нагревается, а стратосфера и мезосфера охлаждаются особенно сильно вблизи мезопаузы (80–90 км). В настоящей статье с использованием данных глобального реанализа ERA-Interim [12] о распределении температуры воздуха и отношении смеси озона в узлах регулярной сетки 2,5×2,5 ° на 26 изобарических поверхностях (от 1000 до 0,1 гПа) с месячным разрешением за период 1979–2016 гг. рассчитывался ряд термодинамических характеристик для января и июля, осредненных для территории всего Северного полушария (СП), полярной (90–65 ° с. ш.), умеренной (65–30 ° с. ш.) и тропической зон (30–0 ° с. ш.). Это дает возможность охарактеризовать атмосферу в целом как единую динамическую систему, управляемую внутренними и внешними факторами, отдельные слои которой, физически отличные друг от друга по характеру термической стратификации и энергетическим процессам, находятся в состоянии более или менее активного взаимодействия [7]. Это взаимодействие осуществляется посредством волнового механизма, с помощью которого возмущения метеорологических полей, обусловленные бароклинностью атмосферы, неоднородным нагревом подстилающей поверхности и орографией предаются вверх из тропосферы в стратосферу. В работе [2] представлены результаты успешного моделирования сложных динамических процессов в стратосфере с использованием климатической модели ИВМ РАН. В более ранних статьях авторов рассматривались пространственно-временные изменения в полях температуры, скорости ветра и атмосферного давления лишь в тропосфере [17, 18].

Результаты и их обсуждение

В табл. 1 представлено распределение по вертикали средних многолетних значений температуры воздуха Av (°C) и величины наклона линейных трендов A (°C/год) на 26 изобарических поверхностях. Осредненные данные по СП как для января, так и июля показывают понижение температуры Av с высотой в тропосфере, ее рост в стратосфере и вновь понижение в нижней мезосфере. В полярной зоне в январе обнаруживается инверсия температуры в нижней тропосфере. Отмечаются значительный годовой ход и весьма заметные зональные отличия в распределении температуры. Процесс изменения температуры со временем происходит неоднородно по вертикали. Об этом свидетельствуют коэффициенты наклона линейного тренда (A). В тропосфере происходит нагрев особенно интенсивный зимой в полярной зоне, где значения A достигают у земной поверхности величины 0,107 °C/год, в стратосфере наблюдается охлаждение ($A < 0$) наиболее выраженное в умеренной и тропической зонах, а в нижней мезосфере в целом по полушарию происходит нагрев ($A > 0$). Так, на уровне 3 гПа в январе величина A для СП достигает значения -0,118 °C/год, а в тропической зоне $A = –0,175$ °C/год. Однако в полярной зоне в январе в нижней мезосфере в отличие от тропической зоны температура заметно понижается. В целом распределение КНЛТ соответствует теории глобального потепления, однако между сезонами года и широтными зонами существуют заметные различия, обусловленные радиационными и динамическими факторами.

В частности похолодание лучше выражено в летней стратосфере, чем в зимней (рис. 1), что свидетельствует о снижении вертикальных связей между уровнями посредством

волновой активности и отсутствием в этот период характерных для зимы стратосферных потеплений, способствующих быстрому нагреву полярных областей. Анализ показывает, что в летний сезон на больших высотах процессы протекают более однородно и сказывается роль озонового слоя, благодаря которому происходит сильный нагрев воздушных масс в средней стратосфере. Как видно из рис. 1, тренды температуры меняют свой знак по вертикали.

В работе [1] отмечено, что увеличение концентрации парниковых газов приводит к снижению температуры стратосферы и как следует из анализа ракетных, спутниковых и баллонных измерений это снижение составляет до 1,5 °С за 10 лет в верхней стратосфере и нижней мезосфере. Согласно полученным нами данным, представленных в табл. и рис. 1, наблюдается определенное согласование расчетных и экспериментальных оценок в указанных слоях атмосферы.

О том, насколько между собой связаны процессы, происходящие в различных слоях атмосферы, можно судить по характеру поведения коэффициента корреляции, рассчитанного между уровнями в поле температуры воздуха. Анализ полученных результатов показывает, что в январе в полярной зоне на всех уровнях в слое 1000–0,1 гПа устанавливаются тесные связи, коэффициент корреляции r>0,9 в слое 1000–5 гПа за исключением слоя 400–300 гПа, где r=0,743. Теснота связей слегка снижается в верхней стратосфере – нижней мезосфере. В июле коэффициенты корреляции заметно уступают январским, особенно на стратомезосферных уровнях, что свидетельствует о расслоении атмосферы. Так, слабо связаны между собой изменения температуры между уровнями 10 и 7 гПа (r=0,268), 5 и 3 гПа (r=0,076), в верхней стратосфере и нижней мезосфере. В это время важную роль в термическом режиме играет озоновый слой, а динамическое перемешивание не столь выражено (ослабление вертикального волнового взаимодействия). В умеренных широтах в январе несколько снижается связь в слоях 250–200 (r=0,793), 150–100 (r=0,671), 2–1 гПа (r=0,716), в июле в тропосфере коэффициенты корреляции имеют высокие значения за исключением слоев 200–150 гПа (r=0,615) – тропопауза; 0,29–0,1 гПа (r=0,474) стратопауза. Следовательно, вертикальные корреляционные связи в июле в полярной зоне имеют более сложную структуру, а в умеренной зоне в июле связи заметно ослабевают в переходных слоях: на тропопаузе и стратопаузе. Анализ корреляционных связей в январе по вертикали в целом для СП показывает, что в тропосфере связи высокие, наблюдается резкое их ослабление между 100 и 70 гПа (r=0,040), что можно объяснить лишь процессами в тропической зоне. Наблюдается усиление связи в верхней стратосфере – нижней мезосфере. В июле связи высокие в тропосфере, в слое 200–150 гПа r=0,773; 150–100 гПа r=0,496; 100–70 гПа r=0,740, т. е. в нижней стратосфере корреляционные связи ослабевают. В верхней стратосфере выделяется слой 2–1 гПа, где r=0,417, затем 0,29–0,1 гПа, где r=0,575. В целом связи достаточно высокие, понижения обусловлены физическими различиями между слоями и сезонной перестройкой в метеорологических полях.

Следует отметить, что изучение взаимодействия между слоями проводилось авторами и ранее [13] только для более короткого периода (1986–1999 гг.) и с использованием спектрального подхода. Была исследована волновая структура зональной циркуляции в тропостратосфере и верхней мезосфере-нижней термосфере для спектрального интервала с временными масштабами планетарных волн (2–30 суток). Для установления взаимосвязей между слоями были получены когерентные волновые структуры и показана их зависимость от сезона, межгодовой изменчивости и высоты.

Таблица

Средние многолетние значения температуры Av (°C) и величины коэффициентов наклона линейных трендов A (°C/год) на 26 изобарических поверхностях за период с 1979 по 2016 г.

P, гПа	Январь								Июль							
	Северное полушарие		Полярная Зона СП		Умеренная Зона СП		Тропическая Зона СП		Северное полушарие		Полярная Зона СП		Умеренная Зона СП		Тропическая Зона СП	
	Av, °C	A, °C/год	Av, °C	A, °C/год	Av, °C	A, °C/год	Av, °C	A, °C/год	Av, °C	A, °C/год	Av, °C	A, °C/год	Av, °C	A, °C/год	Av, °C	A, °C/год
1000	9,82	0,024	-20,52	0,107	-0,60	0,026	22,63	0,012	22,23	0,020	4,46	0,025	19,54	0,028	26,89	0,013
925	6,19	0,023	-19,23	0,078	-3,77	0,026	17,95	0,012	18,63	0,023	3,86	0,047	16,38	0,031	22,53	0,012
850	3,48	0,020	-19,65	0,059	-5,87	0,024	14,41	0,011	15,18	0,021	1,67	0,038	12,97	0,028	18,86	0,013
700	-3,20	0,020	-24,88	0,052	-12,33	0,021	7,37	0,014	6,63	0,018	-5,73	0,028	4,19	0,022	10,35	0,013
600	-9,93	0,016	-30,77	0,044	-18,98	0,018	0,45	0,011	-0,83	0,016	-12,22	0,021	-2,97	0,023	2,50	0,009
500	-18,32	0,015	-38,69	0,041	-27,59	0,017	-7,83	0,010	-9,12	0,013	-20,59	0,023	-11,63	0,023	-5,46	0,004
400	-29,28	0,019	-48,65	0,038	-38,53	0,016	-18,94	0,018	-20,05	0,020	-32,15	0,025	-23,00	0,022	-15,94	0,017
300	-42,65	0,023	-58,70	0,045	-50,60	0,018	-33,85	0,025	-34,99	0,027	-45,55	0,029	-37,97	0,027	-31,06	0,027
250	-49,36	0,022	-61,20	0,051	-54,98	0,018	-43,07	0,020	-43,54	0,024	-48,24	0,018	-45,90	0,024	-40,93	0,025
200	-55,19	0,014	-61,06	0,042	-56,16	0,014	-53,57	0,010	-51,59	0,011	-44,46	-0,013	-51,28	0,013	-52,82	0,012
150	-61,39	0,015	-61,70	0,052	-56,34	0,013	-65,54	0,011	-60,08	0,004	-44,02	-0,012	-55,05	0,005	-66,45	0,006
100	-69,23	0,019	-64,75	0,091	-59,22	0,005	-78,17	0,021	-66,52	-0,005	-44,91	-0,009	-58,29	-0,013	-76,33	0,003
70	-68,72	-0,016	-67,00	0,108	-60,19	-0,005	-76,06	-0,042	-62,61	-0,033	-44,35	-0,019	-56,86	-0,026	-69,89	-0,041
50	-64,40	-0,026	-68,48	0,120	-59,88	-0,009	-67,59	-0,060	-57,88	-0,040	-43,86	-0,026	-53,95	-0,032	-63,07	-0,048
30	-59,45	-0,018	-68,69	0,155	-58,49	-0,009	-58,98	-0,049	-52,07	-0,029	-42,95	-0,027	-49,62	-0,030	-55,36	-0,029
20	-55,81	-0,006	-66,23	0,155	-56,51	-0,002	-53,82	-0,032	-47,41	-0,017	-40,22	-0,023	-45,31	-0,025	-50,14	-0,010
10	-49,00	0,002	-59,14	0,147	-50,89	0,016	-46,03	-0,030	-39,62	-0,015	-31,90	-0,006	-37,14	-0,021	-42,74	-0,012
7	-43,24	-0,047	-52,45	0,066	-45,01	-0,030	-40,51	-0,077	-34,75	-0,006	-26,87	0,065	-32,02	0,016	-38,11	-0,034
5	-36,87	-0,103	-46,02	-0,013	-38,69	-0,073	-34,10	-0,140	-28,83	-0,029	-21,73	0,111	-26,24	0,029	-31,95	-0,096
3	-28,36	-0,118	-38,82	-0,089	-31,21	-0,054	-24,55	-0,175	-18,03	-0,094	-7,25	-0,028	-14,51	-0,063	-22,43	-0,128
2	-22,84	-0,077	-34,19	-0,140	-27,35	-0,046	-17,53	-0,094	-11,33	-0,071	4,38	-0,064	-7,38	-0,090	-16,77	-0,056
1	-16,76	0,014	-26,33	-0,098	-22,50	-0,023	-10,67	0,060	-6,85	0,054	9,67	-0,008	-3,98	0,046	-11,49	0,068
0,8	-15,54	0,037	-23,72	-0,074	-21,14	-0,010	-9,76	0,091	-7,04	0,082	8,13	0,006	-4,60	0,085	-11,15	0,090
0,51	-15,68	0,072	-19,15	-0,040	-19,47	0,023	-12,06	0,129	-12,18	0,113	-0,34	0,047	-10,39	0,113	-15,29	0,122
0,29	-21,93	0,087	-19,08	-0,029	-22,82	0,041	-21,59	0,142	-24,69	0,106	-17,70	0,088	-24,30	0,078	-25,97	0,131
0,1	-36,66	0,043	-26,68	-0,090	-34,44	-0,001	-39,87	0,098	-49,00	0,030	-55,90	0,002	-51,25	-0,032	-46,18	0,086

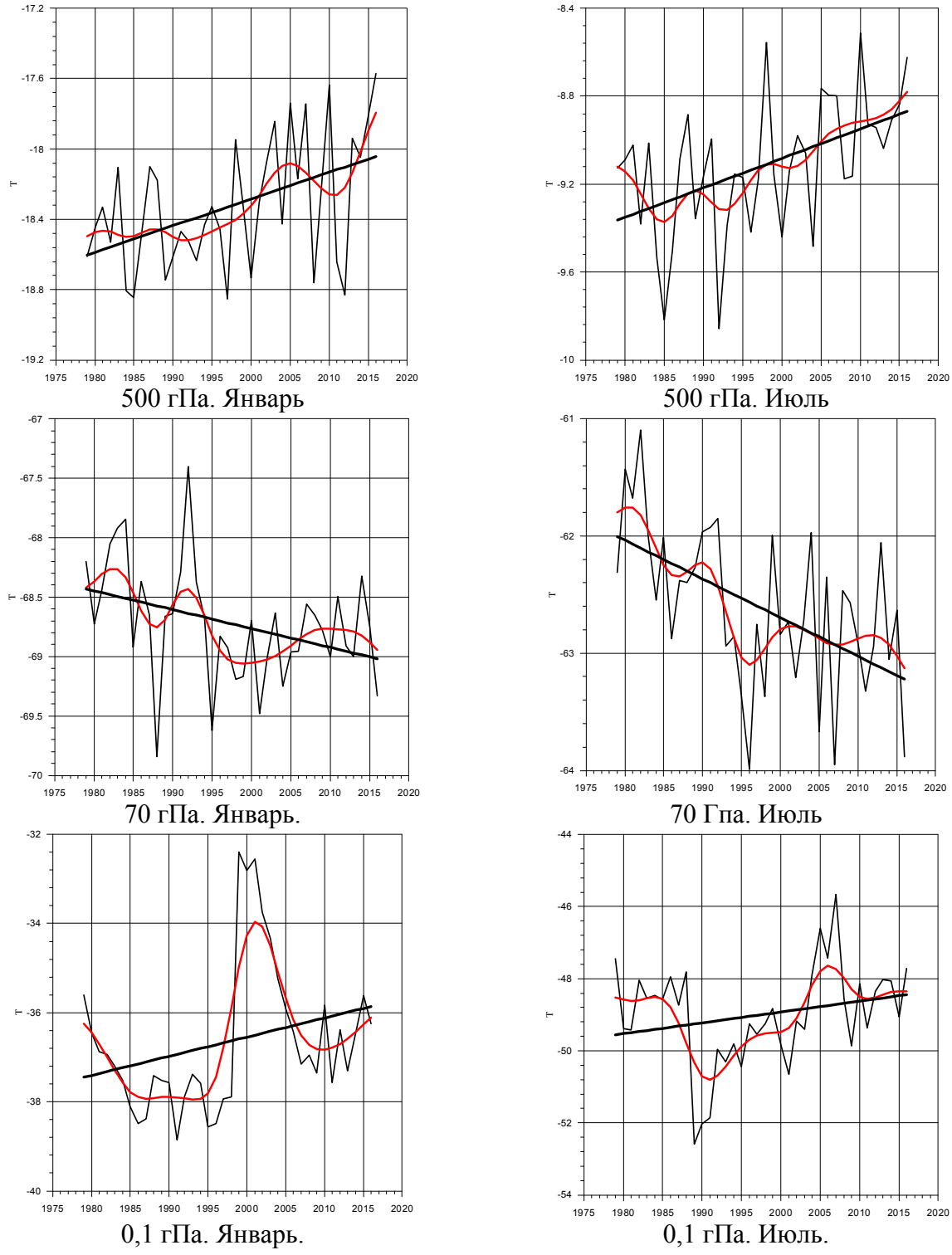


Рис. 1. Многолетний ход температуры воздуха осредненной по Северному полушарию на уровнях 500, 70 и 0,1 гПа. Исходный ряд, линейный тренд, низкочастотная компонента (НЧК) с периодом более 10 лет

Оценка воздействия отдельных циркуляционных мод – северо-атлантического колебания (САК), арктической осцилляции (АО), скандинавского колебания (СК) и др. на приповерхностную температуру внетропических широт СП с помощью композитного анализа позволил выявить регионы значимого отклика. Так, отепляющее влияние САК наиболее велико в зимний период на территории Центральной и Восточной Европы и в Средней Сибири, Арктическое колебание максимально проявляется в поле температуры в Восточной Европе и в Сибири, а Скандинавское колебание приводит к значительному понижению температуры воздуха в январе в Восточной Европе, Западной и Средней Сибири [9].

Анализ высотно-временных разрезов первых разностей низкочастотных компонент (НЧК) с периодом более 10 лет температуры воздуха (ТВ) (°С/год) в январе, июле и по годовым данным показал в 1979–2016 гг. следующее (рис. 2). В тропосфере отмечается наиболее устойчивая картина. Начиная с 1994 г. Наблюдается устойчивый (достаточно слабый) рост ТВ (0,1 °С/год). Правда, в январе в 2006–2010 гг. отмечалось слабое падение ТВ (-0,1 °С/год). На стратосферных уровнях рассматриваемые величины в определенные временные периоды меняют свой знак и отрицательные разности достигают в январе в слое 15–30 км значений -0,2 °С/год. Начиная с 30 км и выше в январе перепады усиливаются, а начиная с высоты 45 км, происходит чередование отрицательных и положительных очагов смены знака разностей НЧК. Сильное потепление отмечается в слое 45 км и выше в период 1995–2001 гг., когда в январе величина первых разностей НЧК превосходила 1,2 °С/год, при этом основной максимум располагался в толще 45–65 км, в июле в диапазоне 45–57 км (0,9 °С/год). В январе отмечается ~ 8-летняя цикличность рассматриваемого параметра: 1980–1988 гг. – похолодание, 1994–2002 гг. – потепление, 2002–2008 гг. – похолодание. Следовательно, верхняя стратосфера и нижняя мезосфера отличаются неустойчивым характером температурного режима по сравнению с тропосферой.

Аналогичная работа была выполнена по озону, где в качестве характеристики его содержания была взята величина – отношение смеси озона. Выявилось, что основные межгодовые изменения этой величины происходят в слое 20–45 км (рис. 3). При этом, если наибольшая динамика для температуры воздуха отмечается зимой, то для озона летом. Известно, что в стратосфере при поглощении озоном ультрафиолетовой радиации происходит выделение тепла, кроме того, озон поглощает длинноволновую радиацию, поступающую от земной поверхности [11; 14; 15].

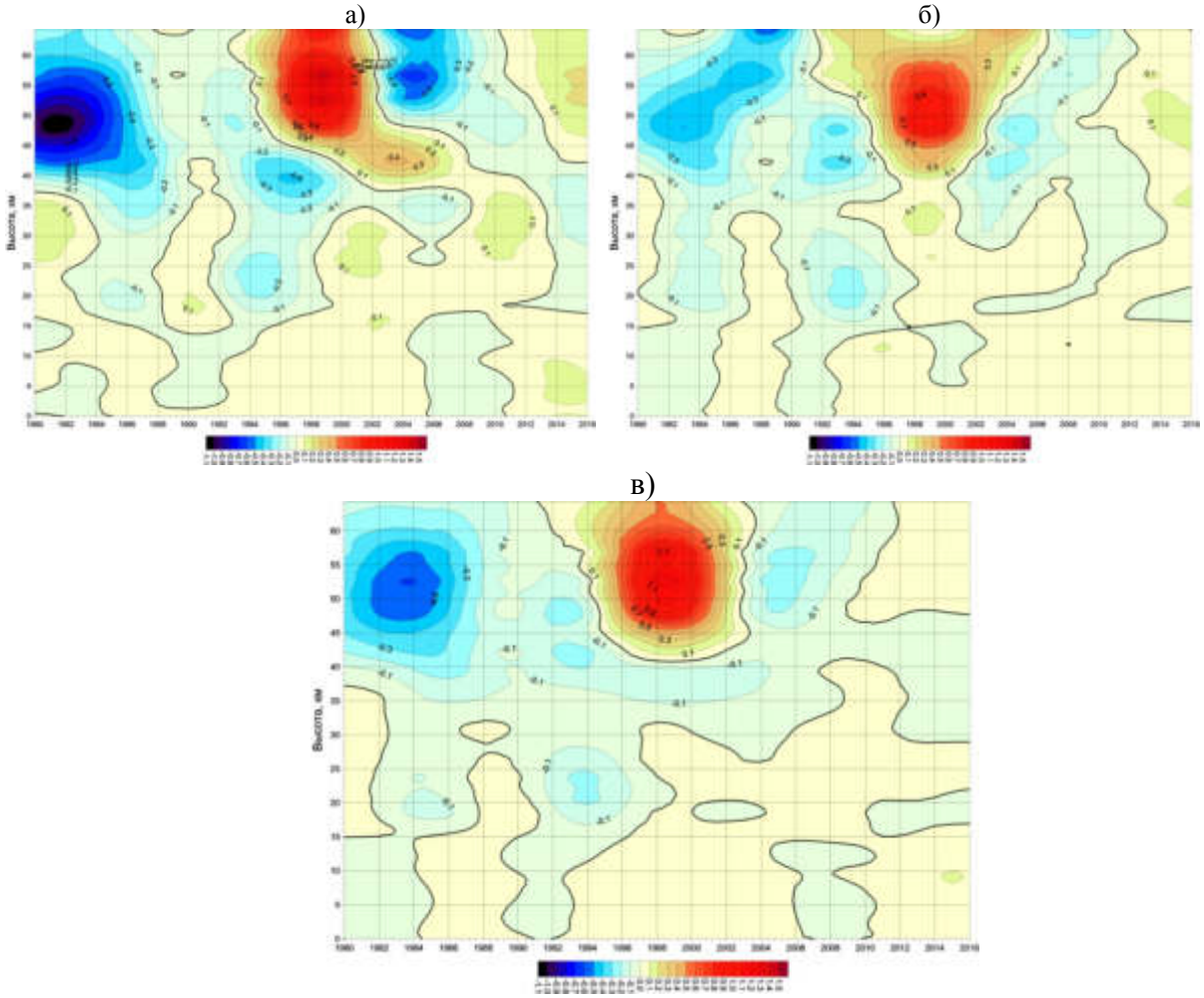


Рис. 2. Первые разности НЧК с периодом более 10 лет температуры воздуха Северного полушария (°С/год): а – январь, б – июль, в – год

Выводы

1. Данные реанализа ERA-Interim объективно отражают основные закономерности динамики основных климатических показателей в толще атмосферы до высоты 64 км.

2. Отмечается значительная пространственно-временная неоднородность в распределении термических характеристик, обусловленных различием физических механизмов, регулирующих термический режим в слоях атмосферы.

3. Происходит чередование знака коэффициента наклона линейного тренда температуры воздуха по вертикали, в соответствии с теорией глобального потепления климата.

4. В верхней стратосфере и нижней мезосфере (45–60 км) отмечаются очаги роста или понижения температуры с цикличностью в 8 лет. В озоносфере аналогичный процесс протекает ниже – в слое 25–40 км.

5. Для получения более полной картины изменения температурного режима атмосферы необходимо привлечение данных о циркуляции атмосферы в ее различных слоях, геофизических параметрах, включающих солнечную и геомагнитную активность, неравномерное вращение Земли.

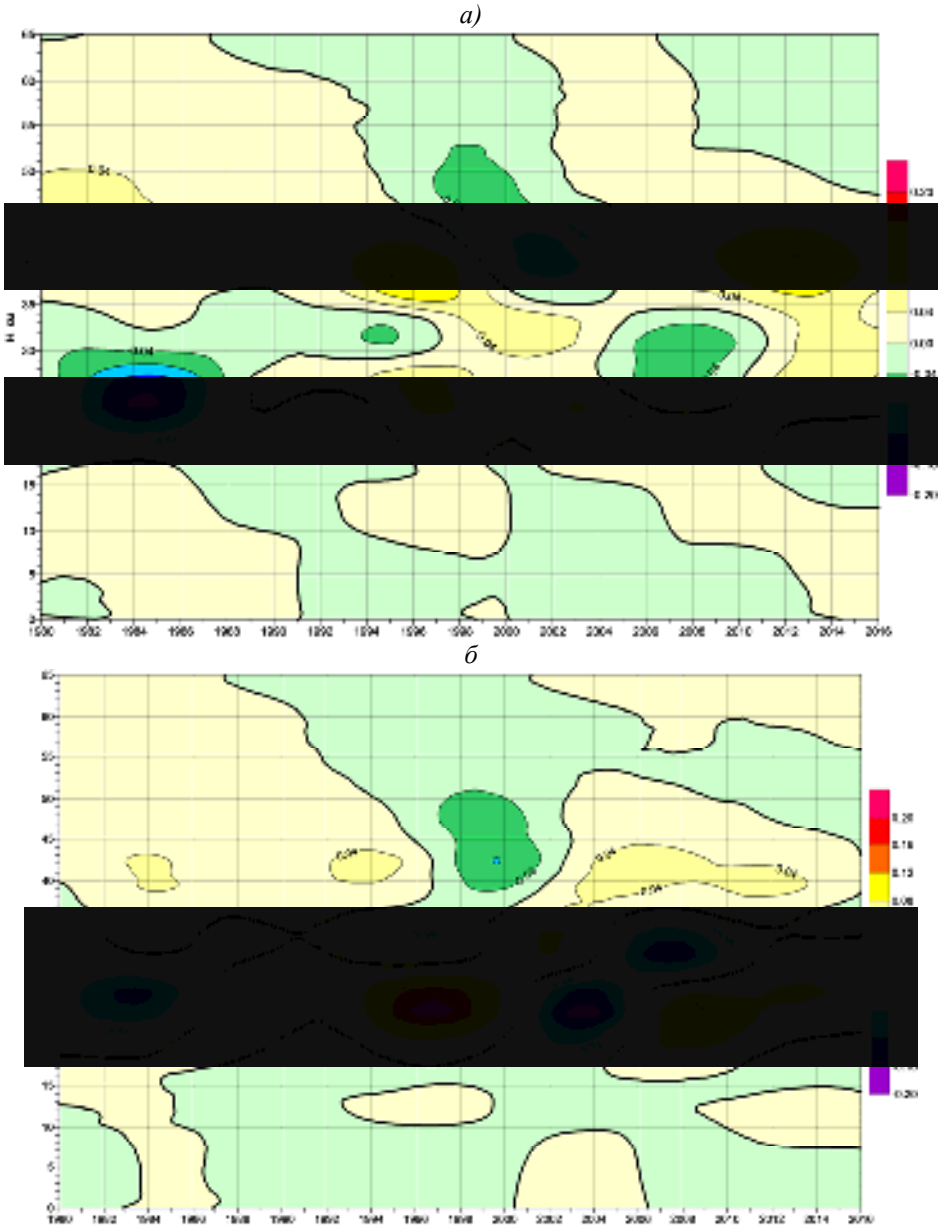


Рис. 3. Первые разности НЧК с периодом более 10 лет отношения смеси озона (10^{-6}/год) Северного полушария: а – январь, б – июль

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 18–05–00721).

Список литературы

1. О стратосферно-тропосферных взаимодействиях / П. Н. Варгин, Е. М. Володин, А. Ю. Карпечко, А. И. Погорельцев // Вестн. РАН. 2015. Т. 85, № 1. С. 39–46.

2. Варгин П. Н., Володин Е. М. Анализ воспроизведения динамических процессов в сратосфере климатической моделью ИВМ РАН // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52, № 1. С. 3–18.

3. Груза Н. В., Ранькова Э. Я. Наблюдаемые и ожидаемые изменения климата России: температура воздуха. Обнинск : ВНИИГМИ-МЦД, 2012. 194 с.

4. Замолодчиков Д. Г. Естественная и антропогенная концепции современного потепления климата // Вестник РАН. 2013. Т. 83, № 3. С. 227–235.

5. Иванова А. Р. Стратосферно-тропосферный облик и его некоторые особенности во внетропических широтах // Метеорология и гидрология. 2016. № 3. С. 22–45.

6. Мохов И. И., Акперов М. Г. Вертикальный температурный градиент в тропосфере и его связь с приповерхностной температурой по данным реанализа // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2006. Т. 42, № 4. С. 467–475.

7. Переведенцев Ю. П. Циркуляционные и энергетические процессы в средней атмосфере. Казань : Изд-во Казан. ун-та, 1984. 167 с.

8. Переведенцев Ю. П., Шанталинский К. М. Динамика тропо- и стратосферы и изменений современного климата // Фундам. и прикл. климатология. 2015. № 1. С. 205–225.

9. Переведенцев Ю. П., Вильфанд Р. М., Шанталинский К. М. Низкочастотные изменения атмосферного давления и приповерхностной температуры во внетропических широтах Северного полушария // Труды Гидрометцентра России. 2016. Вып. 360. С. 5–25.

10. Исследование чувствительности состава и температуры стратосферы к вызванной 11-летним циклом солнечной активности изменчивости спектральных потоков солнечной радиации / С. П. Смышляев, В. Я. Галин, П. А. Блакитная, А. К. Лемищенко // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52, № 1. С. 19–36.

11. Barnett J. J., Chandra S. COSPAR International Reference Atmosphere Grand Mean // Adv. Space Res. 1990. Vol. 10, N 12. P. 7–10.

12. The ERA-Interium reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system / D. P. Dee [et al.] // Q. J. R. Meteorol. Soc. 2011. N 137. P. 552–597.

13. Dynamical processes and correlations at midlatitudes in the power and middle atmosphere / A. N. Fahrutdinova, Y. P. Perevedentsev, V. V. Guryanov, V. V. Kulikov // Adv. Space Res. 2001. Vol. 27, N 10 P. 1667–1672.

14. Climatology of the SKYHI troposphere – stratosphere – mesosphere general circulation model / K. Hamilton, John Wilson R., J. D. Mahlman, L. J. Umscheid // J. Atmos. Sci. 1995. Vol. 52, N 1. P. 5–43.

15. Holton J. R., Wehrbein W. M. A numerical model of the zonal mean circulation of the middle atmosphere // Pure Appl. Geophys. 1980. Vol. 118, N 1. P. 284–306.

16. Mohanakumar K. Stratosphere-troposphere Interactions. Springer, 2008. 416 p.

17. Perevedentsev Y. P., Shantalinskii K. M. Estimation of contemporary observed variations of air temperature and wind speed in the troposphere of the Northern Hemisphere // Russian Meteorology and Hydrology. 2014. Vol. 39, Iss. 10. P. 650–659.

18. Long-term variations in surface air pressure and surface air temperature in the northern hemisphere midlatitudes / Y. P. Perevedentsev, A. A. Vasilev, K. M. Shantalinskii, V. V. Guryanov // Russian Meteorology and Hidrology. 2017. Vol. 42, Iss. 7. P. 461–470.

УДК 501.509.5

Сравнительная оценка краткосрочного прогноза осадков в холодный период года на Урале по модели WRF разных версий

Е. В. Пищальникова[1,2] (sinoptik. perm@yandex.ru),
Н. А. Калинин[2] (kalinin@psu.ru), А. Н. Шихов[2] (and3131@inbox.ru),
А. В. Быков (blexx256@yandex.ru)[2]

[1] Пермский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, Пермь
[2] Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

Аннотация. Рассматривается применение мезомасштабной модели WRF разных версий для прогнозирования осадков разной интенсивности в холодное время года на Урале в марте 2016 года. Выполнена оценка успешности численного прогноза при разной заблаговременности и в зависимости от типа барического поля. Установлено, что модель WRF версии 3.6.1 стала более точно рассчитывать сумму осадков при выпадении сильных снегопадов на Урале.

Ключевые слова: модель WRF, сильный снегопад, численный прогноз, Урал.

Введение

Прогноз осадков, выполненный с помощью гидродинамических моделей атмосферы, является неотъемлемой частью прогностической практики синоптиков на местах. Правильная интерпретация полученного модельного результата зачастую определяет качество оперативного краткосрочного прогноза не только общего назначения, но и опасных природных явлений. Известно, что численные прогнозы осадков сроком до трех суток связаны с крупными синоптическими системами являются достаточно надежными, особенно в холодный период года [7].

К числу наиболее распространенных инструментов моделирования атмосферных процессов относится мезомасштабная модель WRF. Изучение случаев возникновения опасных явлений погоды в холодный период года с помощью данной модели можно найти в работах [11–13, 15, 16]. Для территории России исследованы возможности модели WRF на примере отдельных случаев возникновения осадков в твердом виде [1, 2, 3, 6].

В настоящей работе представлены результаты прогноза осадков на территории Урала в марте 2016 г. с использованием модели WRF разных версий. Оценка качества прогнозов осадков выполнена по совокупности параметров, рекомендованных РД 52.27.284–91 [8] и РД 52.27.724–2009 [9]. Для оценки качества прогноза сильных снегопадов (6–19 мм/12 ч) дополнительно рассчитывались число ложных тревог и пропусков явления.

Материалы и методы исследования

В работе представлены результаты оценки численного прогноза осадков разной интенсивности (от небольшой до сильной) по модели WRF, установленной на вычислительном кластере « ПГУ-Тесла» научно-образовательного центра « Параллельные и распределенные вычисления», двух версий: 3.2.1 и 3.6.1.

Модель WRF версии 3.2.1. Расчет выполнялся на 32 вертикальных уровнях, период моделирования составлял 48 ч, временной шаг вывода данных – 3 ч, пространственное разрешение модели – 10 км (200×200 точек). Схемы параметризации подсеточных процессов:

– микрофизика облачности – схема Томпсона;
– длинноволновая радиация – схема RRTM;
– коротковолновая радиация – схема Дудья;
– приземный слой – схема Меллора – Ямады – Янича;
– подстилающая поверхность и почва – схема NOAH;
– пограничный слой – схема университета Енсей;
– конвекция – схема Грелла – Девени.

Модель WRF версии 3.6.1. Данная версия была установлена с целью настройки и адаптации модели к условиям Среднего Урала и дальнейшего переноса ее на вычислительный кластер с гибридной архитектурой « ПГНИУ-Кеплер» научно-образовательного центра « Параллельные и распределенные вычисления» . Настройки модели отличаются от прежней версии следующим: число вертикальных уровней доведено до 42, пространственное разрешение составило 9 км (224×224 точек) и 4 км (400×400 точек), временной шаг вывода данных – 1 ч. Изменена схема параметризации приземного слоя на схему Монина-Обухова с вязким подслоем Карлсона-Боланда и стандартными функциями подобия, которая рекомендована руководством по экспликации модели. Вместо параметризации конвекции производилось ее прямое моделирование, а сама модель переведена в негидростатический режим.

В качестве исходных данных для обеих версий модели использовался прогноз модели GFS и реанализ климатической модели CFS в коде GRIB2. Для дальнейшего анализа использовались результаты счета на срок 15 и 27 ч от начала прогноза (0 ч ВСВ), чтобы обеспечить совпадение со сроками измерения выпавших осадков на метеостанциях.

Для оценки достоверности прогноза осадков по модели были использованы данные с 53 метеостанций, расположенных на территории Пермского края, Республики Удмуртия, Свердловской и Кировской областей. Сравнение модельных и фактических значений сумм осадков проводилось на полусуточном интервале. Модельные значения осадков для каждой метеостанции были получены путем интерполяции между узлами модельной сетки.

Результаты численного прогноза снегопадов разной интенсивности

Сопоставление оправдываемости осадков в марте 2016 года, полученных на основе модели WRF разных версий, по Наставлению (OPR) [14] (табл. 1), позволяет отметить повышение качества прогностических данных. Существенно лучше модель WRF версии 3.6.1 стала рассчитывать сумму осадков с заблаговременностью 27 ч – так, средняя оправдываемость с 54,9 % увеличилась до 78 %. При времени интегрирования на 15 ч средняя оправдываемость осадков увеличилась до 75,2 %.

Таблица 1

Успешность прогноза осадков по модели WRF разных версий (3.2.1/3.6.1)

Показатели успешности	Заблаговременность прогноза, ч	
	15	27
OPR	62,3 / 75,2	54,9 / 78,0
U	54,4 / 64,0	50,9 / 52,1
$U_о$	53,7 / 60,5	50,9 / 51,4
$U_{бо}$	75,6 / 84,7	53,3 / 56,7
$П_о$	98,6 / 96,0	99,1 / 88,2
$П_{бо}$	4,9 / 26,3	1,1 / 15,6
δ	0,24 / 0,23	0,24 / 0,14
σ	1,18 / 1,16	2,19 / 2,15
$P_{<3}$	95,7 / 95,9	97,1 / 99,1
$N_{лт}$	27 / 14	45 / 37
$N_{пя}$	7 / 6	23 / 17

Общая оправдываемость прогнозов (U), которая учитывает факт наличия/отсутствия осадков, по обеим версиям модели весьма низкая. Тем не менее, при переходе к новой версии модели отметилось увеличение процента успешных прогнозов, особенно при заблаговременности на 15 ч. Также отметим, что в целом увеличился процент успешных прогнозов как отсутствия осадков ($U_{бо}$), так и их наличия ($U_о$). При этом крайне низкой остается предупрежденность прогноза отсутствия осадков ($П_{бо}$). Таким образом, проблема завышения площади распространения осадков остается не решенной.

Вне зависимости от заблаговременности прогноза осадков величины среднеквадратичной (σ) и абсолютной (δ) ошибок уменьшились, что свидетельствует о повышении количественной точности модельных данных. Также этот факт подтверждается возрастанием надежности количественного прогноза осадков ($P_{<3}$) до 2 %.

Важно отметить, что модель WRF версии 3.6.1 стала более точно рассчитывать сумму осадков при выпадении сильных снегопадов на Урале, что проявилось в уменьшении числа ложных ($N_{лт}$) тревог и пропусков явления ($N_{пя}$).

Точность прогноза осадков по мезомасштабным моделям атмосферы зависит не только от параметризации физических процессов и пространственного разрешения [4; 5; 10], но и от синоптической обстановки, учет которой позволяет устранить часть неопределенностей выходной продукции, вызванных несовершенством параметризации. В данной работе в качестве наиболее простого и понятного параметра, учитывающего синоптическое положение пункта прогноза, используется приземное барическое поле. Так, в табл. 2 представлены показатели успешности прогноза осадков в марте 2016 г. в зависимости от типа барического поля.

Сравнивая показатели успешности прогноза осадков по модели WRF при разных типах барических полей можно отметить следующее:

– повышение качества прогностических данных при переходе к новой версии модели в целом;

– наиболее высокие оправдываемости прогноза осадков (OPR, U и U_o) наблюдаются при циклоническом поле с заблаговременностью 15 ч;

– самая низкая предупрежденность прогноза отсутствия осадков ($П_{бо}$) отмечается при малоградиентном поле с заблаговременность 27 ч, и при переходе к новой версии модели данный показатель ухудшился,

– надежность количественного прогноза осадков ($P_{<3}$), полученного по новой версии модели, возросла, особенно для циклонических полей при времени интегрирования 27 ч.

Сильные снегопады выпадали на территории Урала в марте 2016 года при циклоническом и антициклоническом полях. Тем не менее, модель WRF обеих версий прогнозирует формирование сильного снегопада при малоградиентном поле с заблаговременностью 27 ч. Как правило, в малоградиентном поле обнаруживается фронтальный раздел. Можно предположить, что модель переоценивает роль орографии, ошибочно локализуя зону сильных осадков в Предуралье.

Таблица 2

Оценка качества прогноза осадков по модели WRF разных версий (3.2.1/3.6.1) в зависимости от типа барического поля

Показатели успешности	Тип приземного барического поля					
	малоградиентное		циклоническое		антициклоническое	
	Заблаговременность прогноза, ч					
	15	27	15	27	15	27
OPR	67,9 / 73,6	55,2 / 55,5	79,4 / 79,7	64,4 / 69,7	69,9 / 75,9	59,5 / 62,7
U	38,5 / 49,7	31,3 / 33,7	76,5 / 80,8	69,9 / 70,3	50,0 / 60,1	38,4 / 44,8
U_o	26,6 / 34,5	30,9 / 33,6	80,4 / 83,5	69,9 / 75,3	45,7 / 48,0	37,7 / 37,9
$U_{бо}$	91,8 / 72,2	100,0 / 50,0	16,3 / 52,5	—* / 34,6	86,3 / 94,4	58,8 / 69,2
$П_o$	93,6 / 64,8	100,0 / 99,0	93,7 / 94,9	100,0 / 89,3	96,6 / 96,0	96,5 / 81,1
$П_{бо}$	21,8 / 42,6	0,9 / 0,5	5,1 / 23,3	0,0 / 16,1	15,9 / 39,1	3,0 / 24,1
δ	0,12 / 0,08	0,73 / 0,73	0,35 / 0,38	0,04 / 0,34	0,06 / 0,10	0,23 / 0,16
σ	0,57 / 0,43	1,94 / 1,95	1,55 / 1,53	2,76 / 1,53	0,06 / 0,79	0,23 / 1,61
$P_{<3}$	99,7 / 99,7	91,2 / 91,3	94,8 / 94,8	86,8 / 90,0	98,4 / 98,5	94,7 / 95,0
$N_{лт}$	0 / 0	16 / 11	25 / 13	19 / 17	2 / 1	10 / 8
$N_{пя}$	0 / 0	0 / 0	6 / 5	20 / 14	1 / 1	3 / 3
Примечание:* – расчет не производился, так как модель не прогнозировала отсутствие осадков						

Выводы

Переход на новую версию модели WRF имеют большую практическую значимость, так как позволяет выпускать более точный прогноз осадков в холодное время года, особенно сильной интенсивности.

Список литературы

1. Бычкова В. И., Рубинштейн К. Г. Предварительные результаты испытания алгоритма краткосрочного прогноза метелей // Метеорология и гидрология. 2013. № 6. С. 30–42.

2. Гончуков Л. В., Ламаш Б. Е. Численный прогноз опасных явлений погоды по северу Приморского края // Вестник Дальневосточного отделения РАН, 2010. № 6. С. 17–23.

3. Калинин Н. А., Попова Е. В. Численный прогноз опасных и неблагоприятных снегопадов в Пермском крае 15–16 марта 2013 года // Учен. зап. РГГМУ. СПб. : Изд. РГГМУ, 2013. № 32. С. 7–17.

4. Калинин Н. А. Мониторинг, моделирование и прогноз состояния атмосферы в умеренных широтах. Пермь : Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2015. 308 с.

5. Оценка качества прогноза очень сильного снегопада на Урале с помощью модели WRF / Н. А. Калинин, А. Л. Ветров, Е. В. Пищальникова, Е. М. Свиязов, А. Н. Шихов // Метеорология и гидрология. 2016. № 3. С. 55–62.

6. Оценка качества прогноза динамики атмосферы в Сибирском регионе мезомасштабной моделью WRF-ARW / Ю. В. Мартынова, Р. Б. Зарипов, В. Н. Крупчатников, А. П. Петров // Метеорология и гидрология. 2014. № 7. С. 14–24.

7. Методический кабинет Гидрометцентра России [Электронный ресурс]. URL: http://method.meteorf.ru (дата обращения: 7.08.2017).

8. Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов. РД № 52.27.284–91 / Ком. Гидрометеорологии при Кабинете министров СССР. М., 1991. 149 с.

9. Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). Руководящий документ РД 52. 27. 724–2009. Обнинск : ИГ-СОЦИН, 2009. 62 с.

10. Прогноз сильного и очень сильного снегопада на Урале на основе модели WRF / Е. В. Пищальникова, Н. А. Калинин, А. Л. Ветров, А. Н. Шихов, Е. М. Свиязов, А. В. Быков // Тр. ГМЦ. 2016. № 359. С. 58–72.

11. Торопов П. А., Шестакова А. А. Оценка качества моделирования новороссийской боры с помощью модели WRF-ARW // Метеорология и гидрология. 2014. № 7. С. 38–51.

12. Ширяев М. В., Рубинштейн К. Г. Прогноз категорий опасности метеорологических явлений // Труды Гидрометцентра России. 2012. Вып. 347. С. 144–158.

13. Numerical diagnosis of a heavy snowfall event in the center of the Iberian Peninsula / E. Gascón, J. L. Sanchez, D. Charalambous, S. Fernández-González, L. Lopez, E. Garcia-Ortega, A. Merino // Atmos. Res. 2015. Vol. 153. P. 250–263.

15. On the dynamics, thermodynamics, and forecast model evaluation of two snow-burst events in Southern Alberta / S. M. Milrad, J. R. Gyakum, K. Lombardo, E. H. Atallah // Wea. Forecasting. 2014. Vol. 29, N 3. P. 725–749.

16. An exceptionally heavy snowfall in Northeast china: Large-scale circulation anomalies and hindcast of the NCAR WRF model / H. Wang, E. Yu, S. Yang // Meteorol. and Atmos. Phys. 2011. Vol. 113, Iss. 1. P. 11–25.

УДК 581.526.32 5

Параметризация внутрисуточных, внутригодовых и межгодовых колебаний характеристик гидрологического и экологического режима долинного водохранилища

К. К. Эдельштейн (EdelsteinKK emek05@mail.ru),
Ю. С. Даценко (yuri0548@mail.ru), А. В. Гончаров (mama15333@mail.ru),
М. Г. Гречушникова (allavis@mail.ru), В. В Пуклаков (puklakov@mail.ru)

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва

Аннотация. Приводятся первые результаты анализа данных автоматизированных измерений внутрисуточной изменчивости характеристик летнего гидроэкологического состояния водной массы в долинном водохранилище при сменах погоды. Параметризация внутригодовых и межгодовых изменений ее экологических характеристик выполнена диагностическим верифицированным расчетом по гидрологической модели водохранилищ ГМВ-МГУ. Расчетами по ней воспроизведен 55-летний ряд индекса цветения воды, который использован для статистической оценки вклада 15-ти природных и техногенных факторов в межгодовую изменчивость биомассы фитопланктона, сильно затрудняющей очистку воды на стациях Мосводоканала. Обосновывается возможность и целесообразность оперативного модельного прогноза качества воды в водохранилищах – источниках водоснабжения Московского мегаполиса.

Ключевые слова: водохранилище, моделирование, качество воды, фитопланктон, индекс цветения

Задача параметризации гидрологического режима водохранилищ и изменчивости их экологического состояния возникла в связи с потребностью интенсификации процессов самоочищения от загрязняющих речную воду веществ в водоемах–источниках централизованного водообеспечения населения. Сложность ее решения вызвана тем, что взаимодействие разнообразных внутриводоемных процессов трансформации растворенных и взвешенных в воде веществ происходит под воздействием проникающей в водоем солнечной и ветровой энергии. Из-за крайне изменчивой во времени ее интенсивности количественное воспроизведение режима физических, химических и биологических характеристик экологического состояния водных масс в водохранилищах возможно лишь многокомпонентными математическими моделями. По своей структуре они существенно отличаются от озерных моделей не только из-за продольной асимметрии ложа долинных водохранилищ, но и их в среднем на порядок большей проточности, меняющейся с внутригодовой и межгодовой изменчивостью речного стока и его регулированием гидроузлом. Оно определяет, в конечном счете, изменчивость высоты уровня, размеры акватории, глубин и объемов воды в цепочке плесов водоема и их проточность. Но именно эта специфика водохранилищ дает возможность управления формированием качества основной водной массы (ОВМ) конкретного водоисточника и наиболее эффективной работой водопроводных станций. Использование такой модели для диагностических расчетов существенно уточняет данные мониторинговых наблюдений за качеством воды в водоеме [2]. А в комплексе метеорологическими прогнозами погоды и гидрологическими прогнозами притока в водохранилище дает возможность оперативно прогнозировать вероятное изменение качества воды при том или ином изменении режима работы гидроузла и водозаборов водопроводных станций.

Внутрисуточные колебания гидроэкологических характеристик ОВМ

Лаборатория по изучению водохранилищ МГУ летом 2016 г. организовала на Можайском водохранилище – головном водоеме Москворецкой системы водоснабжения Москвы – автоматическую круглосуточную регистрацию основных характеристик экологического состояния его ОВМ с целью уточнить модельное воспроизведение влияния изменчивости погоды на продукционно-деструкционные процессы биологической трансформации химического состава воды в водоеме.

На рейдовой станции в центре Красновидовского плеса, находящегося в средней части этого небольшого долинного водохранилища, с 20 мая по 25 сентября 2016 г. выполнен лимнологический эксперимент « Многосуточная вертикаль – 2016» , который включал:

1) непрерывную регистрацию термисторами термокосы пульсаций температуры воды на горизонтах 0,35; 1; 2; 5; 7 и 10 м одновременно с регистрацией автоматической метеостанцией, установленной на расчаленном тремя якорями катамаране, атмосферного давления, температуры и влажности воздуха, скорости и направления ветра;

2) с 25 июня измерение биохимических показателей интенсивности продукционно-деструкционных процессов в трофогенном слое водоема впервые созданным логгерным продукциометром в кислородной модификации [3]. Он снабжен оптическими датчиками двух оксиметров ХОБО и YSI ProODO для регистрации на горизонте 0,5 м продуцирования фитопланктоном кислорода (O_2) в мг/л за час (валовая первичная продукция ППв) и его поглощения планктоном за тот же час вследствие деструкции (Д) органических веществ. Этим же прибором ежечасно регистрировалась температура воды и каждые три часа – концентрация в ней O_2, а ФАР-логгер, помещенный на берегу на высоте 10 м, регистрировал фотосинтетически активную солнечную радиацию (ФАР) в диапазоне длин волн 400–700 нм;

3) периодически в течение суток и более регистрировался вектор скорости течения воды на горизонте 1 м доплер-методом (прибор AANDERAA DCS4100), эпизодически окси-термокондуктометрами YSI зондировали водную толщу и отбирали пробы воды с характерных горизонтов на химический анализ (pH, ортофосфаты, ПО и БО).

Параметризация внутрисуточной изменчивости суммарной солнечной радиации $R_{\odot}$ при безоблачном небе и ее ослабления меняющейся облачностью в экологическом блоке гидрологической модели водохранилища ГМВ-МГУ [7] выполняется по разработанной В. М. Степаненко программе с использованием формулы К. Я. Кондратьева [5, 6] и срочных наблюдений за облачностью на ближайшей метеостанции (МС) Можайск. Валидация этой программы выполнена сопоставлением рассчитанных по ней значений $R_{\odot}$ с данными ФАР-логгера за 28-суточный период с 23 июля по 20 августа, фрагмент которого показан на рис. 1.

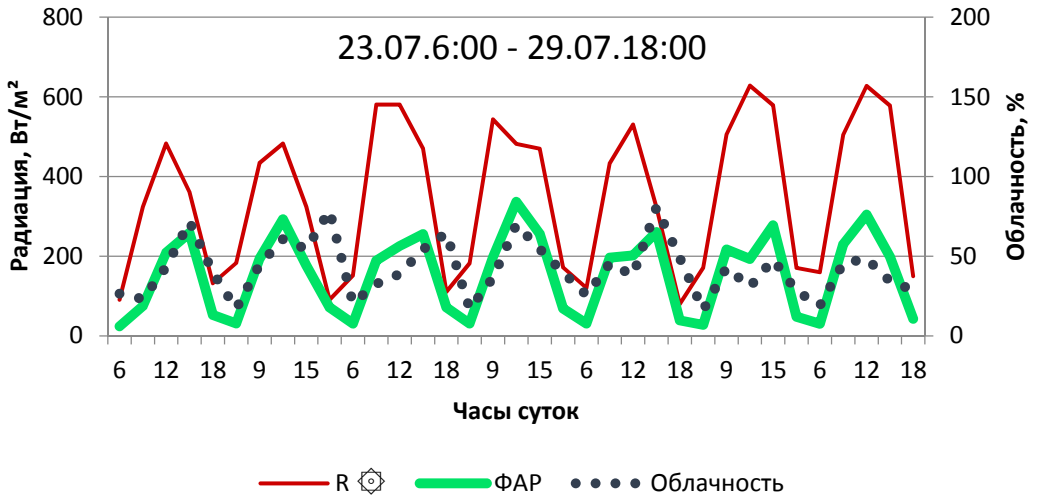


Рис. 1. Внутрисуточное изменение интенсивности рассчитанной суммарной радиации ($R_{\odot}$), зарегистрированной ФАР и общей облачности в часы ее оценки на МС Можайск

В этот расчетный период средняя из 143 сроков метеонаблюдений величина $R_{\odot}$ составила 340 Вт/м^2, а максимальная 730 Вт/м^2. Аналогичные величины зарегистрированной в те же сроки величины $R_{ФАР}$ равны 130 и 340 Вт/м^2, из чего видно, что доля ФАР в суммарной радиации составляет 38 % и 46 % соответственно. Установленная между их величинами статистическая зависимость $R_{ФАР} = 0{,}408R_{\odot} - 10{,}17$ высоко значима (коэффициент корреляции r = 0,76). Величины альбедо с изменением высоты Солнца при безоблачном небе рассчитаны нами по формуле А. А. Пивоварова [6], дополненной учетом облачности и проверенной по данным измерений на Волгоградском и Новосибирском водохранилищах [1]. При гладкой водной поверхности, ряби, волнении до 3–4 баллов и высоте солнца >10 ° днем альбедо всего 4,5 %, а утром и вечером увеличивается до 7 %.

Достаточно обоснованная параметризация внутрисуточных колебаний характеристик экологического состояния ОВМ также сильно зависит от правильного воспроизведения внутрисуточной изменчивости метеорологических характеристик погоды над водоемом. Анализ зарегистрированных на рейдовой станции метеоданных показал необходимость коренного изменения традиционного метода пересчета данных ближайшей к водохранилищу метеостанции в их значения на высоте 2 м над водной поверхностью путем введения поправок. В отличие от рекомендуемых в [10], такие поправки для средних и малых водохранилищ долинного класса должны учитывать узость долины [9] и ориентацию ее продольной оси. Для Можайского водохранилища разработана серия необходимых поправок к данным МС Можайск, находящейся в 10 км к юго-востоку от рейдовой станции с учетом направления продольной оси водоема с СЗ на ЮВ. Статистический анализ более 1,5 тыс. синхронных измерений скорости ветра летом 2016 и 2017 гг. на метеостанции ($U_Ф$ м/с по флюгеру) и рейдовой метеостанции (U_2) показал, что наилучшую корреляцию r = 0. 69 они имеют при параметризации скорости ветра над водоемом в виде $U_2 = k_U U_Ф$, если коррекционный коэффициент k_U = 1,0 для ветров с левого и правого берегов, а для продольных ветров k_U = 1,8 с учетом k_L – коэффициента разгона ветра по [10].

Наиболее контрастная смена погоды с её антициклонической фазы (АФП) на циклоническую (ЦФП) с ярко выраженными различиями внутрисуточных изменений гидрологических характеристик произошла с 26 июня по 8 июля (рис. 2).

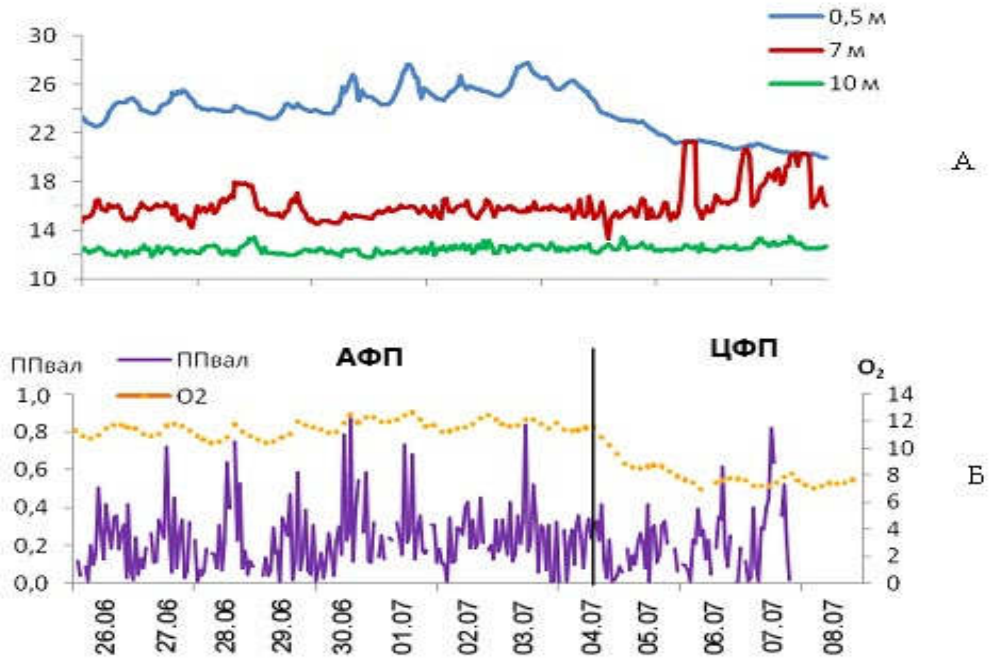


Рис. 2. Ежечасная изменчивость температуры (Т °С) на трех горизонтах водной толщи (А), содержания растворенного кислорода (мг/л) и валовой первичной продукции (мг O_2/л час) (Б) за антициклоническую и циклоническую фазы погоды в конце июня – начале июля 2016 г.

В АФП (26 июня – 3 июля) стояла преимущественно жаркая погода с давлением 1011±2 мб и температурой воздуха днем T_B >25 °С при средней скорости ветра< U_2 2 м/с. С 4 июля среднесуточная U_2 возросла на 33 % при похолоданиях до 15 °С в ночные часы. В АФП скорость ветра минимальна днем, а максимум температуры воздуха обычен в 13–14 час. При этом изменчивость (Cv_X) суточных максимальных ежечасных значений интенсивности суммарной солнечной радиации и ФАР меньше, а внутрисуточная изменчивость облачности и значений T_B и U_2 в АФП заметно больше, чем в ЦФП (табл. 1). Кучевая облачность изменчива и к вечеру полностью исчезает. Облачность в ЦФП в течение всех суток варьирует от 60 до 100 %, что и определяет изменчивость суммарной солнечной и фотосинтетически активной радиации в светлое время суток.

Таблица 1

Осредненные за фазу погоды среднесуточные ($X_{СР}$) и максимальные ($X_{МАКС}$) значения, диапазон ΔX внутрисуточной изменчивости и коэффициент вариация Cv_X (%) характеристик погоды и гидроэкологического состояния ОВМ водохранилища

Характеристика состояния погоды и водной массы	Антициклоническая фаза				Циклоническая фаза погоды			
	$X_{СР}$	$X_{МАКС}$	ΔX	Cv_X	$X_{СР}$	$X_{МАКС}$	ΔX	Cv_X
Солн. радиация (макс.) Вт/м^2	530	804	374	61	521	700	266	71
ФАР (макс) на воду, Вт/м^2	256	406	217	75	246	354	163	96
Облачность, %	40	60	70	57	62	70	60	34
Температура воздуха, ^{o}C	20,9	28,8	8,1	18	18,7	24,9	6,3	12
Скорость ветра, м/с	2,1	5,4	3,4	65	2,8	4,9	4,4	48
Температура воды (0,5 м), ^{o}C	24,4	27,7	1,9	5	22,9	20,0	1,5	9
Концентрация O_2, мг/л	11,5	12,0	1,2	5	9,0	9,4	1,0	17
Насыщение воды O_2, %	137	148	16	6	107	112	10	21
Валовая продукция, мг O_2/л ч	0,21	0,66	0,8	74	0,19	0,64	0,7	76
Деструкция ОВ, мг O_2/л час	0,18	0,51	0,5	37	0,18	0,61	0,6	50

Эти различия двух фаз погодного цикла оказывают наибольшее влияние на изменчивость важнейших характеристик гидроэкологического состояния ОВМ.

Погодное изменение состояния водной массы

Интенсивность проникающей в трофогенный слой воды ФАР из-за малости альбедо снижается незначительно. Средние значения диапазона внутрисуточной изменчивости температуры поверхности воды в АФП и ЦФП 1,9 и 1,5 °С соответственно. За 6 суток ЦФП шло медленное охлаждение поверхности воды $T_{0,5}$ с 27,7 до 20,0 °С (рис. 2) с сокращением внутрисуточной изменчивости Cv_T до 5–9 %, на порядок меньшей в сравнении с $Cv_{ФАР}$ (табл. 1). Характер колебаний температуры воды на горизонте 10 м не изменился. Зато в ЦФП существенно возросли колебания температуры воды в слое скачка: на горизонте 7 м, где их диапазон увеличился вдвое, с 3,7 °С до 7,9 °С. Эти колебания вызваны не только потерями теплоты при похолодании, но и колебаниями толщи воды под воздействием ветра. Зарегистрированные 6 июля порывы юго-западного ветра достигали 10–13 м/с и в сочетании с конвекцией перемешали в срок 18:00–20:00 водную толщу на рейдовой станции до горизонта 7 м. Такое эпизодическое перемешивание повторялось на следующие сутки днем и 8-го июля утром и в полдень (рис. 2А). С этим же связано и уменьшение в ЦФП концентрации O_2 на 12 % в поверхностном слое при одновременном уменьшении интенсивности продукционного процесса на 10 %. Его изменчивость, как и *Cv* деструкции, многократно сильнее, чем изменчивость содержания кислорода в воде трофогенного слоя (табл. 1), вследствие того, что экспонирование воды ведется, хотя in situ, но все же в склянках, изолирующих пробы от динамических внутриводоемных процессов. Интенсивность деструкции ОВ в ЦФП несколько меньше, чем в АФП из-за снижения температуры воды, а ее изменчивость в 1,5 раза меньше, чем величина $Cv_{ППв}$ в ясную погод.

Параметризация внутригодовых и межгодовых изменений характеристик ОВМ

Для параметризации **внутригодовой изменчивости** экологического состояния долинного водохранилища нами использована боксовая гидрологическая модель водохранилища ГМВ-МГУ [7]. Водоем в ней представлен рядом расчетных отсеков (РО), с размерами плёсов затопленной долины и предустьевым участкам ее притоков. Боксы состоят из слоев воды метровой толщины. Внешний и внутриводоемный водо-тепло-массообмен между РО рассчитывается методом их ежесуточного баланса. Ведущей его составляющей служит сброс воды через гидроузел в его нижний бьеф, величина которого, как правило, определяется точнее, чем суммарный приток воды с водосбора [1]. Использующиеся в качестве исходных данных значения составляющих водного баланса всегда определяются с некоторой погрешностями, что приводят к его невязке. Ее величина зависит от многих факторов: точности определения или расчета каждой составляющей, наличия неучтенных составляющих, степени взаимной компенсации ошибок разного знака. Невязки суточного баланса обычно относительно крупнее, чем месячных и годовых водных балансов [1]. При непрерывном балансовом

расчете с суточным шагом наличие даже небольшой ошибки при вычислении составляющих баланса или включение в расчет в отдельные сутки неявных промахов приводят к росту искажения результата модельного расчета характеристик водной массы водохранилища к концу годичного расчетного периода. Поэтому в алгоритм ГМВ-МГУ включена коррекция расчета составляющих водного баланса водохранилища.

Коррекция включает вычисление на каждом суточном шаге невязки водного баланса, т. е. разности между рассчитанным и фактическим объемами всего водоема $\delta W = W_{Р} - W_{Ф}$. Величина $W_{Ф}$ определяется по среднесуточному уровню $Н_{Ф}$ на водпосту и батиграфической кривой водоема. Полученная невязка распределяется между всеми составляющими водного баланса, включая и величину аккумуляции воды $\Delta W_{Ф}$ в тот же день, пропорционально их вкладу в структуру суточного баланса. Затем каждая составляющая корректируется на величину δw_i. В результате в скорректированном уравнении водного баланса $\Delta W_{Р} = \Delta W_{Ф}$ при скорректированном уровне воды $Н_{К} = Н_{Ф}$. В дальнейшем модельном расчете используются скорректированные величины составляющих водного баланса водохранилища. Некоторый недостаток такого метода коррекции в том, что в нем не учитываются различия в точности определения каждой составляющей баланса, зависящей от местных условий.

Чтобы показать эффективность коррекции водного баланса при параметризации гидрологического режима Можайского водохранилища и внутригодовой изменчивости состояния его ОВМ нами выполнены модельные расчеты для двух наиболее различных по водности лет: 1990 г. – экстремально многоводный и 2015 г. – экстремально маловодный год.

Расчеты выполнялись без коррекции и с коррекцией водного баланса (рис. 3).

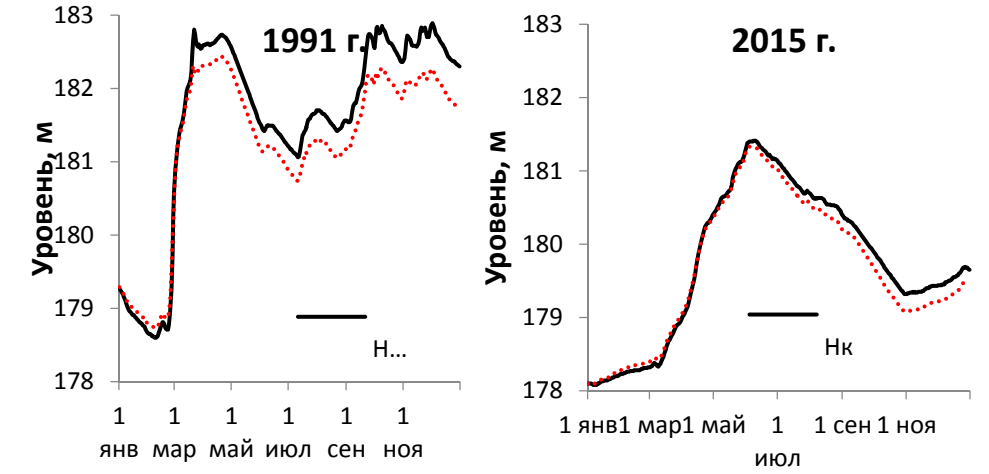


Рис. 3. Рассчитанные колебания уровня воды в Можайском водохранилище: скорректированные $Н_{К} = Н_{Ф}$ и без коррекции водного баланса $Н_{БК}$ в годы экстремальной водности (НПУ = 183 м)

Без коррекции водного баланса модельный расчет в оба года занизил уровень в конце весеннего наполнения водой водохранилища в многоводный год на 30 см, в маловодный – на 10 см и к концу этих лет ошибка расчета увеличилась вдвое. Занижение объема, площади акватории, глубин вызвало увеличение проточности и существенно повлияло на модельные ошибки расчета значений характеристик гидроэкологического состояния водной массы (табл. 2).

Таблица 2

Диапазон разности значений физических и гидрохимических характеристик воды при модельном расчете с коррекцией и без коррекции составляющих водного баланса.

Характеристика	1990 г.	2015 г.
Уровень воды, м	-0,22 ÷ 0,72	-0,09 ÷ 0,25
Температура у поверхности, С	-1,23 ÷ 0,74	-0,96 ÷ 3,27
придонная, С	-1,00 ÷ 1,99	-1,20 ÷ 1,43
Электропроводность у пов, мкСм/см	-16,5 ÷ 3,4	-7,0 ÷ 2,8

у дна, мкСм/см	-34,4 ÷ 6,92	-22,8 ÷ 9,9
Кислород у поверхности, мг/л	-2,10 ÷ 5,99	-1,30 ÷ 1,15
у дна, мг/л	- 3,28 ÷ 4,76	- 4,20 ÷ 3,08
Фосфор мининеральный у пов, мг/л	0,00 ÷ 0,02	0,00 ÷ 0,02
у дна, мг/л	- 0,12 ÷ 0,08	- 0,18 ÷ 0,10

Верификация модельного расчета гидроэкологического режима Можайского водохранилища выполнена по данным наблюдений 2012 г. с использованием трех статистических критериев – индексов Тейла (*T*), Неша-Сатклиффа (*E*) и *S*/σ (отношение среднеквадратичного расхождения рассчитанных среднесуточных значений и измеренных днем в те же сутки значений к стандартному отклонению ряда измеренных величин от их среднего значения). Качество расчетов общепринято считать "*удовлетворительным*" при значениях этих критериев: $\boldsymbol{T} < 0.4$; $0 < \boldsymbol{E} < 1$ и $\boldsymbol{S/\sigma} < 0.8$, а при $S/\sigma < 0.5$ – "*хорошим*" [2, 13]. Результаты расчета сопоставлены с данными зондирования водной толщи в нескольких экспресс-съемках 18-ти РО и лабораторного анализа более 1000 проб воды и более 100 альгологических проб. Использование столь большого числа данных показало, что качество непрерывного с января модельного расчета характеристик состава воды в большинстве случаев удовлетворительно. Это видно на примере данных двух периодов (табл. 3, рис. 4) в фазу гидроэкологического режима, когда наблюдается наибольшее ухудшение питьевых качеств воды из-за ее обильного « цветения».

Таблица 3

Статистическая оценка верности модельного расчета среднесуточных значений наименее консервативных характеристик ОВМ Можайского водохранилища: температуры *T*, концентрации кислорода O_2 и окисляемости воды БО в периоды интенсивного цветения в 2012 г.
(*n* = 245 – число пар сравнения, или длина статистических рядов)

Даты периодов	Критерий	T	O_2	БО
11.07–7.08	*T*	0,00	0,05	0,02
	E	0,87	0,79	0,68
	S/σ	0,36	0,45	0,57
8.08–29.08	*T*	0,00	0,07	0,01
	E	0,85	0,75	0,43
	S/σ	0,38	0,50	0,76

Для решения задачи параметризации экологического состояния водохранилища особенно важно, что не только характеристики *T* и O_2, определяющие насыщенность всех слоев воды растворенным кислородом, по указанным трем критериям оцениваются в летний сезон на ***хорошо*** (что демонстрирует рис. 3), но и менее надежно определяемые в пробах воды величины БО воспроизводятся модельным расчетом ***удовлетворительно***.

Различия в оценке насыщенности воды кислородом в плесах и РО в 3–5-метровом эпилимнионе водохранилища, видимые на рис. 4, объясняются двумя причинами.

Во-первых, тем, что термо-оксиметрическое зондирование в съемку производилось солнечным днем АФП с кучевой облачностью (типичная изменчивость первичной продукции фитопланктона и O_2 в такой день показана на рис. 2Б), а расчеты дают среднесуточное распределение O_2 в водоеме. Во-вторых, в большей степени причина различия заключается в том, что при балансовом расчете происходит сглаживание не только временной, но и пространственной изменчивости, возникающей при такой погоде пятнистости полей цветения воды, формирующихся в результате сгоно-нагонных явлений даже при слабом ветре [4].

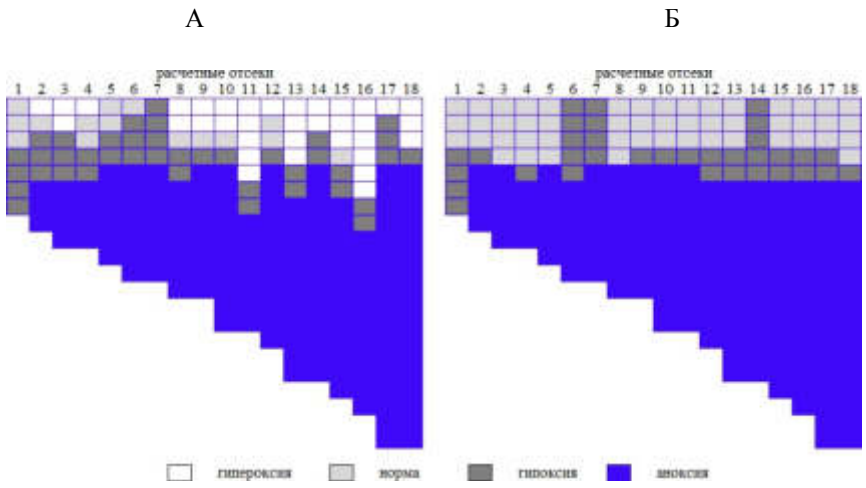


Рис. 4. Распределение по продольному разрезу Можайского водохранилища зон гипероксии (O_2 >100 % насыщения), нормального содержания кислорода (O_2 >6 мг/л), гипоксии (O_2 <6 мг/л) и аноксии (O_2 <2 мг/л) по данным экспресс-съемки 7 августа 2012 г. (А) и по результатам диагностического модельного расчета на эту дату (Б)

Для параметризации **межгодовой изменчивости** экологического состояния водохранилища мы использовали ту же боксовую модель и Базу данных комплексных исследований Можайского водохранилища и его водосбора Красновидовской лаборатории МГУ, а также Ежегодники и данные Мосводоканала. Все эти данные положены в основу расчета ежесуточной изменчивости свойств и состава воды в Можайском водохранилище за 55-летний период его эксплуатации (1961–2015 гг.).

Из громадного массива полученных данных мы здесь показываем результаты воспроизведенного модельным расчетом режима биомассы фитопланктона (ФП) только в приплотинном плесе гидроузла, через который ОВМ водоема сбрасывается в Москва-реку. Верификация модельного расчета проводилась по данным режимных наблюдений Лаборатории контроля качества воды Можайского гидроузла [8] и показала вполне адекватный результат (рис. 5) за различные по режиму сработки воды годы. В многолетней изменчивости обилия ФП в водохранилище выявлен тренд увеличения средней за вегетационный сезон его биомассы по мере старения водоема на фоне климатического увеличения паводкового стока. При использовании воды водопроводными станциями Москвы на их системы очистных сооружений возникает повышенная нагрузка массой сырого органического вещества. Опыт очистки воды от ФП на Западной и Рублевской станциях [11], показывает, что нормальный режим водоочистки ведется при его концентрации в воде, не превышающей 1 г/м^3. При такой его биомассе ($B_{ФП}$) водоем имеет вид наполненного очень чистой водой с 5-метровой прозрачностью. Чем больше ФП в водоисточнике, чем дольше в нем цветение, тем больший расход реагентов, используемых при водоочистке. С целью параметризации суммарного содержания ФП в водоеме при цветении предлагаем **Индекс цветения воды** (ИЦВ)**:** ИЦВ = $\sum_{i=\tau 1}^{i=\tau 2} B_{\text{ФП}}^{i}$, г/ м^3, где τ_1 – первые сутки и τ_2 последние сутки цветения всем фитопланктоном, или диатомовым $\sum B_{\text{Д}}$, или $\sum B_{\text{СЗ}}$ синезеленым. Период цветения воды – это время непрерывного превышения величиной $B_{\text{ФП}}^{i}$ 1 г/ м^3 в верхнем метровом слое водоема.

Расчет межгодовой изменчивости ИЦВ показал, что его тренд (рис. 6) выражен сильнее, чем увеличение максимальной биомассы ФП из-за одновременного роста продолжительности цветения со 120–140 до 160–170 суток. При этом диапазон колебания интенсивности цветения от мало биологически продуктивных лет к высокопродуктивным годам увеличился втрое из-за летне-осеннего пика цветения воды синезеленым ФП.

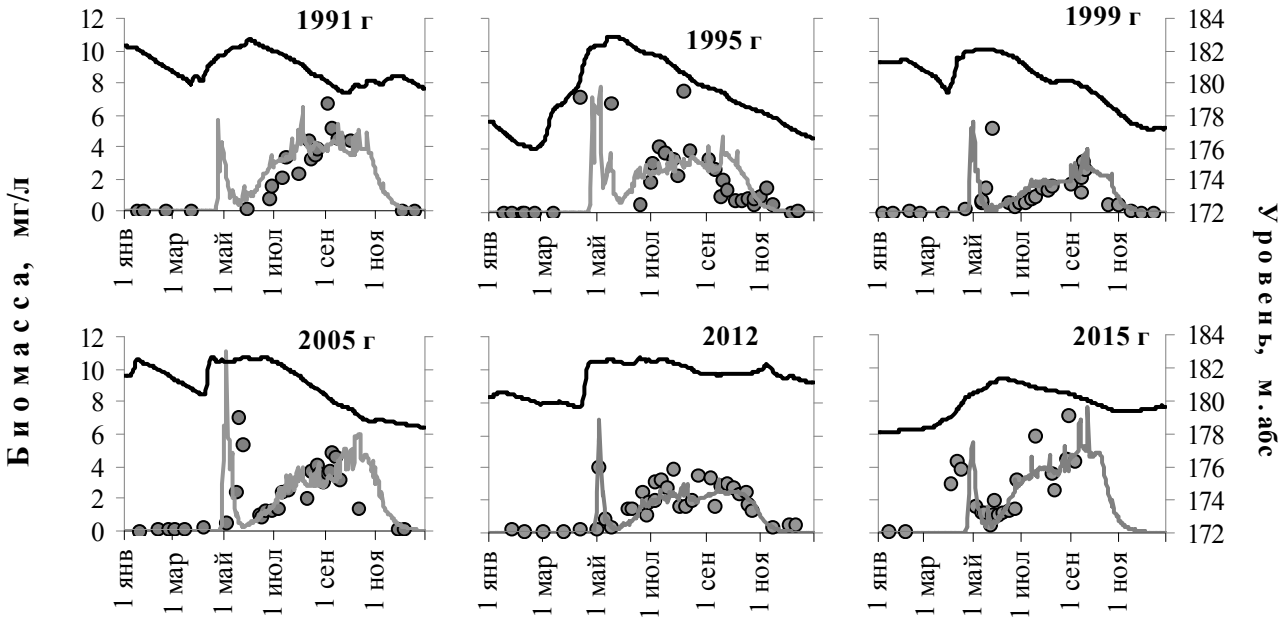


Рис. 5. Рассчитанные уровень воды (черная линия), биомасса ФП (г/м^3) (серая линия) и наблюденные величины биомассы (точки) в приплотинном плесе Можайского гидроузла.

55-летний ряд рассчитанных значений ИЦВ сделал возможной попытку выявить статистически значимые зависимости биомассы ФП от 15 природных и техногенных факторов. Рассматривалась роль 5 метеорологических факторов, 6-ти гидрологических, внешний и внутренней химической (биогенной) нагрузки и двух факторов возможного регулирования высоты уровня и проточности водоема сбросами воды в нижний бьеф [12].

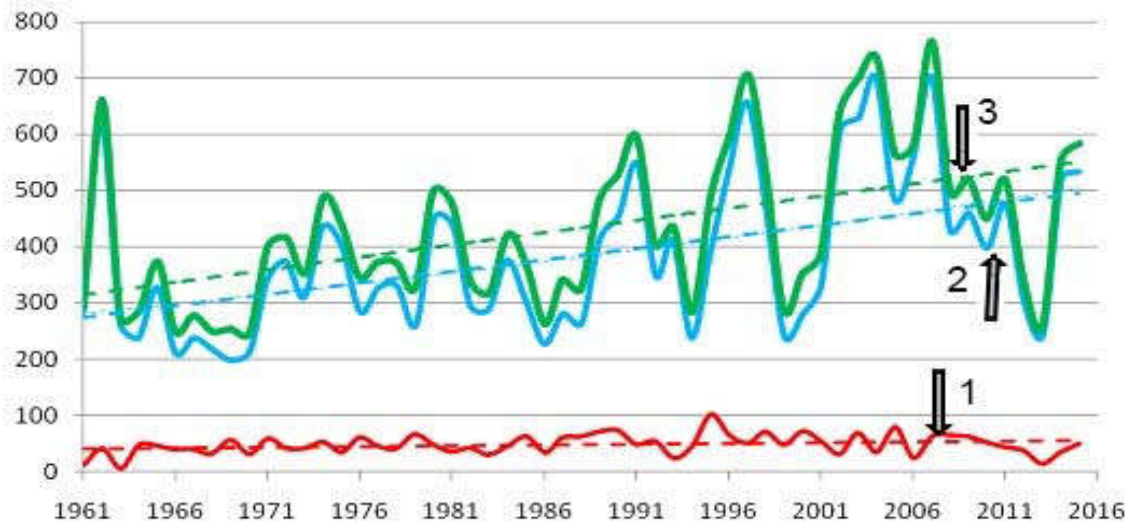


Рис. 6. Изменчивость индекса цветения воды, г/м^3, диатомовыми (1), синезелеными (2) и всеми видами фитопланктона (3) в приплотинном плесе Можайского водохранилища в годы его эксплуатации

Наименее предсказуемой по результатам статистического анализа следует считать группу диатомовых водорослей. Для нее отмечено наименьшее количество значимых связей с факторами окружающей среды. Индекс цветения воды синезелеными водорослями более тесно связан с большинством рассмотренных факторов. Ззначима зависимость ИЦВ$_{СЗ}$ от объема летне-осенних паводков и скорости перемещения речной водной массы из верховьев в центральный район водоема, от числа штилевых дней, от количества солнечной радиации, температуры воды и от биогенной нагрузкой в период цветения. В то же время значима от-

рицательная корреляция $ИЦВ_{СЗ}$ со скоростью ветра, с величиной предвесенней сработки воды и с коэффициентом водообмена водоема в половодье. Оказалось, что водность водохозяйственного года мало влияет на величину $ИЦВ_{СЗ}$ у гидроузла. Тем не менее, более высокий уровень воды в водохранилище весной и летом способствует снижению величины ИЦВ, и чем глубже предвесенняя сработка, тем более вероятна сниженная величина у $ИЦВ_{СЗ}$.

Статистический анализ показывает, что многообразие действующих факторов и сложная опосредованность их влияния на развитие ФП обусловливают относительно низкие значения большинства парных линейных связей ИЦВ с гидроэкологическими факторами. только приток биогенных веществ может существенно определять продукционные процессы в отдельные годы. Для оценки приоритетности влияния факторов на ИЦВ использован метод остаточных отклонении. Их ранжирование по тесноте связи с предикторами показало, что вариация $ИЦВ_{Д}$ значительно хуже объясняется рассмотренными факторами, чем вариация $ИЦВ_{СЗ}$. Лишь 3 фактора на 44 % описывают межгодовые колебания $ИЦВ_{Д}$ со статистической погрешностью аппроксимации 25 %. Для цветения воды синезелеными водорослями таких факторов оказалось 6, и их сочетание удовлетворительно объясняет зависимость между ними и $ИЦВ_{СЗ}$ – на 95 % со среднестатистической погрешностью всего 8 %. Интенсивность и длительность цветения воды синезелеными водорослями на 86 % определяется поступлением в водоем с его водосбора биогенных веществ (в частности – фосфора) [12].

Многообразие факторов и их сложное, нередко противоречивое влияние на развитие ФП в водохранилище не позволяют сделать однозначных выводов о гидрометеорологических условиях летом, определяющих ту или иную величину ИЦВ. Так, 2004 г. и 2007 г. с максимальными значениями $ИЦВ_{СЗ}$, равными 700 г $м^{-3}$ (рис. 6), существенно отличаются друг от друга по гидрометеорологическим условиям. Первый из них – многоводный (обеспеченность годового стока p = 9 %) со средним объемом половодья (p = 49 %), большим числом летних паводков (p = 7 %) и средний по температуре в вегетационный сезон (обеспеченность числа жарких дней с температурой воздуха >25 ^{o}C равна p = 59 %), а второй – маловодный (p = 91 %) с аномально низким половодьем (p = 97 %), небольшими по водности паводками (p = 66 %), но жарким сезоном цветения (p = 15 %) [2].

Другой аспект использования модели ГМВ-МГУ заключается в возможности прогноза продуктивности водозаборного плеса любого водохранилища при наличии прогнозов погоды и приточности воды в водоем. Изменчивость цветения воды от суток к суткам велика. Максимальные изменения биомассы ФП в течение суток могут достигать 8,0 г /$м^3$ для диатомовых и 4,6 г/ $м^3$ для синезеленых водорослей. Поэтому при наличии уточняющихся гидрометеорологических прогнозов можно рассчитывать по гидроэкологической модели прогнозный сценарий развития продукционных процессов в водохранилище с заблаговременностью в 5–7 суток. Она важна для принятия достаточно обоснованных управленческих решений о предстоящей интенсификации очистных мероприятий на станциях водоподготовки и/или для изменения системы подачи воды из наименее подверженных цветению водоисточников крупного города. Такими, например, служат водохранилища Волжской и Москворецкой систем водоснабжения г. Москвы.

Необходимость гидроэкологических прогнозов не вызывает сомнений. За последние 20 лет наибольшая концентрация ФП у водозаборов Западной и Рублевской станций водоподготовки системы водоснабжения Москвы отмечена летом и осенью 2007 г. – до 30 г /$м^3$ (300 тыс. кл/мл). Критическая ситуация привела к необходимости прекращению подачи воды из Озернинского водохранилища в июне–ноябре и Истринского – в сентябре–октябре, в верховьях которых биомасса ФП достигала 50 г/ $м^3$ и более [11]. А в приплотинном плесе Можайского водохранилища в это же время $ИЦВ_{СЗ}$ по модельному расчету имел наивысшую за полвека величину в 700 г/ $м^3$ (рис. 6). Поэтому проблема нормального водоснабжения Москвы в это время решалась перекачкой двумя насосными станциями воды из водохранилищ Вазузской гидротехнической системы по каналу и Рузское водохранилищ, а из него в Москву-реку.

Авторы благодарны сотруднику НИВЦ МГУ канд. физ.-мат. наук В. М. Степаненко за участие в совершенствовании модели ГМВ-МГУ.

Полевые исследования и диагностическая модельная параметризация многолетней изменчивости развития фитопланктона выполнены М. Г. Гречушниковой, Ю. С. Даценко, А. В. Гончаровым и В. В. Пуклаковым при поддержке РНФ (проект 14–17–00155), а обощающий анализ двухлетних наблюдений, внедрение в водохозяйственную практику индекса цветения воды и принципов оперативного прогнозного моделирования качества воды в водохранилищах К. К. Эдельштейном при поддержке РФФИ (проект 18–05–01066).

Список литературы

1. Викулина З. А. Водный баланс озер и водохранилищ Советского Союза. Л. : Гидрометеоиздат, 1979. 175 с.

2. Гидроэкологический режим водохранилищ Подмосковья (наблюдения, диагноз, прогноз) / под ред. К. К. Эдельштейна. М. : Перо, 2015. 286 с.

4. Гончаров А. В., Гречушникова М. Г., Пуклаков В. В. Автоматизированное определение продукции и деструкции органического вещества в водоеме скляночным кислородным методом // Биология внутренних вод (в печати).

5. Малютин А. Н., Эдельштейн К. К. Пространственная неоднородность гидрологических характеристик в водохранилище // Комплексные исследования водохранилищ. Вып. 5. М. : Изд-во Моск. ун-та, 1980. 8 с.

6. Матвеев Л. Т. Физика атмосферы. СПб. : Гидрометеоиздат, 2000. 778 с.

7. Пивоваров А. А. Термика пограничных слоев океана и атмосферы. Ч . 1. М. : Изд–во МГУ, 1986. 127 с.

8. Пуклаков В. В. Гидрологическая модель водохранилища (руководство для пользователей). М. : ГЕОС, 1999. 96 с.

9. Пуклаков В. В., Замана Г. Т. Оценка оправдываемости модельного прогноза характеристик качества воды в Можайском водохранилище в условиях аномальной жары // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов : тр. V Междунар. науч. -практ. конф. Пермь : ПГНИУ, 2015. Т. 2.

10. Пуклаков В. В., Эдельштейн К. К., Даценко Ю. С. Оценка роли формы водохранилища при параметризации его экологического состояния в экстремальных гидрологических условиях // Метеорология и гидрология. 2016. № 8.

11. Руководство по гидрологическим расчетам при проектировании водохранилищ. Л. : Гидрометеоиздат, 1986. 368 с.

12. Водоподготовка и управление качеством воды в условиях развития фитопланктона на примере москворецкого водоисточника / Е. В. Шушкевич, А. В. Карпушенко, В. О. Полянин, Е. А. Столярова // Водоснабжение, санитарная техника. 2010. №10, ч. 1.

13. Эдельштейн К. К., Пуклаков В. В., Даценко Ю. С. Экспериментально-теоретические основы диагноза и прогноза цветения в водохранилищах источниках муниципального водоснабжения // ВОДАmagazine. 2017. № 4 (116).

14. Krause P., Boyle D. P., Bäse F. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment // Advances in Geosciences. 2005.

Секция

ПОГОДА И КЛИМАТ. МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ

УДК 551.501.7

Сравнительный анализ методов прогнозирования обледенения в интересах метеорологического обеспечения беспилотных летательных аппаратов

С. Г. Алёхин[1] (2670368@rambler.ru), Ю. В. Кулешов[1] (kuleshov_y@mail.ru), А. А. Туркин[2] (info@niitp.ru), В. А. Шемелов[1] (vladshem@mail.ru)

[1]ВКА имени А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург
[2]АО «НИИ ТП», Москва

Аннотация. В прикладной метеорологии одной из актуальных задач является задача прогнозирования метеорологических условий на территории, где отсутствует возможность инструментальных метеорологических наблюдений. При этом одним из наиболее трудно прогнозируемых явлений в атмосфере является обледенение летательных аппаратов. Существующий научно-методический аппарат позволяет прогнозировать обледенение летательных аппаратов в атмосфере либо косвенным путем – с проверкой соответствия вычисленных климатических показателей температуры воздуха, температуры точки росы и высоты нижней границы облачности некоторым условиям наличия/отсутствия обледенения, либо с помощью методов регрессионного анализа путем построения дискриминантной функции, разделяющей случаи умеренного или сильного обледенения от случаев без обледенения в облаках. Авторы исследовали преимущества и недостатки обоих подходов и предложили новую физико-статистическую модель на основе схемы комбинации условий.

Ключевые слова: обледенение летательных аппаратов, физико-статистическая модель, дискриминантный анализ, комбинация условий

Введение

Обледенением летательного аппарата (далее по тексту – ЛА) называется образование на его поверхности льда. При определенных метеорологических условиях ледяной налет растет и превращается в нарост, обладающий способностью по краям увеличиваться быстрее, чем в середине. В результате образования ледяного нароста изменяется профиль несущей поверхности летательного аппарата, что влечет за собой увеличение коэффициента сопротивления и изменения аэродинамических и тактических свойств летательного аппарата [1–3]. При этом в экстремальных случаях – увеличивается его вес, уменьшается тяга двигательной установки, увеличивается удельный расход топлива.

Основными причинами возникновения обледенения являются [4]:

а) сублимация водяного пара, когда при резком снижении охлажденный ЛА попадает в более теплый и влажный воздух;

б) замерзание переохлажденных капель воды, сталкивающихся с поверхностью ЛА.

Интенсивность обледенения пропорциональна скорости полета ЛА, водности облака, она больше на деталях малых поперечных размеров.

Выделяют следующие степени интенсивности обледенения: слабое – 0,01–0,5 мм/мин: умеренное – 0,6–1,0 мм/мин, сильное – 1,1–2,0 мм/мин, очень сильное – более 2,0 мм/мин [1].

Основными факторами, влияющими на интенсивность обледенения, являются – повышение водности облаков (1 г/м3 и более), их агрегатное состояние и размеры водяных ка-

пель. Наиболее опасное обледенение в зонах переохлажденного дождя и в облаках с крупными переохлажденными каплями.

С одной стороны, интенсивность обледенения растет с увеличением скорости полета, что объясняется увеличением объема воздуха, обтекающего ЛА в единицу времени, больше капель сталкивается с ЛА и более мелкие капли оседают.

С другой стороны, при скоростях более 500 км/ч возникает кинетический нагрев поверхности ЛА, который противодействует замерзанию капель. Кинетический нагрев () определяется формулой [1]

$$\delta T = 5\left(\frac{C}{100}\right)^2, \quad (1)$$

где C – скорость полета в м/с.

В облаках значение кинетического нагрева почти в два раза меньше, или, другими словами, составляет 60 % от кинетического нагрева в сухом воздухе, так как теряется часть тепла на испарение части капель [5; 6]. Для ЛА, движущихся в облаках в диапазоне температур от 0 ºС до минус 24 ºС, минимальная скорость полета должна превышать:

при Т = -5 ºС – 500 км/ч ($\delta T = 5{,}8$°С);
при Т = -8 ºС – 600 км/ч ($\delta T = 8{,}3$°С);
при Т = -12 ºС – 700 км/ч ($\delta T = 11{,}4$°С);
при Т = -16 ºС – 800 км/ч ($\delta T = 14{,}8$°С);
при Т = -18 ºС – 900 км/ч ($\delta T = 18{,}8$°С);
при Т = -24 ºС – 1000 км/ч ($\delta T = 23{,}2$°С).

При удовлетворении этого требования кинетический нагрев компенсирует условия возникновения обледенения, но следует помнить, что он неравномерно распределяется по поверхности ЛА и это может привести к образованию опасной формы обледенения. Кинетический нагрев отдельных частей ЛА (крыла, боковых частей) может быть рассчитан путем умножения значения на коэффициент восстановления, который зависит от рассматриваемой части ЛА.

Отсюда следует, что на практике обледенению могут быть подвергнуты все дозвуковые ЛА (скорость полета до 1200 км/ч).

В районах, где отсутствует возможность инструментальных метеорологических наблюдений, оценить вероятность возникновения обледенения возможно только с помощью физико-статистических методов [7–12].

Указанная проблемная ситуация наглядно подтверждает актуальность разработки новых моделей и методов прогнозирования обледенения беспилотных дозвуковых ЛА, неоснащенных противообледенительными системами, на территории, неосвещенной инструментальными метеорологическими наблюдениями.

Характеристика условий возникновения обледенения

Обледенение может наблюдаться в широком интервале отрицательных температур от минус 40 ºС до 0 ºС в основном на высотах до 6 км, но вероятность его возникновения максимальна в сравнительно узких интервалах температуры и относительной влажности воздуха и (модель NCEP) [7,8], в особенности и на высотах до 3 км зимой и в переходные сезоны, а летом на высотах 3–6 км [3].

Вне этих интервалов вероятность возникновения обледенения уменьшается.

Дополнительная информация о возможности обледенения содержится в данных о дефиците точки росы. Экспериментальными исследованиями установлено, что при дефиците точки росы 0–1 облака находятся в стадии развития, и обледенение наблюдается в 80 % случаев [3; 5]. При дефиците точки росы 1–3 облака сохраняют свою форму и обледенение также наблюдается в 65 % случаев. Увеличение дефицита точки росы более 3 свидетельствует о размывании облаков, и обледенение в 84 % случаев отсутствует. Кроме того, для высот менее 3000 м интенсивность обледенения можно оценить с помощью следующих правил:

– обледенение в облаках умеренное и сильное;
– обледенение в облаках слабое и умеренное;

– обледенение в облаках слабое, либо отсутствует.

При этом необходимо учитывать и другие факторы, такие как: протяженность зон обледенения; наличие осадков; высота полета ЛА (с учетом – в облаках или вне); скорость полета ЛА в зоне обледенения; время полета ЛА в зоне обледенения.

Дополнительно, нельзя не упомянуть о краткосрочном методе прогнозирования обледенения чешского физика Годске, который для высот до 2000 м предложил по данным зондирования атмосферы определять величину – температуру насыщения надо льдом по формуле [9,13]

$$T_{is} = -8d = -8(T - Td). \quad (2)$$

Если температура насыщения надо льдом выше температуры окружающего воздуха, то на этом уровне следует ожидать обледенение.

Таким образом, условия наличия/отсутствия обледенения разделим на:

«V» – условия, определяющие возможность обледенения;

«I» – условия, определяющие интенсивность обледенения при условии «V».

Условия V и I определяются следующими физико-географическими и метеорологическими параметрами (МП): рельеф и тип подстилающей поверхности местности; время года; тип синоптической ситуации, температура воздуха; температура точки росы (дефицит точки росы); температура насыщения надо льдом; относительная влажность воздуха; формы облачности; высота нижней границы облачности; наличие осадков.

Характеристика исходных данных для построения схемы комбинации условий

Пусть при решении задачи прогнозирования обледенения беспилотных дозвуковых ЛА, на территории, неосвещенной инструментальными метеорологическими наблюдениями, рельеф (RLF), тип подстилающей поверхности (TG), время года ($Season$), тип синоптической ситуации ($MeteoSit$), значение температуры воздуха (T) известны априори.

Значение температуры точки росы (Td) вычисляется с помощью выражения

$$Td = c_0 + c_1 T, \quad (3)$$

где c_0, c_1 – коэффициенты линейной парной регрессии при $R_{\widetilde{Td}\,Td} \geq 0{,}95$; $R_{\widetilde{Td}\,Td}$ – коэффициент корреляции между рассчитанным $\widetilde{Td}$ и фактическим Td значениями.

Значение температуры насыщения надо льдом вычисляется с помощью выражения (2).

Значение высоты нижней границы облачности (H_{cb}) вычисляется с помощью выражения [14]

$$H_{cb} = a_0 + a_1 h_{sl} + a_2 T + a_3 Td + a_4 ff, \quad (4)$$

где h_{sl} – значение превышения местности над уровнем моря, м; T – температура воздуха, ºС; Td – температура точки росы, ºС; ff – скорость ветра, м/с.

Скорость ветра рассчитывается путем определения эмпирических вероятностей повторяемостей соответствующих значений скорости ветра в исследуемом районе, либо используется математическое ожидание этого параметра.

Требуется разработать схему комбинации условий наличия/отсутствия обледенения в районе нахождения ЛА.

Поясним, каким образом получить значения относительной влажности (f), информацию о формах облаков (F_{cl}) и возможных видов осадков (PR).

Относительная влажность (f) определяется по значениям (T) и (d) с использованием психрометрических таблиц.

Формы облаков (F_{cl}) и возможные виды осадков (PR) определяются на основе комплексного анализа данных о сезоне года, типе синоптической ситуации.

Информация о рельефе и типе подстилающей поверхности в районе нахождения ЛА необходима – поскольку вероятность обледенения возрастает при наличии больших водоемов и гор.

Информация о времени года требуется потому, что повторяемость обледенения в теплый, холодный и переходный периоды на разных высотах различная. Так, зимой и в пере-

ходные периоды на высотах до 3000 м обледенение наблюдается в 60–70 % случаев, а на высотах более 3000 м составляет около 20 %. Летом до высот 3000 м обледенение отмечается в 30–40 % случаев, а выше 3000 м – более 60 % [8; 15].

Для удобства восприятия излагаемого материала исследований, а также для придания стилю изложения технической направленности введем условные обозначения.

Условные обозначения для определения рельефа местности: RLF_a – равнины; RLF_b – холмы; RLF_c – горы.

Условные обозначения для определения типа подстилающей поверхности подразделяются на гидрографические условия местности и тип растительности, преобладающей в данной местности.

Гидрографические условия местности: TG_hydro_a – болота и озера; TG_hydro_b – реки и озера; TG_hydro_c – моря и реки; TG_hydro_0 – безводно.

Тип растительности: TG_veg_a – тундровый; TG_veg_b – лесной; TG_veg_c – степной; TG_veg_d – пустынный; TG_veg_e – луговой и болотный.

Условные обозначения для определения времени года:

ws (warm season) – теплое время года (лето);

cs (cool season) – холодное время года (зима);

wc (warm-cool) – переходный период (зима-весна; лето-осень).

Условные обозначения для определения типов синоптических ситуаций, благоприятных для возникновения обледенения:

Тип A – синоптические условия, благоприятные для возникновения самых сильных обледенений;

Тип B – синоптические условия, благоприятные для возникновения умеренных и сильных обледенений;

Тип C – синоптические условия, благоприятные для возникновения слабых обледенений;

Тип D – синоптические условия, при которых обледенение отсутствует, либо отсутствует информация о синоптических условиях.

Введем условные обозначения осадков: PR_a – морось; PR_b – дождь, снег; PR_c – ливень, град; PR_0 – без осадков.

Построение схемы комбинации условий наличия/отсутствия обледенения

На основе проведенного выше анализа сформируем комбинацию условий, определяющих возможность обледенения (табл. 1).

Таблица 1

Комбинация условий, определяющих возможность обледенения

№ п/п	Параметр, характеризующий условия наличия/отсутствия обледенения	Показатель влияния, $v \in [-1; 3]$
(№ 1) Рельеф местности		
1	RLF_a	0
2	RLF_b	
3	RLF_c	+1
(№ 2) Гидрография местности		
4	TG_hydro_a	0
5	TG_hydro_b	+1
6	TG_hydro_c	
7	TG_hydro_0	0
(№ 3) Тип растительности местности		
8	TG_veg_a	+1
9	TG_veg_b	0
10	TG_veg_c	
11	TG_veg_d	-1
12	TG_veg_e	0
(№ 4) Тип синоптической ситуации		
13	A	+3

№ п/п	Параметр, характеризующий условия наличия/отсутствия обледенения				Показатель влияния, $v \in [-1;3]$
14	B				+2
15	C				+1
16	D				0
(№ 5) Температура воздуха, ℃					
17	[-40;+5]				+1
18	[-16;-10]				+2
19	[-10;0]				+3
20	> 0				-1
(№ 6) Дефицит точки росы, ℃					
21	[0;1]				+1
22	[1;2]				
23	[2;3]				0
24	> 3				-1
(№ 7) Температура насыщения надо льдом, ℃					
25	$T_{is} \geq T$				+1
26	$T_{is} < T$				0
(№ 8) Относительная влажность, %					
27					-1
28	[63;85]				+1
29					+2
(№ 9–15) Высота нижней границы облачности (м), форма облаков, вид осадков					
Высота, м		Форма обл.	Вид осадков	Время года	
30	0	ясно	PR_0	—	-1
31	100–700	St	PR_a	ws	-1
				cs	+1
				wc	
32	100–1000	Ns	PR_b	ws	-1
				cs	+1
				wc	
33	400–1500	Cb	PR_c	ws	+1
				cs	
				wc	
34	400–2000	Sc	PR_a	ws	-1
				cs	+1
				wc	
35	2000–6000	Ac	PR_0	ws	+1
				cs	-1
				wc	0
36	3000–6000	As	PR_b	ws	+1
				cs	
				wc	

Используя таблицу 1, факт наличия/отсутствия обледенения определяется на основе классической формулы теории вероятностей

$$P(\Psi) = \frac{m}{n}, \tag{5}$$

где $P(\Psi)$ – оценка вероятности наличия обледенения; $m = \sum_{i=1}^{15} V_i$ – сумма показателей влияния (v), характеризующих наличие/отсутствие обледенения; n – общее число параметров характеризующих условия обледенения.

Поясним, что общее число параметров, характеризующих условия обледенения в таблице 3 равно 15, потому, что, при анализе, значения им присваиваются несовместно. Для каждого параметра можно выбрать только одно значение показателя влияния.

Сформируем комбинацию условий, определяющих интенсивность обледенения (I) (таблица 2).

Таблица 2

Комбинация условий, определяющих интенсивность обледенения

№ п/п	Температура воздуха (поверхности ЛА),°С	Дефицит точки росы, °С	Интенсивность обледенения, мм/мин	Вероятность нал. /отсут., %
1.	$T \in [-10; 0]$	$d \in [0; 1]$	0,6–1,0 (умеренное); 1,1–2,0 (сильное)	80
		$d \in [1; 2]$	0,01–0,5 (слабое); 0,6–1,0 (умеренное)	70
		$d > 2$	0,01–0,5 (слабое) либо отсутствует	
2.	$T \in [-20; -11]$	$d \in [0; 1]$	1,1–2,0 (сильное)	35
			0,01–0,5 (слабое); 0,6–1,0 (умеренное)	65
		$d \in [1; 2]$	0,01–0,5 (слабое) либо отсутствует	70
		$d > 2$	отсутствует	90
3.	$T < -21$	$d \in [0; 1]$	0,01–0,5 (слабое); 0,6–1,0 (умеренное)	40
		$d > 1$	отсутствует	90

Во взаимосвязи разработанные комбинации условий (таблицы 1, 2) можно представить в виде схемы $\boldsymbol{V \rightarrow I/V}$, позволяющей определять вероятность возникновения обледенения и его интенсивность при условии, что обледенение возможно.

Экспериментальное исследование морфологии полей параметров атмосферы, характеризующих условия возникновения обледенения

Для анализа применимости разработанной схемы комбинации условий $\boldsymbol{V \rightarrow I/V}$ на практике и подтверждения того, насколько она адекватно характеризует физические условия возникновения обледенения в атмосфере, проведено экспериментальное исследование морфологии полей параметров атмосферы, которые обуславливают возможность возникновения этого явления.

Заметим, что для апробации методов прогнозирования обледенения необходим богатый эмпирический материал, полученный непосредственно в условиях естественного обледенения, что небезопасно, экономически нецелесообразно и связано с большими временными затратами. Поэтому в настоящее время такие экспериментальные исследования не проводятся.

В 60–70-х годах прошлого столетия были проведены немногочисленные эксперименты, в результате которых построены дискриминантные функции. Так, например, большое практическое значение имеет построенная по данным зондирования во Внуково (ст. 27612) дискриминантная функция, разделяющая случаи умеренного или сильного обледенения от случаев без обледенения в облаках:

$$L = -0{,}017H_{cb} - 0{,}488T + 0{,}875. \quad (6)$$

Выражение (6) было получено К. Г. Абрамовичем, Г. В. Васильевой и В. М. Прохоровой методами регрессионного анализа, где отбор информативных метеорологических параметров проводился по расстоянию Махаланобиса [12].

Величина $L > 0$ соответствует области умеренного или сильного обледенения, $L \leq 0$ – области отсутствия обледенения в облаках.

Оправдываемость прогнозов с помощью линейной дискриминантной функции (6) показала ее применимость для различных районов ЕТС: общая оправдываемость прогнозов составила 75 %, для умеренного и сильного обледенения – 79 %, для отсутствия обледенения в облаках – 71 %.

Обозначим разработанную схему комбинации условий условным наименованием «Модель № 1», а функцию (6) «Модель № 2», и получим с их помощью количественные оценки показателей обледенения – вероятность возникновения и интенсивность.

В качестве исходных данных использовались ряды данных метеорологических наблюдений на станции 22113 (г. Мурманск) за февраль месяц, всего 1816 сроков наблюдений с 2005 по 2016 гг.

В ходе проведения исследования мы ограничились синоптическими ситуациями, где высота нижней границы облачности составляла 100, 200, 300 и 600 м, а также сделали допущение, что значения температуры воздуха на этих высотах соответствуют значению температуры воздуха у земли.

Введенное ограничение обосновано тем, что наиболее часто обледенение наблюдается в облачности с высотой нижней границы до 600 м, а допущение обусловлено отсутствием однородных данных измерений температуры воздуха на высотах 100, 200, 300 и 600 м.

Рассмотрим полученные результаты.

Станция 22113 (г. Мурманск)

Характеристика условий возникновения обледенения с помощью Моделей № 1–2 представлена на рис. 1.

Раскроем содержание условных обозначений, представленных на рисунке.

Общие обозначения: T– распределение температуры воздуха; d – распределение дефицита точки росы; Ψsl – область слабого обледенения; 0,01–0,5 мм/мин; Ψu – область умеренного обледенения; 0,6–1,0 мм/мин; Ψs – область сильного обледенения; 1,1–2,0 мм/мин.

Модель № 1:

G – распределение показателя наличия/отсутствия обледенения по методу Годске;

Tis – распределение температуры насыщения надо льдом.

Модель № 2:

L – распределение дискриминантной функции, характеризующей условия наличия/отсутствия обледенения.

Для интерпретации результатов применения Моделей № 1–2 составим следующую таблицу.

Таблица 3

Результаты анализа условий наличия/отсутствия обледенения на станции 22113 (г. Мурманск), февраль, $H_{cb} = 100$ м

Модель	Вероятность наличия/отсутствия обледенения, %				
	Без обледенения	Наличие обледенения	Ψsl	Ψu	Ψs
Модель № 1	23	77	32	27	14
Модель № 2	9	91	—	91	

Из анализа табл. 3 видно, что Модель № 2 по сравнению с Моделью № 1 дает достаточно грубую оценку условиям возникновения обледенения и не разделяет случаи слабого, умеренного и сильного обледенения.

Станция 22113 (г. Мурманск), $H_{cb} = 200$ м

Характеристика условий возникновения обледенения в феврале при высоте нижней границы облачности 200 м представлена на рисунке 2.

Интерпретация результатов применения Моделей № 1–2 представлена в таблице 4.

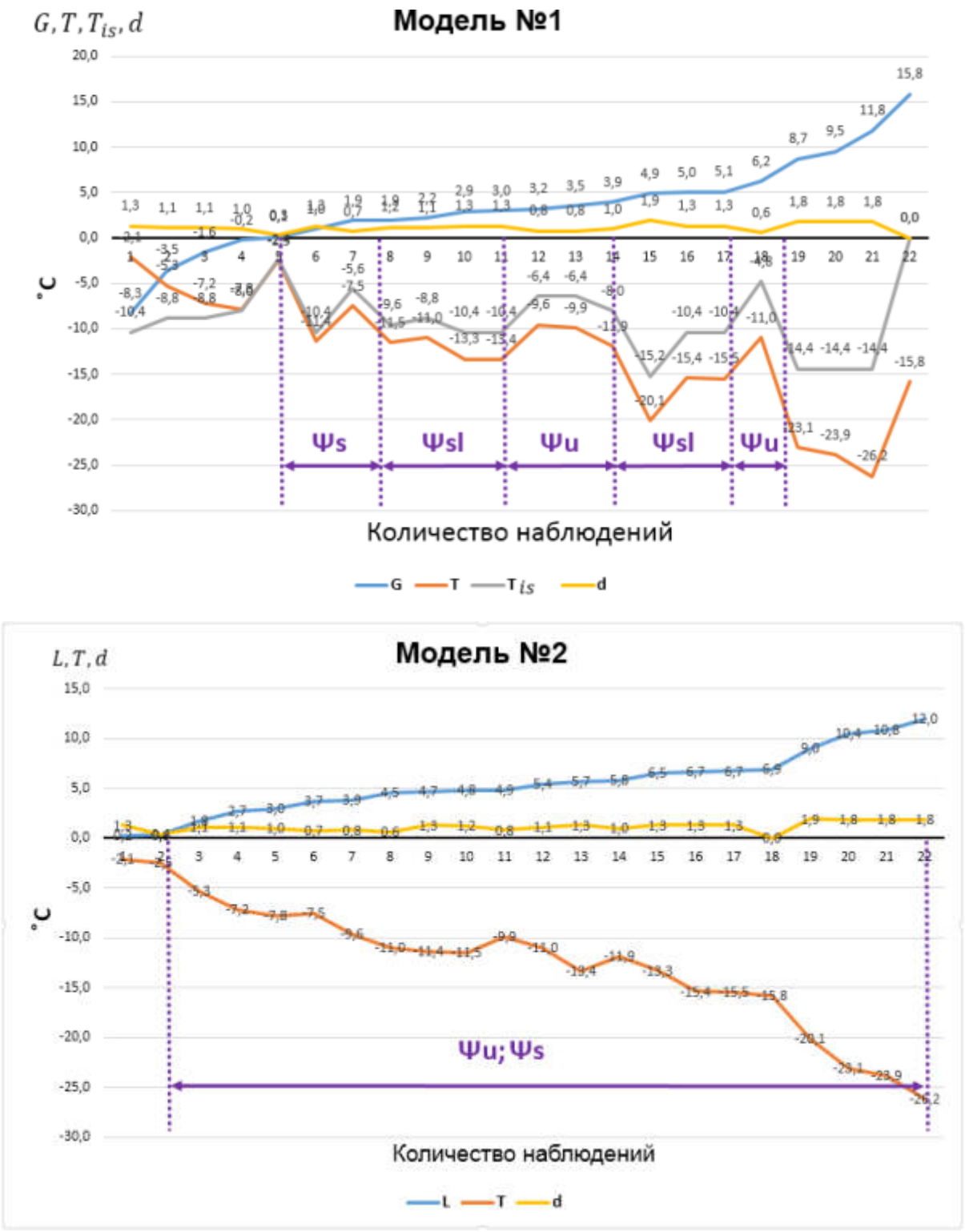


Рис. 1. Характеристика условий возникновения обледенения на станции 22113 (г. Мурманск), февраль, H_{cb} = 100 м

Таблица 4

Результаты анализа условий наличия/отсутствия обледенения на станции 22113 (г. Мурманск), февраль, H_{cb} = 200 м

Модель	Вероятность наличия/отсутствия обледенения, %				
	Без обледенения	Наличие обледенения	Ψsl	Ψu	Ψs
Модель № 1	18	82	60	12	10
Модель № 2	12	88	—	88	

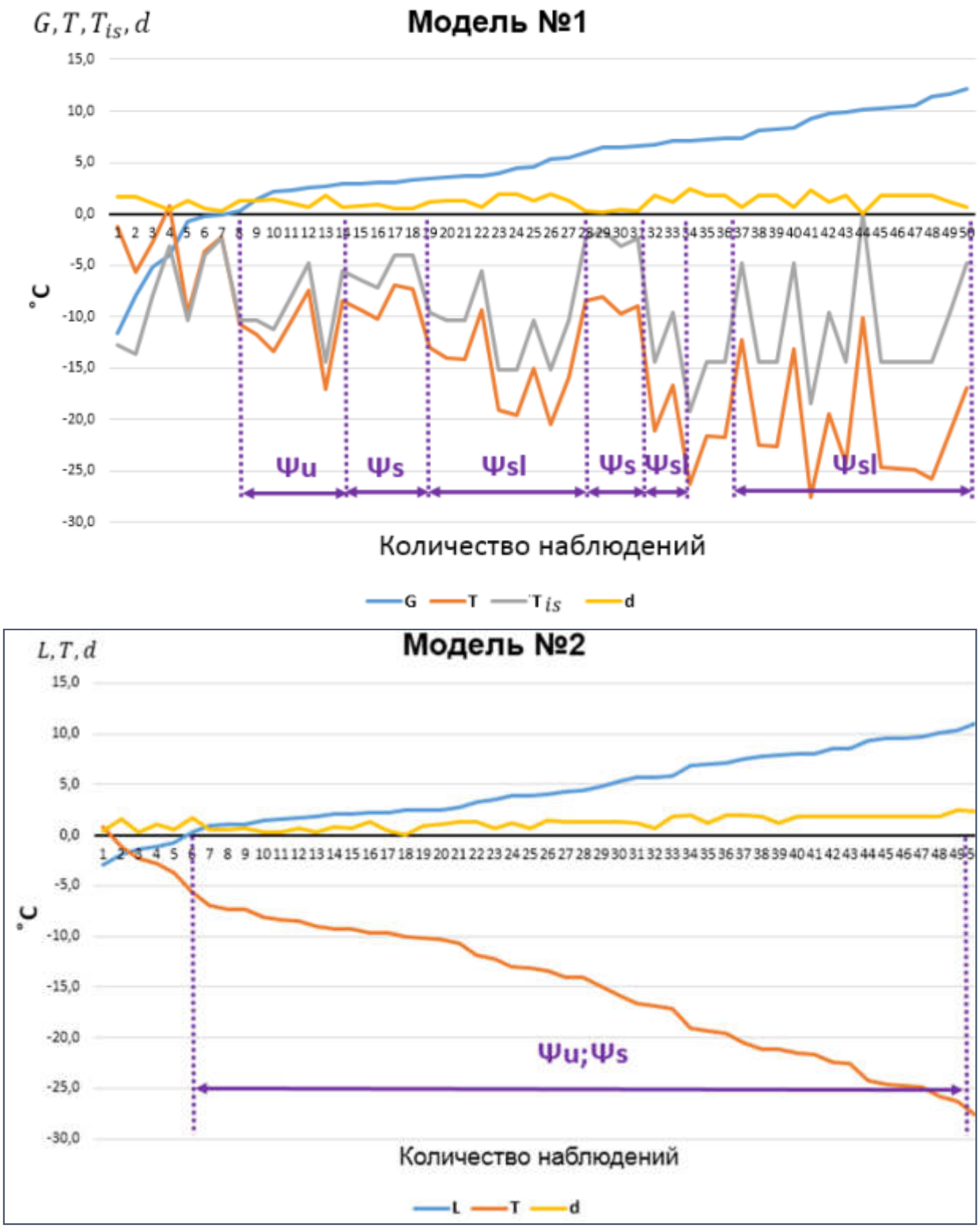


Рис. 2. Характеристика условий возникновения обледенения на станции 22113 (г. Мурманск), февраль, $H_{cb} = 200$ м

Аналогично были получены оценки наличия/отсутствия обледенения для $H_{cb} = 300$ м и $H_{cb} = 600$ м.

Станция 22113 (г. Мурманск), $H_{cb} = 300$ м

Характеристика условий возникновения обледенения в феврале при высоте нижней границы облачности 300 м представлена в табл. 5.

Таблица 5

Результаты анализа условий наличия/отсутствия обледенения на станции 22113 (г. Мурманск), февраль, $H_{cb} = 300$ м

Модель	Вероятность наличия/отсутствия обледенения, %				
	Без обледенения	Наличие обледенения	Ψsl	Ψu	Ψs
Модель № 1	23	77	32	27	14
Модель № 2	9	91	—	91	

Станция 22113 (г. Мурманск), $H_{cb} = 600$ м

Характеристика условий возникновения обледенения в феврале при высоте нижней границы облачности 600 м представлена в табл. 6.

Таблица 6

Результаты анализа условий наличия/отсутствия обледенения на станции 22113 (г. Мурманск), февраль, $H_{cb} = 600$ м

Модель	Вероятность наличия/отсутствия обледенения, %				
	Без обледенения	Наличие обледенения	Ψsl	Ψu	Ψs
Модель № 1	80	20	15	2	3
Модель № 2	95	5	—	5	

Заключение

В прикладной метеорологии основой прогнозирования обледенения ЛА является определение метеорологических условий, благоприятствующих отложениям льда той или иной интенсивности. Такие условия формируются при наличии облачности, содержащей переохлажденные капли воды, и определенных значений температуры воздуха, соответствующих этой структуре облаков. На практике прогнозируются потенциальные зоны, где высока вероятность возникновения обледенения в атмосфере, а не обледенение конкретного ЛА.

При прогнозировании обледенения беспилотных дозвуковых ЛА в условиях отсутствия инструментальных метеорологических наблюдений учет качественных признаков невозможен. К ним относятся: расположение облачных систем и формы облаков, их водность, определение в облачности слоев со значениями температуры воздуха, где обледенение возможно, определение высот изотерм минус 20 ºС минус 10 ºС и 0 ºС и т. п. Поэтому более предпочтительны объективные способы прогнозирования обледенения – метод NCEP ($T \in [-16; 0]$, ℃ и $f > 63$ %), метод Годске (2) и метод дискриминантного анализа (6).

При построении схемы комбинации условий Модели № 1 авторы учли правила методов NCEP и Годске, и экспериментально сравнили с методом дискриминантного анализа – Модель № 2. В целом Модель № 2 показала некоторое завышение числа прогнозов умеренного и сильного обледенения по сравнению с Моделью № 1.

Кроме того, по результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Модель № 1 более адекватно описывает физические условия возникновения обледенения в атмосфере, чем Модель № 2, так как учитывает не только высоту нижней границы облачности и температуру воздуха, но и относительную влажность воздуха, дефицит точки росы, температуру насыщения надо льдом, а также рельеф местности и тип подстилающей поверхности.

2. Модель № 2 в отличии от Модели № 1 не разделяет случаев наличия обледенения различной интенсивности, а относит любое обледенение (при его наличии) одновременно к умеренному и/или сильному обледенению. Такой результат прогнозирования существенно ограничивает область допустимых решений на применение ЛА.

3. Модель № 2 в большей степени применима, для определения условий возникновения обледенения на высотах от 300 м, но в то же время по достоверности прогноза она уступает Модели № 1.

Список литературы

1. Зверев А. С. Синоптическая метеорология : учебник. Л. : Гидрометеоиздат, 1977. 711 с.
2. Хромов С. П., Петросянц М. А. Метеорология и климатология : учебник. М. : Изд-во МГУ, 2001. 527 с.
3. Руководство по практическим работам метеоподразделений авиации вооруженных сил. М. : Воениздат, 1992. С. 64–66, 285–291.
4. Позднякова В. А. Практическая авиационная метеорология : учеб. пособие. Екатеринбург. : Уральский УТЦ ГА, 2010. 113 с.
5. Голоспинкина Л. А. Авиационная метеорология : лекции по курсу «Авиационная метеорология». Ташкент. : ТГАИ, 2005.
6. Моделирование процессов обледенения летательных аппаратов в аэроклиматических трубах / Г. П. Клеменков, Ю. М. Приходько, Л. Н. Пузырев, А. М. Харитонов // Теплофизика и аэромеханика. Вып. № 4, Т. 2. Новосибирск. : ИТПМ им. С. А. Христиановича СО РАН, 2008. С. 563–572.
7. Шакина Н. П. Метод прогноза зон возможного обледенения воздушных судов / Метод. кабинет Гидрометцентра России. М. : Гидрометцентр России, 2009. 6 с.
8. Руководство по прогнозированию метеорологических условий для авиации / под ред.: К. Г. Абрамович, А. А. Васильевой. Л. : Гидрометеоиздат, 1985. 301 с.
9. Богаткин О. Г. Основы авиационной метеорологии: учебник. СПб. : Изд. РГГМУ, 2009. 339 с.
10. Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности / С. А. Айвазян, В. М. Бухштабер, И. С. Енюков, Л. Д. Мешалкин. М. : Финансы и статистика, 1989. 607 с.
11. Кендалл М. Дж., Стьюарт А. Многомерный статистический анализ и временные ряды : пер. с англ. М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1976. 736 с.
12. Еникеева В. Д., Солонин С. В. Применение теории распознавания образов при решении задач авиационной метеорологии : учеб. пособие. Л. : ЛПИ им. М. И. Калинина, 1979. 69 с.
13. Зуев В. В., Нахтигалова Д. П., Шелехов А. П., Шелехова Е. А. Дистанционный способ определения пространственных зон вероятного обледенения воздушных судов в режиме реального времени / Пат. № 2580375 Рос. Федерация: МПК B64D 15/20; заявитель и патентообладатель ФГБУН ИМКЭС СО РАН – № 2014154535/28; заявл. 30. 12. 2014; опубл. 10. 04. 2016, Бюлл. № 10.
14. Дорофеев В. В., Степанов А. В., Гедзенко Д. В. Научно-методический подход к расчету полетной дальности видимости для аэронавигации по правилам визуальных полетов. СПб. : ОАО ГНИНГИ. Навигация и гидрография. 2016. № 44. С. 86–92.
15. Материалы с сайта http://flymeteo.org.

УДК 551.509.57

Гидродинамическое моделирование полярных циклонов

О. Г. Анискина (olga.aniskina@mail.ru), М. А. Моцаков (maxm@rshu.ru)

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург

Аннотация. Описаны эксперименты по моделированию полярных циклонов с использованием мезомасштабной гидродинамической модели WRF-ARW. Проведена ассимиляция результатов спутниковых наблюдений.

Ключевые слова: полярные циклоны, гидродинамическое моделирование, модель WRF-ARW.

Введение

Полярные циклоны это мезомасштабные циркуляционные системы полярных областей с горизонтальными размерами менее тысячи километров. Они образуются и развиваются зимой вне прямой связи с фронтальными системами синоптического масштаба в холодных воздушных массах над теплыми водными акваториями высоких широт к полюсу от основной бароклинной зоны. Эти системы обнаружены в 60 годах XX века при анализе облачных структур на спутниковых снимках [1].

При своих небольших размерах полярные мезомасштабные циклоны очень интенсивные погодные системы, которые способны принести большие разрушения. С ними связаны внезапные и резкие ухудшения погоды. Полярные циклоны образуются, как правило, в холодный период года при смещении арктического холодного воздуха на свободную ото льда относительно теплую морскую поверхность. Мезомасштабные полярные циклоны формиру-

ются и развиваются очень быстро. Небольшие размеры, короткий жизненный цикл и недостаточное покрытие открытого моря сетью метеорологических станций приводят к тому, что далеко не все полярные циклоны фиксируются на картах погоды. В то же время они хорошо видны в поле облачности на спутниковых снимках в видимом и инфракрасном диапазонах. Их облачные системы могут принимать вид слабо организованного скопления кучево-дождевых облаков, облачной запятой или семейства облачных спиралей, состоящих из конвективных облаков, часто с безоблачным глазом в центре. Развитие таких циклонов характеризуется очень быстрым падением давления, сильным ветром, что представляет опасность для нефте- и газодобывающей промышленности, мореплавания, береговых населённых пунктов и предприятий.

Интерес к изучению полярных циклонов связан также и с выявленной общностью полярных и тропических циклонов, проявляющейся, в частности, в структуре поля облачности, наличии глаза и теплого ядра [3].

Целями данной работы является исследование динамики полярных циклонов на основе гидродинамического моделирования и ассимиляции спутниковых данных.

Методы исследования

Гидродинамические модели атмосферы в последнее время стали основным инструментом научных исследований по всему миру.

В данной работе представлены результаты вычислительных экспериментов по прогнозу полярных мезомасштабных циклонов, выполненных с помощью мезомасштабной негидростатической метеорологической модели WRF-ARW, версия 3.6.1.

Данные, используемые для моделирования

Существуют международные требования о правилах идентификация и классификация ПМЦ (Polar Low workshop 2016, Париж). В данной работе использовалась информация о наличии полярного циклогенеза и обработанные данные спутниковых измерений, предоставленные д. к.-м. н. Е. В. Заболотских, Спутниковая лаборатория океанографии РГГМУ (http://solab. rshu.ru). Использовались поля интегральной водности, скорости ветра и приземного давления. Из большого количества циклонов были отобраны наиболее интересные случаи, для которых существует хороший набор фактических данных. На рисунке 1 для примера представлены поля интегральной водности для циклона в Баренцевом море 7–9 января 2009 г. по данным AMSR-E.

Результаты и обсуждение

Моделирование проводилось в области, представленной на рисунке 2. Шаг по горизонтали 3 км, по времени 60 секунд. В качестве начальных использовались данные реанализа Национального центра охраны окружающей среды США и Национального центра прогнозов окружающей среды (NCEP/NCAR).

Были проведены исследования по выбору наилучшей комбинации параметризаций физических процессов. Основное внимание было уделено выбору параметризаций планетарного пограничного слоя атмосферы, конвекции и гидрологического цикла, так как именно эти процессы играют основную роль в полярном циклогенезе.

Полученные модельные результаты сравнивались с данными спутникового зондирования (скаттерометр ASCAT). Пример этих данных представлен на рис. 3.

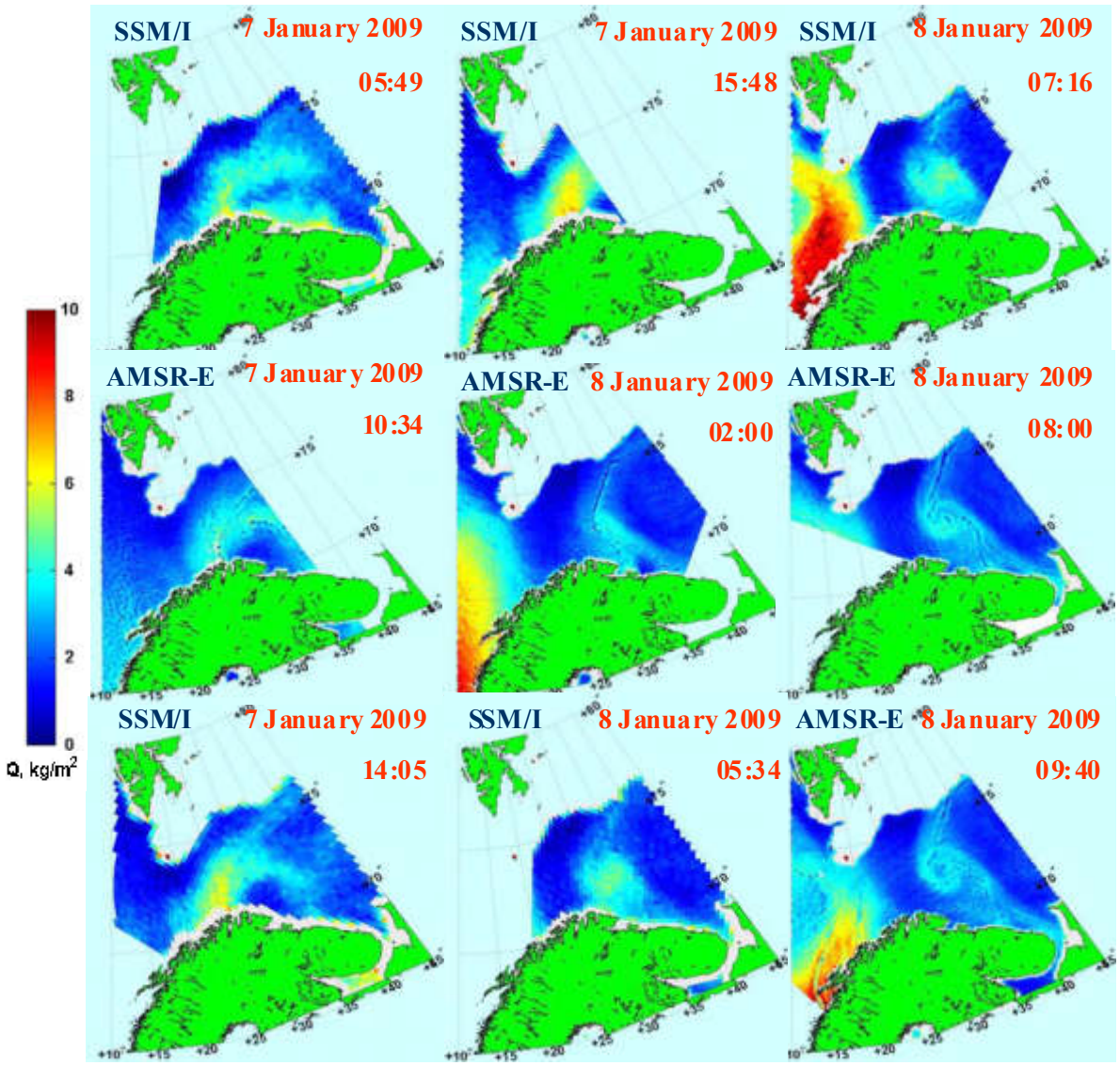


Рис. 1. Поле интегральной водности по данным SSM/I и AMSR-E

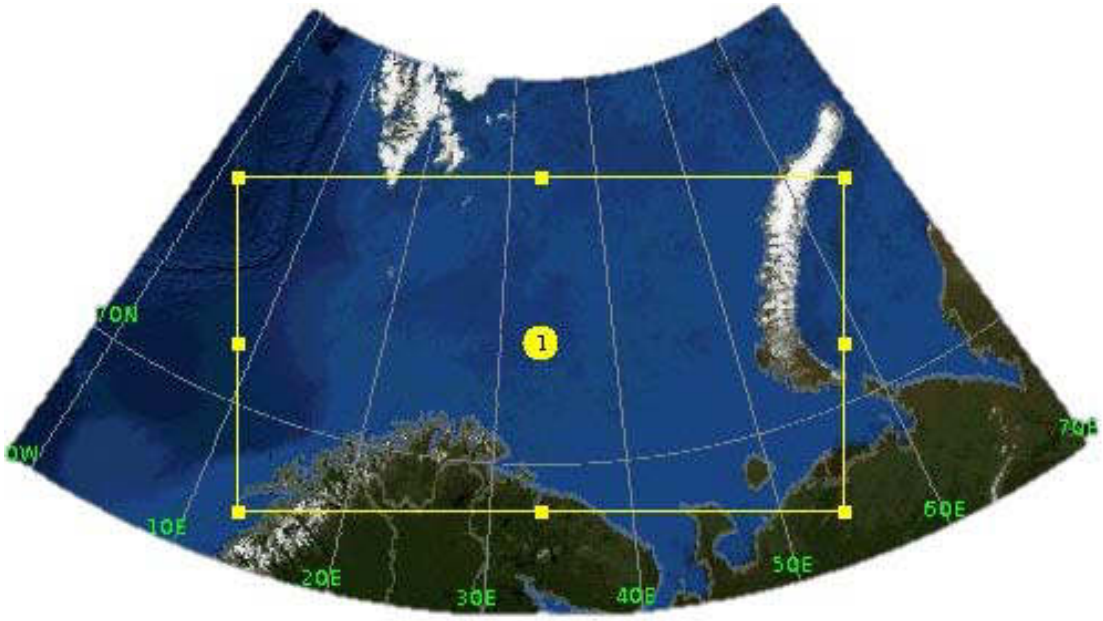


Рис. 2. Область моделирования

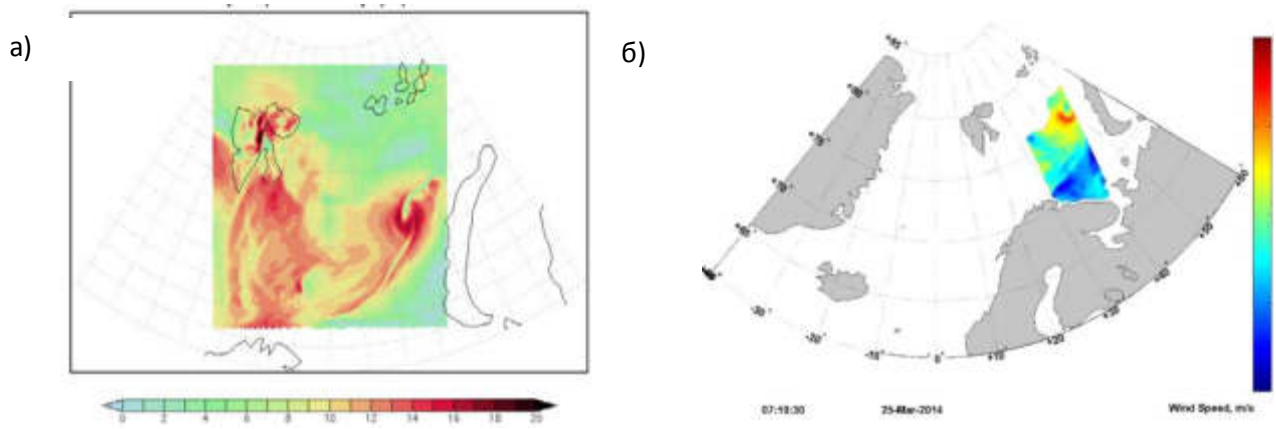


Рис. 3. Сравнение спутникового снимка(б) и прогностического (схема MRF) поля ветра (срок 0600 СГВ 25 Марта 2014) для циклона 24–26 Марта

На рисунке 4 приведены поля приземного ветра, полученные с использованием разных параметризаций планетарного пограничного слоя.

Оценивая эти результаты, можно сказать, что модель WRF-ARW хорошо прогнозирует максимальную стадию развития циклонов, но очень плохо моделируется начальная стадия, которая очень важна. И на данный момент актуально улучшение прогноза зарождения полярных мезомасштабных циклонов.

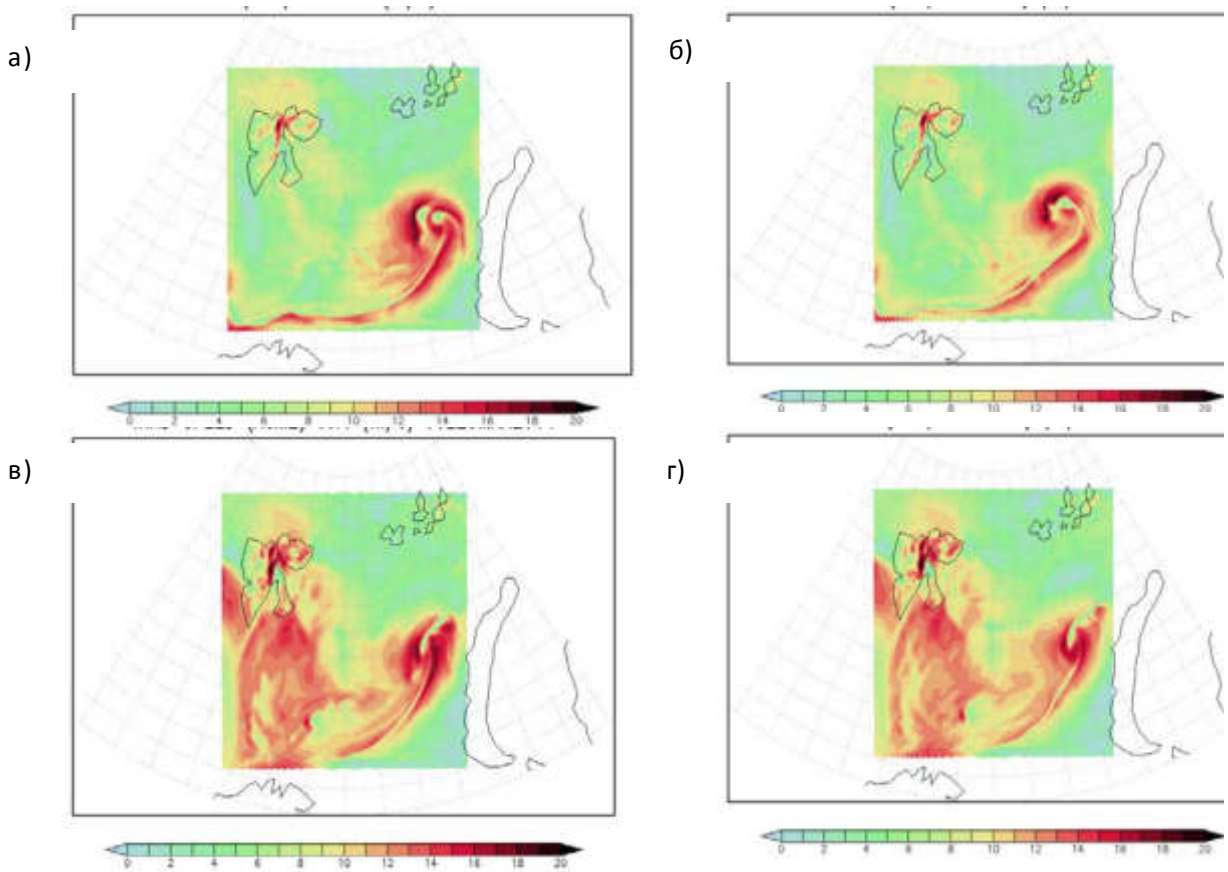


Рис. 4. Результат моделирования полей скорости ветра (срок 0600 СГВ 25 Марта 2014) для циклона 24–26 марта 2014 с использованием параметризаций: а) Университета Йонсей (YSU), б) Мелора–Ямады–Янича (MYJ), в) Асимметрическая конвективная модель(ACM2), г) Схема прогноза среднего диапазона (MRF)

Для повышения качества моделирования зарождения полярных циклонов проведены эксперименты по ассимиляции спутниковых данных. В последние годы наблюдается заметный интерес к такого рода исследованиям. Связано это, в первую очередь, с развитием компьютерных систем, развитием суперкомпьютеров и значительным прогрессом в области численных методов. Также важно отметить появление больших массивов наблюдаемой геофизической информации, систем спутниковых наблюдений и измерений, скоростных средств связи и т. д. Задача усвоения данных в гидродинамической модели, сегодня является одной из самых актуальных и непростых задач. Хорошо известно, что успешность гидродинамических прогнозов с использованием региональных моделей зависит от корректности описания начального состояния атмосферы, так называемого анализа атмосферы.

Основная цель системы ассимиляции данных в модель WRF (блок WRF-DA) в том, чтобы подготовить качественную оценку состояния атмосферы при анализе с помощью минимизации функции стоимости (или функционала качества).

На рисунке 5 совместно показан спутниковый снимок и разницы в полях интегрального влагосодержания, полученных с ассимиляцией и без. Можно сделать вывод, что эта процедура оказывает незначительное влияние на прогностические поля водяного пара.

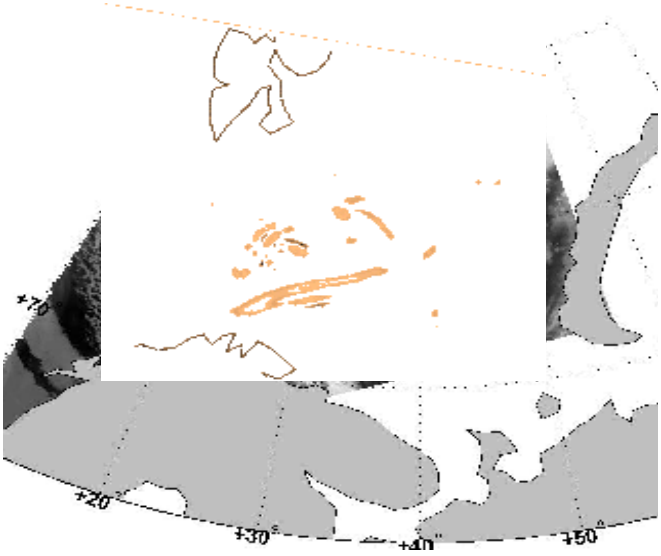


Рис. 5. Совмещение спутникового снимка(MODIS) и разницы в прогнозах полей водяного пара

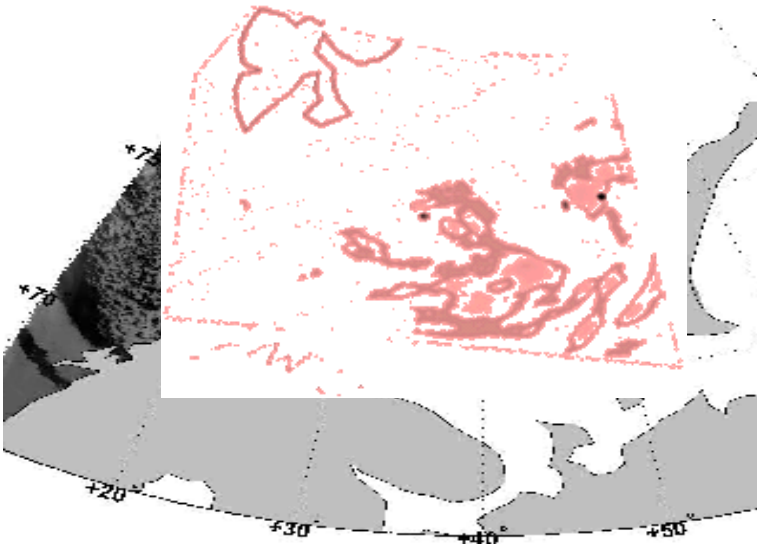


Рис. 6. Совмещение спутникового снимка (MODIS) и разницы в прогнозах полей давления

Лучший результат получен при ассимиляции данных о приземном давлении. На рисунке 6 совмещены фактический спутниковый снимок полярного циклона и разница в поле давления, полученного с ассимиляцией и без. Видно, что значительная разница в полях приземного давления в районе центра циклона и на фронте окклюзии, разница составляет около 1 гПа.

Заключение

Для прогнозирования и усовершенствования прогнозирования опасных явлений погоды использовалась модель WRF (Weather Research and Forecasting), которая является одной из наиболее универсальных, успешных и современных систем моделирования атмосферных процессов. Являясь свободно распространяемым программным продуктом, она широко и успешно используется для метеорологического прогнозирования в научных центрах и метеослужбах различных стран и продолжает непрерывно развиваться.

При выполнении исследований были проведены циклы численных экспериментов, которые позволили выбрать наилучшую комбинацию параметризаций. Основное внимание было уделено выбору параметризации планетарного пограничного слоя атмосферы. В результате проведённых исследований лучшей параметризацией пограничного слоя атмосферы для улучшения прогноза начальной стадии циклонов признана схема Университета Йонсей (YSU). Для прогнозирования максимальной стадии развития циклонов следует использовать Асимметрическую конвективную модель(ACM2) или схему MRF. Это исследование помогло подобрать набор настроек для более успешного запуска модели в полярном регионе.

Ассимиляция данных о скорости, направлении приводного? ветра и приземного давления в модель WRF-ARW вариационным методом WRF-Var с временным окном 6 часов, не помогла улучшить прогноз полярного циклогенеза. Требуются дополнительные исследования.

Список литературы

1. Erik A. Rasmussen. Polar Lows: Mesoscale Weather Systems in the Polar Regions. Cambridge University Press, 2003. 614 p.

2. Заболотских Е. В., Бобылев Л. П., Дикинис А. В. Использование данных еанализа и спутниковых измерений для оценки количественных характеристик штормовых мезоциклонов // Ученые записки РГГМУ. 2011. № 22. С. 157–170.

3. Валидация модели переноса излучения на частотах икроволновых радиометров SSMIS и AMSR-E и её применение при анализе морских погодных систем с использованием усовершенствованных алгоритмов / Е. В. Заболотских, Л. М. Митник, Б. Шапрон, О. Г. Анискина, А. В. Дикинис, Ю. Е. Смирнова // Ученые записки РГГМУ. 2013. № 29. С. 146–160.

УДК 551.582(571.53)

Особенности изменения экстремальных температур в Иркутске

Т. В. Ануфриенко (tanya_anufrienko@mail.ru)
Е. А. Кочугова (kochugovae@mail.ru)
Иркутский государственный университет, Иркутск

Аннотация. Выполнен обзор научной и периодической литературы по проблеме изменения климата в современный период. Дана климатическая характеристика Иркутска, проанализированы экстремальные температурные характеристики за период 1957–2017 гг. Выявлены тренды увеличения максимумов и минимумов, однако рост максимальных температур более выражен.

Ключевые слова: изменение климата, экстремумы, температура воздуха, климат Иркутска, изменчивость.

Введение

Климат регионов, как и всей планеты, стал более изменчив, с частым возникновением экстремальных условий погоды, угрожающих или ограничивающих деятельность человека. Например, воздействие низких и высоких температур ведет к негативным последствиям не только для организма человека, но и для обеспечения жизнедеятельности населения в целом: сокращение службы механизмов, экономическое удорожание всех сфер жизнедеятельности и т. д.

В связи с этим основным объектом анализа в статье являются экстремальные климатические характеристики, непосредственно измеренные. В отличие от средних температур экстремальные обладают большей изменчивостью и меньшей повторяемостью Кроме того, непосредственный ущерб людям и их собственности не очевиден при постепенном изменении температуры, но бесспорен, когда вызван их экстремумами.

Краткая климатическая характеристика температурного режима г. Иркутска

Климат Иркутска формируется под воздействием большого числа различных факторов. Многие из них зависят от географического положения Иркутска. С географическим положением связана принадлежность к умеренному климатическому поясу. Собственно же формирование климата происходит под взаимодействием двух групп факторов. Группу физических факторов формируют радиационный режим, циркуляция атмосферы и влагооборот, а в группу физико-географических и антропогенных факторов входят подстилающая поверхность, орография и особенности хозяйственной деятельности человека

Значительное влияние на климат Иркутска оказывает водохранилище. В 1956–1959 гг. на Ангаре, в 65 км от озера, была построена плотина Иркутской ГЭС. В результате уровень воды в озере поднялся почти на 1 м, под воду ушли 600 км^2 береговой зоны озера, 1200 км^2 прибрежных земель стали часто затапливаться. Строительство Иркутской ГЭС на р. Ангаре сказалось на климатическом режиме региона. Климат стал менее континентальным.

За последние 130 лет в Иркутске отмечен рост среднегодовой температуры воздуха на 2,5 °С, причем, как видно на графике, представленном на рис. 1, наибольшее увеличение температуры приходится на последние 60 лет. Если до строительства Иркутской ГЭС максимальное значение среднегодовой температуры составляло только 0,4 °С (1932 г.), то после появления водохранилища максимальное значение достигло рекордных значений 3,0 °С (2007 г., 2015 г). Среднегодовые значения в Иркутске колеблются в пределах от минус 1,1 °С за период 1886–1956 гг. до 0,6 °С за период 1957–2016 гг. Понизились температуры летнего периода, а зимы стали характеризоваться повышенными температурами относительно периода до постройки ГЭС [6].

Исследуя годовой ход температуры воздуха в Иркутске за весь период регулярных наблюдений (1886–2017 гг.), были найдены следующие характеристики температуры воздуха: средняя месячная температура самого холодного месяца в Иркутске составляет – 19,9 °С (рис. 2). Самая высокая среднемесячная температура наблюдалась в январе в 2002 г. (–10,8 °С), а самая низкая – в 1893 г. (–29,9 °С).

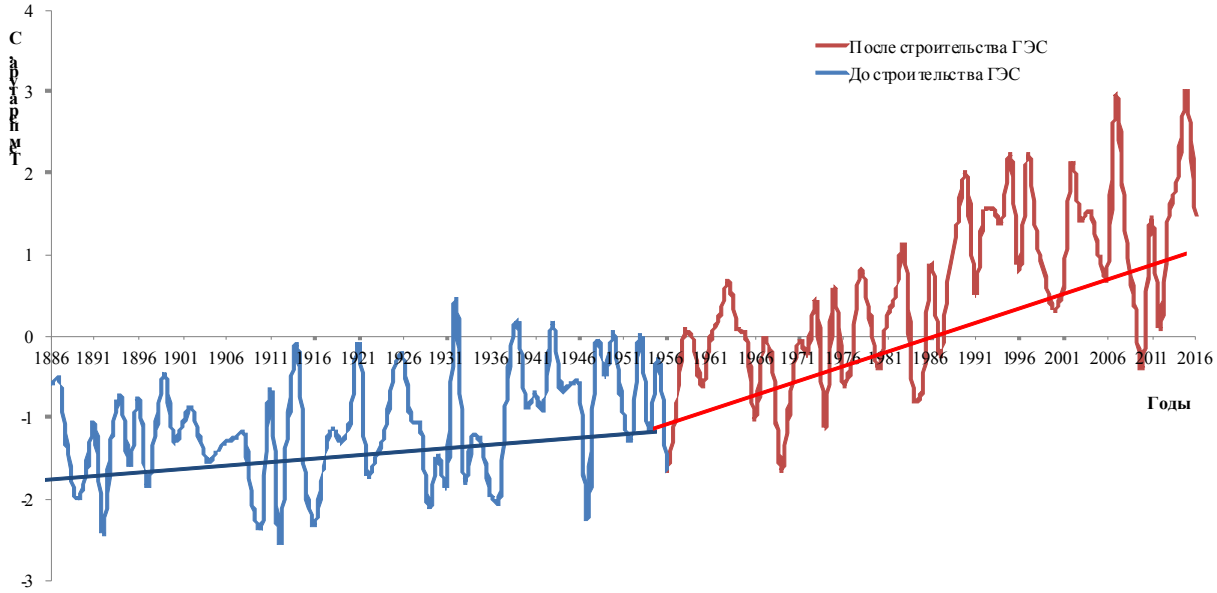


Рис. 1. График изменения среднегодовой температуры воздуха в Иркутске

Абсолютный минимум температуры воздуха в Иркутске наблюдался в 1915 г., когда температура понизилась до –50 °С. Минимальная годовая температура в городе может опуститься до –39 °С лет 1 раз в 10 лет и до –43 °С раз в 100 лет.

Самым тёплым месяцем в году является июль. Температура воздуха этого месяца составляет 17,8 °С. Самый теплый июль за весь период регулярных наблюдений отмечался в 1922 г., температура составила 21,5 °С. Минимальная среднемесячная температура зарегистрирована в 1907 г. (14,7 °С). Предельно высокая температура воздуха в Иркутске наблюдалась в 1901 г., когда температура повысилась до 32 °С. Максимальная годовая температура в Иркутске может повыситься до 33 °С лет 1 раз в 10 лет и до 37 °С 1 раз в 100 лет.

На рисунке 3 представлена гистограмма отклонений среднегодовых температур воздуха в Иркутске от средних значений, рассчитанных за период 1886–2017 гг. Анализируя гистограмму, можно сказать, что в период с 1886 по 1976 гг. преобладали отрицательные отклонения среднегодовых температур. Начиная с 1976 г., практически ежегодно средняя температура воздуха была выше нормы. В 2007 г. и 2015 г. отклонения достигали рекордных значений – 3 °С.

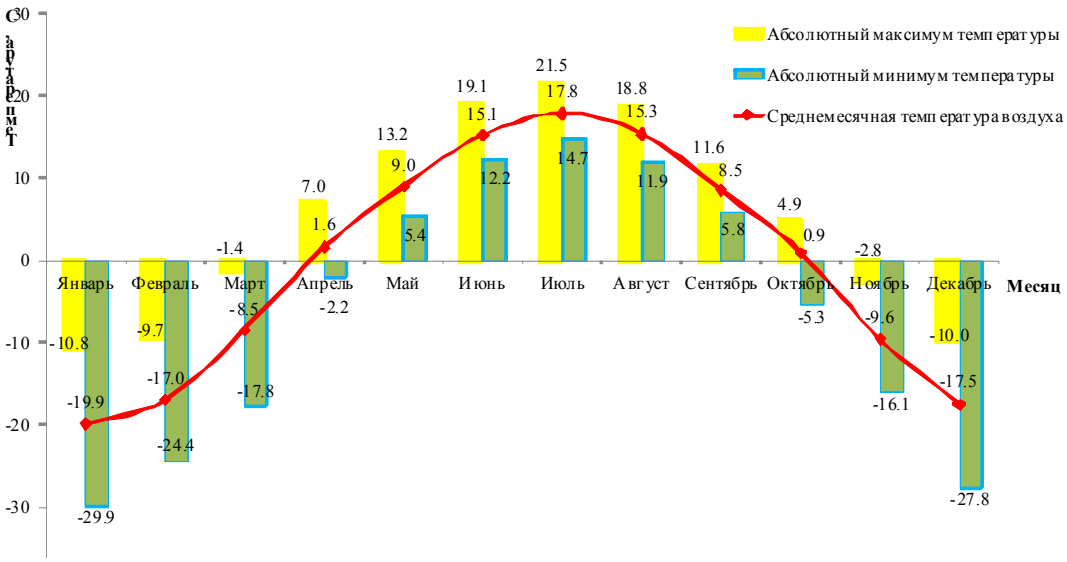


Рис. 2. Годовой ход характеристик температуры воздуха

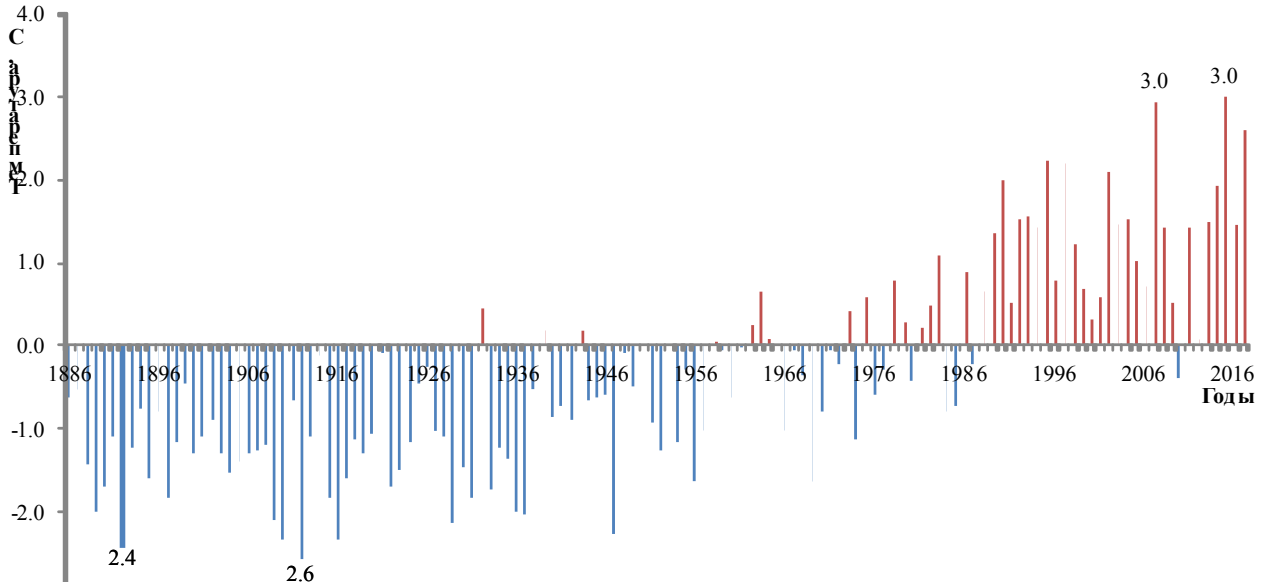


Рис. 3. Отклонение среднегодовых значений температуры воздуха в Иркутске от нормы

Следует отметить, что в последние 10–15 лет наблюдается увеличение количества положительных аномалий среднемесячной температуры воздуха, а также их абсолютных значений. В целом, график показывает устойчивую тенденцию к потеплению, особенно хорошо выраженную в последние десятилетия.

Состояние изученности вопроса об изменении экстремумов температуры воздуха

Климатические изменения обычно изучают на основе осреднённых метеорологических величин с различным временным разрешением. Однако средние не являются наблюдаемыми величинами и требуют соответствующей интерпретации: учета соотношения периодов осреднения, оценки дисперсий и т. п. Поэтому определенный научный и практический интерес представляет исследование таких климатических характеристик, как экстремальные значения непосредственно измеренных метеорологических величин. Сами по себе экстремумы – величины с малой обеспеченностью, они связаны с малыми вероятностями, обладают большей изменчивостью и меньшей повторяемостью в отличие от средних состояний погоды, и нередко с ними связан ощутимый социально-экономический ущерб, а также человеческие жертвы. Это наводит на мысль о том, что в описании изменения климата и оценке поведения (повторяемости и интенсивности) экстремальных климатических явлений целесообразней оперировать с распределениями их вероятностей, производными климатических индексов экстремальности [7].

Бардин М. Ю. [1], исследуя сезонные экстремальные значения суточной средней, минимальной и максимальной температуры воздуха на территории России в зимний и летний сезоны за период 1976–2009 гг., показал, что в оба сезона пороги экстремальных положительных и отрицательных аномалий температуры растут на большей части территории России. Однако имеются регионы, где наблюдаются отрицательные тренды.

Сравнение с изменениями среднесезонных значений температуры воздуха показывает, что география изменения пороговых значений экстремумов качественно в основных чертах определяется общим смещением распределения температуры. Летом это выраженный рост почти на всей территории РФ с максимумами на западе страны (в особенности – на юго-западе ЕЧР), вокруг Байкала и на дальнем Северо-Востоке (Камчатка, Чукотка); зимой – менее выраженный рост с максимумом на западе и обширная область убывания температур на дальнем Северо-Востоке. Наиболее ярко выраженные отличия изменений экстремумов от изменения сезонных средних и асимметрия изменений положительных и отрицательных экстремумов наблюдаются для зимы. Следует в первую очередь отметить отсутствие области отрицательного тренда на дальнем Северо-Востоке для 5-го процентиля: это значит, что общее выраженное зимнее похолодание в этой области не приводит к углублению экстремумов

холода. Напротив, здесь наблюдается некоторое смягчение экстремальных холодов. С другой стороны, величины экстремумов тепла снижаются здесь значительно быстрее средних температур. Эти особенности объясняются значительным уменьшением дисперсии температуры в данном регионе. Важная особенность − усиление экстремумов холода на востоке Северного Кавказа, не сопровождающееся уменьшением сезонных средних и снижением порога положительных экстремумов. Оно как будто объясняется ростом дисперсии в южной половине ЕЧР: но здесь ситуация существенно отличается от рассмотренных выше. Рост дисперсии здесь (в отличие от Северо-Востока и Северо-Запада) исключается при рассмотрении аномалий относительно переменного годового хода. Изменения границ экстремумов обоих знаков летом значительно более сходны между собой и с изменениями среднесезонных температур, нежели зимой.

Рочевой Э. В. [10] выявлено, что влияние особенностей теплового состояния океана в предшествующий холодный период проявляется в продолжительности длительных летних аномалий тепла на континенте во все месяцы летнего периода (с мая по август). Но расположение областей этих аномалий меняется от месяца к месяцу: в мае это центральные районы Сибири (90 °-95 ° в. д.), в июне-июле – дальневосточный сектор 100 °-140 ° в. д. Области влияния зимней Северной Атлантики отмечаются в западных районах России (30 ° в. д.) в июле; в августе они охватывают всю Европейскую часть России (30 °-60 ° в. д.) и сектор 120 °-140 ° в. д.

В статье [4] проанализированы многолетние ряды как среднегодовых значений температуры воздуха, так и ряды абсолютных максимумов и минимумов температуры на территории Предбайкалья за период с 1951 г. по 1995 г. Наибольшие изменения в сторону повышения наблюдаются у минимальных температур воздуха (до 2 °С/10 лет), что на порядок превышает аналогичные характеристики для абсолютных максимумов. В рядах температуры наиболее часто встречаются колебания с периодами 2–4 года, 10–12 лет, что соответствует общепризнанным квазидвухлетним и 11-летним циклам.

Башалхановой Л. Б. [2] удалось установить, что наибольшие положительные отклонения средних месячных температур с декабря по февраль свидетельствуют о частой смене воздушных масс и сокращении периода интенсивного выхолаживания подстилающей поверхности, характерного для Восточной Сибири. Заметное сокращение низкотемпературных периодов способствует повышению средних месячных температур. Вместе с тем колебания температуры холодного периода не оказали существенного влияния на установленные пределы оценки уровней дискомфортности климата макрорегиона.

В статье [8] отмечается, что в среднем в Предбайкалье минимальная температура воздуха за период с 1943 по 2012 гг. повысилась на 3,5 °С. Увеличение минимальной температуры, превысившее среднее значение по Предбайкалью, произошло в северо-восточном, западном и центральном районах. Меньше, чем в других районах, температура повысилась на побережье Байкала. Здесь средняя скорость повышения минимальных температур за зимний сезон составляет 0,25 °С/10 лет.

Вследствие большой зависимости числа случаев с низкой температурой, как и температур вообще, от высоты и рельефа местности создается чрезвычайно сложная картина распределения. В различных районах Предбайкалья линейный тренд за этот же период составил от 0,10 °С/10 лет (станция Бодайбо) до 1,11 °С/10 лет (станция Иркутск). В работе отмечено, что последние два десятилетия характеризуются более суровым температурным режимом, что нашло свое отражение в уменьшении скорости роста минимальных температур воздуха. Например, тренд минимальной температуры воздуха на станции Иркутск с 1,99 °С/10 лет уменьшился до 1,11 °С/10 лет. Исследованием установлено, что более всего изменениям подверглись декабрьские минимальные температуры, которые в среднем на 0,23 °С/10 лет превышают тренд других зимних месяцев. В этой же статье указано, что наблюдаемое изменение климата Предбайкалья выражается в виде положительных аномалий приземной минимальной температуры воздуха в зимний период, повторяемость которых значительно возрастала до 2002 г. Предполагается, что причина таких аномалий – усиление циклонической ак-

тивности в высоких широтах Евразии, связанное с изменениями крупномасштабной атмосферной циркуляции. В зимний период, помимо явного повышения минимальных экстремумов, температура воздуха демонстрирует существенную десятилетнюю и межгодовую изменчивость.

Таким образом, можно сделать вывод, что зимние условия становятся термически более мягкими, хотя не исключены периоды с аномально низкими температурами. Последнее утверждение подтверждают выводы Второго оценочного доклада Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации [3]. В нем указано, что повышение температуры зимой на территории Иркутской области будет заметно превышать ее повышение в летний сезон. Также можно отметить, что к концу XXI века изменение сезонной температуры приземного воздуха в зимний период по отношению к концу XX в. достигнет 4 °С (рис. 4).

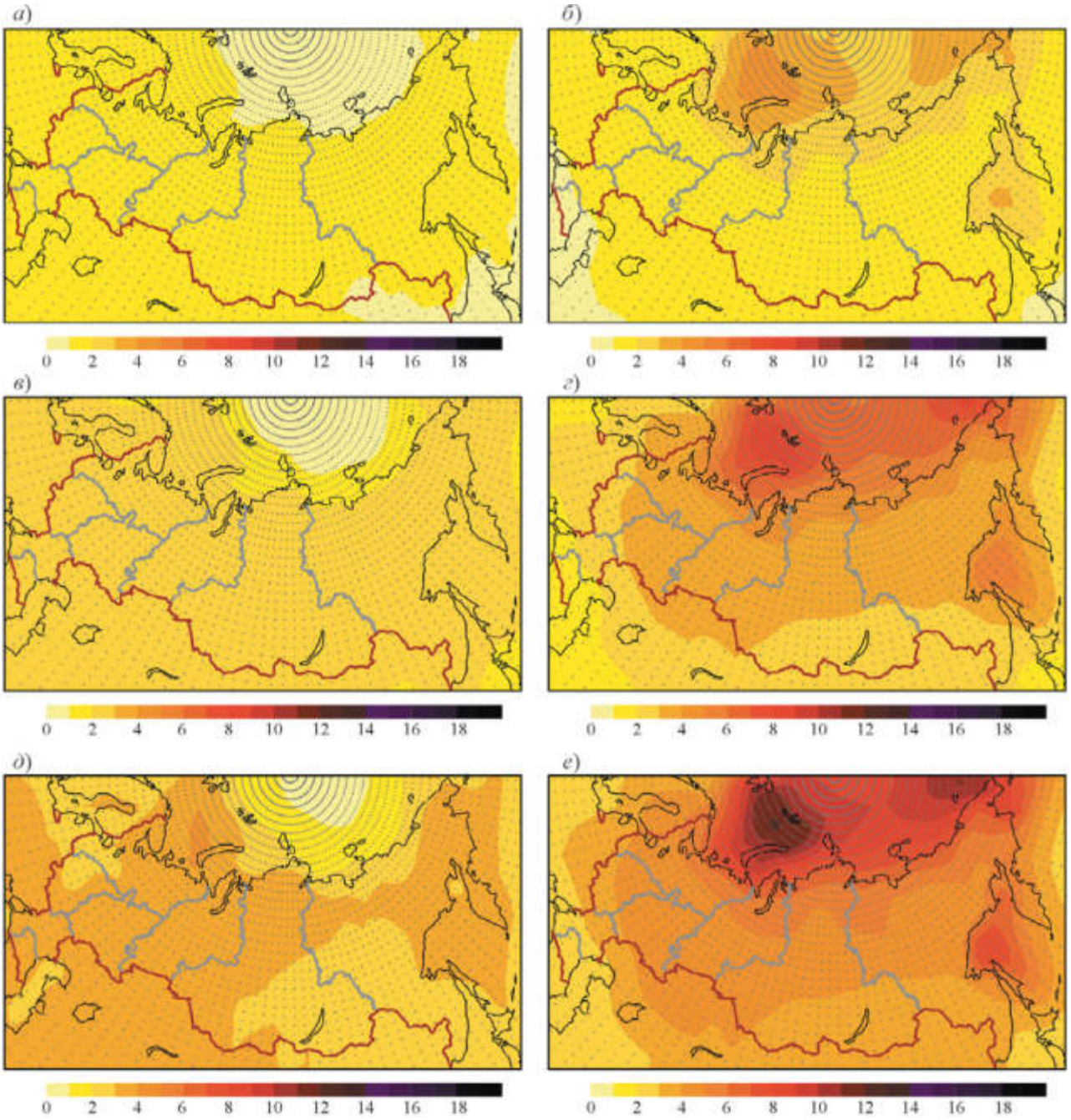


Рис. 4. Изменения средней сезонной температуры приземного воздуха (°С) в периоды 2011–2030 (а, б), 2041–2060 (в, г) и 2080–2099 гг. (д, е) по отношению к концу XX в. летом (а, в, д) и зимой (б, г, е) по оценкам ансамбля из 31 модели CMIP5 для сценария RCP4. 5 [3]

В работе Б. Н. Порфирьева, посвящённой изменениям климата и международной безопасности [9], также отмечается, что в последующие десятилетия средняя температура приземного воздуха в целом по России будет продолжать повышаться, особенно зимой, причем, на большей части территории страны, особенно в Сибири, скорость потепления будет превышать глобальный показатель.

Л. Б. Башалханова, исходя из результатов своей работы [2], предполагает, что ожидаемое снижение степени суровости климата Восточной Сибири в связи с некоторым уменьшением числа дней со средней суточной температурой ниже минус 25 °С может возмещаться повышением скорости ветра, всегда сопровождающим смену воздушных масс. Кроме того, выявленный диапазон изменений числа дней с температурой ниже минус 25 °С происходит в рамках установленных пределов оценки соответствующего уровня дискомфортности климата.

Информация о вероятности возникновения экстремально низких и высоких температур важна для многих секторов экономики (сельское, лесное, водное хозяйства и т. д.), а также при решении прикладных задач, в частности при проектировании и техническом обслуживании объектов нефтегазодобывающей отрасли. Исключительно продолжительная холодная погода истощает до опасно низкого уровня запасы природного газа и топливной нефти. Морозы могут привести к различного рода техническим авариям, разрушениям систем отопления, гибели людей от переохлаждения. В период аномально высоких температур возрастает частота пожаров, увеличивается площадь территории с засухами, увеличиваются риски для здоровья населения и др.

Для решения подобного рода задач необходима информация об абсолютных минимумах и абсолютных максимумах за год в целом, значения которых используются в качестве расчетных параметров в ряде нормативных документов.

На рис. 5 приведен межгодовой ход экстремумов температуры воздуха с 1957 по 2017 г.

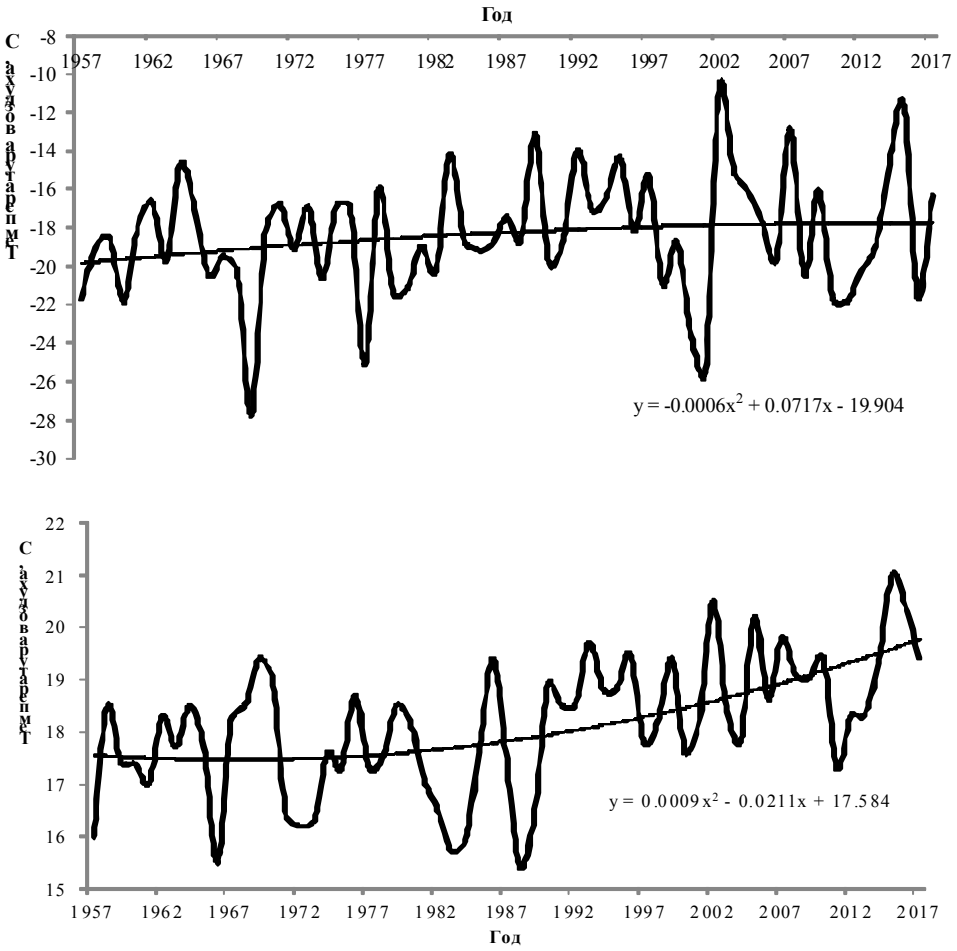


Рис. 5. Межгодовой ход минимальных (а) и максимальных (б) значений температуры воздуха в Иркутске за период 1957 – 2017 гг.

На графиках временного хода температурных экстремумов, прослеживаются тренды увеличения максимумов и минимумов, однако рост максимальных температур более выражен. За весь период максимальная температура возросла на 2 °С, а минимальная уменьшилась на 2 °С.

Следует отметить, что после 1980 г. рост минимальных температур замедлился, также отмечается заметное увеличение скорости роста годовых максимальных температур.

Оценим продолжительность периодов с экстремальными температурами. В Иркутске непрерывная продолжительность периодов с аномально низкой температурой чаще всего составляет 1–2 дня. Повторяемость более длительных периодов наблюдается значительно реже. Наибольшая устойчивость экстремально холодной погоды отмечается зимой. В зимние месяцы продолжительность периодов с аномально низкой температурой изменяется от 1 до 12 дней подряд. Самые длительные периоды, когда минимальные температуры были ниже порогового значения, наблюдалось с 19 по 30 января 1969 г. и с 3–14 января 2001 г.

Большое прикладное значение имеет изменение индекса CSDI, под которым понимают годовое количество последовательных (≥ 6) холодных ночей, когда держалась экстремально холодная погода, включающая значения минимальной температуры ниже квантиля 0,1. Анализ CSDI показал, что в Иркутске устойчивость холодных периодов в последние годы уменьшается со скоростью -0,4 дн. /10 лет (рис. 6).

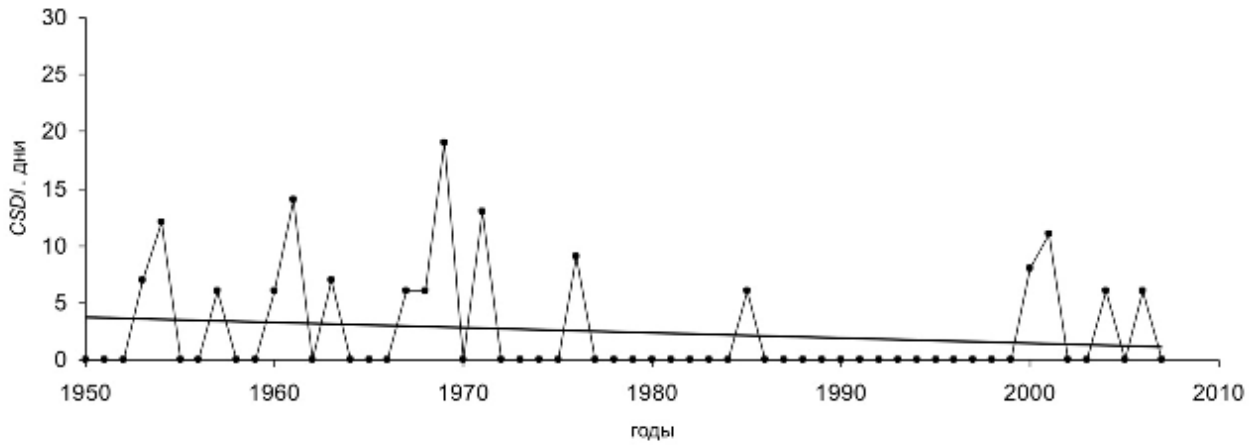


Рис. 6. Динамика индекса холодных периодов (CSDI) на станции Иркутск обс.

Непрерывная продолжительность периодов с аномально высокой температурой в среднем составляет 1–2 дня, лишь однажды она увеличивается до 13 дней. Как известно, степень неблагоприятного воздействия высоких температур воздуха определяется не сколько достижением температуры критических пределов, сколько длительностью их воздействия. Тенденции продолжительности теплых периодов, в которые ≥6 дней подряд держалась экстремально жаркая погода (включающая значения максимальной температуры выше квантиля 0,9 ежесуточного распределения максимальных температур за базовый период 1961–1990 гг.) указывают на незначительное уменьшение.

Заключение

Глобальное изменение температурного режима является интегральным показателем региональных изменений климата, поэтому очень важно изучать климатические тенденции на региональном уровне. Оценка региональных особенностей изменений климата проводилась на основе наблюдений за экстремумами температуры воздуха в Иркутске за шестидесятилетний период (1957–2017 гг.).

Выполненное исследование позволило сделать следующие выводы:

1. Экстремальные температуры воздуха в Иркутске изменяются в широком диапазоне. Общие закономерности температурного режима осложнены влиянием факторов регионального и местного характера.

2. На территории Сибири прогнозируется рост среднегодовой температуры воздуха (скорость потепления будет превышать глобальный показатель), а также снижение суровости климата.

3. Анализ трендов годовых температур воздуха показывает, что с 1980 г. по настоящее время происходит рост максимальных и минимальных температур.

4. В последние годы в Иркутске отмечается снижение устойчивости холодных и тёплых периодов.

Таким образом, в последние 60 лет летние условия в Иркутской области становятся термически более напряженными, характеризующимися возрастанием повторяемости экстремальных значений, а зимние – более мягкими, хотя не исключены периоды с достаточно низкими температурами воздуха.

Список литературы

1. Бардин М. Ю., Платова Т. В. Изменения порогов экстремальных значений температур и осадков на территории России в период глобального потепления // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем : сборник. М. : Изд-во Ин-та глоб. климата и экологии Росгидромета и РАН, 2013. Т. 25. С. 71–93.

2. Башалханова Л. Б., Максютова Е. В. Влияние изменений температуры холодного периода на условия проживания населения в Восточной Сибири // География и природные ресурсы., 2014. № 1. С 82–90.

3. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М. : Росгидромет, 2014. С. 44–46.

4. Густокашина Н. Н., Максютова Е. В. Изменение температурных экстремумов на территории Предбайкалья // Вычисл. технологии, 2006. Т. 11, спец. вып. С. 83–87.

5. Густокашина Н. Н., Балыбина А. С. Изменение климатических и природных характеристик территории, прилегающей к водохранилищам Ангарского каскада ГЭС / Н. Н. Густокашина, // География и природ. ресурсы, 2005. № 4. С. 93–101.

6. Зилов Е. А. Современное состояние антропогенного воздействия на озеро Байкал / Е. А. Зилов // Journal of Siberian Federal University. Biology. 2013. Т. 6, № 4. С. 388–404.

7. Климат России / под ред. Н. В. Кобышевой. СПб. : Гидрометеоиздат, 2001. 654 с.

8. Кочугова Е. А. Изменчивость зимних минимальных температур воздуха в Предбайкалье / Е. А. Кочугова // Изв. Иркут. гос. ун-та. Сер. Науки о Земле, 2015. Т. 13. С. 98–110.

9. Порфирьев Б. Н., Катцов В. М., Рогинко С. А. Изменения климата и международная безопасность / РАН, Отд-ние общественных наук, 2011. М. : Д'АРТ. 291 с.

10. Рочева Э. В., Смирнов В. Д. О тенденциях в изменении продолжительности «волн тепла» на территории России // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. М. : Ин-т глобального климата и экологии, 2013. Т. 25. С. 94–114.

УДК 502.3–027.21

Загрязнение атмосферного воздуха г. Ангарска с учётом неблагоприятных климатических условий

А. В. Ахтиманкина (anastasiya. ahtimankina@mail.ru)

Иркутский государственный университет, Иркутск

Аннотация. Работа заключается в оценке уровня загрязнения атмосферного воздуха, создаваемого выбросами стационарных источников промышленных предприятий г. Ангарска с учетом климатических условий местности. В качестве входной информации использовались инвентаризационные данные 3 000 стационарных источников поступления загрязняющих веществ и 8-срочные метеорологические наблюдения за период с 1995 по 2014 г. Расчет абсолютных концентраций загрязняющих веществ осуществлялся с использованием программного комплекса «Эколог». Для нахождения частот превышения гигиенических нормативов загрязняющих веществ применялась полуэмпирическая математическая модель. Расчет уровней атмосферного загрязнения произведен для двух периодов: зимнего и летнего. Согласно расчетам приоритетными вредными веществами, с точки зрения создания высоких уровней загрязнения атмосферы на территории г. Ангарска, являются: диоксиды азота и серы, сажа, неорганическая паль с содержанием двуокиси кремния 20–70 % и менее 20 %, оксид азота, бенз(а)пирен, мазутная зола, а также ряд специфических загрязняющих веществ.

Ключевые слова: загрязнение атмосферного воздуха, нефтехимические предприятия, математическое моделирование, загрязняющие вещества, гигиенические нормативы, самоочищение атмосферы.

Введение

Ангарск – город в Восточной Сибири, который часто называют городом нефтехимиков (рис. 1). Такое название он заслужил расположением на территории самого крупного восточносибирского предприятия по переработки нефти и нефтепродуктов – ОАО «Ангарская нефтехимическая компания». Однако в городе также развиты и другие отрасли, среди которых: строительство, электроэнергетика, легкая и пищевая промышленность.

Разнообразие промышленных предприятий не может не сказаться на состоянии окружающей среды. На протяжении порядка 35 лет, по данным Министерства природных ресурсов, в атмосферу поступают загрязняющие вещества, концентрации которых значительно превышаю гигиенические нормативы. В результате чего город регулярно включают в Приоритетный список город с наибольшими уровнями загрязнения атмосферы.

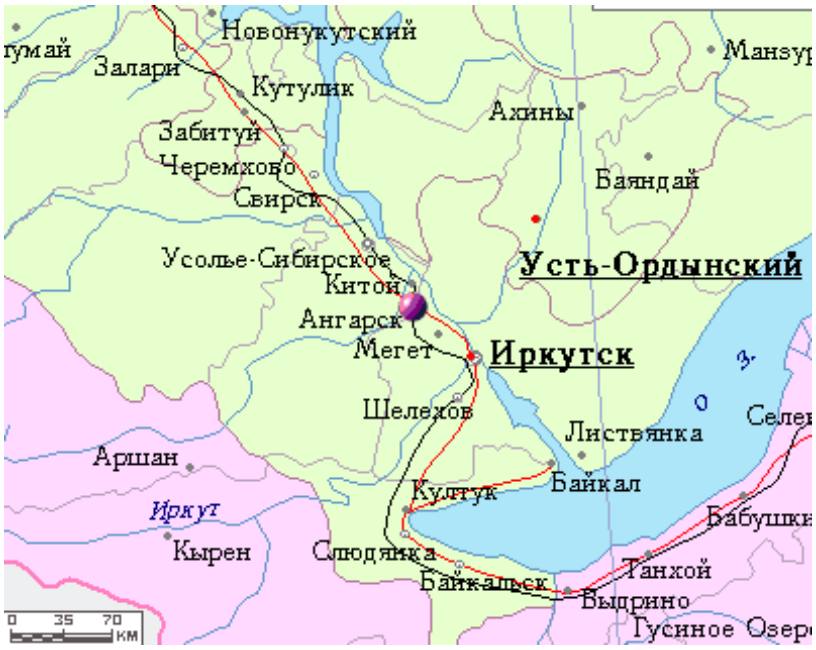


Рис. 1. Ангарск на карте Иркутской области (источник www.nakarte.ru)

Ситуация осложняется за счет неблагоприятных для рассеяния климатических условий. В проведенных ранее исследованиях [1] было установлено, что на территории г. Ангарска как в летний, так и зимний периоды ветер характеризуется неустойчивостью, что связано с преобладанием на этой территории двух направлений ветра: северо-западного и юго-восточного.

Построение эллипсов рассеяния ветрового потока, являющихся качественной характеристикой способности атмосферы к самоочищению, и нахождение площадей эллипсов позволило выявить, что самые неблагоприятные условия для рассеяния создаются в январе, характеризующемся большой повторяемостью штилевых ситуаций, способствующих накоплению загрязняющих веществ на подстилающей поверхности; наилучшие условия для рассеяния складываются в апреле – месяце, в котором скорости ветра увеличиваются, а повторяемость штилей уменьшается в 3–4 раза по сравнению с зимними месяцами. Однако увеличение скоростей ветра в весенние месяцы способствует дополнительному поступлению загрязняющих веществ, накопленных в зимний период на подстилающей поверхности и созданию более высоких концентраций, что подтверждается данными, полученными на постах наблюдения за загрязнением атмосферного воздуха.

На станциях мониторинга регулярно осуществляется сбор информации Гидрометеорологической службой, однако данные полученные в ходе наблюдений характеризуют уровень загрязнения в локальной точке. Для оценки уровня загрязнения атмосферного воздуха наряду с информацией о концентрациях загрязняющих веществ представляет интерес также определение (с учетом климатических особенностей местности) продолжительности воздействия на окружающие ландшафты и население опасных концентраций примесей.

Характеристика стационарных источников промышленных предприятий г. Ангарска

На территории г. Ангарска расположено более 3 тыс. стационарных источников поступления загрязняющих веществ в атмосферу, принадлежащих таким крупнейшим в области предприятиям как ОАО «Ангарская нефтехимическая компания» (ОАО «АНХК), ТЭЦ-10, Завод низковольтных комплексных устройств и т. д. По массе выбрасываемых от данных истоников веществ город располагается на первом месте среди остальных крупных промышленных центров области (рис. 2) [2].

Среди отраслей промышленности наибольшее количество выбросов приходится на производство и распределение электроэнергии, газа и воды, представленное предприятиями ОАО «Иркутскэнерго», ЗАО «Байкалэнерго» и др.; обрабатывающие производства, среди которых ОАО «АНХК»; и металлургические производства и производства готовых металлических изделий, к которым относят предприятие ЗАО «Кремний». В 2014 г. выброс от данных отраслей составил 389,7 тыс. т, 195,5 тыс. т и 113,1 тыс. т соответственно.

Среди крупнейших промышленных предприятий области, расположенное на территории г. Ангарска, ОАО «Ангарская нефтехимическая компания» находится на третьем месте с ежегодной массой выброса превышающей 20 тыс. т (рис. 3). Основной деятельностью ОАО «АНХК» является подготовка сырой нефти (обезвоживание, обессоливание, очистка от механических примесей), ее переработка с получением легких и тяжелых нефтепродуктов, производство отдельных видов химической продукции, очистка газов от сероводорода.

Методы исследования

В качестве методов исследования использовалось моделирование на основе двух методик: ОНД-86 – является эмпирической методикой и реализуется программным комплексом «Эколог».

На основе данной методики был произведен расчет максимальнух приземных концентраций загрязняющего вещества в долях ПДК средне-суточных (ПДКс. с.) [3]: где А – безразмерный коэффициент, зависящий от температурной стратификации атмосферы и определяющий условия вертикального и горизонтального рассеяния вредных веществ в атмосфер-

ном воздухе; M (г/с) – количество вредного, выбрасываемого в атмосферу в единицу времени; F – безразмерный коэффициент, учитывающий скорость осаждения вредных веществ в атмосферном воздухе; m, n – безразмерные коэффициенты, учитывающие условия выхода газовоздушной смеси из устья источника выброса; – безразмерный коэффициент, учитывающий влияние рельефа местности; H (м) – высота источника выброса над уровнем земли; (м3/с) – поток газовоздушной смеси; (0C) – разность между температурой выбрасываемой газовоздушной смеси и температурой окружающего атмосферного воздуха.

Таким образом методика учитывает параметры источников выброса, а также ряд метеорологических параметров и параметров, определяющих условия распространения загрязняющих веществ.

Полуэмпирическая модель, основанная на аналитическом решении уравнения переноса и турбулентной диффузии примеси [4]:

$$\frac{\partial s}{\partial t}+\upsilon\frac{\partial s}{\partial x}+\nu\frac{\partial s}{\partial y}+(\omega-\omega_g)\frac{\partial s}{\partial w}+\alpha s=\frac{\partial}{\partial x}k_x\frac{\partial s}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial y}k_y\frac{\partial s}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial z}k_z\frac{\partial s}{\partial z}+f(x,y,z,t),$$

где s – концентрация примеси (мг/м3), – компоненты вектора скорости ветра, спроектированные на оси локальной декартовой системы координат x,y,z (оси x,y направлены по горизонтали, ось z – вертикально вверх) (м/с), t – время (с), – скорость гравитационного осаждения частиц (м/с), – коэффициент распада примеси (с-1), – коэффициенты турбулентной диффузии по осям Ox, Oy, Oz соответственно (м2/с), f – функция, описывающая источник примеси.

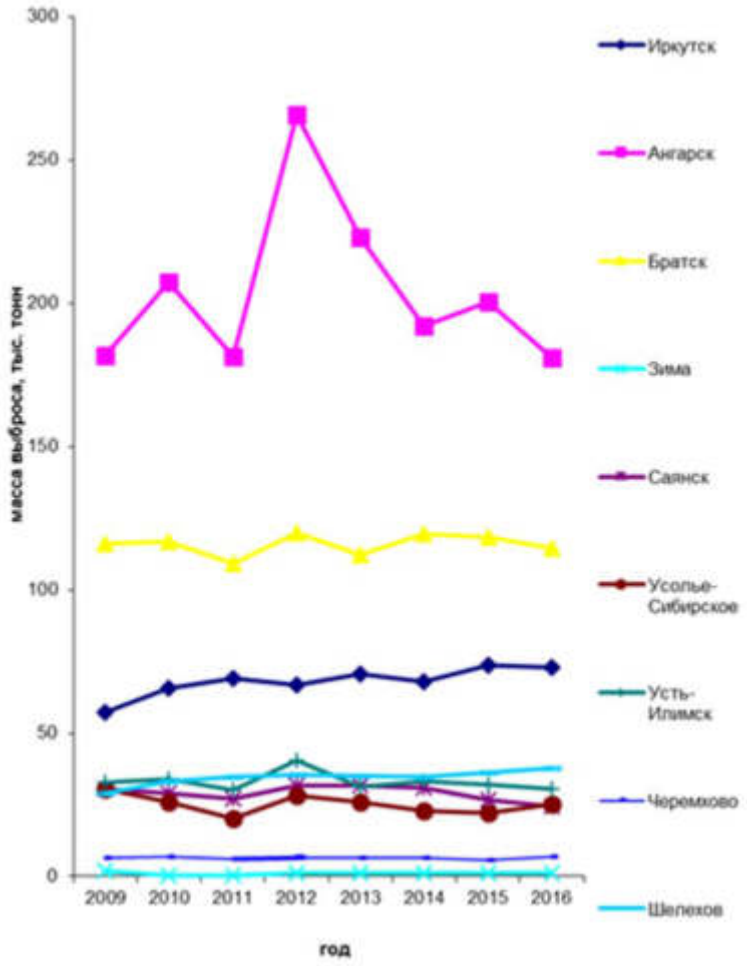


Рис. 2. Динамика массы выброса загрязняющих веществ от стационарных источников городов Иркутской области в период 2009–2016 гг.

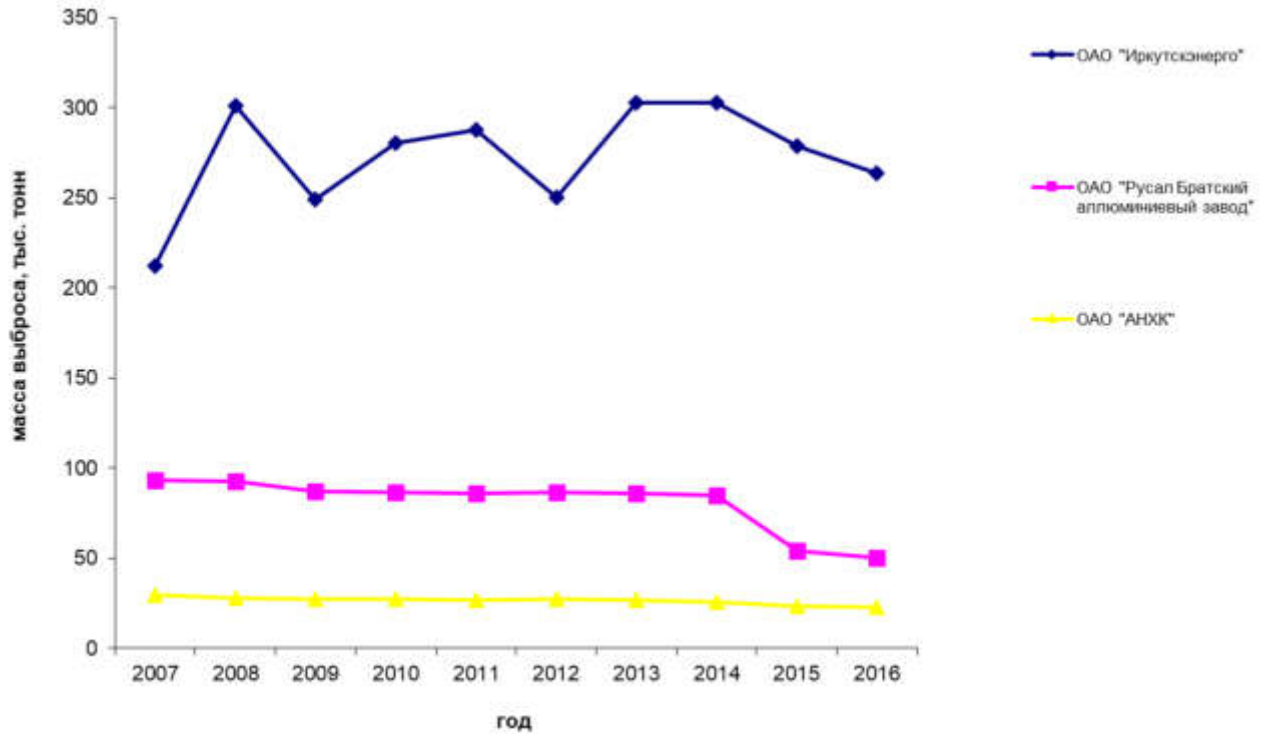


Рис. 3. Динамика массы выброса загрязняющих веществ от крупнейших промышленных предприятий Иркутской области в период 2007–2016 гг.

Особенностью используемой модели является возможность нахождения частоты превышения гигиенических нормативов (ПДКс. с.), установленных для загрязняющих веществ, путем определения вероятности проявления параметров среды, например, скоростей ветра, благоприятствующих превышению критерия качества атмосферного воздуха. Кроме учета параметров источника выброса модель учитывает метеорологические параметры за многолетний период и рассчитанные на их основе статистические характеристики, необходимые для нахождения многомерной функции плотности вероятности.

Обсуждение результатов

Представим отдельные результаты расчетов.

Диоксид азота. Особенностью г. Ангарска в сравнение с многими городами области является расположение промышленных предприятий в специально отведенных промышленных зонах, однако даже при соблюдении данного благоприятного условия, расчеты показывают, что выбросы распространяются на дальние расстояния, подвергая воздействию места постоянного проживания населения (рис. 4). Максимальные концентрации диоксида азота на территории Ангарска составляют 20 ПДКс. с. и отмечаются в промышленной зоне города. Селитебная территория г. Ангарска подвержена воздействию концентраций, достигающих значения 9 ПДКс. с. (см. рис. 4). В г. Ангарске максимальная частота превышения ПДКс. с. диоксида азота составляет 717 часов, что соответствует 29 дням в месяц и наблюдается также вблизи источников загрязнения атмосферы (рис. 5). Жилая зона, расположенная на севере города и ее центральной части, в непосредственной близости к промплощадке, находится под воздействием повышенных концентраций диоксида азота в течение 248 часов (10 дней) в месяц. Вся остальная территория повергается влиянию в течение более 144 часов (6 дней) в месяц. Причем концентрации диоксида азота распространяются за пределы границ города.

Диоксид серы

Рассчитанные максимумы диоксида серы приурочены либо к территориям промышленных зон (табл. 1). На селитебных территориях в г. Ангарске абсолютные концентрации составляют 6–8 ПДКс. с. Стоит отметить, что полученные результаты свидетельствуют о распространении выбросов и повышенных концентраций за пределы границ городов.

Сажа. На территории г. Ангарска максимальная концентрация сажи достигает величины 20 ПДКс. с. (рис. 6) и локализуется вблизи промышленных предприятий, расположенных в восточной части города. Области повышенных концентраций в Ангарске также отмечены в селитебной зоне северной части города, где концентрации сажи могут достигать величин 10 ПДКс. с. На территории г. Ангарска частота превышения норматива по саже составляет 712 (29 дней) в месяц (рис. 7). Области повышенных концентраций в Ангарске отмечены как на территории промплощадки, так и в селитебной зоне северной части города, которая подвержена воздействию повышенных концентраций, согласно расчетам, в течение 192–553 часов (8–23 дня) в месяц.

Пыль неорганическая с содержанием кремния 20–70 %. В г. Ангарске, согласно проведенному расчету и картированию, максимум (20 ПДКс. с.) наблюдается вблизи основных источников (расположенных в промышленной зоне города) поступления неорганической пыли в атмосферу (табл. 1). В то же время выбросы достигают и селитебной зоны города, создавая максимальные концентрации порядка 2 ПДКс. с. Максимальная частота превышения в г. Ангарске по данному веществу получена на территории промышленной зоны и составила 363 часа (15 дней) в месяц (табл. 2), селитебная зона, согласно расчетам, подвержена влиянию повышенных концентраций в течение 24–48 часов (1–2 суток) в месяц.

Таблица 1

Максимальные концентрации загрязняющих веществ в воздухе г. Ангарска

Загрязняющее вещество (ПДКс. с., *ПДКм. р.)	Максимальная концентрация, доли ПДКс. с.	
	Зимний период	Летний период
Диоксид азота (0,04 мг/м^3)	20	10
Диоксид серы (0,05 мг/м^3)	20	20
Сажа (0,05 мг/м^3)	20	10
Пыль неорганическая с содержанием кремния 20–70 % (0,1 мг/м^3)	20	2
Оксид азота (0,06 мг/м^3)	10	5
Бенз(а)пирен (10–6 мг/м^3 *)	20	10
Мазутная зола (0,002 мг/м^3)	20	10
Пыль неорганическая с содержанием кремния менее 20 % (0,15 мг/м^3)	1,2	1,1

Таблица 2

Частоты превышения гигиенических нормативов загрязняющих веществ в воздухе города Ангарска

Загрязняющее вещество (ПДКс. с., *ПДКм. р.)	Частота превышения, часы	
	Декабрь	Июль
Диоксид азота (0,04 мг/м^3)	717	697
Диоксид серы (0,05 мг/м^3)	720	595
Сажа (0,05 мг/м^3)	712	692
Пыль неорганическая с содержанием кремния 20 – 70 % (0,1 мг/м^3)	363	311
Оксид азота (0,06 мг/м^3)	160	97
Бенз(а)пирен (10–6мг/м^3 *)	592	175
Мазутная зола (0,002 мг/м^3)	588	608
Пыль неорганическая с содержанием кремния менее 20 % (0,15 мг/м^3)	Менее 12	Менее 12

Оксид азота. Значительные превышения нормативов по оксиду азота отмечены на территории города Ангарск– 10 ПДКс. с. (табл. 1). Частота превышения при этом составила 160 часов или 6 дней в месяц (табл. 2). Однако газовоздушная смесь, содержащая оксид азота, не распространяется на дальние расстояния, а локализуется в пределах промышленных зон городов.

По ряду веществ также наблюдаются локальные превышения, установленных для них гигиенических нормативов, примерами таких веществ являются бенз(а)пирен, мазутная зола и пыль неорганическая с содержанием кремния менее 20 % (табл. 1, 2).

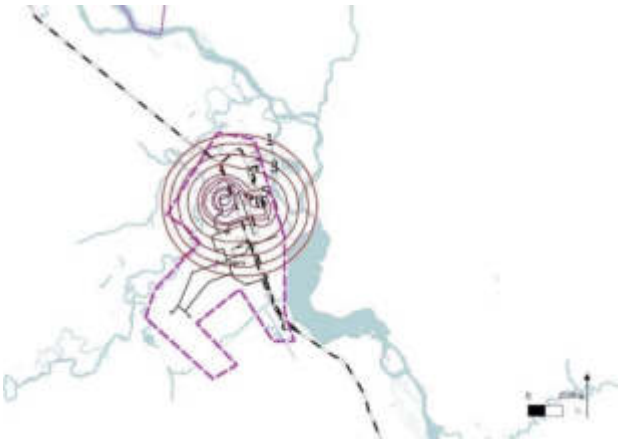


Рис. 4. Карта-схема изолиний абсолютных концентраций диоксида азота в зимний период на территории г. Ангарска

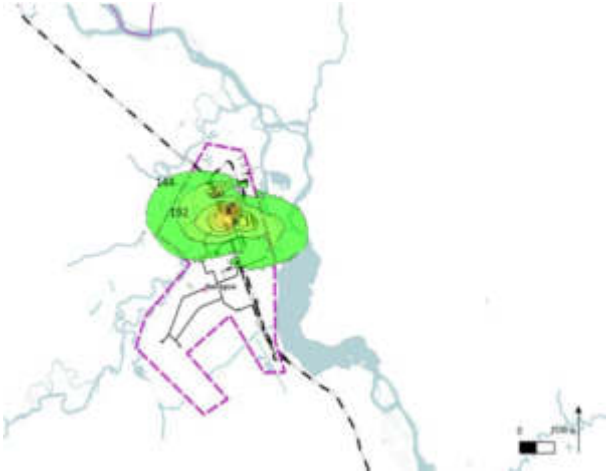


Рис. 5. Карта-схема изолиний частот превышения ПДКс. с. диоксида азота в декабре на территории г. Ангарска

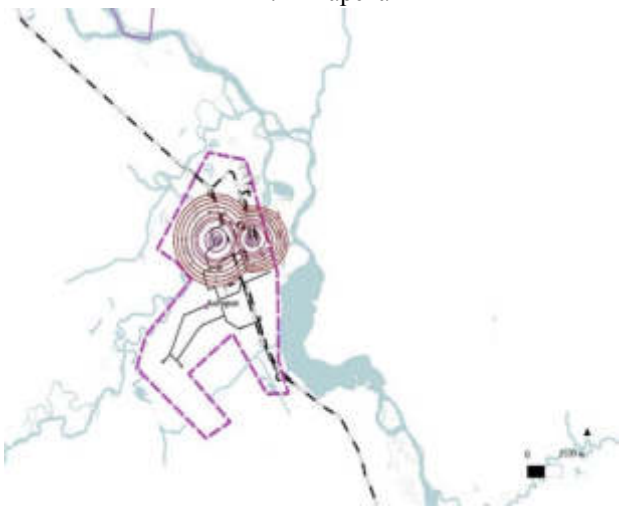


Рис. 6. Карта-схема абсолютных концентраций сажи в зимний период на территории г. Ангарска

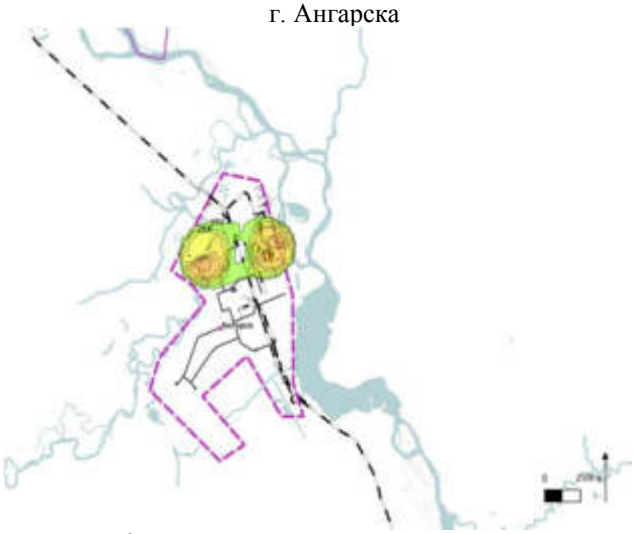


Рис. 7. Карта-схема изолиний частот превышения ПДКс. с. сажи в декабре на территории г. Ангарска

Выводы

Ситуация с загрязнением атмосферного воздуха на территории г. Ангарска остается неудовлетворительной на протяжении длительного времени, что подтверждается отчетами Министерства природных ресурсов и экологии и проведенными расчетами. Для решения сложившейся проблемы необходимы комплексные меры, которые включают в себя, во-первых, ужесточение подходов в области нормирования качества окружающей среды и источников загрязнения, а во-вторых, совершенствование методов мониторинга и выявления нарушений в области соблюдения предельно-допустимых выбросов поллютантов.

Список литературы

1. Ахтиманкина А. В. Исследование рассеивающей способности атмосферы Иркутской области // Изв. Иркут. гос. ун-та. Сер. Науки о Земле. 2016. Т. 15. С. 15–27.

2. Государственный доклад «Об охране окружающей среды в Иркутской области» [Электронный ресурс]. 2008–2017. URL: http://irkobl.ru/sites/ecology/picture.

3. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. Общесоюзный нормативный документ (ОНД-86) / под ред. М. Е. Берлянд. Л. : Гидрометеоиздат, 1987. 93 с.

4. Аргучинцев В. К., Аргучинцева А. В. Моделирование мезомасштабных гидротермодинамических процессов и переноса антропогенных примесей в атмосфере и гидросфере региона оз. Байкал. Иркутск : Изд-во Иркут. гос. ун-та, 2007. 255 с.

УДК 551.501

Сверхкраткосрочные прогнозы в режиме online для метеорологических параметров в приземной атмосфере по текущим данным измерений ультразвуковой метеостанции АМК-03

А. Я. Богушевич (bay@imces.ru)

[1]Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск

Аннотация. Приводится описание реализованного метода сверхкраткосрочных временных прогнозов с использованием фильтрации Калмана для значений метеорологических параметров, измеряемых ультразвуковой метеостанцией, структуры алгоритма его программной реализации и экспериментальные результаты апробации метода на примерах реальных данных метеостанции АМК-03.

Ключевые слова: ультразвуковая метеостанция, метеорологические параметры, фильтрация Калмана, временной прогноз.

Введение

Ультразвуковые автоматические метеостанции нашли широкое применение в метеорологии, экологии, энергетике и военной технике [4, 9, 10]. Основным преимуществом таких приборов является очень малая инерционность их измерений мгновенных значений температуры и трех компонент вектора скорости ветра (время измерения ($\chi \le 10^{-2}$ с), высокая пороговая чувствительность к турбулентным изменениям этих же метеорологических параметров ($\sigma_\xi \approx (1-2)\cdot 10^{-2}$ ºС или м/с) и высокая частота повторения производимых аппаратных измерений (до Fd ~100 Гц). В ИМКЭС СО РАН на протяжении более 20 лет выполняются работы по созданию и развитию ультразвуковых метеостанций, имеющих с 2002 г. общее для всех модификаций наименование типа как АМК-03 [1–3; 10]. Метеостанции АМК-03 занесены в государственный реестр средств измерений (сертификат RU. С. 28. 007. А № 29530) и с 2006 г. выполняется их серийное промышленное изготовление (предприятием ООО «Сибналитприбор», г. Томск). Основными метрологическими параметрами АМК-03 являются усредненные значения температуры воздуха T, скорости Vh и направления D горизонтального ветра, скорости вертикального ветра w, атмосферного давления P и относительной влажности воздуха r. Дополнительно вычисляется несколько десятков характеристик атмосферной турбулентности.

В АМК-03 программное обеспечение МЕТЕО 3. 0 [5] обеспечивает автоматизацию, как градуировки устройства и организации самих измерений, так и статистической обработки их данных и сохранения ее результатов. При этом оценка средних значений измеряемых метеорологических параметров здесь может производиться по временному интервалу Δt_{aver}, задаваемому в пределах от 1 до 20 мин, а их выдача потребителю – с любой периодичностью во времени δ, начиная от 1 мин, которую можно устанавливать независимо от значения Δt_{aver}. В итоге, в процессе измерений в оперативной памяти компьютера, в файлах и/или в базе данных на жестком диске могут создаваться упорядоченные временные ряды с дискретными значениями усредненных метеорологических параметров, имеющие на порядок большее временное разрешение по сравнению с данными наблюдений на стандартных гидрометеорологических постах (через 3 часа). Усредненные метеорологические параметры в этих рядах оцениваются с чрезвычайно малой случайной погрешностью порядка $\sigma_\xi / \sqrt{N}$, где N>>1 – число учитываемых приборных измерений при усреднении данных (в АМК-03 при стандартных Fd = 80 Гц и Δt_{aver} = 10 мин N = 48000).

Существенное превалирование систематической составляющей погрешности измерений, определяемой возможностями градуировки прибора при имеющихся эталонных средствах измерений и других технических средств, над случайной погрешностью является ха-

рактерной особенностью ультразвуковых метеостанций [6]. Также в [7] нами было показано, что в этих временных рядах усредненные (за интервал около 10 мин) значения одного и того же метеорологического параметра имеют значимую корреляцию между собой в пределах временных интервалов Δt_{cor}, как правило, не меньших 4–6 ч. При этом выявлено, что величина Δt_{cor} существенно зависит от типа анализируемого метеорологического параметра (минимум значения Δt_{cor} наблюдается для характеристик ветра, а его максимум – для более инерционного атмосферного давления) и может меняться в зависимости от общей климатической ситуации в период наблюдений.

Высокое временное разрешение измеряемых значений метеорологических параметров при минимальных случайных шумах их наблюдения $\sigma_\xi / \sqrt{N}$ позволяет ожидать, что к их временным выборкам можно более успешно применять известные стохастические методы экстраполяции [8] для оценивания их дальнейшей временной эволюции на сроки δ, как минимум сравнимые с текущим значением Δt_{cor} для анализируемого метеорологического параметра. Это означает, что по текущим данным измерений единственной метеостанции будет выполняться сверхкраткосрочный прогноз значений метеорологических параметров в режиме реального времени (online) на период, сравнимый с Δt_{cor}, пространственно привязанный к точке местоположения метеостанции.

Ниже приводится описание реализованного нами метода подобных временных прогнозов с использованием фильтрации Калмана для значений метеорологических параметров, измеряемых ультразвуковой метеостанцией, структуры алгоритма его программной реализации и экспериментальные результаты апробации метода на примерах реальных данных АМК-03.

Описание метода

Пусть имеются временные ряды с усредненными значениями метеорологических параметров $\xi_k = \xi_{(tk)}$, измеряемых ультразвуковой метеостанцией в дискретные моменты времени t_k. Здесь и ниже k = 0 1, 2, 3,… – порядковый номер измерений, а через ξ_k обозначается значение любого из следующих метеорологических параметров: температуры воздуха T, атмосферного давления P, относительной влажности воздуха r, зональной u и меридиональной v составляющих скорости горизонтального ветра. Для оперативных прогностических оценок дальнейшей эволюции $\xi_{(tk)}$ будем использовать полиномиальную модель для экстраполяции непрерывной функции $\xi_{(t)}$, в которой, в отличие от классической интерполяции, не применяется предположение о постоянстве во времени аппроксимирующих коэффициентов $a_0(t)$, $a_1(t)$, $a_2(t)$,…$a_n(t)$, т. е. она записывается как

$$\xi (t_0 + \tau) = a_0(t_0 + \delta) + a_1(t0 + \delta)\, \tau + a_2(t0 + \delta)\, \tau^2 + \ldots + an(t_0 + \delta)\, \tau^n. \qquad (1)$$

здесь t_0 – время последнего (текущего) измерения параметра ξ; δ – временной интервал между измерениями; τ – интервал временной экстраполяции ξ (срок прогноза); n – порядок (степень) используемого полинома; a_1, a_2,…,a_n – медленно меняющиеся на интервале τ (по сравнению с изменчивостью самого метеорологического параметра ξ) случайные коэффициенты, величины которых вычисляются (предсказываются) при выполнении каждого нового измерения в момент t0 для последующего срока измерений $t_0 + \delta$.

Для вычисления в (1) полиномиальных коэффициентов a_0, a_1, a_2,…a_n будем применять фильтрацию Калмана значений прогнозируемого параметра $\xi_{(tk)}$, измеренных в предыдущие моменты времени $t_k = t_0 - (k - 1)\,\delta$, где k = 1, 2, 3,…,m (m – используемое число циклов работы фильтра Калмана). Также будем использовать дополнительное априорное условие $a_0(t_0 + \delta) = \xi(t_0)$. При этом величина $\delta t = (m - 1)\,\delta$ является периодом упреждения для начала выполнения измерений метеорологического параметра ξ, который требуется для набора объема данных измерений $\xi(t_k)$ к моменту t0, достаточного для минимизации ошибок прогнозирования.

В теории фильтрации Калмана широко применяется математический аппарат матричной алгебры. Поэтому коэффициенты $a_0(t)$, $a_1(t)$, $a_2(t)$,…$a_n(t)$, описывающие здесь состояние

анализируемой динамической системы (в данном случае поведения ξ(t), должны использоваться в виде вектора-столбца

$$X(t) = | a_o(t), a_1(t), a_2(t),\ldots a_n(t)|^T. \quad (2)$$

где верхний символ «Т» в конце записи обозначает транспонирование матрицы.

При компьютерной реализации алгоритма требуется переход от непрерывного времени к дискретному. При этом интервал дискретизации здесь можно задавать только кратным или равным периоду < поступления данных измерений метеорологического параметра < . В дискретной форме вектор-столбец (2) принимает вид:

$$X(k) = | X_1(k), X_2(k), X_3(k),\ldots X_{n+1}(k)|^T, \quad (3)$$

где динамические изменения составляющих вектора состояния системы описываются системой разностных уравнений, которая в векторной форме записывается как

$$X(k+1) = X(k) + \Omega(k). \quad (4)$$

Здесь $\Omega(k) = | \omega_1(k), \omega_2(k), \omega_3(k),\ldots\omega_{n+1}(k)|$ – вектор случайных возмущений параметров системы (так называемых шумов состояния).

Получаемый результат Y измерения метеорологического параметра ξ в k-ый момент времени можно представить как аддитивную смесь его истинного значения ξ(k) и ошибки измерения ε(k):

$$Y(k) = \xi(k) + \varepsilon(k). \quad (5)$$

Определим оценку ξ как некую функцию h(X) от вектора-столбца состояний X, которая в соответствии с (5) имеет вид:

$$h(X) = X1 + kX2 + k2X3 +. . + knXn+1. \quad (6)$$

После подстановки (6) в (5) модель наблюдений уже будет выглядеть следующим образом:

$$Y(k) = h(X) + \varepsilon(k). \quad (7)$$

Вследствие нелинейности функции h(X) задачу временной экстраполяции параметра рекомендуется решать с использованием расширенного фильтра Калмана-Бьюси, обеспечивающего оценку вектора X с минимальной дисперсией. При этом алгоритм оценивания вектора состояния X^(k+1) на шаг k+1 (для момента времени $t_0 + \delta$) будет иметь вид:

$$X^(k+1) = X^(k+1|k) + G(k+1)[Y(k+1) – h(X^(k+1|k))]. \quad (8)$$

Здесь X^(k+1|k) = X^(k) – вычисленный вектор предсказанных оценок на шаг k+1 по данным на предыдущем шаге k; G(k+1) – матрица весовых коэффициентов размерностью [(n+1) × 1], вычисляемая как

$$G(k+1) = P(k+1|k)HT(k+1)< [H(k+1)P(k+1|k)HT(k+1) + RE(k+1)]-1; \quad (9)$$

$$H = |\partial h/\partial Xi|, i = 1, 2, 3,\ldots n, \partial h/< Xi = ki-1; \quad (10)$$

$$P(k+1|k) = P(k|k) + R\Omega(k); \quad (11)$$

$$P(k+1|k+1) = [I – G(k)H(k)] P(k+1|k); \quad (12)$$

P(k+1|k) – апостериорная матрица ковариаций ошибок предсказания, P(k+1|k+1) – априорная матрица ковариаций ошибок оценивания, RE(k+1) – диагональная матрица дисперсии шумов наблюдения, RΩ(k) – диагональная матрица шумов состояния, I – единичная матрица. Все эти матрицы имеют размерность [(n+1) × (n+1)].

При компьютерном синтезе фильтра Калмана в соответствии с (8) и (9) необходимо задавать начальные условия его инициализации. К ним относятся начальный вектор оценивания X_0, начальная матрица ковариаций ошибок оценивания P_0, а также значения элементов ковариационных матриц шумов состояния $R_\Omega(0)$ и дисперсия шума измерений $R_E(0)$. Как

правило, априорная информация об X0 и P0 отсутствует и в этом случае задается $X_0 = 0$ и $P_0 = I$. Диагональные элементы матриц $R_E(0)$ и $R_\Omega(0)$ первоначально устанавливаются равными квадрату среднеквадратической (случайной) погрешности измерений в используемой метеостанции.

На заключительном этапе, когда вычислен вектор X^(k+1), выполняются прогнозы значений метеорологического параметра < на различные интервалы времени τ вперед в соответствии с формулой, вытекающей из принятой модели (1):

$$\xi^\wedge = X_1^\wedge + X_2^\wedge \tau + X_3^\wedge \tau^2 + \ldots + X_{n+1}^\wedge \tau n. \quad (13)$$

Для улучшения качества прогнозирования обычно применяется предварительное центрирование измеренных значений ξ_k метеорологического параметра относительно его фиксированного значения ξ_0. В этом случае при калмановской фильтрации анализируются только временные изменения метеорологического параметра $\Delta\xi_k = \xi_k - \xi_0$ за период упреждения < t и к полученному конечному результату следует добавлять значение ξ_0. В качестве параметра центрирования ξ0 можно использовать среднее за период упреждения значение ξ_k или, как нами применялось, его последнее измеренное значение (в момент t_0).

Для определения оптимальных параметров алгоритма прогнозирования, описываемого (8) и (13), нами предварительно выполнялись оценки ξ^ на основе реальных рядов значений метеорологических параметров, измеренных АМК-03, с использованием полиномов со степенями n от 1 до 6 включительно и с интервалами упреждения δt в 1, 2, 3,…7 часов. Расчеты показали, что предлагаемый метод позволяет выполнять с хорошей точностью прогнозы значений всех основных метеорологических параметров на срок <, как правило, не превышающий 6 часов, который соответствует наиболее типичному значению интервала корреляции Δt_{cor} [7]. При этом, исследуя метод для различных комбинаций параметров калмановской фильтрации, был сделан вывод, что самой оптимальной комбинацией с точки зрения минимизации погрешностей прогнозирования является применение полинома 3 степени с 9 циклами Калмана.

Алгоритм программной реализации

Программная реализация описанного выше метода сверхкраткосрочного прогнозирования метеорологических параметров, измеряемых ультразвуковой метеостанцией, выполняется в соответствии с блок-схемой алгоритма, представленной на рисунке 1 для случая выполнения однократного прогноза на один фиксированный срок τ для одного метеорологического параметра ξ. Здесь:

Блок 1 обеспечивает ввод оператором исходных параметров решаемой задачи: выбор типа анализируемого метеорологического параметра <; задание срока прогноза <, степени используемой полиномиальной модели n, оптимального количества циклов работы фильтра Калмана m. На основании их выполняется инициализация фильтра Калмана (задание начальных значений матриц X_0, P_0, $R_E(0)$, $R_\Omega(0)$, а также переходной матрицы h(X)).

Блок 2 обеспечивает ввод из базы данных или оперативной памяти компьютера значений ξ_k для выбранного метеорологического параметра, измеренных к текущему времени t0 за предыдущий период, равный $\delta t = (m - 1)\,\delta$, и подготовку их к использованию в решаемой задаче. Подготовка данных включает их прореживание с коэффициентом q, где $q = Int(\tau/m) \geq 1$– целое число, и их центрирование относительно ξ_0.

Блок 3 обеспечивает инициализацию цикла по номерам k элементов подготовленной выборки значений ξk.

Блок 4 задает условие повторения вычислений внутри цикла (с 5-ого по 8-ой блок).

Блок 5 обеспечивает вычисление в соответствии с (11) апостериорной матрицы ковариаций ошибок предсказания P(k+1|k).

Блок 6 обеспечивает вычисление в соответствии с (9) матрицы весовых коэффициентов G(k+1).

Блок 7 обеспечивает вычисление в соответствии с (12) априорной матрицы ковариаций ошибок оценивания P(k+1|k+1).

Блок 8 обеспечивает прогностическое вычисление в соответствии с (8) вектора состояния X^(k+1).

Блок 9 обеспечивает выход из цикла по номерам k.

Блок 10 обеспечивает вычисление в соответствии с (13) прогноза значения метеорологического параметра < с заданным сроком упреждения по времени τ.

Блок 11 обеспечивает вывод потребителям полученного результата прогноза.

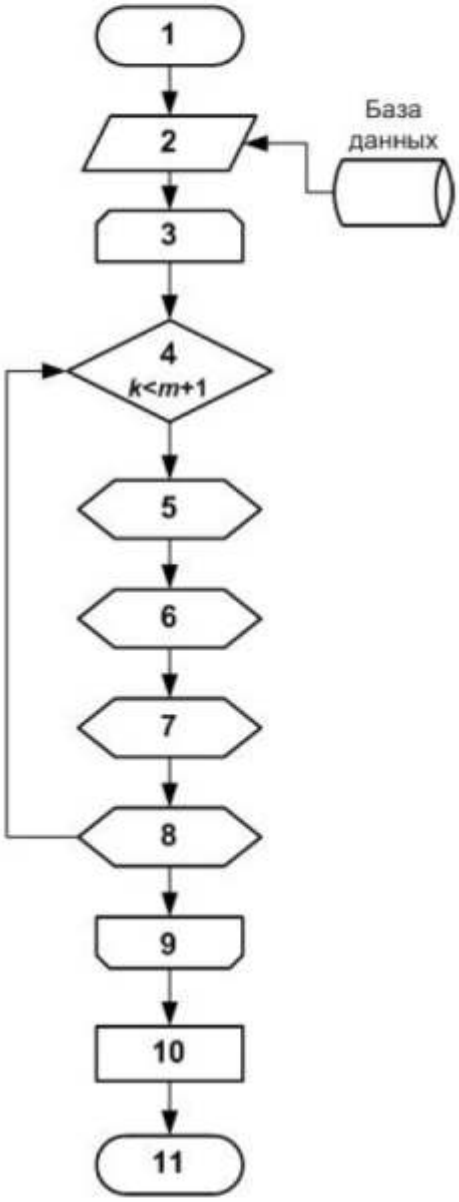


Рис. 1

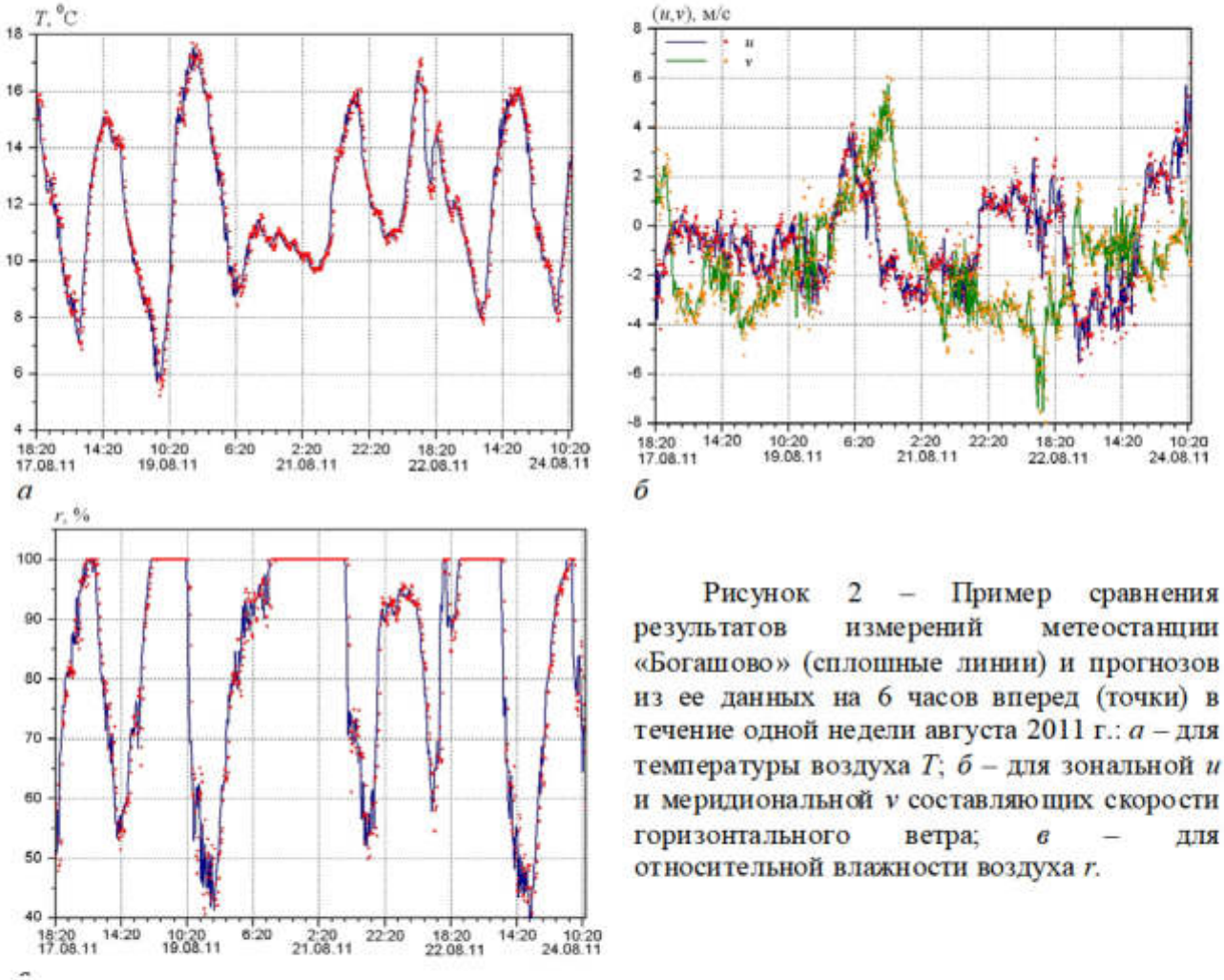
Результаты экспериментальной апробации метода

Для экспериментальной апробации описанного выше метода был использован архив данных измерений метеорологических параметров с усреднением за $\Delta t_{aver} = 10$ минут, полученный в августе 2011 г. при одновременной работе трех ультразвуковых метеостанций АМК-03 («Аникино», «Богашово» и «ИМКЭС), размещенных в окрестности г. Томска на удалении друг от друга на расстояния около 20 км. Периодичность регистрации δ усредненных метеорологических параметров здесь составляла также 10 минут.

Методика апробации метода заключалась в следующем. Выбирался какой-либо срок t_0 измерений, который условно считался текущим, и загружались в программу все значения анализируемого метеорологического параметра, измеренные за предыдущий от t_0 период $\delta_t = (m - 1)\,\delta$. Выполнялось по ним прогностическое вычисление вектора состояния X^(k+1)

для выбранного метеорологического параметра. И далее по формуле (13) выполнялись оценки прогнозируемых значений метеорологического параметра $\xi^{\wedge}$ на 1, 2, 3,…6 часов вперед, которые сравнивались с фактически измеренным значением ξ для тех же сроков. Однократная ошибка прогноза вычислялась как простая разность $\delta\xi = \xi^{\wedge} - \xi$, а в качестве ее усредненной характеристики за выбранный период наблюдений использовалось ее среднеквадратическое значение СКО($\delta\xi$).

Качество получаемых краткосрочных прогнозов можно оценить из рис. 2. Наилучшие результаты для используемого метода получаются для временных участков, на которых прогнозируемая величина непрерывно возрастает или убывает. При этом изменения скорости возрастания или убывания значения метеорологического параметра практически не сказываются на качестве прогнозов. Наиболее критичными являются случаи, когда временная производная в суточном ходе значений метеорологической величины изменяет свой знак. Это обусловлено тем, что фильтр Калмана обладает некоторой инерционностью в прогнозировании полиномиальных коэффициентов в (13), равной для полинома 3-ей степени двум циклам его работы. Из рис. 2, а видно, что когда временная производная температуры меняет свой знак, фильтр подстраивает соответствующим образом значения полиномиальных коэффициентов только через время 2<=20 минут, где < = tk << tk< 1 < интервал времени между соседними отчетами данных. Тем не менее, абсолютные ошибки прогноза даже в этом случае оказываются сопоставимыми с погрешностью прямых измерений многих традиционных средств метеорологических измерений.



а *б*

Рисунок 2 – Пример сравнения результатов измерений метеостанции «Богашово» (сплошные линии) и прогнозов из ее данных на 6 часов вперед (точки) в течение одной недели августа 2011 г.: *а* – для температуры воздуха *T*; *б* – для зональной *u* и меридиональной *v* составляющих скорости горизонтального ветра; *в* – для относительной влажности воздуха *r*.

В таблице 1 приведены вычисленные среднеквадратические значения (СКО) за август 2011 г. погрешностей прогноза на 1, 2, 3,…6 часов вперед для температуры воздуха T, относительной влажности воздуха r, зональной u и меридиональной v составляющих скорости горизонтального ветра. При их оценивании здесь было использовано более 4-х тысяч измерений метеорологических параметров каждой из трех метеостанций. Как и ожидалось, погрешность прогноза всегда возрастает с увеличением срока прогнозирования <. При этом, поскольку использовались однотипные метеостанции, разнесенные на расстояния меньше радиуса пространственной корреляции метеорологических параметров (см. [7]), то погрешности прогноза из их данных измерений на один тот же срок < оказались близкими для идентичных метеорологических параметров. Результаты для погрешностей прогнозов температуры и скорости ветра, приведенные в таблице 1, более наглядно представлены на рис. 3.

Таблица 1

Метеостанция	τ, часы	1	2	3	4	5	6
«Аникино»	T, 0C	0,28	0,42	0,53	0,63	0,72	0,81
	r, %	2,18	3,49	4,51	5,38	6,10	6,81
	u, м/с	0,48	0,65	0,77	0,88	0,97	1,09
	v, м/с	0,42	0,56	0,65	0,76	0,84	0,93
«Богашово»	T, 0C	0,22	0,34	0,43	0,51	0,59	0,68
	r, %	2,06	3,20	4,02	4,70	5,33	6,02
	u, м/с	0,48	0,62	0,70	0,76	0,84	0,93
	v, м/с	0,55	0,68	0,78	0,87	0,93	1,03
«ИМКЭС»	T, 0C	0,25	0,40	0,51	0,61	0,71	0,80
	r, %	2,26	3,61	4,62	5,41	6,10	6,79
	u, м/с	0,44	0,55	0,64	0,70	0,78	0,85
	v, м/с	0,46	0,56	0,61	0,67	0,72	0,79

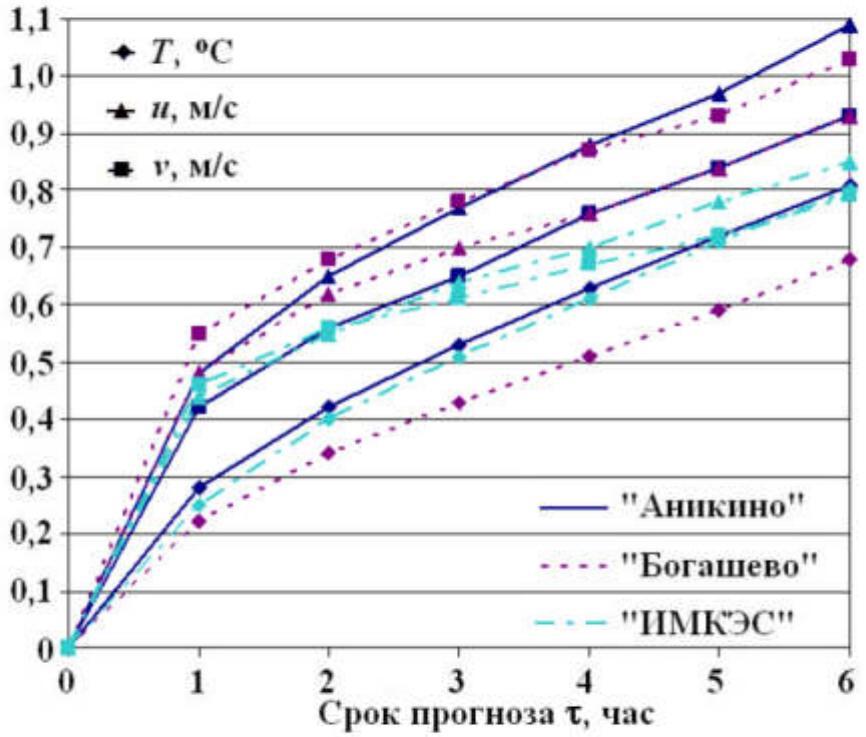


Рис. 3. Среднеквадратические значения погрешностей прогнозов температуры воздуха T, зональной u и меридиональной v составляющих скорости горизонтального ветра на разные сроки < из данных измерений трех ультразвуковых метеостанций типа АМК-03.

Заключение

Изложенный здесь метод сверхкраткосрочного прогнозирования метеорологических параметров в атмосфере, основанный на применении фильтрации Калмана к усредненным данным измерений ультразвуковой метеостанции, практически всегда дает хорошие результаты на сроки до 6 часов вперед. Не смотря на его ограниченность по максимальному сроку достоверного прогнозирования, он имеет два основных достоинства, которые делают его привлекательным для практического применения. Во-первых, здесь временной прогноз выполняется по данным измерений единственной метеостанции и конкретно для точки ее размещения. Во-вторых, при его программной реализации выполняется совокупность элементарных алгебраических операций над матрицами размерности [4 < 4] с ограниченным количеством используемых циклов Калмана, что исполняется на современных компьютерах практически мгновенно. Последнее позволяет выполнять подобные прогнозы в режиме «on-line» при каждой новой регистрации измеряемых метеорологических параметров. Возможность получения таких прогнозов в любой момент времени работы метеостанции АМК-03 сейчас реализуется в новой версии ее программного обеспечения METEO 4. 0 как стандартная сервисная функция.

Работа выполнялась в рамках базовых проектов СО РАН № № VII.66.1.2, VIII.80.2.2, а также была поддержана Соглашением № 14.607.21.0030 от 05.06.2014 (уникальный идентификатор ПНИ RFMEFI60714X0030) в рамках ФЦП РФ на 2014–2020 годы.

Список литературы

1. Автоматизированный ультразвуковой метеорологический комплекс АМК-03 / А. А. Азбукин, А. Я. Богушевич, В. С. Ильичевский, В. А. Корольков, А. А. Тихомиров, В. Д. Шелевой // Метеорология и гидрология. 2006. № 11. С. 89–97.

2. Полевой вариант метеорологического комплекса АМК-03 / А. А. Азбукин, А. Я. Богушевич, В. А. Корольков, А. А. Тихомиров, В. Д. Шелевой // Метеорология и гидрология. 2009. № 2. С. 101–106.

3. Автоматические метеостанции АМК-03 и их модификации / А. А. Азбукин, А. Я. Богушевич, А. А. Кобзев, В. А. Корольков, А. А. Тихомиров, В. Д. Шелевой // Датчики и системы. 2012. № 3. С. 47–52.

4. Богушевич А. Я. Ультразвуковые методы оценивания метеорологических и турбулентных параметров атмосферы // Оптика атмосферы и океана. 1999. Т. 12, № 2. С. 170–175.

5. Богушевич А. Я. Ультразвуковая метеостанция, версия 3.0 («METEO 3. 0»). Российское агентство по патентам и товарным знакам. Свидетельство об офиц. регистрации программы для ЭВМ № 2002612038 от 3.12.02.

6. Богушевич А. Я. Источники погрешностей при ультразвуковых измерениях метеовеличин в атмосфере, методы и алгоритмы их минимизации на основе опыта создания промышленной метеостанции АМК-03 // Учен. зап. физ. фак-та Моск. ун-та. 2014. № 6. 146308. 10 с.

7. Богушевич А. Я., Корольков В. А., Тихомиров А. А. Некоторые результаты работы территориально-распределенной измерительной системы на основе сети постов ультразвуковых АМС // Метеорология и гидрология. 2015. № 10. С. 85–95.

8. Динамико-стохастические методы и их применение в прикладной метеорологии / В. С. Комаров, Ю. Б. Попов, С. С. Суворов, В. А. Кураков. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2004. 235 с.

9. Тихомиров А. А. Ультразвуковые термометры и анемометры для измерения пульсаций скорости и температуры и воздушных потоков. Обзор // Оптика атмосферы и океана 2010. Т. 23, № 7. С. 585–600.

10. Бортовой метеорологический комплекс на базе многоцелевых гусеничных и колесных машин / А. А. Тихомиров, В. А. Корольков, А. Я. Богушевич, А. А. Азбукин, В. Д. Шелевой // Вестн. Акад. военных наук. 2008. № 3 (24). С. 144–148.

УДК 551.582.2

Исследование региональных особенностей глобального потепления климата в Якутии

Е. В. Винокурова (katekaulitz483@mail.ru),
С. А. Лященко (olga.aniskina@mail.ru)

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург

Аннотация. Приводятся результаты исследований климатических изменений температуры воздуха на территории Якутии по различным данным.

Ключевые слова: Якутия, температура воздуха, климат, тренд.

Введение

Ни для кого не секрет, что Якутия является самым крупным регионом нашей страны. И в первую очередь, все интересуются именно климатом республики. Климат в Якутии считается суровым – резко-континентальным.

Якутия, как обширная страна с огромной площадью, занимающая 1/7 часть территории России. Почти половина Якутии находится за полярным кругом. С северной стороны омывается такими морями, как Восточно-Сибирское и Лаптевых. Также в состав Якутии входит многие острова этих морей. Именно Якутия занимает одно из первых мест в России по количеству рек. Вся территория разбита на шесть основных речных бассейнов, из которых самым большим является речной бассейн р. Лены с ее притоками. Наиболее крупными реками также являются Анабар, Оленек, Лена и Яна, впадающие в Море Лаптевых, Индигирка и Колыма, впадающие в Восточно-Сибирское море. Территория Якутии обладаем всеми формами рельефа: горами, плоскогорьями, междугородними впадинами (котловинами) и низменностями [1].

Именно в Якутии находится полюс холода Оймякон, где была официально зафиксирована минимальная температура -67,7 ºС в феврале 1933 г. На самом деле, есть очень много споров насчет того, какая же самая низкая температура была зафиксирована в Якутии. По неофициальным данным в 1938 году была зафиксирована -77,8 ºС. В разных источниках, полюсом холода называется, то поселок Оймякон, то г. Верхоянск и температура указывается разная от -67,8 ºС до -76 ºС [2].

Зима в Якутии обычно начинается в начале октября и заканчивается в конце марта. На большей части Якутии самые низкие температуры наблюдаются в январе, но на островах низкие температуры наблюдаются в феврале. Зимой осадков выпадает мало из-за сухости воздуха и почти всегда стоит ясная морозная погода. Также в зимние периоды Якутия находится под сильным влиянием Сибирского антициклона и туманы образуются очень часто. В некоторых населённых пунктах бывают и ледяные туманы, которые возникают из-за антропогенных воздействий.

Тёплыми месяцами можно считать май, июнь, июль и август. Несмотря на то, что лето в Якутии очень короткое, оно бывает жарким. Самым тёплым месяцем считается июль месяц. На большей части Якутии температура может повыситься о 34–38 ºС. Более севернее, т. е. на побережьях морей и островах 18–24 ºС. Заморозки обычно наблюдаются в начале июня и в конце августа.

Всем известно, что Якутия лежит в зоне вечной мерзлоты. За всё лето, почва оттаивает только до глубины 3,5 м. И в этой вечной мерзлоте до сих пор находят останки доисторических животных. Но, к сожалению, в связи с глобальным потеплением вечная мерзлота начала таять и в некоторых местах уже начинают образовываться болота и берега на севере начали отступать.

Каждый из нас, наверное, задумывался о том, действительно ли происходит глобальное потепление? Как быстро и насколько оно опасно? Арктическая шапка с каждым годом становится всё меньше и меньше. Во-первых, одни исследователи считают, что потепление

вызвано естественными причинами, а точнее солнечной активностью, другие твердят о том, что именно деятельность человека влияет на климат. И именно это имеет место быть, ведь каждый год в атмосферу выбрасываются миллиарды тонн углекислого газа и метана, которые создают парниковый эффект. Понятие глобального потепления опасно для всей нашей планеты, но в первую очередь, оно опасно для Якутии. Вы только представьте себе, что может произойти с вечной мерзлотой. Что произойдет, если оно начнет таять очень быстро? Уже сейчас в северных районах, точнее на побережьях участков Восточно-Сибирского моря берег может отступить за год примерно на 500 м. Если наступит глобальное потепление, то Якутию ждет наводнение. И не стоит забывать о животных, которые обитают в полярном регионе. Бороться с глобальным потеплением, конечно, будет очень сложно, но хотя бы мы должны стараться не загрязнять атмосферу, а постараться уменьшить количество выбросов.

В данном исследовании рассматривается изменение температуры воздуха на территории Якутии по данным наблюдений и реанализа.

Данные и методы

В настоящей работе для анализа были использованы данные аэрологического зондирования на трёх станциях Якутии, полученные с сайта [3].

На сайте представлены результаты зондирования за два срока 00 и 12 часов местного времени. Нами были использованы данные за 12 часов. Временной интервал 1973–2015. Эти данные представляют собой таблицы значений температуры, влажности, направления и скорости ветра, высоты на различных изобарических поверхностях.

Для подробного анализа были выбраны 3 станции: Вилюйск, Оймякон, Тикси.

Выбор обусловлен тем, что они характеризуют различные регионы Якутии. Это можно увидеть на карте, представленной на рис. 1, и из анализа климата Якутии.



Рис. 1. Карта Якутии

Границы зондирования по высоте:

для Вилюйска – от 1030 до 10 гПа;
для Оймякона – от 1000 до 5 гПа;
для Тикси – от 1000 до 10 гПа.

Высота над уровнем моря

Вилюйск – Станционное возвышение: 111.0
Оймякон – Станционное возвышение: 741.0
Тикси – Станционное возвышение: 7.0

Поэтому на станциях Оймякон и Вилюйск данных на изобарической высоте 1000 гПа нет. Кроме этого, надо отметить, что самый низкий уровень при зондировании имеет значительное превышение над подстилающей поверхностью. И поэтому в нашем исследовании нет анализа приповерхностных значений метеорологических элементов.

В ходе работы были проанализированы среднемесячные, среднегодовые значения температуры и выявлены закономерности их изменения.

Результаты и обсуждения

Вилюйск

Анализ среднегодовой температуры позволяет сделать следующие выводы.

Самый теплый слой атмосферы 980–880 гПа (-5 ºС) Со временем этот слой сужается, т. е., начиная с 1973 г., происходит постепенное понижение температуры воздуха. На уровне 1000 гПа наблюдается потепление между 1988–2005 гг. на фоне -9 ºС потеплело до -5 °С, максимально со второй половины 1990-х до 2000 г. Начиная с 2000 г. начинается понижение температуры. На высотах приблизительно между 1980–2000 гг. наблюдалось потепление, а с 2000 года выше уровня 300 гПа наблюдается похолодание, т. е. наблюдается процесс обратных процессу в нижних слоях атмосферы.

Для более детального анализа среднегодовой температуры были проанализированы изменения среднегодовой температуры на каждом уровне отдельно и рассчитан коэффициент линейного тренда для выявления основных тенденций. Из анализа среднегодовой температуры видно, что в средней и верхней атмосфере до 1985 года межгодовые колебания температуры были незначительны – амплитуда колебаний меньше 2 ºС. Последние же 20 лет характеризуются резкими скачками от года к году – амплитуда колебаний примерно 15 ºС. А на уровнях 700 и 100 гПа в 1985 г. отмечен резкий скачок межгодового колебания температуры, равный 10 ºС после 1990 г. такие же большие амплитуды колебаний температуры. После 2000 г. они начинают угасать.

Оймякон

Временной ход среднегодовой температуры в Оймяконе имеет такой же характер, как и в Вилюйске. Основные отличия наблюдаются в приземном слое – здесь не наблюдается столь ярко выраженное, как в Вилюйске похолодание в последнее десятилетие. Температура в приземном слое атмосфере сохраняется примерно постоянной -50 ºС во весь исследуемый период.

Из анализа среднегодовой температуры видно, что примерно на уровне 925 гПа до 90-х гг. температура изменялась в пределах от 0 ºС до -5 ºС. Последние же 20 лет характеризуются резкими скачками от года к году – амплитуда колебаний примерно 10 ºС. А на уровнях 500 и 100 гПа до середины 90-х гг. амплитуды межгодового колебания температуры были небольшие 5–10 ºС. Затем резко возросли – значения амплитуд колебаний доходят до 20 ºС. В среднем температура повысилась на 2 ºС.

Тикси

Вертикальный разрез временного хода среднегодовой температуры в Тикси несколько отличается от Вилюйска и Оймякона, что, скорее всего, связано с отличиями в расположении этих городов и влиянию моря на климат Тикси. Хотя общие закономерности сохраняются.

У подстилающей поверхности теплеет от -11 ºС в 1993 г. до -7 ºС в 2015 г. Максимально теплый слой 950–900 гПа, но начиная с 1995 г., этот слой атмосферы остывает при-

мерно на 2 ºС. В верхней атмосфере наблюдается потепление, особенно сильное в слое 300 – 200 гПа.

Среднегодовая температура уровня 1000 гПа повышается, примерно на 3,5 ºС. Можно выделить колебания с периодом примерно 11 лет. На уровне 925 гПа с 1990-х гг. резкое понижение температуры на 9,5 ºС, амплитуды межгодового колебания температуры возросли. На 700 и 200 гПа температура повысилась, примерно на 10–15 ºС.

Были рассчитаны среднемесячные температуры воздуха на различных изобарических поверхностях в трёх выбранных городах Якутии.

Вилюйск

Самый холодный месяц – январь. Наблюдаются температуры до -28 ºС. Самый теплый месяц – июль, температура у подстилающей поверхности достигает +15 ºС.

В холодную часть года – ноябрь, декабрь, январь, февраль, март – на уровне 925 гПа в 1973 максимально высокие температуры (-6 ºС), а далее похолодание. У поверхности земли изменения не очень значительные. В верхней атмосфере небольшое потепление между 1985 и 2000 гг.

В апреле у поверхности земли потепление на 2 ºС: с -7 ºС до -5 ºС, начиная с 1980 г., на уровне 300–100 гПа наблюдается похолодание.

В мае самые низкие температуры наблюдались у подстилающей поверхности в 80-е годы 20 столетия (-3 ºС,-5 ºС), затем с 2000 г. на уровне 1000 гПа отмечается повышение температуры с 1 ºС до 3 ºС. Слой 300 – 200 гПа характеризуется самыми низкими значениями температуры на уровне до середины 80х годов и с 2000 г.

В июне и июле картина примерно одинаковая. В июне максимальное потепление наблюдается в нижней атмосфере в слое между уровнями 950 гПа и 850 гПа, температура поднимается в июне до +9 ºС, в июле до +15 ºС, начиная с 80-х гг. XX столетия. У постилающей поверхности в 80-х гг. -1 ºС,-3 ºС. С 1992 года температура повысилась на 20 ºС с +10 ºС до +30 ºС. В верхней атмосфере температура понижается.

В августе максимальные температуры наблюдаются на уровне от 950 до 850 гПа 10 ºС с середины 90-х гг. На нижней границе атмосферы потепление на 2 ºС с 2 ºС до 4 ºС (с 1995 по 2000 г.). С 1980 по 1990 г. похолодание с 2 ºС до 0 ºС. В верхней атмосфере потепление.

В сентябре на нижних слоях изменений особых нет, на уровне 950 гПа потепление с 90-х гг. на 2 ºС от +1 ºС до +3 ºС. В верхних слоях 300 гПа 200 гПа идет похолодание, максимально низкие температуры -530С на уровне 250 гПа.

В октябре наблюдается потепление у подстилающей поверхности на 6 ºС от -6 ºС до 0 ºС, начиная с середины 80-х гг. В верхних слоях атмосферы, выше уровня 300 гПа температура понижается от -50 ºС до -58 ºС.

Из анализа видно, что примерно на уровне 1000 гПа межгодовые колебания температуры примерно 15–20 ºС, амплитуда этих колебаний с годами почти не меняется. Температура в среднем составляет около -27 ºС. На 925 гПа холодает примерно на 3 градуса с 22,25 ºС до 25 ºС. На 850 и 700 гПа почти одинаковая картина, после 1990 года большая амплитуда колебаний температуры равный 14 ºС. А на верхних уровнях 500–100 гПа характер изменения почти одинаков, небольшая амплитуда изменений равная 5–100 ºС. Отмечен резкий скачок межгодового колебания температуры, равный 30 ºС в начале 1980х годов. На этих же уровнях похолодало примерно на 5 ºС. А на 50 гПа колебания небольшие (5 ºС), но потеплело на 25 ºС с -57 ºС до -32 ºС.

Оймякон

Самый холодный месяц – февраль. Наблюдаются температуры до -6 ºС на всем протяжении исследуемого периода. Самый тёплый месяц июль – температура у подстилающей поверхности достигает +15 ºС.

В холодную часть года – декабрь, январь на нижней границе атмосферы изменений почти нет, только, начиная с 2005 г., похолодало на 2 ºС от -6 ºС до -8 ºС. В слое от 950 до 750 гПа холодает, начиная с 1985го года. В верхней атмосфере потепление почти на 10 ºС между 1980–2000 годами.

В феврале на нижнем уровне изменений нет, температура практически не меняется и незначительно колеблется около значения -60 °С. На уровне 950 гПа похолодание на 6 ºС от -6 ºС в 1965 году до -12 ºС. В верхней атмосфере потепление.

В марте на уровне 1000 гПа похолодание на 2 ºС (от -5 до -7 ºС) с 1997 г. В средних слоях изменений нет. В верхней атмосфере потепление почти на 80С между 1985–2000 гг. . На уровне 250 гПа потепление доходит до -33 ºС от обычного -50 ºС или -40 ºС.

В апреле в нижней атмосфере изменений нет (-50 ºС). Самые низкие температуры наблюдаются в верхней атмосфере на уровне 300 – 200 гПа (-550С) до конца 70-х гг. Потом потепление, максимальное потепление (до -410 ºС) на уровне 250 гПа с 1990 по 2005 г.

В мае на нижнем уровне без изменений (-1 ºС). На высотах потепление между 1980–2000 гг. Максимальное потепление на уровне 200 гПа в 1995–2000 гг. -39 ºС.

В июне на нижнем уровне 950 гПа потепление на 6 ºС, от -1 ºС до +5 ºС, начиная со второй половины 80х годов. В верхней атмосфере потепление между 1980 и 2005 гг. Максимальная температура на уровне 850 гПа +9 ºС, начиная с 2005 г. Максимальное потепление на уровне 200 гПа с 1990 по 2000 г. (-39 ºС).

В июле у поверхности Земли до 2006 г. держалась температура -2 ºС, с 2006 г. потеплело на 20 ºС (0 ºС). Максимально теплый слой 900–800 гПа (+100 ºС) утолщается с 2000-х гг. На высотах наблюдается потепление между 1985 и 2005 гг.

В августе в нижней атмосфере на уровне 925 гПа потепление на 4 ºС с +10 ºС до +5 ºС, начиная со второй половины 90-х гг. Самый теплый слой атмосферы на уровне 850 гПа +9 ºС, с 2000х годов этот слой утолщается до 900–800 гПа. На верхних слоях идет потепление с 1980-х годов.

В сентябре почти по всей толще атмосферы больших изменений не наблюдается. На уровне 925–800 гПа температура держится равномерно -1 ºС. В верхней атмосфере небольшое потепление между 1985–2005 годами на уровне 200–100 гПа.

В октябре на уровне 925 гПа похолодание на 8 ºС с 0 ºС до -8 ºС, начиная с 1985 г. В верхних слоях потепление между 1980 и 2000 гг. на уровне 150 гПа, с 1983–1998 гг. -46 ºС.

В ноябре у поверхности земли похолодание на 4 ºС с +0 ºС до -4 ºС, начиная с 1985 га. В верхних слоях атмосферы 100–350 гПа похолодание. Максимально низкие температуры наблюдаются на уровне 300 гПа (-60 ºС, -50 ºС). В средних и высоких слоях идет похолодание.

Из анализа среднемесячной температуры видно, что примерно на уровне 925 гПа похолодало на 19 ºС от -18 ºС до -37 ºС, межгодовые колебания температуры небольшие (5–6 ºС). На 850–300 гПа характер изменений почти одинаков. В конце 1970-х гг. отмеченные большие колебания межгодового изменения температуры, равные примерно 23 ºС, после 1990 г. колебания уменьшились. На этих уровнях похолодало примерно на 10 ºС.

Тикси

Анализ среднемесячной температуры в Тикси показал, что самый холодный месяц года – декабрь, когда наблюдались температуры до -22 ºС. Самые тёплые месяцы – июль и август, температура у подстилающей поверхности достигает +4 ºС.

В холодную часть года – ноябрь, декабрь, январь, февраль, март – на уровне 900–950 гПа до 1985 г. максимально высокие температуры (-6 ºС), а далее похолодание. У поверхности земли изменения не очень значительные. В верхней атмосфере наблюдается небольшое потепление между 1990 и 2000 гг.

В апреле на уровне 925 гПа максимум наблюдается в 1973 г. (-5 ºС), а начиная с 1993 г. – похолодание. Кроме этого, наблюдается потепление на уровне 1000 гПа с1973 г. на 60 ºС с -17до -11 ºС.

В мае самые низкие температуры (-90 ºС) наблюдались на уровне 1000 гПа в 80-е гг. XX века, сейчас потепление, но потепление более слабое, чем в апреле с -9 ºС до -5 ºС.

В июне потепление на 1000 гПа примерно на 4 ºС: с -20 ºС до 0 ºС. Небольшое похолодание на уровне 950 гПа и на уровне 850 гПа в 1980–2000 гг., примерно на 2 ºС. В верхней атмосфере ничего не происходит.

В июле потепление в нижних слоях атмосферы (1000–950 гПа), начиная с 2000 г. Похолодание в верхней атмосфере за весь исследуемый период, которое уменьшается к 2000 г.

В августе потепление затронуло всю нижнюю атмосферу, постепенно проникая от уровня 1000 гПа (1973 г.) до 800 гПа (2008 г.). В верхней атмосфере похолодание.

В сентябре изменений в нижней и средней атмосфере не происходит. У поверхности земли температура равна -1 ºС.

В октябре у поверхности земли температура понизилась на 60 ºС: с -5 ºС до -11 ºС. Самый холодный слой атмосферы 300–200 гПа, температура -51 ºС с середины 1990-х гг. до -53 º С. Выше уровня 150 гПа идет потепление атмосферы.

Из анализа среднемесячной температуры видно, что на уровне 1000 гПа межгодовые колебания температуры примерно 15–20 ºС, амплитуда этих колебаний с годами почти не меняется. Температура в среднем повысилась на 6 ºС, от -25 ºС до -190 ºС. На 925 гПа холодает примерно на 5 градусов от 15 ºС до 20,5 ºС, амплитуды межгодового колебания с годами уменьшается. На 850 и 700 гПа почти одинаковая картина, отмечен резкий скачок межгодового колебания температуры, равный 20 ºС в начале 1980-х гг.

На 500–250 гПа характер изменений почти одинаков, в начале 80-х гг. амплитуды равны примерно 30–45 ºС, в начале 90-х гг. так же отмечен резкий скачок межгодового колебания температуры, равное 30 ºС. 11-летний период колебаний. На 500–300 гПа незначительно потеплело на 5 ºС (на 500 гПа от 32,5 ºС до 37,5 ºС, а на 400 гПа от 40 ºС до 35 ºС, на 300 гПа от -480 ºС до -36 ºС). На 250 гПа потеплело примерно на 150 ºС, от -50 ºС до -35 ºС.

На 200 гПа потеплело на 20 ºС: от -50 ºС до -30 ºС. В начале 80-х гг. отмечены большие межгодовые колебания температуры, равные примерно 50 ºС. После 1990 г. такие же резкие изменения, колебания примерно 30 ºС. на уровне 100 гПа значительно потеплело на 28 ºС: от -50 ºС до -22 ºС. а на 50 гПа потеплело примерно на 38 ºС: от -45 ºС до -7 ºС.

Заключение

В результате проделанной работы можно сделать следующие выводы:

1) во всех проанализированных пунктах происходят изменения температуры воздуха;

2) наибольшие изменения происходят в приповерхностном слое атмосферы;

3) значительным изменениям подвержены и самые высокие слои атмосферы (выше 150 гПа);

4) три проанализированных пункта характеризуют разные части Якутии и изменения происходят разные;

5) наибольшие изменения происходят в Тикси;

6) наименьшие изменения в Вилюйске;

7) В Оймяконе температура понизилась, особенно в зимние месяцы;

8) в Тикси потеплели осенние и весенние месяцы примерно на 4–60 °С.

Список литературы

1. Справочник по климату России. Выпуск 24. Якутская АССР. Влажность воздуха, атмосферные осадки, снежный покров: Справочник. Л. : Гидрометеоиздат, 1968. 249с.

2. Иванова Р. Н. Рекордно низкие температуры воздуха в Евразии // Вестн. Сев.-Вост. федер. ун-та им. М. К. Аммосова. 2006. Т. 3, № 1. С. 13–19.

3. http://weather. uwyo. edu/upperair/sounding.html.

УДК 551.509.53

Статистическая обработка результатов моделирования для улучшения качества гидрометеорологического прогноза

О. В. Воробьева (lelik9416@mail.ru)

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург

Аннотация. Описаны исследования по уточнению результатов гидродинамического моделирования с использованием техники Model Output Statistic.

Ключевые слова: гидродинамическое моделирование, пошаговая регрессия, мезомасштабная гидродинамическая модель WRF.

Введение

MOS является техникой объективного прогноза погоды, которая заключается в определении статистических связей между предиктантом и прогностическими переменными, рассчитанными гидродинамической моделью [1].

MOS техника это определение связанной с погодой статистики гидродинамической модели. Например, можно узнать в каком количестве случаев действительно идёт дождь, когда модель предсказывает относительную влажность 80 %, или как лучше оценить ветер у подстилающей поверхности в аэропорту, если модель предсказывает геострофический ветер на высоте 1000 гПа в определённой точке в определённый момент времени.

Множественная линейная регрессия устанавливает связь между переменной Y, которая называется зависимой переменной или предиктантом, и k другими переменными X_i, называемыми независимыми переменными или предикторами. Результатом регрессионного анализа является уравнение, которое может быть использовано для оценки предиктанта по линейной комбинации предикторов.

$$Y(X,b) = b_1X_1 + b_2X_2 + \ldots + b_kX_k = \sum_{j=1}^{k} b_iX_i \qquad (1)$$

Обычно неизвестно какие или как много предикторов включать в уравнение регрессии. Даже если предиктант коррелирует с сотнями переменных, уравнение регрессии, содержащее только некоторые из них, обычно объясняет почти такую же часть дисперсии, как и уравнение, содержащее многие переменные. Это связано с взаимной корреляцией между переменными. Также если в регрессионное уравнение включено много предикторов, предиктант может быть оценен чрезвычайно хорошо на зависимой выборе (по которой строится регрессионное соотношение). Но это уравнение может учитывать не только реальные физические связи, но также связи, которые есть только в зависимой выборке и которые не будут представлены в других данных. Поэтому уравнение со многими слагаемыми может быть менее точно на независимых данных, чем уравнение с меньшим числом переменных.

Целью научного исследования является корректировка прогностической температуры, полученной на основе гидродинамической модели WRF с использованием техники MOS (Model Output Statistics).

Методы и данные

Для расчетов использовались результаты моделирования с использованием мезомасштабной гидродинамической модели WRF-ARW следующей конфигурации:

1) модель реализовывалась с использованием телескопизации; материнский домен имеет шаг 50 км, два вложенных 16,6 км и 5,5 км, соответственно;

2) используется ламбертова проекция декартовой системы координат;

3) шаг по времени 300 с;

4) начальные данные получают из реанализа NCEP/NCAR с разрешением 0,5°; граничные условия обновляются каждые 3 ч.

Анализируются результаты на самой мелкой сетке, которая охватывает всю территорию Словакии.

Анализируются результаты прогноза за период с января 2012 г. по сентябрь 2013 г. в г. Братислава (Словакия).

Используются измерения на метеорологической станции Братислава температуры воздуха на высоте 2 м. Результаты моделирования содержат информацию о геопотенциальной высоте, температуре и влажности воздуха, компонентах скорости ветра на основных изобарических поверхностях от 500–1000 гПа, а так же количество осадков. Дополнительно были рассчитаны температура точки росы на всех уровнях, индекс Боудена (индекс для оценки вероятности грозы), индекс статической устойчивости (Vertical Totals), индекс Cross Totals, разница между значениями метеорологических величин на вертикальных уровнях.

Массивы предикторов и предиктанта рассматривались, как временные ряды по которым оценивалась значимость предиктора и качество построенной регрессионной модели.

Результаты и обсуждение

Для выбора предикторов использовалась модель ANOVA, основанная на дисперсионном анализе. Оценивались 168 потенциальных предикторов такие, как: геопотенциальная высота 500, 700, 850, 925, 950, 975, 1000 гПа; температура, относительная влажность воздуха, компоненты скорости на ветра на этих же поверхностях; разницы геопотенциальных высот, температур точки росы, температуры, влажности воздуха на уровнях 700 и 850 гПа, 925 и 1000 гПа, и т. п.

Из результатов анализа модели ANOVA были выбраны 5 лучших предикторов: температура воздуха на уровнях 975 и 1000 гПа и 2 м, температура точки росы на уровнях 975 и 1000 гПа. На основе полученных предикторов, было составлено регрессионное уравнение

$$\tilde{T}_2 = 19{,}9 + b \cdot X^T,$$

где b – вектор коэффициентов, $b = \begin{vmatrix} 0{,}774 \\ -1919 \\ 1916 \\ 1766 \\ -1762 \end{vmatrix}$; X – вектор предикторов, $X = \begin{vmatrix} T_2 \\ T_{1000} \\ T_{d1000} \\ T_{975} \\ T_{d975} \end{vmatrix}$; T_2 _ модельная температура воздуха на уровне 2 м; T_{1000} – модельная температура воздуха на уровне 1000 гПа; T_{d1000} – рассчитанная по модельным данным точка росы на уровне 1000 гПа; T_{975} – модельная температура воздуха на уровне 975 гПа; T_{d975} – рассчитанная по модельным данным температура точки росы на уровне 975 гПа; $\tilde{T}_2$ – прогностическая температура воздуха на уровне 2 м после корректировки с использованием MOS.

Было оценено качество модельного прогноза температуры воздуха без корректировки и после MOS. Для оценки рассчитаны следующие ошибки: средняя квадратическая ошибка (СКО), средняя абсолютная ошибка (САО), средняя ошибка (СО), коэффициент корреляции между фактическими и прогностическими значениями. Ошибки приведены на рисунке.

Анализ ошибок говорит о том, что качество прогноза после корректировки техникой MOS улучшилось. Средняя ошибка уменьшилась примерно на 2 °С. Коэффициент корреляции изменился незначительно.

Заключение

Проведенные исследования говорят о том, что использование техники MOS для корректировки результатов моделирования способно улучшить качество прогноза. Аналогичные исследования были проведены для 18 станций Словакии и на всех получены похожие результаты.

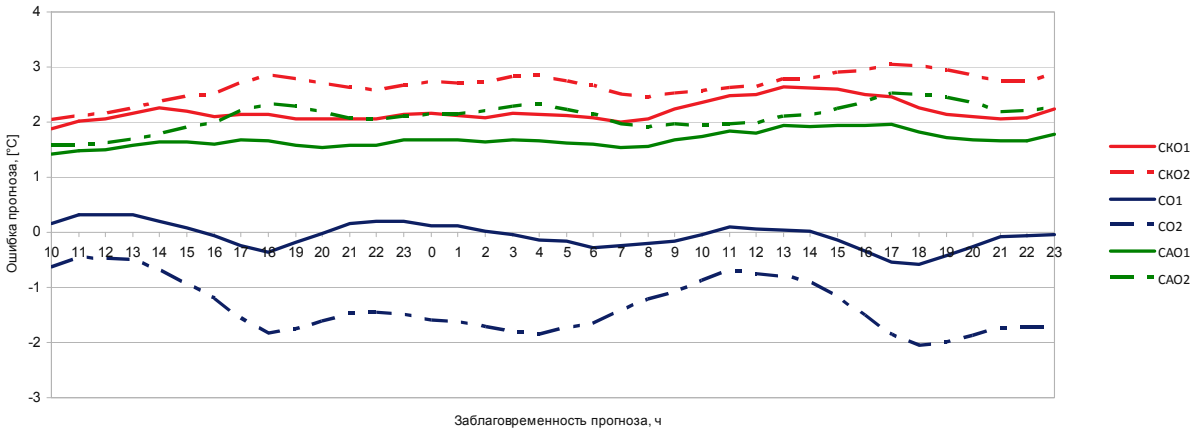


Рис. Ошибки модельного прогноза температуры воздуха без корректировки и после MOS. Цифрой 1 помечены ошибки модельного прогноза с корректировкой MOS, цифрой 2 – прогнозов без корректировки

Список литературы

1. Harry R. Glahn, Dale A. Lower. The Use of Model Output Statistics (MOS) in Objective Weather Forecasting // Journal of Applied Meteorology. 1972. Vol. 11. P. 1203–1211.

УДК 504.37:551.583

Режим увлажнения на территории юго-востока Западной Сибири

Е. А. Глушкова (katya-glushkova1994@mail.ru)

Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск

Аннотация. Работа посвящена анализу режима увлажнения на территории юго-востока Западной Сибири с использованием показателей «число дней без осадков/с осадками». Рассмотрены характеристики периодов без осадков/осадками, тенденции продолжительности периодов без осадков/с осадками, а также типы элементарных циркуляционных механизмов (ЭЦМ), способствующие формированию периодов без осадков/с осадками с охватом более 85 % станций рассматриваемого региона.

Ключевые слова: теплый период, периоды с осадками, сухие периоды, непрерывная продолжительность, типизация Б. Л. Дзердзеевского

Введение. Условия увлажнения – важнейший показатель как глобального, так и регионального климата. Режим увлажнения определяется сложным взаимодействием циркуляции атмосферы, рельефа местности и свойств подстилающей поверхности.

Территория России характеризуется значительной протяженностью, неоднородностью физико-географических климатических условий, развития экономической и хозяйственной деятельности в регионах. В этой связи целесообразна оценка и мониторинг происходящих изменений климата России, включая и режим увлажнения. Индикаторы изменчивости режима увлажнения, включающего суммы осадков, периоды с осадками и без осадков, а также опасные явления в режиме осадков, существенно различаются в разных регионах, что приводит к необходимости дополнительного получения сведений о региональной обеспеченности влагоресурсами на фоне происходящих климатических изменений. Происходящие климатические изменения связаны с возникновением климатических и погодных контрастов, и, сопровождаются увеличением экстремальности метеорологических явлений, что также отчетливо проявляется на региональном уровне [1; 2; 4; 10].

Исследование по оценке изменчивости режима увлажнения с использованием показателей «число дней без осадков/с осадками» выполняются в СибНИГМИ для юго-востока Западной Сибири с 2011 г. в рамках изучения климата в региональном аспекте [7; 8]. На

основе создания специализированных банков данных для работы применялись несколько критериев периодов увлажнения – от близкого к стандартам «Климатического справочника» (нижний предел осадков 0,1 мм), до показателей рекомендованных МГЭИК (Международная группа экспертов по изменению климата). Результаты исследования показали, что осредненные по региону и областям тенденции межгодовой изменчивости для периодов, начиная с двух дней, характеризуются для бездождных периодов – положительным трендом, а для дождливых – отрицательным, хотя степень выраженности указанных тенденций может иметь особенности в разных частях региона [8, 9]. Проведённые расчеты тенденций межгодовой изменчивости индексов, рекомендованных МГЭИК (индекс CDD – максимальная за каждый год продолжительность «сухого» периода (нижний предел осадков – 1 мм), R10 – индекс интенсивных осадков, число дней в каждом году с осадками не менее 10 мм) по станциям и осреднённо по всей изучаемой территории, иллюстрируют слабоотрицательные тренды для индекса CDD; для индекса R10 – в общем, нулевые тренды [8]. В работе [3] приводятся результаты исследования пространственного распределения периодов с осадками и без осадков для 18 станций на территории Западной Сибири за период с 1881 по 2005. Анализ данных показал, что периоды с осадками, в основном, кратковременны, как в зимнее, так и в летнее время, а периоды без осадков более устойчивы и более продолжительны.

Целью настоящего исследования является пространственно-временная оценка режима увлажнения и макроциркуляционных условий их формирования в теплый период на территории юго-востока Западной Сибири.

Материалы исследования. Материалом для исследований послужил банк специализированных данных **СибНИИГМИ:** «Специализированные массивы данных о характеристиках увлажнения» (http://sibnigmi.ru/cgi-bin/inst/index. pl?5&81), составленный с. н. с. ЛПЭиК, к. г. н. Л. Г. Немировской на 39 станциях юго-востока Западной Сибири за теплый период (апрель-октябрь) с 1977 по 2015 гг. Данные массивы включают информацию о датах начала и окончания периода с осадками/без осадков, их длительность и сопутствующие метеопараметры: средняя за период температура, осреднённая за период максимальная температура, осреднённая за период минимальная за сутки относительная влажность, осреднённые за период характеристики среднесуточной и максимальной скорости ветра. Кроме этого, были использованы массивы данных **СибНИИГМИ** о площадных характеристиках периодов (дат) одновременного охвата изучаемыми периодами определённого количества станций (≥85 % от общего числа привлеченных станций) за период с 1966 по 2015 г. Специализированные базы климатических данных для регионов необходимы для изучения региональных особенностей климатических изменений, для рационального использования природных ресурсов в развитии экономики регионов, благоприятных факторов природной среды, уменьшения ущерба, наносимого неблагоприятными погодными условиями, для проведения работ по адаптации к изменению климата, к преодолению их последствий [7].

Результаты исследования. Для станций юго-востока Западной Сибири были рассчитаны и проанализированы следующие показатели: продолжительность периодов без осадков/с осадками (средняя, максимальная, тенденции изменения) и площадные характеристики периодов без осадков/с осадками с охватом более 85 % станций рассматриваемого региона (количество периодов, циркуляционные условия формирования).

В таблице 1 приведены для каждой станции характеристики максимальной продолжительности периодов с осадками/без осадков: средняя многолетняя продолжительность периодов с осадками/без осадков, абсолютный максимум, стандартное отклонение и тренд за 10 лет.

Расчеты показали, что максимальная продолжительность сухих периодов в среднем многолетнем выводе составляет от 10. 4 дней (ст. Центральный рудник) до 16,6 дней (ст. Угловское). Абсолютный максимум продолжительности периода без осадков наблюдался на станциях Родино и Алейская, а также Учебная при ГПТУ 7 и составил 28 дней.

Среднее многолетнее значение максимальной продолжительности влажных периодов составило 5. 5 – 11. 6 дней, с абсолютным максимумом 23 дня на ст. Болотное (Новосибир-

ская область). Таким образом, максимальная непрерывная продолжительность сухих периодов в целом выше продолжительности влажных.

Расчет тенденций изменения максимальной продолжительности сухих периодов за исследуемый период показал, что на рассматриваемой территории на большинстве станций (более 55 %) наблюдается тенденция к уменьшению максимальной продолжительности со скоростью до -1. 2 дня/10 лет. Тенденция к увеличению максимальной продолжительности сухих периодов наблюдается на 16 станциях и составляют несколько меньшие значения по величине, достигая 0. 7 дней/10 лет на ст. Маслянино (Новосибирская область).

Таблица 1

Максимальная продолжительность периода без осадков / с осадками

Станция	период без осадков (дни)				период с осадками (дни)			
	среднее	абс. макс	ст. откл	тренд/10 лет	среднее	абс. макс	ст. откл	тренд/10 лет
Тегульдет	11,5	27	3,8	0,2	9,5	21	3,6	-0,3
Сред. Васюган	11,5	20	3,7	0	9,5	15	2,4	0,8
Пудино	12,9	25	4,4	0,1	9,2	16	2,4	0
Прохоркино	10,8	21	3,3	0,2	10	17	2,7	0,3
Новый Васюган	11,5	21	3,6	-1	8,5	17	2,8	0,3
Колпашево	11,9	19	2,9	0,2	8,1	14	2,3	-0,3
Александровское	11,2	16	2,5	-0,2	9,5	20	3,4	-0,6
Томск	12,3	23	3,1	0,5	9,3	15	2,6	0,6
Хабары	14,3	26	4,3	-0,6	6,7	12	1,9	-0,5
Угловское	16,6	23	3,8	-0,1	5,5	9	1,4	-0,5
Славгород	14,7	26	4,3	0,4	6,4	10	1,4	-0,5
Рубцовск	15,5	22	3,6	-0,4	6,1	10	1,6	-0,5
Родино	15,2	28	4,7	-0,3	6,2	11	1,5	-0,4
Краснощеково	13,3	21	3,4	-0,3	6,2	10	1,9	-0,2
Ключи	16,2	28	4,2	-0,3	5,5	9	1,6	0
Змеиногорск	12,8	21	3,8	-0,9	7,7	14	2,5	-0,3
Бийск-зональная	12,6	21	3,2	-0,3	7,6	12	2	-0,1
Барнаул	13,8	22	4,1	-0,4	7,2	13	2,1	0,4
Алейская	15,4	28	4,5	-0,5	7	13	1,9	0
Центр. рудник	10,4	20	3,2	0,2	11,6	21	6	-0,3
Тяжин	10,5	16	2,4	-0,6	8,7	14	2,2	-0,4
Тайга	11	22	3,1	-0,2	10,6	18	3,1	0,5
Новокузнецк	12,6	21	3,5	-1,2	7,5	14	2,4	0,1
Междуреченск	10,8	20	3,5	-0,4	9,7	17	2,7	0,5
Мариинск	11,6	19	2,8	0,1	8,4	14	2,6	0,3
Кемерово	11,9	22	3,3	-0,7	8,9	14	2,4	0,2
Кондома	11,5	20	3,6	-0,4	8,9	16	2,6	-0,2
Чулым	13,6	26	3,7	0	7,3	16	2,5	0
Учеб. при ГПТУ7	12,9	28	4,2	0,5	7,5	15	2,4	0,1
Татарск	13,7	23	3,5	0,1	6,5	11	1,5	0,4
Ордынск	14,2	25	4	-0,3	7,1	11	2,2	0,3
Огурцово	13,4	26	4,3	0,1	7,2	13	2,2	0,3
Маслянино	12,7	23	3,2	0,7	7,6	13	2,3	0
Кыштовка	13,1	27	3,7	0,3	7,4	12	1,7	-0,2
Купино	15,1	25	4,2	0,4	5,9	11	1,8	-0,3
Крещенка	13,2	25	3,6	0,2	8	12	1,7	0,1
Довольное	15,3	24	3,6	-0,8	6,5	13	1,8	-0,1
Болотное	12,4	23	3,6	-0,2	9	23	3,4	-0,5
Барабинск	13,6	21	3,1	0,1	6,5	11	1,7	0,2

Расчет тенденций изменения максимальной продолжительности влажного периода за исследуемый период 1977–2015 гг. показал, что на большей части территории (23 станциях) наблюдается тенденция увеличения максимальной продолжительности влажных периодов и составляет до 0,8 дней/10 лет на ст. Средний Васюган (Томская область). На 13 станциях (большей частью – территория Алтайского края) максимальная продолжительность периода с осадками уменьшается, со скоростью до -0,6 дня/10 лет (ст. Александровское).

Далее было рассмотрено количество периодов с осадками/без осадков с различной продолжительностью (1–5 дней, 6–10 дней и более 10 дней).

Анализ данных показал, что среднее годовое число сухих периодов продолжительностью 1–5 дней варьирует в диапазоне от 23 на ст. Ключи до 34 периодов на станции Новый Васюган. Расчеты скорости изменения за исследуемый период показали неоднозначную картину распределения тенденций по территории. Так, для периодов без осадков продолжительностью 1–5 дней наблюдается тенденция к уменьшению на 20 станциях из 39, со скоростью до -1. 4 периодов/10 лет (ст. Змеиногорск). Следует отметить, что наибольшее число станций с отрицательными трендами сосредоточены на территории Алтайского края. На 15 станциях из 39 наблюдается тенденция к увеличению, и ее величина достигает 1,6 периода/10 лет (ст. Новокузнецк), на пяти станциях – тенденции нулевые.

Среднее многолетнее число сухих периодов продолжительностью 6–10 дней изменяется по территории от 3. 5 (ст. Средний Васюган, Прохоркино и Центральный рудник) до 6 периодов (ст. Угловское). Следует отметить, что повышенные значения числа периодов продолжительностью 6–10 дней отмечаются преимущественно на территории Алтайского края, что связано с физико-географическими условиями данной местности. Расчет трендов за исследуемый период показал, что для большей части территории характерна тенденция к увеличению количества периодов без осадков продолжительностью 6–10 дней. Скорости роста лежат в диапазоне от 0,1 до 0,6 периодов/10 лет. Максимальные скорости наблюдаются на станции Кондома и Бийск. На трех станциях тенденции изменения отсутствуют. На 11 станциях прослеживается сокращение числа сухих периодов продолжительностью 6–10 дней, с небольшими скоростями уменьшения (преимущественно 0,2–0,3 периодов/10 лет). Таким образом, на большей части юго-востока Западной Сибири в теплый период года наблюдаются тенденции уменьшения кратковременных сухих периодов и роста более продолжительных.

Рассматривая сухие периоды продолжительностью более 10 дней, следует отметить, что на рассматриваемой территории они наблюдаются не каждый теплый сезон, максимум в годовом ходе наблюдается в июле. Суммарное количество за период 1977–2015 гг. составляет от 14 (ст. Междуреченск) до 96 периодов (ст. Ключи).

Анализ периодов с осадками различной продолжительности показал, что среднее годовое число периодов продолжительностью 1–5 дней изменяется в диапазоне от 31 на ст. Центральный рудник до 7 периодов на ст. Новый Васюган. Тенденции изменения за исследуемый период также изменяются неоднозначно по территории. Так, для периодов с осадками продолжительностью 1–5 дней наблюдается тенденция к уменьшению на 22 станциях из 39 со скоростью до -0. 9 периодов/10 лет (ст. Краснощеково). На 17 станциях из 39 наблюдается тенденция к увеличению, и ее величина достигает 1 периода/10 лет (ст. Крещенка).

Среднее многолетнее число периодов продолжительностью 6–10 дней изменяется по территории от 0. 5 (ст. Угловское, Рубцовск) до 3,6 периодов (ст. Центральный рудник). Расчет трендов за исследуемый период показал, что для большей части территории характерна тенденция к увеличению количества периодов с осадками продолжительностью 6–10 дней. Скорости роста лежат в диапазоне от 0,1 до 0,7 периодов/10 лет. Максимальные скорости наблюдаются на станции Пудино и Александровское.

Рассматривая площадные характеристики влажных периодов с охватом ≥ 85 % станций, следует отметить, что всего за период 1966 по 2015 г. отмечалось 520 эпизодов (периодов) с осадками с обширным охватом территории. При этом 79 % всех периодов составили однодневные, 15 % – двухдневные и 6 % составили периоды продолжительностью 3 и более дней. Максимальная продолжительность периода с осадками при охвате ≥ 85 % станций составила 11 дней и наблюдалась с 21 по 31 октября 2010 г.

Проанализировав данные сухих периодов с охватом ≥ 85 % станций, следует отметить, что за весь рассмотренный период их количество составило 1034. Также, чаще наблюдались однодневные периоды и составили 45 %, двухдневные – 21 %, трехдневные – 13 % и 21 % – периоды с продолжительностью 4 и более дней. Максимальная продолжительность периода без осадков при охвате ≥ 85 % станций составила 19 дней (с 10 по 28 июля 2012 г.)

Для оценки циркуляционных условий формирования сухих/влажных периодов с охватом ≥ 85 % станций были рассмотрены типы ЭЦМ в соответствующие дни (рис. 1–2).

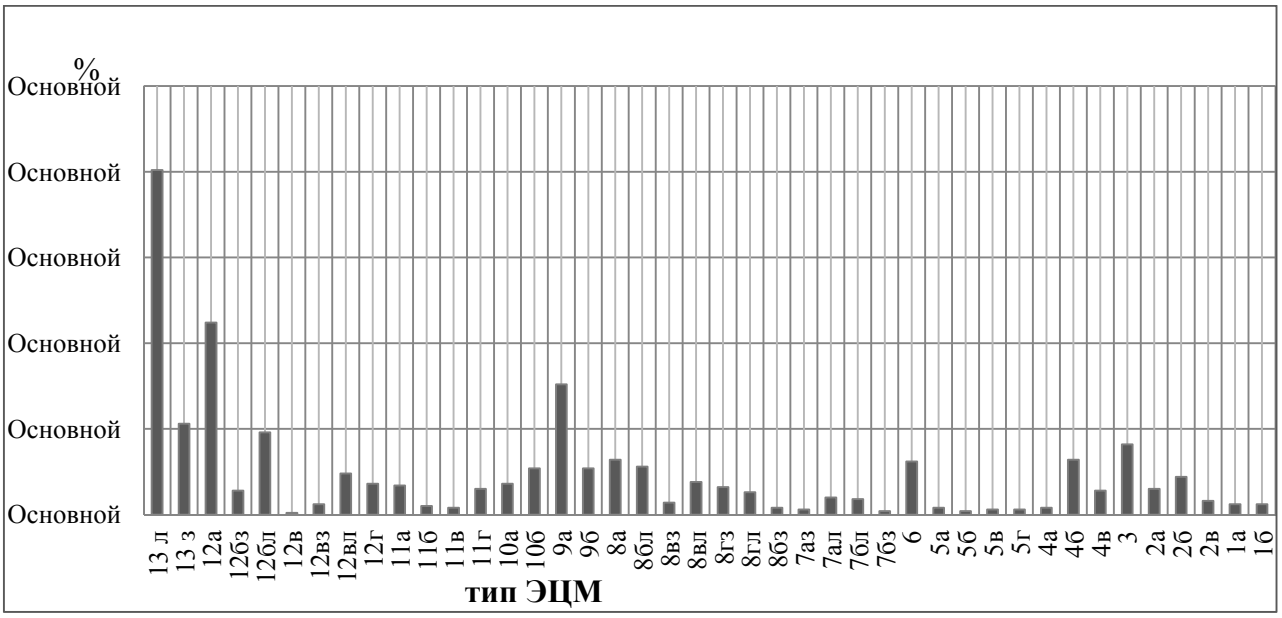


Рис. 1. Повторяемость (%) ЭЦМ в периоды без осадков

Было получено, что формирование сухих периодов на юго-востоке Западной Сибири оказывают влияние все группы ЭЦМ (рис. 1), но преобладающими являются меридиональная северная и меридиональная южная, а наименьший вклад вносит зональная циркуляция.

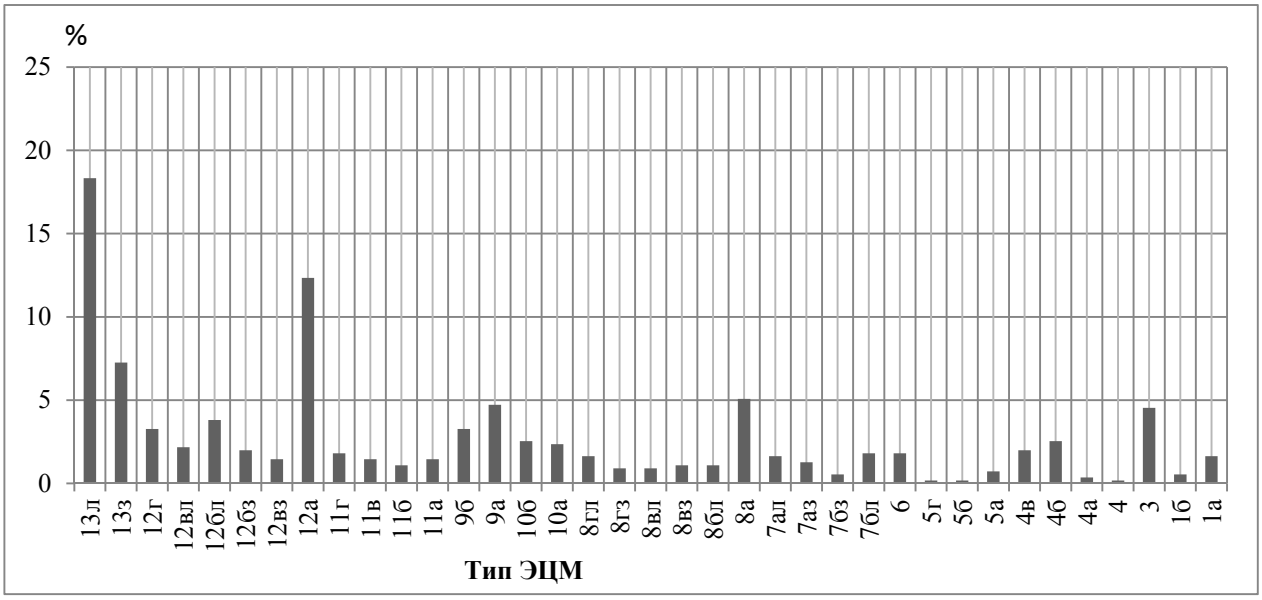


Рис. 2. Повторяемость (%) ЭЦМ в периоды с осадками

Среди подтипов в формировании периодов без осадков играют ведущую роль такие ЭЦМ, как 13л, 12а и 9а. Максимальная повторяемость наблюдалась у ЭЦМ 13л и составила 20. 1 %, повторяемость ЭЦМ 12а составила 11. 2 %, ЭЦМ 9а – 7. 6 %.

Рисунок 2 показывает, что при влажных периодах с охватом более 85 % станций максимальная повторяемость наблюдалась также у ЭЦМ 13л (18. 3 %), повторяемость ЭЦМ 12а составила 12. 3 %, ЭЦМ 8а – 5 %. Таким образом, в формировании сухих периодов преобладают ЭЦМ 13л (выход средиземноморских циклонов на среднее течение Оби, антициклоны к

западу от Оби и к югу и северо-востоку от оз. Балхаш) и 12а (отрог арктического антициклона, вторгшегося на Восточную Сибирь). На рисунке 3 представлены динамические схемы подтипов 12а и 13л.

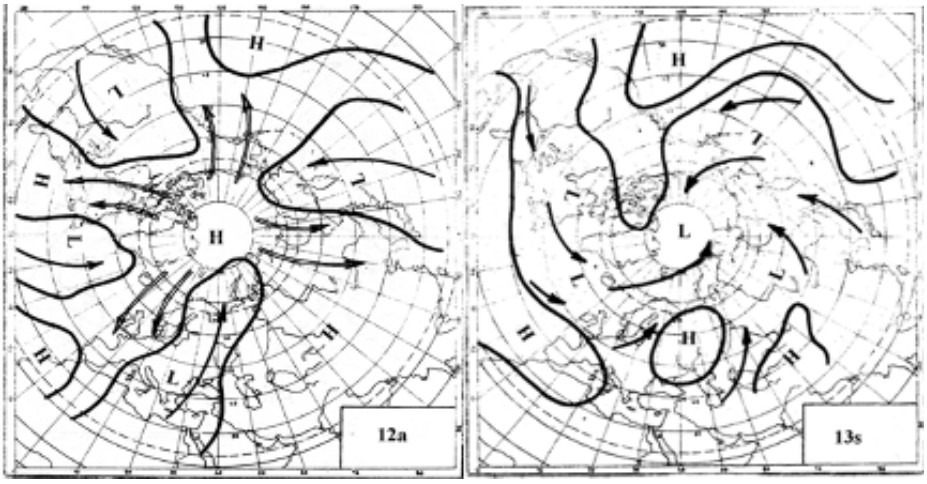


Рис. 3. Динамические схемы подтипов 12а и 13л [4]

Следует отметить, что в разных районах юга Западной Сибири одни и те же ЭЦМ создают разную синоптическую ситуацию [5]. Так, ЭЦМ 13л, относящийся к долготной южной группе (для территории Западной Сибири), благодаря выходу южных циклонов, приносит интенсивные осадки на Алтай, в то же время в более северных районах при них формируются антициклоны, и может возникнуть атмосферная засуха.

Заключение. Проведенное исследование показало, на территории юго-востока Западной Сибири максимальная непрерывная продолжительность сухих периодов в целом выше продолжительности влажных периодов. Расчет тенденций изменения максимальной продолжительности сухих и влажных периодов за исследуемый период показал на большей части рассматриваемой территории тенденцию к уменьшению максимальной продолжительности периодов без осадков и тенденцию увеличения максимальной продолжительности влажных периодов.

За период с 1977 по 2015 гг. на большей части территории наблюдаются тенденции уменьшения кратковременных периодов (продолжительностью 1–5 дней) и увеличения более продолжительных (6–10 дней).

Рассматривая площадные характеристики сухих и влажных периодов с охватом ≥ 85 % станций, следует отметить, что всего за теплый период с 1966 по 2015 гг. количество сухих периодов в два раза превышает количество периодов с осадками и являются более продолжительными.

На формирование, как сухих, так и влажных периодов с охватом ≥ 85 % станций на юго-востоке Западной Сибири оказывают влияние все группы ЭЦМ, но преобладающими являются меридиональная северная и меридиональная южная группы, среди подтипов максимум повторяемости принадлежит ЭЦМ 13л.

Список литературы

1. Барашкова Н. К., Волкова М. А., Кужевская И. В. Современный климатический режим атмосферных осадков на территории Томской области // Труды Главной геофизической обсерватории. 2015. Вып. 576. С. 129–152.

2. Современная пространственно-временная структура поля экстремальных осадков на территории Западной Сибири / М. А. Волкова, Н. Н. Чередько, К. И. Соколов, Л. А. Огурцов // Вестн. Том. гос. ун-та. 2015. № 390. С. 202–210.

3. Волкова М. А., Чередько Н. Н., Кусков А. И. Пространственно-временная структура атмосферных осадков в Западной Сибири // Вестник ТГУ. 2009. № 328. С. 214–219.

4. Катцев В. М., Семенов С. М. Второй оценочный доклад об изменениях климата и их последствия на территории Российской Федерации. Росгидромет, 2014. 1009 с: http://cc.voeikovmgo.ru/ru/publikatsii/2016–03–21–16–23–52.

5. Кононова Н. К. Классификация циркуляционных механизмов Северного полушария по Б. Л. Дзедзеевскому / отв. ред. А. Б. Шмакин. М. : Воентехиниздат, 2009. 72 с.

6. Кононова Н. К. Колебания циркуляции атмосферы в Западной Сибири в XX–XXI вв. // Материалы конференции Климатология и гляциология Сибири. Томск, 2015. С. 75–77.

7. Методологическое пояснение [Электронный ресурс]. 2017. URL: http://www. sibnigmi.ru/cgi-bin/inst/index. pl?5&81 (дата обращения: 10.11.2017).

8. Немировская Л. Г. Некоторые показатели оценки изменений режима условий увлажнения юго-востока Западной Сибири на основе уточненных специализированных массивов данных характеристик и их режима // Материалы IV Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием «Современные проблемы географии и геологии», посвящ. 100-летию открытия естественного отделения в ТГУ. (16–19.10.2017). Томск, 2017. С. 307–310.

9. Немировская Л. Г. Некоторые результаты анализа особенностей изменчивости определённых характеристик увлажнения для оценки изменений климата в региональном аспекте (на примере юго-востока Западной Сибири) // Материалы Междунар. науч. конфе. Климатология и гляциология Сибири. (20–23 окт. 2015 г.). Томск, 2015. С. 96–99.

10. Stocker, T. F., Qin D., Plattner G. -K., Tignor M., Allen S. K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P. M. (eds.) Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, N. Y.: Cambridge University Press, 2013. 1535 p. doi:10.1017/CBO9781107415324.

УДК 551.583

Изменение климата Западной Сибири как фактор устойчивого развития региона

В. П. Горбатенко (vpgor@tpu.ru)

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск

Аннотация. Устойчивое развитие экономики Западной Сибири требует тщательного изучения природных ресурсов, одним из которых является климат. Представлен анализ тенденций основных составляющих климата Западной Сибири, от которых зависит перспектива развития региона с учетом социально-экономических рисков.

Ключевые слова: изменения климата, развитие региона.

Глобальное изменение климата создает для территории Западной Сибири – с учетом ее географического положения, экономического потенциала и демографических проблем, необходимость создания долговременных инвестиционных программ и выработки соответствующих социальных решений. В настоящей работе предлагается анализ выявленных изменений, способствующих уточнению оценки социально-экономических рисков для развития экономики Западной Сибири на фоне меняющегося климата. Представлены работы, выполненные коллективом геолого-географического факультета ТГУ.

Целью настоящей работы является анализ тенденций основных составляющих климата Западной Сибири, от которых зависит перспектива развития региона.

Причиной большинства социально-экономических рисков для развития экономики Западной Сибири на фоне меняющегося климата, является изменение температуры воздуха, влекущее за собой изменение других характеристик климата. Исследование **долговременных тенденций температуры воздуха** за период 1971–2010 гг. выявило её рост со скоростью 0,4–0,6 °С/10 лет, причем в отдельные месяцы (февраль-март) холодного периода тенденции достигают 1,5–1,7 °С/10 лет. Структура изменчивости среднесуточных температур неоднородна, что отражается на вероятностных климатических параметрах, применяемых в прикладных целях [2]. Рассчитаны статистические характеристики рисков температурного режима, обусловленных периодами низких (высоких) температур, аномально холодной

(аномально жаркой погодой) и сильным морозом. В целом можно заключить, что преобладают и являются более продолжительными опасные явления (ОЯ) в холодный период года. В долговременном масштабе вклад Сибирского антициклона в антициклогенез юга Западной Сибири увеличивается, что отражается на частоте формировании экстремальных условий в холодный период года [5; 2]. На основе данных по повторяемости ОЯ, в соответствии с методикой [16], был проведен расчет социальных и экономических рисков применительно к каждому из рассматриваемых температурных критериев на основе валового внутреннего продукта (ВВП) на одного жителя области за период со средней продолжительностью опасного явления. В [16] под социальным риском понимают вероятность попадания населения рассматриваемой территории в зону с ОЯ в среднем за год, а под экономическим риском предлагают называть совокупный ущерб от ОЯ на данной территории. Расчеты социальных и экономических рисков показали, что например, все районы Томской области в большей степени уязвимы в холодный период года при формировании периодов низких температур. При этом максимальные значения совокупного ущерба при формировании как положительных, так и отрицательных экстремальных температурных периодов, наблюдаются в Томском административном районе, что обусловлено максимальной плотностью населения на фоне остальных районов.

Современные климатические изменения проявляются, не только в изменении средних величин, но и в резком увеличении частоты и интенсивности экстремальных климатических событий. В первую очередь заметны температурные аномалии. В работе [22] для выявления экстремальных климатических явлений в температурном режиме использованы индексы, рекомендованные Всемирной метеорологической организацией ВМО. Выполнена оценка динамики индексов экстремальности температурного режима (повторяемость холодных и теплых дней/ночей) на территории Западной Сибири по данным 75 станций за период современных климатических изменений (1961–2013 гг.), обнаружившая отсутствие статистически значимых трендов. Тем не менее, сравнение индексов экстремальности в период 1991–2013 гг. с периодом нормы (1961–1990 гг.) показало, что на многих станциях наблюдаются значимые изменения от периода к периоду, характеризующиеся уменьшением повторяемости холодных ночей и дней, а также увеличение теплых ночей и дней в году. Наибольший рост на большей части станций Западной Сибири показал индекс числа теплых ночей. Максимальное увеличение значений этого индекса отмечается на крайних северных станциях Диксон, Марресаля, Амдерма и на станции Кош-Агач, расположенной в Чуйской котловине Алтайских гор на высоте 1760 м. Результат подтверждает уверенность в том, что наибольшие изменения происходят в районе крайнего севера.

Оценка климатических тенденций и синхронности их проявления в Алтайском регионе приведена в работе [13]. Выявлена смена знака тенденции в динамике температуры воздуха после 1998 г. Явно выраженной тенденции в изменении количества осадков в Алтайском регионе не зафиксировано. Комплексное исследование **режима атмосферных осадков** [3] включает в себя как климатические, так и специализированные климатические характеристики, используемые в СНиП. Исследованы структура и динамика режима атмосферных осадков на территории Томской области: вероятностные показатели, индексы экстремальности, опасные явления, тенденции изменения. Получено, что средняя скорость локальных изменений атмосферных осадков на отрезке времени с 1960 по 2012 гг. превышает величину в 2,5 мм/10 лет, возрастая к югу почти до 20 мм/10 лет. Оценка индексов экстремальности показала увеличение максимальной суточной и пентадной сумм осадков. Число дней в году с суточной суммой осадков ≥ 10 мм также возрастает со значениями до 1,3 суток/10 лет. Замечено, что периоды выпадения осадков на территории становятся длиннее, причём наиболее длительные встречаются в осенний период. Максимальная продолжительность сухих периодов, наиболее часто встречаемых в период зимнего антициклогенеза, имеет тенденцию к уменьшению, которая за последние 40 лет несколько ослабла за счет частого выхода циклонов по северным районам области. Для Западной Сибири [27] проведен анализ пространственно-временной изменчивости экстремальности атмосферных осадков суточного разре-

шения с помощью климатических показателей экстремальности, разработанных и рекомендованных объединённой рабочей группой ВМО. Получено, что хотя общая сумма осадков меняется незначительно, но доля сильных осадков увеличивается. Эти изменения территориально привязаны к южной равнинной части Западной Сибири и среднегорья Алтая. В работе [12] для Алтайского региона так же проанализирована пространственно-временная структура полей годовых и сезонных сумм атмосферных осадков. Значимого тренда в динамике годового количества осадков в последние десятилетия также не зафиксировано, однако выявлено уменьшение осадков холодного полугодия на большинстве станций Алтайского региона. Незначительный рост годовых сумм осадков происходил за счет осадков теплого полугодия.

Одной из основных проблем меняющегося климата, является увеличение повторяемости экстремальных погодных явлений, связанных с развитием **конвективной неустойчивости** в атмосфере. Среди таких опасных конвективных явлений как град, ливень и сильный ветер особое место занимаю грозы, так как наносят значительный материальный ущерб многим отраслям народного хозяйства. Исследования многолетних рядов данных наблюдений за грозовой активностью [17, 28] позволяют заметить наличие квазицикличностей различного масштаба для всей территории Западной Сибири. Хотя сообщения о зарегистрированных смерчах, в последние годы встречаются чаще, устойчивых направленных тенденций в рядах грозовой или активности или повторяемости града не обнаружено. Замечено и увеличение повторяемости гроз в северных районах. Считается, что выше северного полярного круга гроз не бывает, или бывают отдельные разряды. Но в последние годы интенсивные грозы замечены и даже чуть выше 71-й широты, например, в районе вахтового поселка Собетта (Ямало-Ненецкий автономный округ).

Остановимся подробнее на специализированных исследованиях в интересах развития ряда отраслей экономики Западной Сибири. К основным специализированным показателям климатических **ресурсов для автомобильного и железнодорожного транспорта** относят число дней с метелями и туманами. Ухудшение видимости из-за тумана или метели делает невозможным взлет и посадку самолетов, увеличивает вероятность столкновения, ограничивает или полностью прекращает движение дорожного и водного транспорта. Наличие туманов снижает мощность электростанций, работающих на солнечной энергии, а увлажнение туманами конструкций ведет к их коррозии, утечкам и пробоям в электро- и радиоаппаратуре и т. п. В [11] изучены основные характеристики и пространственная структура числа дней с туманом на территории юго-востока Западной Сибири по данным 124 станций Томской, Новосибирской, Кемеровской областей и Алтайского края. Получено, что наибольшую повторяемость (мода) числа дней с туманом составляет по территории от 1 до 6 дней. Наибольшее среднее многолетнее число дней с туманом зафиксировано на станциях Кемеровской области: Кондома (98), Усть-Кабырза (96). На большей части Томской области, Алтайского края, в центральной и западной частях Новосибирской области, в западной части Кемеровской области число дней с туманом находится в пределах 10–20 дней. Тенденция к уменьшению числа туманов, замеченная в Томской области, в других областях обнаруживается не везде.

В работе [9] проведен расчет числа дней с метелью, и показана их динамика, их пространственное распределение, зависимость суммарной продолжительности метелей от числа дней с метелью, сезонный ход метелей на территории Томской области. Получено, что произошло значительное уменьшение как числа дней с метелью, так и средней продолжительности метелей. Продолжительность метелей уменьшилась в 2–3 раза, что связано с общей тенденцией уменьшения скорости ветра.

Мониторинг высоты снежного покрова представляет наибольшие трудности для анализа, при этом важен для многих отраслей экономики. Высота залегания снега даже на ближайших станциях может существенно различаться. Тем не менее, если анализировать все станции одновременно можно заметить не только различия, но и общие тенденции и по ним судить о динамике толщины снежного покрова в целом над каким либо регионом. В рядах можно заметить наличие некоторой цикличности в многолетней изменчивости, присущей

практически всем характеристикам атмосферы. Например, есть основания полагать, что присутствует квазидвадцатидвухлетний цикл. Для юга Томской области в период с 1955 по 2016 годы отмечается незначительная положительная динамика высоты снежного покрова [21]. В целом, высота снежного покрова изменяется в пределах 13–65 см. При этом максимальные значения высоты снега достигали отметок 111 см (1989–1990 гг.) и 103 см (2014–2015 гг.) на станции Бакчар, на станции Первомайское – 90 см (1965–1966 г.), на станции Томск – 101 см (2000–2001 г.) и 104 см (2014–2015 г.).

Урожайность сельскохозяйственных культур напрямую зависит от благоприятности климатических условий. Правительство РФ уточнило перечень субъектов страны, территории которых относятся к неблагоприятным для производства сельскохозяйственной продукции. В число неблагоприятных территорий из субъектов Сибирского федерального округа вошли Алтай, Бурятия, Тыва, Хакасия, Иркутская, Кемеровская области, Забайкальский край. Тем не менее, изменение климата, могут обозначить перспективы развития сельскохозяйственной отрасли экономики. В работе [19] проводилось исследование климатических характеристик термического режима теплого периода года, а так же оценка роли погодного фактора вегетационного периода в урожайности зерновых культур на юго-востоке Западной Сибири. Для теплого периода года и его подпериодов (вегетационного, периода активной вегетации) замечена тенденция роста их продолжительности, сумм температур и сумм осадков, начиная с 1980, 1990-х годов. Выявлено, что потепление климата, которое в Западной Сибири не сопровождается ростом засушливости, создает более благоприятные условия для развития сельского хозяйства и может обеспечить повышение его продуктивности за счет более широкого внедрения позднеспелых культур, сортов и гибридов. Для территории Западной Сибири такое опасное явление, как заморозки, встречается часто. Число дней без заморозков составляет 90–120 дней, что пагубно влияет на сельское хозяйство. При этом в период с 1966 по 2015 годы отмечается рост продолжительности беззаморозкового периода [20]. Следовательно, идет увеличение теплообеспеченности сельскохозяйственных культур и улучшение условий их выращивания, что является одним из положительных последствий влияния изменений климата. В работах [7; 14] тоже рассмотрены климатические изменения агрометеорологических характеристик на территории Томской области на фоне смягчения климата. Выполнена оценка средних потерь от заморозков при ориентации на климатическую и прогностическую информацию. Получено, что использование прогностической информации может заметно снизить потери в аграрном секторе, если потребители метеорологической информации будут вести хозяйственные мероприятия с учетом ожидаемой погоды и заблаговременно применять меры защиты.

Строительная отрасль. Ожидается, что повышение температуры воздуха в первой четверти XXI в. приведет к наибольшему изменению соответствующих нормативных характеристик на севере Сибири. При повышении температуры воздуха наиболее холодных суток на 1 °С термическое сопротивление ограждающих конструкций может быть уменьшено на 10–20 %. В процессе эксплуатации здание подвергается внешним воздействиям, которые принимаются во внимание в проектах путем подбора материалов и конструкций, защиты их специальными покрытиями и т. д. Эксплуатационные затраты на здание в процессе его службы в 2–3 раза превышают расходы на его строительство. Поэтому приобретают особую актуальность вопросы безремонтной эксплуатации, т. е. выбора конструкции, не требующей капитального ремонта. В связи с наблюдающимся увеличением повторяемости заморозков и оттепелей на исследуемой территории, ухудшаются условия эксплуатации зданий, в частности сокращается период их доремонтной эксплуатации, уменьшается долговечность. Наибольшее количество переходов температуры воздуха через 0 °С отмечается в момент становления холодного периода и его окончания. При этом в конце холодного периода таких переходов больше, чем в начале, и в ноябре отмечается 7–9 переходов, в апреле – 12–16, на севере области в мае от 8 до 12 [1]. Поскольку структура изменчивости среднесуточных температур на исследуемой территории неоднородна, это отражается на климатических параметрах, применяемых при проектировании зданий и сооружений, систем отопления, венти-

ляции, кондиционирования были рассчитаны вероятностные характеристики термического режима воздуха, приводимые в СНиП «Строительная климатология». Так, значение температуры воздуха наиболее холодных суток с обеспеченностью 92 и 98 % на преобладающей части области увеличилось по сравнению с данными СНиП23–01–99 на 0,6–3,8 °С, а средняя максимальная температура воздуха наиболее теплого месяца возросла на 0,3–1,1 °С [2].

Несмотря на то, что Томская область находится вне зоны залегания вечномерзлых грунтов, и здесь возможны изменения несущей способности почвогрунтов из-за потепления и увеличения глубины сезонного протаивания, ухудшения прочностных характеристик фундаментов зданий и технических сооружений. Зимние строительные работы существенно лимитируются, согласно действующим СНиП, промерзанием верхних слоев почвы, которые в отдельные годы достигают в Томской области глубины 220–240 см при средней климатической величине, равной 160 см. В настоящее время при заложении фундаментов глубина промерзания считается равной 220 см, водопроводные трубы закладываются на глубину 310 см, канализационные – 170 см.

Снеговые нагрузки. В строительстве и эксплуатации различных сооружений и дорог снежный покров является отрицательным фактором, создающим нагрузки и заносы. Снеговая нагрузка на различные покрытия определяется весом снегового покрова на единицу площади (запасы воды в снежном покрове). Происходящие климатические изменения способствуют увеличению снеговых нагрузок на здания и технические сооружения. Так, расчеты снеговых нагрузок на конструкции жилых зданий по типовым проектам (2-, 5- и 9-этажных зданий, наиболее характерных для Томской области), предусматривающим допустимый вес их соответственно в 70, 150 и 150 кгс/м^2, показали, что в области наблюдается увеличение снеговых нагрузок со скоростью до 0,2 и более кгс/м^2 за 10 лет и нагрузки достигают в отдельные годы значений 192 кгс/м^2. Наибольшие изменения снеговых нагрузок зарегистрированы на юге Томской области [1].

Гололедные нагрузки. В холодный период года велика вероятность возникновения гололедно-изморозевых явлений. Территория Томской области по характеристике «толщина стенки гололеда, превышаемая 1 раз в 5 лет», относится к слабогололедному району с толщиной от 3 до 5 мм. Но в отдельных случаях диаметр отложений может достигать 30–40 мм [1]. В зимы с частыми оттепелями вероятность образования гололедно-изморозевых явлений может увеличиться.

Теплоэнергетика. В настоящее время среднесуточная температура – основной критерий, по которому осуществляется выработка тепловой энергии. ЦГМС обеспечивают отрасли энергообеспечения суточными прогнозами этой характеристики. Используемая методика оценки эффективности работы энергосистем учитывает только температуру воздуха. Однако, кроме температуры воздуха, на свойства воздуха и потребность в энергообеспечении оказывают другие метеорологические характеристики. В работе [8] предложено использовать радиационно-эквивалентно-эффективную температуру (РЭЭТ) – комплексную характеристику, учитывающую, кроме температуры, влажность воздуха, солнечную радиацию и скорость ветра. Рассчитана матрица тепловых потерь при разных соотношениях прогностических и фактических температур. Представлена стратегия оптимального использования тепловых ресурсов. Показано, что учет РЭЭТ позволит существенно уменьшить расход тепла на отопление в весенний период, так как в это время за счет высокой интенсивности солнечной радиации РЭЭТ выше температуры воздуха.

Изучение многолетних изменений **скорости ветра** имеет важное как теоретическое, так и прикладное значение**.** Допустимый скоростной напор ветра для данных типовых проектов составляет 45 кгс/м^2. В настоящее время в Томской области фиксируются ветровые нагрузки до 12 кгс/м^2 [1], причем наибольших величин они достигают в зимне-весенний период. Это значит, что в сочетании со снеговой формируется максимальная нагрузка на здания, особенно на выступающие детали конструкций и кровельные перекрытия.

В работе [15] проанализированы основные характеристики ветрового режима для г. Томск. Выполнено сравнение характеристик ветра за два периода наблюдений по ГМС

Томск и за тот же период по ТОР-станции (район Академгородка). За долговременный период обнаружено статистически значимое уменьшение среднемесячной и среднегодовой скорости ветра, числа дней с сильным ветром, максимальных скоростей ветра. Сильные ветры, наблюдаемые ранее в переходные сезоны, практически не наблюдаются или наблюдаются не более одного раза за сезон. Отмечено постепенное увеличение повторяемости штилей. Преобладающее направление ветра осталось южным, хотя при этом в XXI в. усилились западная и юго-западная составляющие. Повторяемость южного ветра постепенно уменьшается. Сравнение с данными ТОР-станции убеждает, что причиной изменения характера ветра является не застройка района метеостанции, а объективные причины, связанные с изменением циркуляции атмосферы. В годовом ходе значения скорости ветра не претерпели изменений: максимум – в ноябре-марте, минимум – в июле-августе. Постепенное уменьшение скорости ветра может способствовать ухудшению экологической обстановки в районе г. Томска.

Возрастание потребности человечества в энергетических ресурсах приводит к необходимости поисков и более широкого использования **альтернативных источников энергообеспечения**. К их числу относится в первую очередь ветроэнергетика. В работе [10] приведены основные характеристики скорости ветра и оценка ветроэнергетического потенциала Кемеровской области. По результатам работы заключили, что использование ветроэнергетические установки (ВЭУ) малой мощности возможно в переходные периоды – апрель, май, октябрь, ноябрь, когда отмечаются более высокие скорости ветра. Однако, учитывая нестабильность (суточная, сезонная, погодная) поступления ветровой энергии, её можно использовать лишь в качестве дополнительного источника электроснабжения. Для более эффективного использования ветровой энергии необходимо располагать ветровые приемники ВЭУ на высотах 30–100 м и выше, так как скорость ветра с высотой увеличивается. Расчет показывает, что скорость ветра на высоте 30 м выше в среднем в 1,7 раза, на высоте 100 м – в 2,4 раза. При этом среднегодовые скорости воздушных потоков на стометровой высоте превышают 7 м/с. Установка ВЭУ на высоте 100 м (используя подходящую естественную или искусственную возвышенность) практически в любом районе может обеспечить эффективную работу ВЭУ и значительные дополнительные поступления электроэнергии.

Исследование **ресурсов солнечной** радиации на юго-востоке Республики Алтай показало, что данная территория обладает достаточным количеством суммарной солнечной радиации для развития гелиоэнергетики. Особенно велики ресурсы гелиоэнергетики в высокогорных котловинах, значительными ресурсами обладают горные долины. Получено, что экономически целесообразно использовать солнечную энергию для горячего водоснабжения сезонных потребителей (спортивно-оздоровительных сооружений, баз отдыха), а также для обогрева открытых и закрытых плавательных бассейнов и других сооружений. Развитие гелиоэнергетики в труднодоступных горных районах Алтая будет способствовать развитию туристско-рекреационной, производственной деятельности и улучшению социальных условий жизни сельского населения [26].

Ресурсы воды. Одним из самых дефицитных ресурсов биосферы в XXI веке будет пресная вода. Поскольку в последнее десятилетие замечена тенденция к учащению процессов блокирования, с которыми связывают экстремально низкие максимальные расходы воды в половодье на реках Обь, Томь, Иртыш и их притоках и проблемы с наполнением Верхне-Иртышского каскада водохранилищ в Казахстане, актуальна оценка стока воды и влажности деятельного слоя почвы на ближайшую перспективу. Такая оценка была сделана на период 2021–2030 гг. [24]. Авторы утверждают, что результаты модельных расчетов, позволяют прогнозировать более раннее начало половодья в лесотундре и тайге. За счёт увеличения зимних осадков будет увеличиваться объем половодья и меняться его форма. Суммарный объем климатического стока возрастет, несмотря на рост испарения. Относительная влажность деятельного слоя почвы будет заметно увеличивается в весенний период и снижаться в летний. Все это внесет коррективы и в режим судоходства и сельскохозяйственного производства.

Лесные ресурсы. Самый богатый лесом район России – Сибирь, ежегодно вырубают 600 тыс. га леса, столько же гибнет от пожаров. Искусственное восстановление не превышает 200 тыс. га. При таком режиме эксплуатации ресурсы лесов Сибири будут подорваны за 30–40 лет. Увеличение периодов с экстремально высокими температурами воздуха, способствует увеличению числа антропогенных пожаров. Число пожаров, возникших по вине гроз, по данным разных источников варьируется для различных регионов от 10 до 67 % от общего числа лесных пожаров. Однако выгоревшая площадь одного пожара, возникшего от молнии, почти вдвое превышала площадь пожаров, возникших по другим причинам, поэтому возгорания от молнии являются самыми опасными для тайги [6]. Лесные пожары в период с июня по август формируют высокий уровень загрязнения воздуха продуктами горения. Известно, что шлейфы дыма, хорошо видимые на спутниковых снимках, распространяются на населенные пункты, в том числе и на Томск, и сопровождаются мглой с уменьшением вертикальной и горизонтальной видимости до 80–100 м и запахом продуктов горения [4].

Здоровье человека. Основа любого экономического развития – человеческий капитал – понятие, включающее помимо трудовых ресурсов накопленные инвестиции в образование, науку, здоровье, безопасность, в качество жизни, в инструментарий интеллектуального труда. Поскольку потепление замечено в холодную часть года, суровость зимних условий уменьшится, очень холодные периоды будут наблюдаться реже, что положительно повлияет на здоровье населения. В летние месяцы большое влияние на здоровье человека оказывают волны тепла, которые в крупных городах могут приводить к большому количеству жертв. Больше других от повышения температуры страдают жители городов, потому что региональное повышение температуры усиливается за счет городского «острова тепла». В работе [18] показано, что наиболее часто за летний период волны тепла с превышением температуры относительно нормы более чем в $2 \cdot \sigma$ были зафиксированы в июне и августе. Выявленные показатели и тенденции проявления волн тепла указывают на возможность в предстоящие годы учащения случаев ухудшения самочувствия людей, повсеместный рост потребления электроэнергии при использовании энергоемких приборов, контролирующих микроклимат рабочих помещений, которые нередко приводят к нарушению жизнедеятельности населения. В целом невозможно с уверенностью оценить, скажется ли изменение климата положительно на здоровье населения Сибири.

Рекреационная деятельность. В связи с перечисленными выше тенденциями на смягчение климата Западной Сибири, представляет интерес оценка рекреационной привлекательности территории. Естественно, что смещение для зимнего сезона дат начала на более поздние сроки, а его конца на более ранние увеличивает продолжительность благоприятного для здоровья населения сезона. Увеличение повторяемости теплых зим (с неустойчивым термическим режимом и безъядерных), делает климат Сибири в целом более комфортным для зимнего отдыха [23]. Из тенденций климатических характеристик летнего сезона авторы отмечают увеличение продолжительности фазы умеренно-тёплое лето. Эта фаза имеет наиболее благоприятные температурные условия для принятия солнечных ванн и купания. Заметное увеличение летнего сезона в целом позитивно влияет на организацию отдыха и проведение лечебно-оздоровительных процедур [25]. Следовательно, наблюдающиеся изменения климата, способствуют увеличению рекреационной привлекательности территории и развитию туризма.

В результате проведенных исследований изменения климата можно утверждать, что:

1. Температуры воздуха на территории Томской области за период 1971–2010 гг. росла со скоростью 0,4÷0,6 °С/10 лет, причем в отдельные месяцы холодного периода (февраль-март) тенденции достигали 1,5÷1,7 °С/10 лет.
2. Расчеты социальных и экономических рисков показали, что все районы (Томской области) Западной Сибири по-прежнему, в большей степени уязвимы в холодный период года при формировании периодов низких температур.
3. Частоту формирования экстремальных условий в холодный период года обеспечивает, по-прежнему Сибирский антициклон.

4. Уменьшается повторяемость экстремально холодных ночей и дней; увеличивается число теплых ночей и дней в году. Тенденция особенно заметна на крайних северных станциях и в Чуйской котловине Алтайских гор на высоте 1760 м. Результат подтверждает уверенность, что наибольшие изменения климата Западной Сибири происходят в районе крайнего севера.

5. На большинстве станций Западной Сибири и Алтайского региона наблюдается уменьшение осадков холодного полугодия. В рядах сумм осадков тенденций не обнаружено благодаря увеличению осадков теплого полугодия. При этом увеличение повторяемости интенсивных осадков создает трудности в самом начале и в конце вегетационного периода.

6. Направленных тенденций в рядах грозовой активности и повторяемости града не обнаружено, хотя величина конвективных осадков постепенно растет. Следовательно, и увеличение повторяемости опасных конвективных явлений в ближайшем будущем весьма вероятно, особенно в северных районах.

7. По причине увеличения периодов с высокими значениями температуры воздуха возможно увеличение площади лесов, охваченной пожарами.

8. Повсеместно наблюдаемое уменьшение скорости ветра может способствовать ухудшению экологической обстановки в районах промышленных центров и соседствующих с районами, охваченными лесными пожарами.

9. Замечена тенденция к уменьшению числа туманов на юге Западной Сибири, хотя обнаруживается она не повсеместно. Уменьшается и число дней с метелями.

10. На значительной части территории Западной Сибири отмечается рост продолжительности беззаморозкого периода, увеличивается теплообеспеченность сельскохозяйственных культур и улучшаются условия их выращивания, что является одним из положительных последствий влияния ожидаемых изменений климата.

11. Даже на юге Западной Сибири возможны изменения несущей способности почвогрунтов из-за потепления и увеличения глубины сезонного протаивания, ухудшения прочностных характеристик фундаментов зданий и технических сооружений.

12. Ухудшаются условия эксплуатации зданий, в частности сокращается период их доремонтной эксплуатации, уменьшается их долговечность, что обусловлено наблюдающимся увеличением повторяемости заморозков и оттепелей.

13. В зимы с частыми оттепелями вероятность образования гололедно-изморозевых явлений увеличивается.

14. Сочетание ветровой и снеговой нагрузок, на фоне прогнозируемого увеличения снеговой, обеспечивает увеличение рисков при эксплуатации различных зданий и сооружений на территории Западной Сибири.

15. Использование значений радиационно-эквивалентно-эффективной температуры в качестве критерия, по которому начинается отопительный сезон, позволит существенно уменьшить расход тепла на отопление в весенний период. Что будет способствовать практике энергосбережения, столь актуальной в наше время.

16. В качестве дополнительного источника электроснабжения в переходные периоды – апрель, май, октябрь, ноябрь целесообразно использование ветроэнергетических установок малой мощности. Их установка на высоте 100 м, используя подходящую естественную или искусственную возвышенность, практически в любом районе может обеспечить значительные дополнительные поступления электроэнергии.

17. Республика Алтай обладает достаточным количеством суммарной солнечной радиации для развития гелиоэнергетики. Экономически целесообразно использовать солнечную энергию для горячего водоснабжения сезонных потребителей (спортивно-оздоровительных сооружений, баз отдыха), а также для обогрева открытых и закрытых плавательных бассейнов и других сооружений.

18. Невозможно с уверенностью ответить на вопрос, сказывается ли изменение климата положительно на здоровье населения Сибири. Положительные и отрицательные результаты изменения климата пока уравновешивают друг друга.

19. Наблюдающиеся изменения климата, способствуют увеличению рекреационной привлекательности территории и развитию туризма, и может обеспечить приток туристов, а, следовательно, и развитие всей инфраструктуры.

Список литературы

1. Барашкова Н. К., Волкова М. А., Кужевская И. В. Оценка современной климатической составляющей хозяйственного комплекса Томской области в холодный период года // Вестн. Том. гос. ун-та. 2011. № 351. С. 163–168
2. Барашкова Н. К., Волкова М. А., Кужевская И. В. Оценка термического режима воздуха и тенденций процессов антициклогенеза на юге Западной Сибири в прикладных целях // Вестн. Том. гос. ун-та. 2014. № 387. С. 225–232
3. Барашкова Н. К., Волкова М. А., Кужевская И. В. Современный климатический режим атмосферных осадков на территории Томской Области // Тр. Гл. геофиз. обсерватории им. А. И. Воейкова, 2015. № 576. С. 129–152
4. Барашкова Н. К., Кужевская И. В., Поляков Д. В. Экстремальный режим погоды летом 2012 г. на территории Томской области как отражение современных глобальных климатических тенденций // Вестн. Том. гос. ун-та. 2013. № 372. С. 173–179
5. Волкова М. А., Чередько Н. Н., Ивашкова О. А. Особенности формирования и социально-экономические последствия температурных рисков в Томской области // Вестн. Том. гос. ун-та. 2013. № 374. С. 180–187
6. Оценка роли климатических факторов в возникновении и распространении лесных пожаров на территории Томской области / В. П. Горбатенко, А. А. Громницкая, Д. А. Константинова, Т. В. Ершова, О. Е. Нечепуренко // Вестн. Том. гос. ун-та. 2015. № 395. С. 233–240
7. Горбатенко В. П., Кижнер Л. И. Экономические аспекты использования агрометеорологических прогнозов // Экономика сельского хозяйства России, 2014. № 4. С. 54–61
8. Грицевич Ю. А., Кижнер Л. И. Метеорологический фактор в теплоэнергетике Томска // Современные проблемы географии и геологии :. материалы IV Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием 16–19 окт. 2017 г. Томск, 2017. С. 239–242
9. Журавлев Г. Г. Динамика метелей Томской области в современный период // Вестн. Том. гос. ун-та. 2013. № 369. С. 181–187
10. Журавлев Г. Г., Задде Г. О. Оценка ветроэнергетического потенциала Кемеровской области // Вестн. Том. гос. ун-та. 2013. № 376. С. 175–181
11. Журавлев Г. Г., Задде Г. О., Ахметшина А. С. Туманы на территории юго-востока Западной Сибири // Вестн. Том. гос. ун-та. 2011. № 347. С. 174–180
12. Журавлев Г. Г., Чередько Н. Н. Крупномасштабные режимы изменения климата и согласованность изменений пространственно-временной структуры поля атмосферных осадков в Алтайском регионе // Вестн. Том. гос. ун-та. 2015. № 391. С. 220–226
13. Журавлев Г. Г., Чередько Н. Н., Кусков А. И. Оценка современных климатических тенденций и синхронности их проявления в Алтайском регионе // Вестн. Том. гос. ун-та. 2014. № 379. С. 200–208
14. Кижнер Л. И. Экономические аспекты обеспечения метеорологической информацией о заморозках в Томской области Вестн. Том. гос. ун-та. 2014. № 381. С. 232–237
15. Кижнер Л. И., Серая Н. Ю. Изменение режима ветра в Томске в начале XXI века // Тр. ГГО, 2015. № 576. С. 102–113
16. Кобышева Н. В., Галюк Л. П., Панфутова Ю. А.Методика расчета социального и экономического рисков, создаваемых опасными явлениями погоды // Тр. ГГО. 2008. Вып. 558. С. 162–171
17. Константинова Д. А., Горбатенко В. П. Динамика грозовой активности над территорией Западной Сибири // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016 : XII Междунар. науч. конгр., 18–22 апреля 2016 г., Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология» : сб. материалов : в 2 т. Новосибирск: СГУГиТ, 2016. Т. 1. С. 97–101
18. Температурные волны тепла как отражение изменчивости современных климатических условий жизнедеятельности на территории Томской области / И. В. Кужевская, Д. В. Поляков, М. А. Волкова, М. А. Барашкова // Экология человека. 2015. № 2. С. 3–9
19. Носырева О. В. Климатические показатели термического режима теплого периода и их современные тенденции для юга Западной Сибири : дис. … канд. геогр. наук. Томск, 2012. 176 с.
20. Носырева О. В., Кошикова Т. С. Повторяемость заморозков в Западной Сибири // Двенадцатое Сибирское совещание и школа молодых ученых по климато-экологическому мониторингу : тез. докл. / под ред. М. В. Кабанова. 2017. С. 72–73.
21. Носырева О. В., Соян Д. А. Снежный покров как фактор развития эрозии почв на юге Томской области // Современные проблемы географии и геологии к 100-летию открытия естественного отделения в Томском государственном университете : материалы IV всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, 2017. С. 311–315

22. Динамика показателей экстремальности климата на территории Западной Сибири / Л. А. Огурцов, Н. Н. Чередько, М. А. Волкова, Г. Г. Журавлев // Оптика атмосферы и океана, 2016. Вып. 29. № 8. С. 633–639

23. Окишева Л. Н., Филандышева Л. Б. Временная динамика и функционирование ландшафтов Западной Сибири. 2015. 316 с.

24. Паромов В. В., Земцов В. А., Копысов С. Г. Климат Западной Сибири в фазу замедления потепления (1986–2015 гг.) и прогнозирование гидроклиматических ресурсов на 2021–2030 гг. // Изв. Том. Политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов, 2017. Т. 328, № 1. С. 62–74

25. Ромашова Т. В., Филандышева Л. Б., Юркова К. Д. Анализ динамики временных характеристик сезонов года в подтайге Западно-Сибирской равнины за период с 1936 по 2015 г. // Геосферные исследования. 2017. № 3. С. 16–26

26. Севастьянов В. В., Мишенина Ю. А. Радиационный режим и гелиоэнергетические ресурсы юго-восточной части Республики Алтай // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29. № 12. С. 1090–1095

27. Шарапова А. А., Кужевская И. В., Каштанова К. А., Поляков Д. В. Характеристики экстремальных осадков на территории Западной Сибири // Геогр. вестн. 2017. № 3 (42). С. 88–98

28. Konstantinova D. A., Gorbatenko V. P., Polyakov D. V. Spatial distribution of the thunderstorm activity characteristics for the territory of Western Siberia // Proc. SPIE 10466, 23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 1046658 (30 November 2017)

УДК 551.58

Задачи и проблемы климатического обслуживания

Д. М. Горяшина (dariagoryashina@gmail.com)

ФГБУ «Иркутское УГМС», Иркутск

Аннотация. Проведен анализ материалов о современном состоянии климатологического обеспечения различных отраслей экономики в России, их проблемы и потребности, в том числе в аспекте Глобальной рамочной основы климатического обслуживания (ГРОКО).

Ключевые слова: адаптация, ГРОКО, климатическая доктрина, климатическое обслуживание, климатические риски, Парижское соглашение.

Введение

Климатическое обслуживание – это процесс предоставления информации, с помощью которой правительство, организации или отдельное лицо может управлять связанными с климатом рисками и возможностями. [4]

Основные потребители климатической информации – это сельское хозяйство, здравоохранение, планирование, энергетика, флот, строительство, транспорт, отрасли промышленности, туризм, страхование, т. е. уязвимые для климатических изменений отрасли.

В последнее десятилетие одним из основных направлений исследований, проводимых Всемирной Метеорологической Организацией (ВМО) в области климатологии, является совершенствование климатологического обслуживания экономики и социальной сферы. С этой целью была разработана ГРОКО – глобальная рамочная основа для климатического обслуживания [6].

1. Глобальная рамочная основа климатического обслуживания

На Третьей Всемирной конференции по климату, проходившей в Женеве с 31 августа по 4 сентября 2009 г., 13 глав государств и правительств, 81 министр и 2500 ученых [10] единогласно приняли решение создать Глобальную рамочную основу для климатического обслуживания с целью улучшить обеспечение потребностей в точной и своевременной информации о климате. На межправительственном совещании ВМО, состоявшемся 11–12 января 2010 года, была утверждена целевая группа высокого уровня, состоящая из 14 высокопоставленных лиц, которая на Всемирном метеорологическом конгрессе в мае 2011 года представила доклад «Знания о климате как основа для действий: Глобальная рамочная основа для климатического обслуживания», на основании которого Всемирным метеорологическим конгрессом 29–31 октября 2012 года были разработаны основы ГРОКО.

В задачи ГРОКО не входит исследование проблемы изменения климата. Главная цель Глобальной рамочной основы для климатического обслуживания – обеспечить пользователей самой современной климатической информацией. В качестве приоритетных отраслей выбраны: водные ресурсы, здравоохранение, уменьшение риска бедствий и сельское хозяйство. Отличительной особенностью Рамочной основы является её постепенное осуществление в течение 10–20 лет [4] и тесная взаимосвязь между её компонентами, а так же между готовящими информацию организациями и организациями исследователей и пользователей, что в свою очередь повысит качество и объем климатического обслуживания.

Компоненты Рамочной основы:

- Наблюдения и мониторинг (сбор данных наблюдений). Этот компонент Рамочной основы уже существует, в рамках ГРОКО будут разработаны и усовершенствованы межправительственные соглашения для обмена данными.
- Исследования, моделирование и предсказание (разработка и обобщение новых знаний).
- Система для обмена информацией (пользователи смогут получать необходимую им информацию в своей повседневной работе по управлению климатическими рисками).
- Платформа взаимодействия с пользователями (предназначена для разъяснения потребностей пользователей, обмена методологией пользователей, установления стандартов для климатического обслуживания). Основная цель и новая возможность в климатическом обслуживании – возможность диалога для всех участников процесса, т. е. как для потребителей, так и для производителей климатической информации.
- Наращивание потенциала (подготовка и сохранение научных кадров высшей квалификации в области климата, разработка и реализация инженерных и организационных мер по адаптации и смягчению антропогенного воздействия на климат, подготовка профессиональных консультантов для ведения международных переговоров и подготовки международных соглашений, информированность общественности, международное сотрудничество).

Как это будет работать? «Сборщики данных увидят, что их данные используются и выяснят, какие данные необходимы больше всего; операторы климатического обслуживания обретут более качественные знания и разработают более инновационную продукцию; исследователи увидят практическое применение их результатов, а пользователи получат более широкие возможности для сообщения о своих потребностях и опыте. « [4]

ГРОКО добьется успеха только в том случае, если все соответствующие стороны (правительства, технические организации, в том числе научные круги, представители пользователей климатической информации) будут участвовать в ее разработке и координации. В краткосрочной перспективе важным критерием успеха будет уровень и масштабы поддержки Рамочной основы. В дальнейшем ожидается совершенствование доступа к климатической информации и ее эффективным использованием теми сообществами и отраслями, которые являются особенно уязвимыми для вариаций климата и экстремальных явлений, а также долгосрочное глобальное уменьшение связанной с климатом гибели людей, средств к существованию и имущества и повышение действенности и эффективности экономических секторов [4].

2. Климатическая безопасность Российской Федерации

Современная хозяйственная деятельность человека, связанная, прежде всего, с выбросами парниковых газов, оказывает заметное влияние на климат во всех регионах планеты. 12 декабря 2015 года на 21-й Конференции Рамочной конвенции ООН по изменению климата (РКИК ООН) в Париже приняли соглашение, определяющее рамки многостороннего сотрудничества в связи с изменением климата и адаптации к последствиям этих изменений – «Парижское соглашение», которое предполагает добровольные обязательства, которые Россия на себя приняла. Сейчас идет разработка соответствующих документов при участии и орга-

нов власти, и представителей промышленности и как сказал глава Росгидромета Максим Яковенко в интервью газете «Коммерсантъ»: «В 2019 году должен быть готов документ, где все это будет прописано» [3].

Осознание и понимание необходимости учёта изменений климата определило создание регуляторов государственной политики Российской Федерации в области климата и смежных с ней областях – Климатической доктрины Российской Федерации, которая была утверждена 17 декабря 2009 года. Доктрина представляет собой систему взглядов на единую государственную политику Российской Федерации по вопросам изменения климата и его последствиями. [5] Для реализации Климатической доктрины был разработан Компескксный план реализации Климатической доктрины Российской Федерации на период до 2020 года (№ 730-р от 25 апреля 2011 года). Также разработан Комплексный план научных исследований погоды и климата, рассчитанный на период до 2020 года, в котором определены направления научных исследований погоды и климата, сформулированные в первом Оценочном докладе Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории РФ (ОДРФ-1, 2008 г.) и в решениях VI Всероссийского метеорологического съезда (МС-VI, 2009 г.):

- оценка прошлого и современного состояния климатической системы;
- оценка факторов влияния антропогенной деятельности на климат;
- прогноз будущих изменений климата и их воздействий на качество жизни населения Российской Федерации и других регионов Земли;
- оценка степени защищенности и уязвимости экосистем, экономики, населения, государственных институтов и инфраструктуры государства по отношению к изменениям климата и существующих возможностей адаптации к ним;
- оценка возможностей смягчения антропогенного воздействия на климат. [7]

3. Климатические риски и адаптации к изменениям климата

Своевременное выявление и оценка связанных с изменениями климата угроз обороноспособности, экономике, состоянию окружающей среды, жизни и здоровью населения относятся к числу приоритетных исследований в области климата.

Изменения климата многообразны и проявляются, в том числе, в изменении частоты и интенсивности опасных погодных явлений (ОЯ) и климатических аномалий, повышении пожароопасности лесов. Но последствия изменений климата проявляются не всегда так явно, например, влияние на миграционные процессы как результат перераспределения продовольственных и водных ресурсов, снижения относительной комфортности проживания человека в отдельных регионах, увеличение уровня заболеваемости и смертности, распространение инфекционных и паразитарных заболеваний, изменение зоны вечной мерзлоты в северных регионах с ущербом для строений и коммуникаций, вытеснение одних биологических видов другими и как следствие нарушение экологического равновесия. [5]

Не все последствия ожидаемых изменений климата носят отрицательный характер. Возможные положительные для Российской Федерации последствия ожидаемых изменений климата связаны с возможными сокращениями расходов в отопительный сезон, улучшением условий транспортировки грузов в арктических морях, облегчение доступа к арктическим шельфам и их освоения, повышение эффективности животноводства, расширение зоны растениеводства.

При оценке социально-экономических последствий природных катаклизмов нужно решить три задачи: во-первых, прогноз ущерба для гипотетических (прогнозируемых) опасных природных явлений, во-вторых, экспресс-оценка прямого ущерба непосредственно после осуществления ОЯ и, в-третьих, оценка всех составляющих ущерба на основе реальных данных после окончания фазы ликвидации последствий ОЯ. [8]

90 % самых тяжелых экономических потерь приходится на опасные гидрометеорологические явления: паводки, наводнения, сильный ветер, ливневые дожди, град, засухи. [2] По данным МЧС наиболее опасными для населения России являются наводнения, очень сильные ветры и лесные пожары. [6] Поэтому актуальной является разработка адаптационных

мероприятий, направленных на смягчение и нейтрализацию негативного воздействия ОЯ. [9] Выделяют пять стадий выбора адаптационных мер:

- определение потребностей в адаптации (анализ современных и будущих климатических рисков при наличии адаптации и без нее, способность к адаптации);
- определение вариантов адаптации;
- оценка этих вариантов с точки зрения затрат и выгод;
- планирование и реализация выбранных адаптационных мер;
- мониторинг и количественная оценка результатов адаптации. [1]

Разнообразие и масштабы изменений климата регионов Российской Федерации и их последствий для окружающей среды, экономики и населения являются естественным следствием значительных размеров территории и многообразия природных условий, что в свою очередь обеспечивает, наряду с другими факторами, более высокий адаптационный потенциал страны. Это позволяет с некоторым оптимизмом относиться к возможностям приспособления нашей страны к сравнительно «медленным» изменениям климата. Остроту «дефицита» адаптации в России, прежде всего, к экстремальным погодно-климатическим воздействиям. [2]

Заключение

Многим людям не известно о потенциальных выгодах использования климатической информации или у них может отсутствовать необходимый опыт и доступ к информации. Основная идея ГРОКО, заключаются в том, что управление климатическими рисками должно систематически осуществляться всеми странами, отраслями промышленности и сообществами. Освещение проблем, связанных с изменениями климата и их последствиями, включая популяризацию научных знаний в этой области, в том числе с помощью средств массовой информации, оценки ущербов позволяют хозяйствующим субъектам выбирать оптимальные стратегии при планировании защитных и адаптационных мероприятий, что повышает экономическую эффективность метеорологических прогнозов. Адаптации к изменениям должна предшествовать количественная оценка возможных последствий и степени их опасности, в том числе и для здоровья человека, в виде климатических рисков. Отсутствие единой методологии и сопоставимых методик расчета экономической эффективности и экономического эффекта усложняет выбор адаптационных мер.

Список литературы

1. Васильев М. П. Изучение международного опыта по разработке национальных планов адаптации к изменению и изменчивости климата (структура, цели, ожидаемые результаты, исполнители) // Тр. ГГО. 2017. № 585. С. 110–125.
2. Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации. ФГБУ «ГГО», 2017. С. 106
3. Дудина Г., Никитина О. Вопросы климата принимают политическую окраску // Коммерсант. 2018. № 3 (6241) от 11.01.
4. Знание о климате как основа для действий: Глобальная рамочная основа для климатического обслуживания – укрепление возможностей наиболее уязвимых стран. Часто задаваемые вопросы, касающиеся доклада целевой группы высокого уровня по глобальной рамочной основе для климатического обслуживания. ВМО, 2011. С . 20
5. Климатическая доктрина Российской Федерации
6. Кобышева Н. В., Васильев М. П. Уязвимость социальной сферы регионов России к опасным гидрометеорологическим явлениям // Труды ГГО. 2015. № 578. С 59–74.
7. Комплексный план научных исследований погоды и климата на период до 2020 года. URL: http://cc.voeikovmgo.ru/ru/dokumenty/kompleksnyj-plan-nauchnykh-issledovanij-pogody-i-klimata
8. Оганесян В. В., Орлова Е. А. Оценки рисков нанесения ущербов экономике опасными метеорологическими явлениями погоды // Тр. Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2016. № 362. С. 214–223.
9. Серов А. Н., Петерс А. А., Осипова Т. Н. Адаптация систем электросетевого хозяйства к изменению климата // Труды ГГО. 2016. № 581. С. 116–137
10. http://www. gfcs-climate. org/overview

УДК 581.584

О существовании острова тепла в г. Томске

Ю. А. Грицевич (gricevich. yuliya@mail.ru), Л. И. Кижнер (kdm@mail. tsu.ru)

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск.

Аннотация. На основе метеорологических наблюдений за температурой воздуха в городе Томске и его окрестностях (аэропорт) в 2012 г. исследовано наличие острова тепла. Показано, что остров тепла проявился по среднемесячным температурам, а также по результатам моделирования – в суточном ходе.

Ключевые слова: остров тепла, внутригодовой ход, суточный ход, температура воздуха, мезомасштабная модель высокого разрешения.

Введение

В настоящее время роль городов в жизни человека неуклонно возрастает. Повышение роли городов – урбанизация – приводит к увеличению количества городов, росту населения в них, увеличению площади городов, росту промышленности. Климат города принципиально отличается от климатических особенностей сельской местности. Под влиянием городской среды, щадящие для сельской местности, погодные условия часто приобретают экстремальный характер. В городах заметно изменяется естественный тип местности, характер и свойства подстилающей поверхности. Характерной особенностью крупных городов является «городской остров тепла», поведение которого оказывает сильное влияние на термическую структуру и динамику приземного слоя воздуха, и, в конечном счете, и на экологию городской окружающей среды.

Основной причиной более высоких температур городской местности является антропогенное преобразование природного пространства. Материалы, широко используемые в городских районах для покрытия тротуаров и крыш, такие как асфальт и бетон, обладают существенно отличающимися объемными тепловыми свойствами (в том числе теплоемкость и теплопроводность) и поверхностными радиационными свойствами (альбедо и излучение), чем окружающие сельские районы. Это приводит к изменению энергетического баланса, что является причиной более высоких температур.

Возникновение и развитие эффекта острова тепла в городских условиях влияет на снижение уровня комфортности проживания горожан: высокие температуры летом (усугубляют заболевания сердечно-сосудистой системы) и влажность зимой (рост острых респираторных инфекционных заболеваний), что негативно сказывается на здоровье горожан [1].

Кроме того, в окрестностях города возникает местная локальная циркуляция воздуха. Ее особенностью является то, что в тени города возникают возвратные потоки воздуха, противоположные направлению основного потока с наветренной стороны. Данная обратная циркуляция, можно сказать, запирает выбросы предприятий на территории города. Над ним возникает «шапка» загрязнений, состоящая из газообразных и аэрозольных веществ. Особенностью данной циркуляции является то, что она имеет свойство сохраняться не только при слабом, но и при ветре средней интенсивности. Но надо заметить, что данные воздушные массы могут быть как чистыми, так и загрязненными. Степень чистоты воздуха зависит от наличия лесных массивов вокруг города, функцией которого является предотвращение циркуляции загрязненных воздушных потоков, для защиты города от промышленных выбросов в атмосферу. При обнаружении негативного эффекта острова тепла необходимо принимать меры, препятствующие образованию данного явления [2].

Изучение городского острова тепла не менее важно для учета эффектов при прогнозировании наиболее опасных для населения и окружающей среды метеорологических условий.

Целью настоящей работы является изучение острова тепла в Томске. Работа основывается в основном на исследовании температурных условий в городе, оцениваемых по наблюдениям Томской гидрометеорологической станции (ГМС), и за городом – по наблюдениям на Авиационной метеорологической станции (АМСГ) Богашево.

Использованные данные

В работе в определенной степени учтены синоптические условия, ветер, результаты температурного моделирования в окрестности Томска с использованием мезомасштабной модели высокого разрешения TSU NM3, созданной в ТГУ.

В качестве источника данных о распределении температуры воздуха, направления и скорости воздушных потоков в приземном слое атмосферы Томска в работе были использованы результаты наблюдений с ГМС, находящейся в южной части города Томска, и АМСГ, находящейся вблизи п. Богашево на расстоянии около 30 км от города.

Результаты

По результатам исследования внутригодового хода температуры воздуха в г. Томск и его пригороде в 2012 г. было обнаружено, что на территории города средние за месяц значения выше, чем над окружающей местностью (таблица). При этом в годовом ходе выявлено, что остров тепла лучше всего проявляет себя в летние месяцы, а максимальное зарегистрированное значение этой разности приходится на июль месяц и составило 1,9 °С (табл., рис. 1).

Таблица

Разность температур между г. Томском и АМСГ Богашево (ΔТ, °С) за 2012 г.

Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
ΔТ	0,2	1,3	0,9	1,6	1,6	1,5	1,9	1,5	1,4	1,1	0,8	1,0



Рис. 1. Годовой ход среднемесячных разностей температур в городе и пригороде

Для анализа суточного хода разности температур между городом и пригородом Томска были выбраны два периода в течение летнего сезона 2012 года.

Первый период выбран в начале июля, который характеризовался сухой жаркой и практически безветренной погодой, сильно загрязненной атмосферой.

5–7 июля. Период характеризовался малооблачной и жаркой погодой, слабым ветром (скорость ветра не превышала 1 м/с) при наличии северо-западного переноса. Во все сроки наблюдений отмечался дым (из-за пожаров), видимость в конце периода уменьшалась до 200–500 м. Ухудшение видимости началось с вечера 5 июля. Утром 6 июля и ночью 7 июля отмечался туман. Фон температуры повышен (на 5 °С выше нормы), максимальная температура составила 29,9 °С.

Ход температуры в этот период на ГМС (город) и АМСГ (пригород) представлен на рисунке 2.

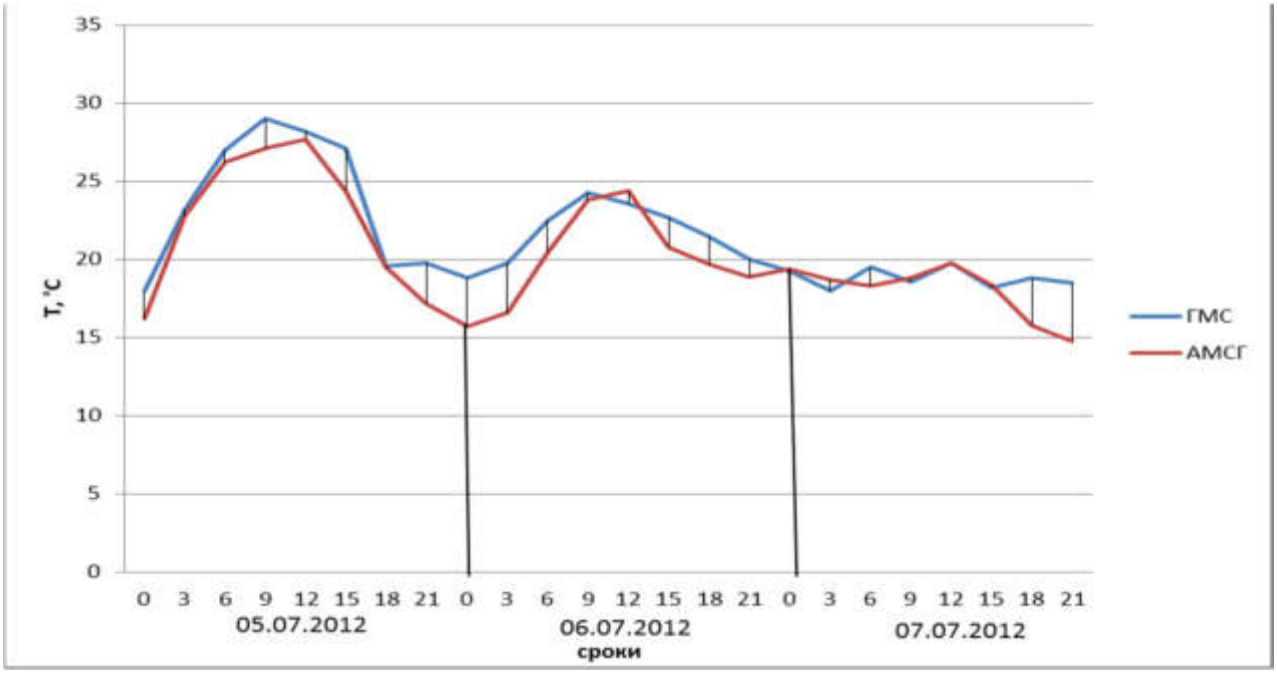


Рис. 2. Суточный ход температуры воздуха с 5 по 7 июля 2012 года

На рис. 2 заметна большая разность температур между городом и пригородом. Наибольшая разность приходится на ночные сроки, с максимумом 07.07.2012 в 21.00 ч Всемирного координированного времени (ΔT = 3,7 °С). Также можно отметить второй максимум, наблюдавшийся 06.07.2012 в 00.00 ч по местному времени (ΔT = 3,2 °С).

На рисунке 3 представлено прогностическое поле температуры воздуха на уровне 2 м от поверхности земли, выполненное с помощью мезомасштабной модели высокого разрешения TSU-NM3, созданной в Томском госуниверситете и предназначенной для прогноза элементов погоды у поверхности земли и в пограничном слое атмосферы [3]. Модель рассчитывает метеополя на территории 50×50 км с шагом сетки 1 км. Как и другие современные прогностические модели, она учитывает основные факторы, действующие в атмосфере, а также использует параметризации (коротковолновая и длинноволновая радиация, уравнение теплопроводности почвы и параметры почвы, поверхностные потоки тепла, микрофизические процессы в атмосфере, описание турбулентной структуры). Модель учитывает также рельеф местности, особенности подстилающей поверхности (используются разные категории землепользования). Прогноз осуществляется на основе результатов численного прогноза по оперативной глобальной модели ПЛАВ Гидрометцентра РФ.

Прогноз дан на 23 ч по местному времени 5 июля 2012 г. Центр рисунка совпадает с центром города и имеет координаты (км) по x и y равные 0. Значения осей положительные в восточном и северном направлениях и отрицательные – в западном и южном.

Из рис. 3 видно, что в центре области (центр города) температура воздуха выше на несколько градусов. Видно также, что река Томь, протекающая в западной части города очень близко от центра, снижает температурный фон. Температура воздуха понижается к периферии.

Таким образом, фактические наблюдения и модельные расчеты указывают на наличие острова тепла в летний при слабом ветре, который больше выражен в темное время суток.

Второй рассмотренный нами период – 24–26 августа.

Период характеризовался облачной без осадков погодой с преобладанием облаков верхнего и среднего яруса, температурным фоном несколько ниже нормы (на 2–3 °С): ночные температуры составляли 3–7 °С, днем до 18 °С. Во второй половине периода ночная температура повысилась и приблизилась к климатической норме.

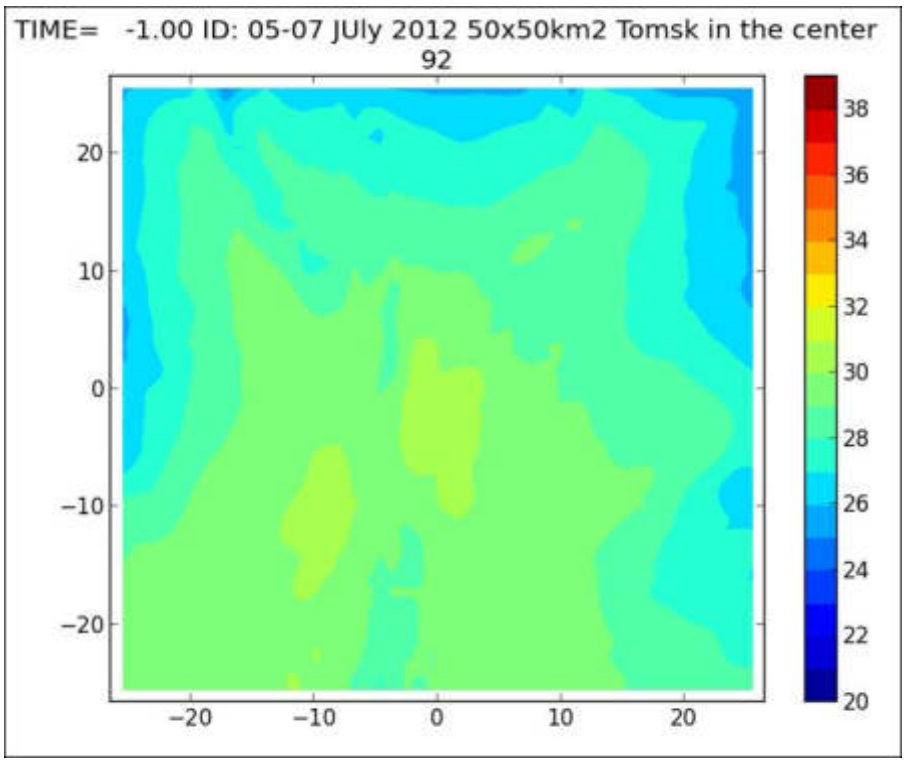


Рис. 3. Распределение температуры воздуха по области расчета. 5 июля 23 ч

Особенностью периода является изменение скорости ветра на рассматриваемой территории: при слабом ветре на ГМС (0–2 м/с при средней скорости 0,8 м/с) отмечались порывы до 9 м/с. Наибольшая скорость ветра зафиксирована на АМСГ (средняя скорость 4,1 м/с, порывы до 11 м/с). Отмечался восточный перенос.

Суточный ход температуры воздуха за этот период представлен на рисунке 4.

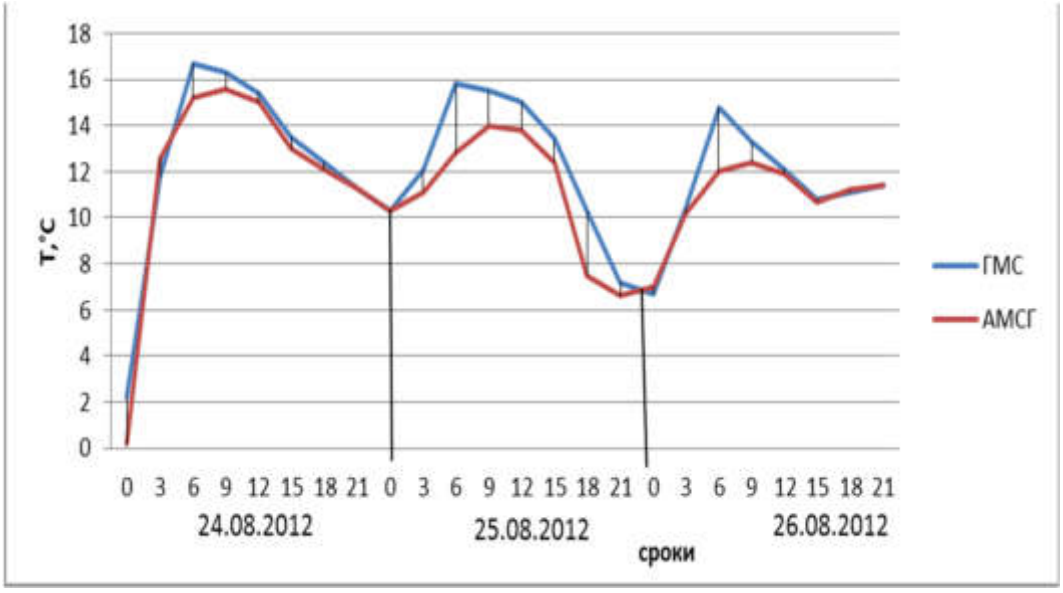


Рис. 4. Суточный ход температуры воздуха с 24 по 26 августа 2012 г.

Из данных, представленных на рис. 4, можно увидеть, что максимум температуры воздуха отмечается днем (в сроки с 6 до 15 ч по Гринвичу или с 13 до 22 ч по местному времени) и минимумом ночью (18.00 ч по Гринвичу или 01.07 ч по местному времени). В первые сутки суточный ход выражен лучше (амплитуда составила 13,4 °С), чем во вторые (5,5 °С). Максимум разности температур между городом и пригородом приходится на

25.08.2013 (ΔT=3,0 °C). Второй максимум можно обнаружить 26.08.2012 (ΔT=2,8 °C). В этом случае остров тепла проявляется лучше в полдень, хотя 25.08 он так же хорошо выражен после захода солнца (23–02 ч по местному времени).

На рисунке 5 представлено пространственное распределение поля температуры по территории (прогноз на 06 часов местного времени 25 августа).

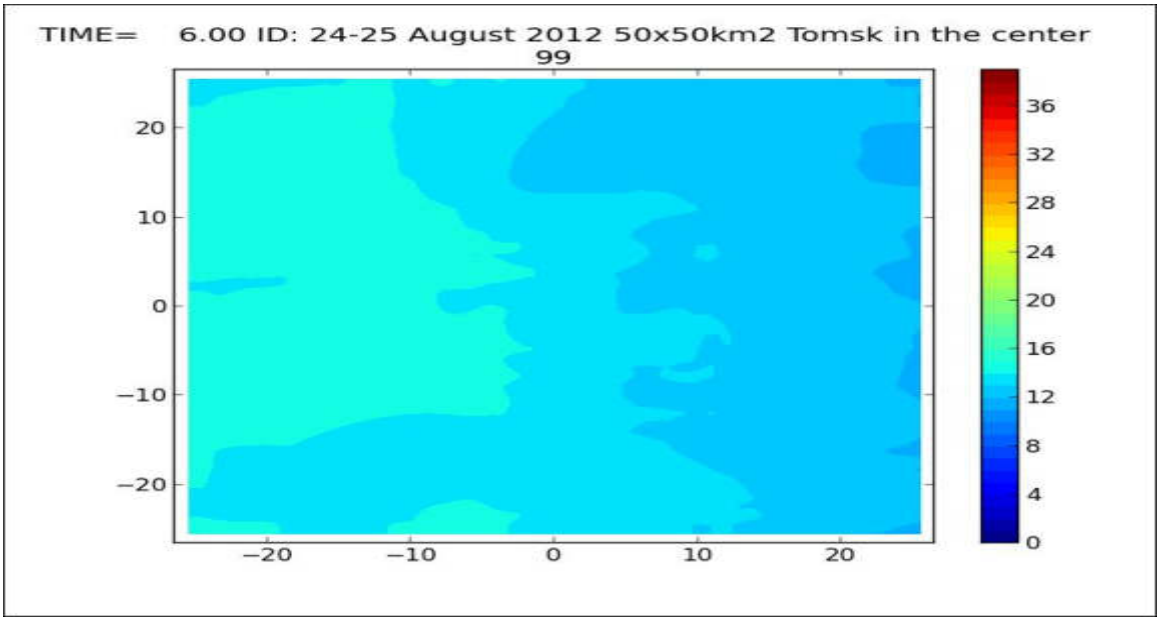


Рис. 5. Распределение температуры воздуха 25 августа 06 ч

Анализируя данные, представленные моделью, можно сделать вывод, что по территории «острова тепла» в это время явно не прослеживается (что хорошо совпадает с фактической погодой, представленной на рис. 4). Наиболее значительное изменение температуры представлено на рис. 5 – постепенное ее понижение к восточной части территории (около 4 °C). В остальных случаях изменение не превышало 2–3 °C.

Возможно, это связано с большей скоростью ветра, перемешиванием атмосферы.

Заключение

При сравнении температуры воздуха в г. Томске и на АМСГ Богашево было обнаружено, что в города теплее, чем над окружающей сельской местностью. Лучше всего данное явление проявляет себя в летние месяцы при наличии безветренной погоды.

Результаты, полученные в работе, подтверждают выводы относительно наличия острова тепла, сделанные в кандидатской диссертации Дудоровой Н. В. [2], однако, в отличие от [2], в наших исследованиях остров тепла проявляется лучше летом, чем зимой.

Результаты, приведенные в работе, отражают условия за один год. На основе проделанной работы будет исследован остров тепла за период с 2012 по 2015 годы в целом и за отдельные временные промежутки.

Список литературы

1. Оке Т. Р. Климаты пограничного слоя. Л. : Гидрометеоиздат, 1982 г. С. 360
2. Дудорова Н. В. Исследование острова тепла в г. Томске и определяющих его факторов : дис. … канд. физ.-мат. наук. Томск, 2016. С. 148
3. Analysis of observations and results of numerical modeling of meteorological parameters and atmospheric air pollution under weak wind conditions in the city of Tomsk / A. V. Starchenko, A. A. Bart, L. I. Kizhner, N. K. Barashkova, M. A. Volkova, G. G. Zhuravlev, I. V. Kuzhevskaya, M. V. Terenteva / 21st International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics. Proceedings of SPIE Vol. 9680 (SPIE, Bellingham, WA, 2015) Six-digit Article CID Number. 9680–228.

УДК 551.51

Комплексный анализ динамики тропосферы-стратосферы-мезосферы в зимний период 2016/2017 по данным интерферометра Фабри – Перро (ИСЗФ СО РАН) и ECMWF ERA-Interim

Р. В. Васильев[1] (roman_vasilyev@iszf.irk.ru),
Е. В. Девятова[1] (devyatova@iszf.irk.ru), В. И. Мордвинов[1,2] (v_mordv@iszf.irk.ru),
О. Ю. Антохина[3] (olgayumarchenko@gmail.com)

[1]Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск
[2]Иркутский государственный университет, Иркутск
[3]Институт оптики атмосферы и океана им. В. Е. Зуева СО РАН, Томск

Аннотация. Представлены результаты наблюдений метеорологических характеристик в верхней мезосфере – нижней термосфере в зимний период 2016/2017 с помощью интерферометра Фабри – Перро ИСЗФ СО РАН (обсерватория Торы, р. Бурятия). По данным наблюдений обнаружена резкая смена режима циркуляции в конце января 2017 и признаки изменения характера циркуляции в середине февраля. Для поиска возможных причин изменений циркуляции в верхней атмосфере данные наблюдений сопоставлены с динамикой крупномасштабной циркуляции в стратосфере (внезапные потепления) и тропосфере (блокинги) по данным архива ECMWF ERA-Interim. Оказалось, что начало перестроек циркуляции в верхней мезосфере – нижней термосфере и стратосфере совпадает с окончанием активных волновых (блокирующих) процессов в тропосфере. Наиболее ярко и однозначно выявленная связь проявилась в первом событии, начавшемся в конце января, а более сложно и менее однозначно – во втором, начавшемся в середине февраля 2017.

Ключевые слова: верхняя атмосфера, средняя атмосфера, тропосфера, внезапное стратосферное потепление, блокинг.

Введение

Мы провели комплексный анализ динамических процессов в нижней и средней атмосфере во второй половине зимы 2017 г. Анализ проведен с целью найти объяснение особенностям в поведении метеорологических характеристик на высоте 90–100 км (верхняя мезосфера – нижняя термосфера), нетипичным для динамики этого слоя, обнаруженным по данным интерферометра Фабри – Перро Института солнечно-земной физики СО РАН (Иркутск). Инструмент расположен в обсерватории Торы, р. Бурятия (рис. 1).

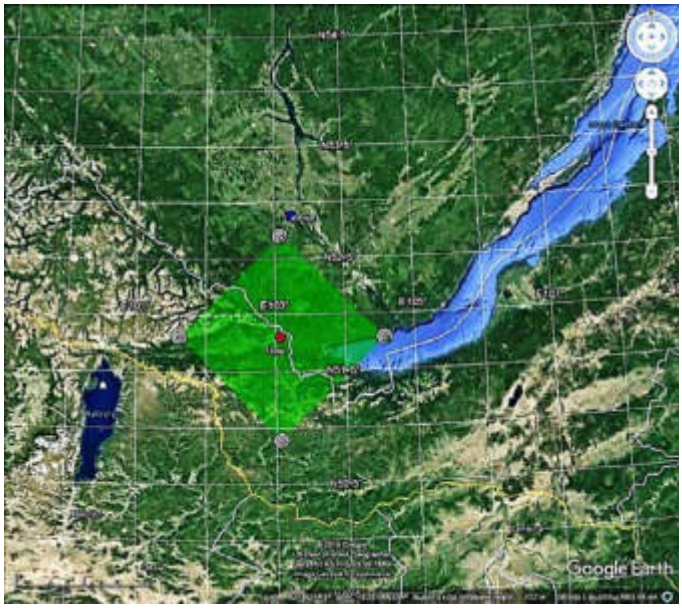


Рис. 1. Карта Google Maps, на которой отмечено место базирования интерферометра Фабри – Перро ИСЗФ СО РАН (центр зелёного ромба).

Мезосфера и нижняя термосфера, являющиеся объектом нашего исследования (интервал высот от 60 до 110 км, включающий высоту сканирования интерферометра), представляют собой верхнюю часть средней атмосферы (интервал высот от 10 до 110 км) [10]. В стратосфере осредненная вдоль широтных кругов зональная компонента скорости ветра направлена с запада на восток в зимнем полушарии, и с востока на запад – в летнем полушарии, достигая максимальных значений 60–70 м/с на высоте около 70 км. Далее с высотой ее значения уменьшаются, и на высоте от 90 до 100 км зональная компонента скорости меняет знак [10].

Существенное влияние на циркуляцию стратосферы, мезосферы и нижней термосферы оказывают волны: приливные (регулярная составляющая), планетарные и гравитационные (нерегулярная составляющая). По крайней мере, частично, источники нерегулярных колебаний находятся в более низких слоях атмосферы. По мере распространения волн вверх их амплитуда экспоненциально растет, компенсируя уменьшение плотности с высотой (например, [2]).

Методика и данные

Для выяснения связи между вариациями метеорологических характеристик в верхней мезосфере – нижней термосфере и динамическими процессами в нижележащих слоях атмосферы мы провели комплексный анализ динамических процессов в нижней и средней атмосфере во второй половине зимы 2017 г.

Для этого мы использовали данные наблюдений интерферометра Фабри – Перро ИСЗФ СО РАН (обсерватория Торы р. Бурятия) о поведении метеорологических характеристик (температура, зональная компонента скорости ветра) на высоте ~90 км во второй половине зимы 2017 года. К анализу событий в стратосфере и тропосфере мы привлекли данные реанализа ERA-Interim о зональной компоненте ветра на поверхностях 10 и 1 гПа и высоте геопотенциальной поверхности 500 гПа.

Результаты

Особенности динамики верхней мезосферы – нижней термосферы во второй половине зимы 2016/2017 по данным интерферометра Фабри – Перро ИСЗФ СО РАН. На рисунке 2 показаны данные наблюдений зональной компоненты скорости ветра (верхний рисунок) и температуры (нижний рисунок) с 16 января по 31 марта 2017 года на высоте 90 км. Серый и черный фон означают пропуски в данных обусловленные засветкой инструмента солнечным излучением и отражённым лунным светом. Тем не менее, несмотря на наличие пропусков, верхний рисунок позволяет нам увидеть (с 16 января по 24 января) типичные для этой высоты регулярные полусуточные вариации зонального ветра, обусловленные приливными модами. Для регулярных приливных колебаний в середине ночи характерна смена знака зональной компоненты ветра с западной (красный цвет) на восточную (синий цвет), а в середине дня – с восточной на западную.

25 января (возможно, 24-го, но в этот день был пропуск в данных) полусуточные вариации резко прерываются и в течение следующих шести дней ветер направлен преимущественно с запада на восток. В этот период можно видеть признаки смены знака в середине ночи зональной компоненты ветра, однако полноценным восстановлением регулярной полусточной составляющей их назвать нельзя. В последующие 9–10 дней, начиная с 31 января, вариации зонального ветра в дневное время можно интерпретировать, как некий волновой процесс с периодом 6 суток. Уверенно об этом говорить, однако, не представляется возможным из-за помех, обусловленных Луной. Обнаруженная периодичность может быть результатом влияния планетарных волн, распространяющихся из нижележащих слоев.

Типичный полусуточный режим циркуляции, насколько опять же можно об этом судить в условиях больших пропусков в данных, более-менее восстанавливается только к середине февраля. В данных о температуре также видны резкие изменения в конце января, а именно резкое похолодание 26 января. Таким образом возмущение поля температуры про-

изошло на сутки (возможно, на двое) позже, чем возмущение поля зонального ветра. Дальнейшее повышение температуры носило достаточно плавный характер. За границу данного процесса можно принять 10–11 февраля. С 12 по 15 февраля температурный фон был повышен, а с 16 февраля снова произошло достаточно резкое понижение температуры, хотя и не такое интенсивное как первое.

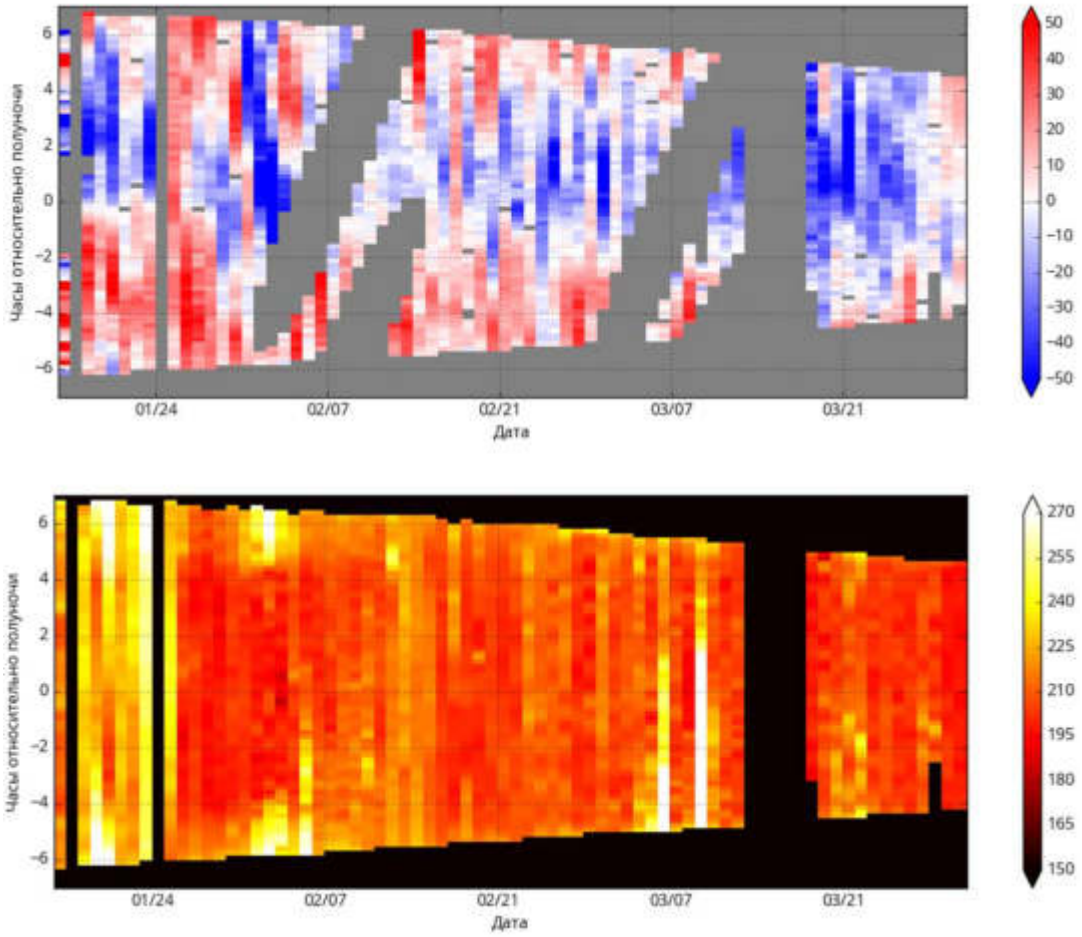


Рис. 2. Сверху вниз: Зональная компонента скорости ветра и температура с 16 января по 31 марта 2017 г. на высоте 90 км по данным интерферометра Фабри – Перро ИСЗФ СО РАН (обсерватория Торы Респ. Бурятия)

Особенности динамики стратосферы во второй половине зимы 2016/2017. Одним из возможных источников возмущений в термической и ветровой структуре мезосферы и нижней термосферы могут быть внезапные стратосферные потепления (ВСП), которые могут генерировать и/или модулировать потоки гравитационных и планетарных волн [10]. Внезапное стратосферное потепление представляет собой динамическое явление взрывного характера в зимней стратосфере, приводящее к резкому повышению температуры в средней и верхней стратосфере (30–50 км) более чем на 30–40 K в течение нескольких дней. При потеплении в полярной области происходит обращение меридионального градиента температуры (минорные ВСП), а в особо мощных событиях и обращение зонального ветра, связанного со струйным течением полярной ночи (мажорные ВСП). Продолжительность внезапных потеплений составляет от нескольких дней до нескольких недель (например, [4]). Фактически, во время ВСП в зимней стратосфере умеренных и высоких широт на несколько дней, а то и недель, устанавливается летний тип циркуляции. Отметим также, что в мезосфере во время ВСП, наоборот, происходит резкое похолодание [1].

Для анализа процессов, происходивших в стратосфере зимой 2016/2017, мы воспользовались данными архива ECMWF ERA-Interim. На рисунке 3 представлены диаграммы «широта – время» осредненной вдоль широтных кругов зональной компоненты скорости

ветра на уровнях 1 и 10 гПа (т. е. на высотах около 50 и 35 км соответственно). На диаграммах видно, что с января по март 2017 в стратосфере умеренных и высоких широт дважды произошло обращение зонального ветра, являющееся индикатором внезапных стратосферных потеплений. Первое обращение ветра на высоте 1 гПа произошло 25 января в умеренных широтах и приблизительно на двое суток позднее в полярных широтах. На уровне 10 гПа изменение направления зонального ветра произошло позднее, чем на 1 гПа, причем развивалось в обратном направлении – от полюса к более низким широтам.

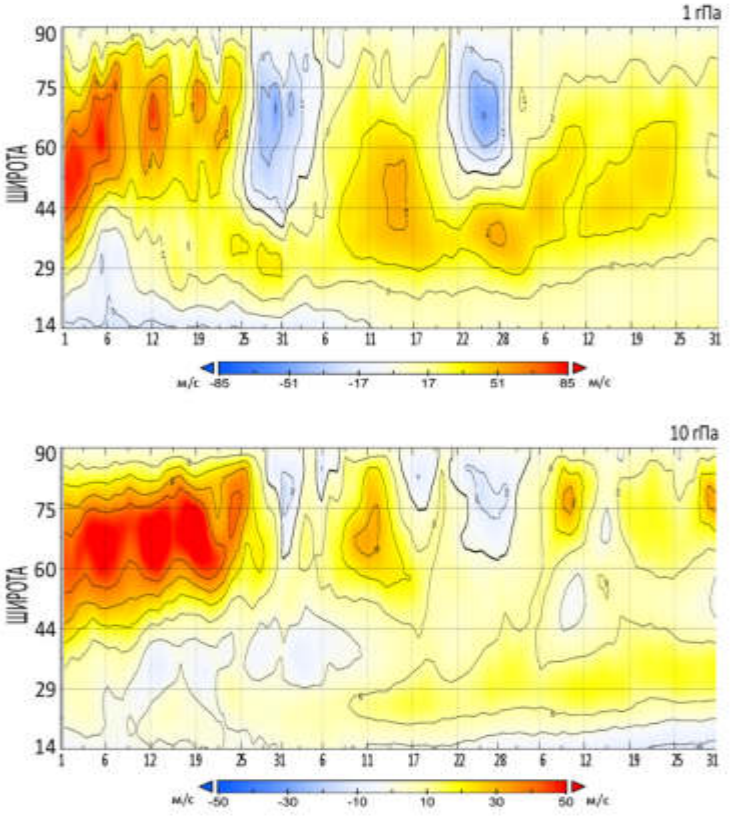


Рис. 3. Диаграммы «широта – время», построенные для зональной компоненты ветра, осредненной по всем долготам на каждой широте от 14 ° с. ш. до 90 ° с. ш. для января, февраля и марта 2017 г. По оси *X* отложены дни месяцев. По оси *Y* – широты. Вверху для уровня 1 гПа, внизу – для 10 гПа. Данные ERA-Interim, 18:00 UT

Западный перенос на уровне 1 гПа восстановился 4 – 5 февраля в умеренных широтах и 6 февраля в полярных. Аналогичным образом (т. е. сначала на более низких широтах, а затем на более высоких) и примерно в те же сроки (6 – 8 февраля) восстановился зимний тип циркуляции и на уровне 10 гПа. Зимний режим циркуляции продержался около двух недель на уровне 1 гПа и немногим более недели внизу, на уровне 10 гПа. Затем появились признаки нового ВСП, причем сначала в нижней стратосфере – с 16 февраля по 5 марта, затем в верхней стратосфере – с 22 февраля по 2 марта.

Диаграмма указывает на то, что в нижней стратосфере не произошло полного восстановления зимнего циклонического вихря в полярной области после первого потепления. Границы между двумя процессами здесь размыты, тогда как динамику зонального ветра в верхней стратосфере можно интерпретировать как достаточно четкие переключения между режимами с западным и восточным ветром. Особо важно для нас здесь то, что в данных интерферометра отчетливо прослеживается реакция только на первое событие ВСП, которое однозначно развивалось сверху вниз. Возможно даже что это не реакция, а часть процесса зарождения и развития взрывного динамического процесса, которое распространяется затем вниз, вплоть до нижней стратосферы. Будучи впервые в истории зарегистрированным именно в нижних слоях стратосферы, этот процесс получил название «внезапного стратосферного потепления» (а не, скажем, «внезапного мезосферного похолодания»).

Особенности динамики тропосферы во второй половине зимы 2016/2017. Согласно классическим представлениям, ВСП являются результатом взаимодействия планетарных волн, распространяющихся из тропосферы [5], со средним потоком в стратосфере. Если это так, то в зимний период тропосфера тоже должна быть динамически очень активной. Как известно, наиболее мощными и устойчивыми динамическими явлениями в тропосфере являются события блокирования [8]. В зависимости от конфигурации поля давления в средней тропосфере выделяют два основных типа блокирования [6]: монопольный и дипольный. Монопольный блокинг (Омега-блокинг (Ω)) представляет собой усилившийся гребень высокого давления, у основания которого с обеих сторон расположены атмосферные ложбины. Дипольный блокинг (Rex-blocking) напоминает цифру «8» и состоит из блокирующего антициклона и циклона, в северной и южной части области блокирования соответственно (в Северном полушарии).

На рисунке 4 представлена долготно – временная диаграмма повторяемости событий блокирования в средней тропосфере Северного полушария в период с 1 января по 1 марта 2017 года. Блокинги идентифицированы с помощью метода, описанного в работе Тибальди и Молтени [9] и модифицированного впоследствии Барриопедро [3]. В основе методики лежит анализ геопотенциальной высоты изобарической поверхности 500 гПа. Для расчетов в данной работе мы использовали один из двух предлагаемых в методе индексов блокирования, а именно:

$$GHGS = \frac{Z(\varphi_0)-Z(\varphi_s)}{\varphi_0-\varphi_s}, \quad (1)$$

где Z — высота геопотенциальной поверхности 500 гПа; φ_0=60 ° с. ш. ±Δ, φ_s=40 ° с. ш. ±Δ, Δ= -5. 0 °, -2. 5 °, 0 °, 2. 5 °, 5. 0 °. Блокирующей считается ситуация, при которой GHGS>0 м/градус широты.

Видно, что в исследуемый нами период в Северном полушарии действительно отмечалась высокая активность блокингов. В первую неделю января блокинг идентифицируется над Аляской (200 °в. д. – 220 °в. д.), затем блокирующая ситуация смещается к западу и приблизительно с 10 по 16 января мощный блокинг отмечается в интервале долгот 120 ° в. д. – 160 °в. д. На этом первый блокирующий процесс в Дальневосточно – Тихоокеанском регионе заканчиваются. Одновременно с его окончанием 15 января появляется блокинг над Атлантико-Западноевропейским сектором. Блокинг стационирует здесь до 27 января, затем смещается на Восточную Европу и разрушается в конце января. И сразу же снова активизируются процессы блокирования над Тихим океаном и Дальним Востоком, а затем – над Атлантикой и Западной Европой. В общей сложности развитие этой цепочки блокингов продолжается в течение двух недель до середины февраля.

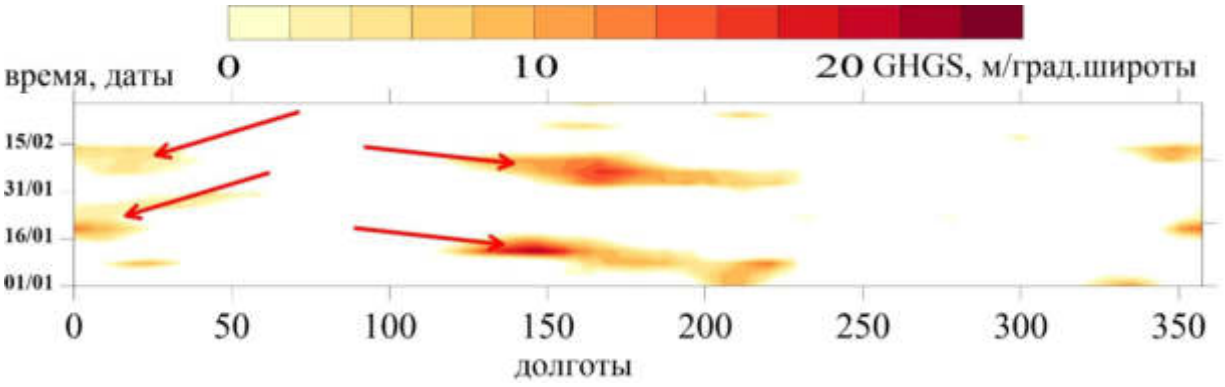


Рис. 4. Долготно-временная диаграмма повторяемости событий блокирования в северном полушарии в период с 1 января по 1 марта 2017 г. По оси *X* – долгота в градусах в. д. По оси У – номер дня, начиная с 1 января 2017 г.

Мы предлагаем интерпретировать наблюдаемую картину динамики блокирований как процесс модуляции блокирований возмущением, бегущим с востока на запад с периодом примерно 15–20 суток. За рассмотренный период возмущение совершило два полных оборота. Развитие блокирований происходило последовательно в секторах «Тихий океан – Дальний Восток» и «Атлантика – Европа». Оба ВСП (в конце января и в середине февраля) развились приблизительно через неделю после окончания блокирующих процессов над Дальним Востоком. Однако поле зонального ветра в данных интерферометра, а также на уровне 1 гПа по данным ERA-Interim (т. е. в интервале высот от 50 до 100 км) не отреагировало на окончание второго волнового процесса.

Заключение

Выполнен комплексный анализ динамики тропосферы – стратосферы – мезосферы в зимний период 2016/2017 по данным интерферометра Фабри-Перро (ИСЗФ СО РАН) и данным ECMWF ERA-Interim. По данным интерферометра было зарегистрировано резкое понижение температуры и смена режима циркуляции в конце января 2017, а также менее выраженное понижение температуры и отсутствие признаков смены циркуляции в середине февраля. Поскольку в литературе причины потепления представлены как взаимодействие усиливающейся планетарной волны с приливными волнами с волновыми числами не больше 3 [7, 11], мы предположили, что наблюдаемые нами волновые процессы в смене режима циркуляции на высотах 90–100 км могут быть отражением указанных динамических явлений возникающих в результате взаимодействия верхних и нижних слоёв атмосферы. Анализ данных реанализа подтвердил, что и в стратосфере и в тропосфере циркуляционные процессы в этот период действительно были весьма активными. В стратосфере произошло два внезапных стратосферных потепления, а в тропосфере – два цикла активизации блокингов в разных секторах Северного полушария, причем начало динамических событий в верхней мезосфере – нижней термосфере (по данным интерферометра) и в стратосфере (по данным реанализа) произошло примерно через неделю после окончания блокирующих процессов над Дальним Востоком. Наиболее ярко и однозначно выявленная связь проявилась в первом событии, начавшемся в конце января, более сложно и менее однозначно – во втором, начавшемся в середине февраля 2017.

Динамику блокирований, играющую, видимо, ключевую роль в развитии процессов перестроек циркуляции в средней и верхней атмосфере, можно интерпретировать как процесс модуляции блокирований возмущением, бегущим с востока на запад с периодом примерно 15 – 20 суток. По мере перемещения возмущения блокирования возникали последовательно в секторах «Тихий океан – Дальний Восток» и «Атлантика – Европа». Возможно, модулирующее возмущение представляет собой длинную волну Россби.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках проекта II.16.1.2.; Грантов РФФИ № 17-05-00119, РФФИ № 17-05-00374. В работе использовались данные интерферометра Фабри-Перо входящего в оптический комплекс ЦКП «Ангара».

Список литературы

1. Моханакумар К. Взаимодействие стратосферы и тропосферы. М. : Физматлит, 2011. 452 с.
2. Andrews D. G., Holton J. R. and Leovy C. B. Middle Atmospheric Dynamics. Academic Press 1987. 489 p.
3. Barriopedro D., Garcrıa-Herrera R., Lupo A. R., and Hernandez E. A climatology of Northern Hemisphere blocking // Journal of Climate. 2006. Vol. 19. P. 1042–1063. doi:10.1175/JCLI3678. 1
4. Butler A. H., Seidel D. J., Hardiman S. C., Butchachachart N., Birner T. and Match A. Defining Sudden Stratospheric Warmings // Bulletin of the American Meteorological Society. 2015. November. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13–00173.1
5. Matsuno T. A dynamical model of the stratospheric sudden warmings // J. Atmos. Sci. 1971. Vol. 28. P. 1479–1494.
6. Pelly J. L., and Hoskins B. J. A new perspective on blocking // J. Atmos. Sci. 2003. Vol. 60, N 3. P. 743–755. doi: http://dx.doi.org/10.1175/1520–0469(2003)060<0743:ANPOB>2.0.CO;2

7. Qian Wu, S. Nozawa, Mesospheric and thermospheric observations of the January 2010 stratospheric warming event // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2015. Vol. 123. P. 22–38, https://doi.org/10.1016/j.jastp. 2014.11.006.

8. Rex, D. F. Blocking action in the middle troposphere and its effect upon regional climate. I. An aerological study of blocking action // Tellus. 1950. Vol. 2. P. 196 – 211.

9. Tibaldi S., Molteni F. On the operational predictability of blocking // Tellus. 1990. Vol. 42A. P. 343–365.

10. Vincent R. A. The dynamics of the mesosphere and lower thermosphere: a brief review // Progress in Earth and Planetary Science. 2015. 2, 4. P. 1–13. doi: 10.1186/s40645–015–0035–8

11. , Observations and simulations of midlatitude ionospheric and thermospheric response to the January 2013 stratospheric sudden warming event / Q. Wu, A. Maute, V. Yudin, L. Goncharenko, J. Noto, R. Kerr and C. Jacobi // J. Geophys. Res. Space Physics. 2016. Vol. 121. P. 8995–9011, doi: 10.1002/2016JA023043.

УДК 551. 585. 5(571. 53)

Оценка континентальности климата на территории Иркутской области

Н. С. Домбровская (ndombrovskaya@inbox.ru)
К. А. Лощенко (loshchenko@bk.ru)

Иркутский государственный университет, Иркутск

Аннотация. Впервые для территории Иркутской области выполнена количественная оценка степени континентальности климата по методикам Горчинского, Хромова, Иванова, Ценкера и Шрепфер, которые учитывают годовую амплитуду температуры воздуха, и методикам Швер и Де Мартонна, которые учитывают режим выпадения атмосферных осадков. По данным 77 метеорологических станций за период 1950–2016 г. установлено, что большинство станций с учетом характера увлажнения территории относятся к континентальному типу климата со средним увлажнением. Во второй половине XX века на территории Иркутской области континентальность климата понижалась в основном за счет уменьшения годовых амплитуд температуры воздуха в условиях преимущественного роста температур в холодный период года, в начале XXI века более выражено смягчение климата за счет изменения режима увлажнения.

Ключевые слова. климат, континентальность, Иркутская область, годовая амплитуда, атмосферные осадки.

Введение

Одним из приоритетных направлений развития метеорологии является изучение причин и последствий глобальных и региональных изменений климата Земли [2,4,6]. Наблюдаемые тенденции изменения климата за последние 100–150 лет привели к пространственно-временному изменению климатических характеристик, среди которых следует выделить вариации индексов континентальности, сухости или гумидности и др.

Под континентальностью климата понимают совокупность характерных особенностей климата, определяемых воздействиями материка на процессы климатообразования [3; 5]. Степень континентальности климата проявляется в изменчивости годовой и суточной амплитуды приземной температуры воздуха, характеристик влажности, облачности, ветра, атмосферных осадков и др. Поэтому в основе количественной оценки континентальности климата функция зависимости годовой амплитуды температуры и географической широты заданного места с различными поправочными коэффициентами. Естественно, что наименьшая континентальность свойственна океанам, а наибольшая наблюдается в глубине континентов. Определенная зависимость континентальности климата проявляется в долготном направлении, что обусловлено климатическими различиями западных и восточных частей материков. В настоящее время существенно возрос интерес к количественной оценке степени континентальности климата. Например, в работе [8] в Центральной Европе по данным 1775–2012 гг. отмечены две волны снижения континентальности (в конце XIX в. и в 1970–1980-х гг.) и две волны их роста (в 1930–1940-х гг., а также в последние 30–40 лет). Увеличение континен-

тальности климата в период 1961–2013 г. подтверждают данные по территории Словакии [9]. В то же время в ряде работ отмечается снижение континентальности климата в последние десятилетия [1; 7].

Методика исследования

Цель данного исследования – проанализировать особенности пространственно-временных вариаций индексов континентальности и амплитуды сезонного хода приземной температуры на территории Иркутской области в условиях современных тенденций регионального климата. Для оценки континентальности региона по данным 77 метеорологических станций Иркутской области в период 1950–2016 гг. были рассчитаны индексы:

1) аридности Де Мартонна: $I_a = \frac{P}{(T+10)}$

2) континентальности по Горчинскому: $K = \frac{1{,}74*A}{\sin\varphi}$

3) континентальности по Хромову: $K = \frac{(A-5{,}4*\sin\varphi)}{A}$

4) континентальности по Ценкеру: $K = \frac{600}{5}\frac{A}{\varphi} - 20$

5) континентальности по Иванову: $K = \frac{A}{0{,}33*\varphi} * 100$

6) континентальности по Швер: $K = \frac{\sum X_{III-VIII}}{\sum X_{IX-II}}$

7) континентальности по Шрепфер: $K = \frac{800}{7}\frac{A}{\varphi} - 14.$

где A – годовая амплитуда температуры (°C), φ – широта местности, $\Sigma X_{III-VIII}$ – сумма осадков в весенне-летний период (мм), ΣX_{IX-II} – сумма осадков в осенне-зимний период (мм), P – годовое количество осадков (мм), T– среднегодовая температура (°C).

Обсуждение результатов

Как видно из представленных выше формул в большинстве случаев индексы континентальности зависят от годовой амплитуды температур, которая согласно рис. 1 увеличивается с юга на север, причем выделяются зоны наименьших значений на побережье оз. Байкал и в горных районах Восточных Саян. В исследуемый период 1950–2016 гг. средние значения годовой амплитуды изменялись от 28,7 °C (ст. Солнечная, побережье оз. Байкал) до 51,4 °C на самой северной станции Наканно.

Отличительной особенностью индекса Швер является то, что в качестве исходных используется соотношение сумм атмосферных осадков теплого и холодного периодов года. При k≤1 климат считается морским (неконтинентальным), 1,75 ≥ k ≥1 полуконтинентальным, при 3,5 ≥ k ≥ 1,75 континентальным, при k >3,5 – резко континентальным. Оказалось, что в исследуемый период на большинстве станций (57 %) климат Иркутской области по данному показателю оценивается как континентальный, на 14 % станций (в основном байкальские станции) резко континентальный, 23 % станций имеют полуконтинентальный тип климата (в основном станции, расположенные на западе Иркутской области), а байкальская станция Баргузинский Заповедник – морской тип климата (рис. 2).

По значения индекса аридности Де Мартонна, где при k>80 – районы очень высокого увлажнения, k=41–80 – среднее увлажнение и k<40 – умеренное увлажнение, местами сухое. Большинство метеорологических станций Иркутской области (74 %) имеют среднее увлажнение, 11 % станций (в основном на севере области) – районы очень высокого увлажнения и 15 % станций (в основном байкальские) – умеренное увлажнение (рис. 3).

В многолетней динамике индексов континентальности климата на территории Иркутской области в период с 1950 по 2016 г. прослеживается незначительная тенденция к снижению континентальности климата, что может быть связано с увеличением зимних температур. Наглядно это видно по многолетней динамике индексов на ст. Иркутск (рис. 4). Среди показателей более выражена динамика индекса аридности, где в последние десятилетия отмечается смягчение климата за счет некоторого уменьшения годовых сумм атмосферных осадков на фоне увеличения среднегодовых температур.

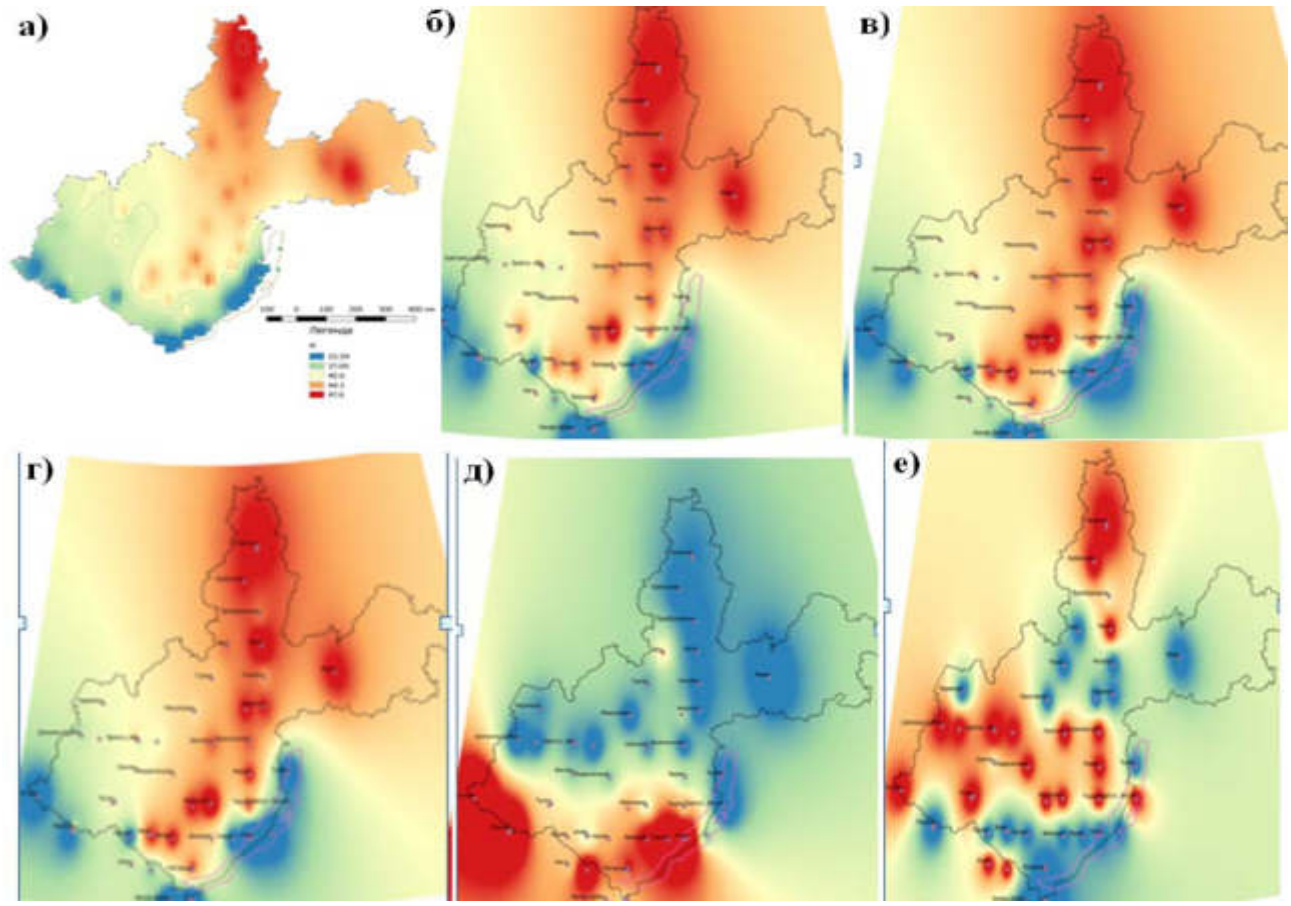


Рис. 1. а – среднегодовая амплитуда и средние значения индексов континентальности климата в Иркутской области: б – по Горчинскому, в – по Иванову, г – по Ценкеру, д – по Швер, е – по Хромову по данным 77 метеорологических станций за 1950–2016 гг.

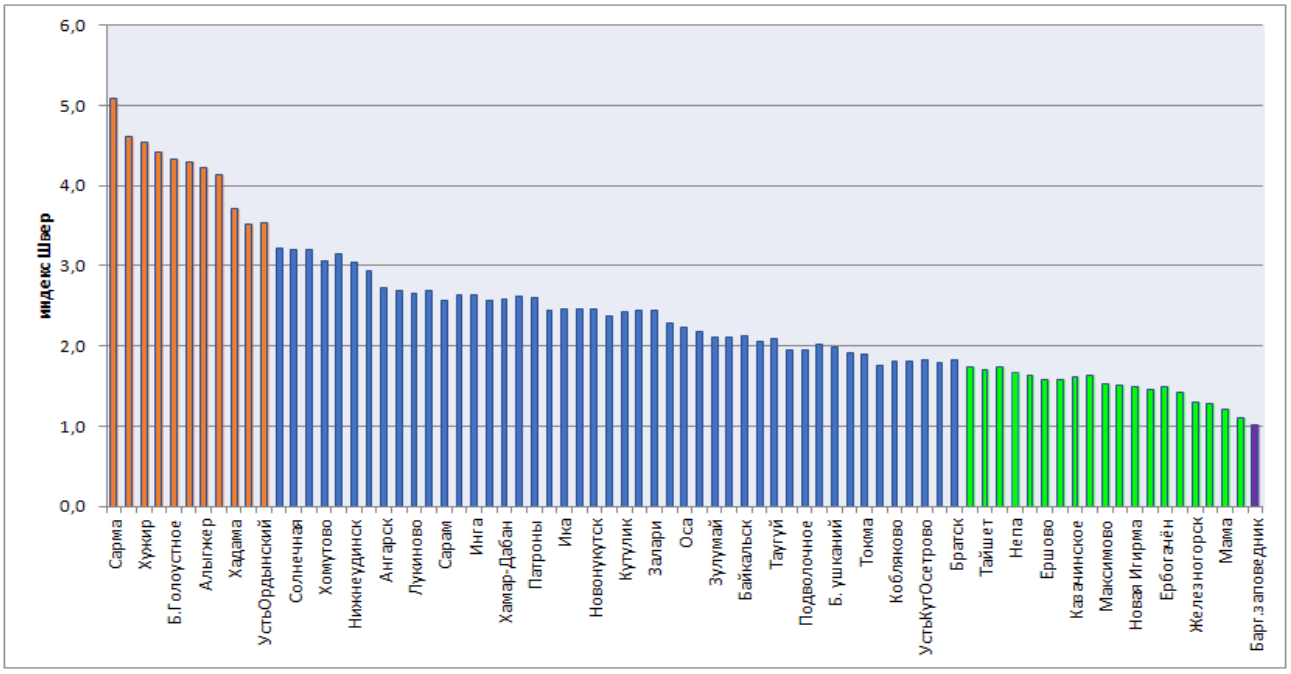


Рис. 2. Средние значения индекса Швер на метеорологических станциях Иркутской области в 1950–2016 гг.

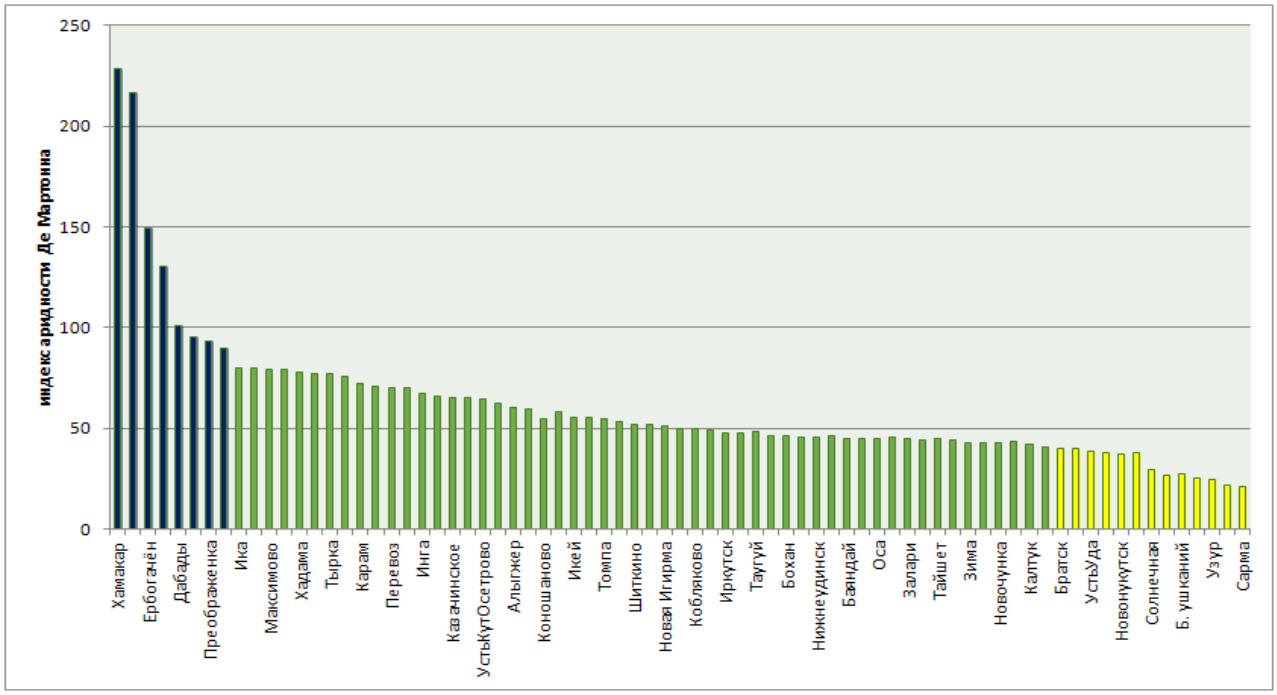


Рис. 3. Средние значения индекса аридности Де Мартонна на метеорологических станциях Иркутской области в 1950–2016 гг.

Выводы

Таким образом, впервые для территории Иркутской области выполнен анализ пространственно-временных особенностей изменения континентальности климата на основе расчета климатических показателей, учитывающих не только годовые амплитуды температуры воздуха, но и режим увлажнения территории. С учетом совместного влияния указанных факторов климат Иркутской области в период 1950–2016 гг. на большей части ее территории относится к континентальному типу со средним увлажнением. Современные тенденции изменения климата характеризуются незначительным уменьшением континентальности климата.

Список литературы

1. Бойченко С. Г., Волощук В. М., Сердюченко Н. Н. Современные пространственно-временные вариации индекса континентальности и амплитуды сезонного хода приземной температуры на территории Украины // Допов. Нац. акад. наук Укр. 2017. № 9. С. 67–75.

2. Второй оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М. : Росгидромет, 2014. С. 1009

3. Иванов Н. Н. Пояса континентальности земного шара // Изв. Всесоюз. геогр. о-ва, 1959. Т. 91. Вып. 5. С. 410–423.

4. Мустафина А. Б. Изменения основных климатических показателей на территории Республики Татарстан за период 1966–2013 гг. // Геогр. вестн. 2017. № 2 (41). С. 99–108.

5. Хромов С. П. Метеорологический словарь. Л. : Гидрометеоиздат, 1974. С. 568

6. Шерстюков Б. Г. Изменения, изменчивость и колебания климата. Обнинск : ВНИИГМИ-МЦД, 2011. 294 с.

7. eatures of climate change on Ukraine: scenarios, consequences for nature and agroecosystems / S. Boychenko, V. Voloshchuk, Ya. Movchan, N. Serdjuchenko, V. Tkachenko, O. Tyshchenko, S. F. Savchenko // Proceedings of the National Aviation University. 2016. N 4. P. 96–113.

8. Ciaranek D. Variability of the thermal continentality index in central Europe // Aerul şi Apa: Componente ale Mediului, 2014. P. 307–313.

9. Vilček J., Škvarenina Ja., Vido Ja., Nalevanková P., Kandrík R., Škvareninová J. Minimal change of thermal continentality in Slovakia within the period 1961–2013 // Earth Syst. Dynam. 2016. Vol. 7. P. 735–744.

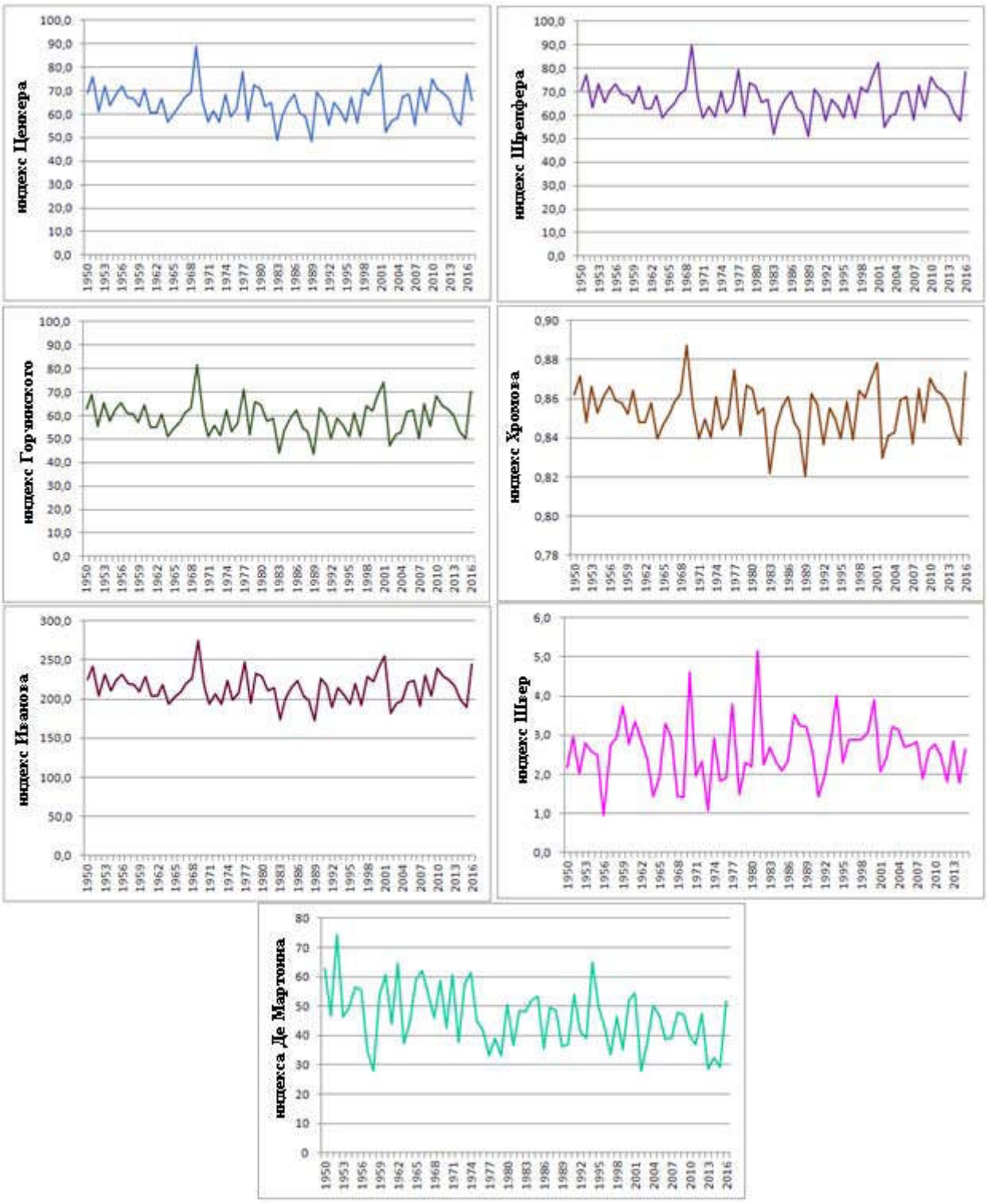


Рис. 4. Многолетняя динамика индексов континентальности климата по данным метеорологической станции Иркутск в 1950–2016 гг.

УДК 551. 577. 13

Оценка поступления соединений серы и азота с осадками на территорию водосбора реки дождевого питания в Приморье по данным многолетнего мониторинга EANET

Е. С. Жигачева (kosjatko@gmail.com)[1], С. А. Громов (Sergey.Gromov@igce.ru)[2]

[1] Институт глобального климата и экологии Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды и РАН, Москва;
[2] Институт географии РАН, Москва

Аннотация. Приведены результаты количественной оценки поступления соединений серы и азота из атмосферы с осадками на территорию водосбора малой реки, а также анализ многолетних изменений содержания поллютантов в атмосферных осадках, показывающий отсутствие значимых трендов концентраций загрязняющих веществ. С использованием данных о суммах осадков рассчитаны массы влажного выпадения соединений серы и азота на всю площадь водосбора малой реки западного склона хребта Сихотэ-Алинь в Приморском крае.

Ключевые слова: кислотные осадки, влажные выпадения, нитраты, сульфаты, аммоний.

Введение

Проблема кислотных осадков, являясь субконтинентальной с точки зрения пространственных масштабов при рассмотрении изменений окружающей среды, продолжает оставаться одной из важнейших для экологического состояния отдельных регионов. В связи с определяющей ролью атмосферной химии в формировании кислотного характера осадков при трансформации антропогенных газовых выбросов, их влияние может проявляться даже на территориях, где отсутствуют источники выбросов закисляющих компонентов, на сотни и тысячи километров вдали от мест массового поступления антропогенных веществ в атмосферу. Немалую роль эта проблема играет в характеристике трансграничного переноса веществ между государствами, так как эти поллютанты могут поступать через границу с атмосферными осадками.

Основными веществами, формирующими и обусловливающими кислотность осадков, отличающуюся от природно-равновесной [3] являются соединения серы и азота, способные образовывать при растворении сильные кислоты в естественных природных условиях. Из-за наличия в дождевых каплях и других соединений в процессе переноса и химических реакций формируется уровень кислотности выпадающих осадков, который и воздействует на наземные и водные экосистемы, приводя в некоторых регионах к ухудшению состояния природных ресурсов. С целью определения такого воздействия во многих странах были созданы специальные сети мониторинга, целью работы которых является измерение химического состава осадков.

Объекты и методы

В качестве репрезентативного объекта для изучения характера атмосферных поступлений растворимых соединений серы и азота на водосбор водных объектов на территории Приморского края была выбрана река Комаровка, расположенная в районе Уссурийска, на западном склоне хребта Сихотэ-Алинь.

Исток реки находится в границах территории Уссурийского заповедника и его охранной зоны на западных отрогах хребта Сихотэ-Алинь на высоте 380 м над уровнем моря. Комаровка – горная река, протяженностью около 66 км. В 44 км ниже истока расположена станция наблюдений EANET (Сети мониторинга кислотных выпадений в Восточной Азии) «Приморская», на которой с 2003 года проводятся наблюдения по комплексной программе мониторинга кислотных выпадений [1]. Наблюдения включают отбор проб атмосферных осадков, метеорологические измерения на метеостанции.

Территория водосбора большей частью покрыта широколиственными лесами. В районе станции и выше по течению реки отсутствуют организованные источники загрязнения воздушной среды и поверхностных вод. Поступление загрязняющих веществ в водоток возможно при вымывании из почв, с ливневым стоком с поверхности территории водосбора и в составе снеговых вод.

Данные по интенсивности влажных выпадений получены по результатам измерений и обработки проанализированных проб осадков, отобранных на станции Приморская в районе центрального створа реки Комаровка на территории бассейна водосбора. Пробы осадков на станции мониторинга отбираются ежедневно, со сменой пробоотборной емкости в девять часов утра. Анализ проб на содержание загрязняющих веществ проводится в Лаборатории по мониторингу загрязнения атмосферы (ЛЗМА) ЦМС ФГБУ «Приморское УГМС».

Ежегодный обзор данных подготавливается в ФГБУ «ИГКЭ Росгидромета и РАН», обобщается в ежегодных разделах Обзоров Росгидромета [2]. Сводные годовые данные наблюдений печатаются вместе с результатами наблюдений всей сети EANET в ежегодных отчетах [4].

Результаты

В таблице 1 приведены сводные результаты среднегодовых концентраций и суммарных выпадений оксидов серы и азота, аммония с осадками за период с 2005 по 2015 г. Как видно из указанных данных, наибольшая средняя концентрация сульфатов в атмосферных осадках наблюдалась в 2006 г (46,0 ммоль•л$^{-1}$), наибольший поток влажных выпадений – в 2007 г (30,4 ммоль•м$^{-2}$•год$^{-1}$). А наименьшие значения наблюдались в 2011 г: 14,0 ммоль•л$^{-1}$ для концентраций и 8,7 ммоль•м$^{-2}$•год$^{-1}$ для выпадений.

Таблица 1

Годовые величины средних концентрации соединений и суммарных потоков выпадений серы и азота в атмосферных осадках на станции Приморская за 2005–2015 гг.

Год	Количество осадков, мм	Средневзвешенные концентрации, ммоль л$^{-1}$			Влажные выпадения, ммоль м$^{-2}$ год$^{-1}$		
		SO_4^{2-}	NO_3^-	NH_4^+	SO_4^{2-}	NO_3^-	NH_4^+
2005	737,1	38,2	21,6	41,6	28,2	15,9	30,7
2006	622,9	**46,0**	29,2	49,8	28,6	18,2	31,0
2007	988,8	30,8	19,1	29,6	**30,4**	18,9	29,2
2008	552,7	40,6	33,1	50,6	22,5	18,3	28,0
2009	864,2	22,6	18,6	28,8	19,5	16,1	24,9
2010	673,3	31,9	21,9	42,7	21,5	14,7	28,8
2011	621,0	**14,0**	**37,8**	**54,1**	**8,7**	23,5	**33,6**
2012	922,4	20,8	23,4	27,0	19,1	21,6	**24,9**
2013	722,6	29,2	18,5	39,6	21,1	13,4	28,6
2014	642,9	32,1	**7,7**	42,3	20,6	**4,9**	27,2
2015	1156,5	21,4	25,4	**25,7**	24,7	**29,4**	29,8
Среднее	773,1	29,8	23,3	39,3	22,3	17,7	28,8

Для нитратов наибольшая концентрация в атмосферных осадках наблюдалась в 2011 г (37,8 ммоль•л$^{-1}$), наименьшая – в 2014г (7,7 ммоль•л$^{-1}$). Максимальный поток влажных выпадений – в 2015 г (29,4 ммоль•м$^{-2}$ •год$^{-1}$), а минимальный в 2014 г (4,9 ммоль•м$^{-2}$ год$^{-1}$)

Для аммония наибольшая концентрация в атмосферных осадках наблюдалась в 2011г (54,1 ммоль л$^{-1}$), наименьшая – в 2015г (25,7 ммоль•л$^{-1}$). Максимальный поток влажных выпадений – в 2011г (33,6 ммоль•м$^{-2}$•год$^{-1}$), а минимальный в 2012 г (24,9 ммоль•м$^{-2}$•год$^{-1}$).

В среднем за весь исследуемый период выпадения в год сульфатов составляют 22,3 ммоль•м$^{-2}$•год$^{-1}$(при вариациях годовых значения в интервале от -61 % до 36 % среднего), нитратов – 17,7 ммоль•м$^{-2}$•год$^{-1}$(от -72 % до 66 %), аммония 28,8 ммоль•м$^{-2}$•год$^{-1}$(от -14 % до +17 %).

На рисунках 1 и 2 представлены графики изменений (межгодовых колебаний) веществ в атмосферных осадках: средневзвешенных концентраций и потока влажных выпадений, соответственно, – на которых отмечается некоторая тенденция снижения содержания сульфатов и нитратов, но в целом колебания от года к году являются нерегулярными.

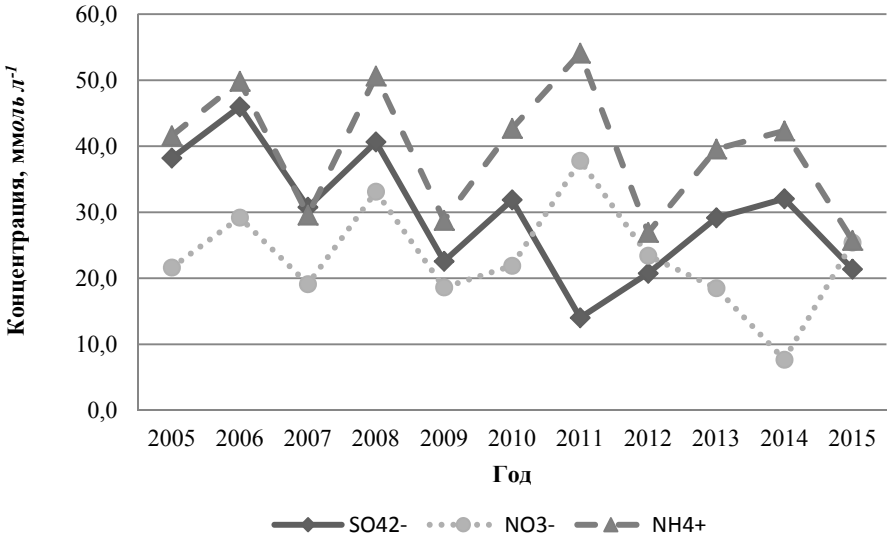


Рис. 1. Изменения средневзвешенных годовых концентраций (ммоль•л$^{-1}$) соединений серы и азота в атмосферных осадках на станции Приморская за 2005–2015 гг.

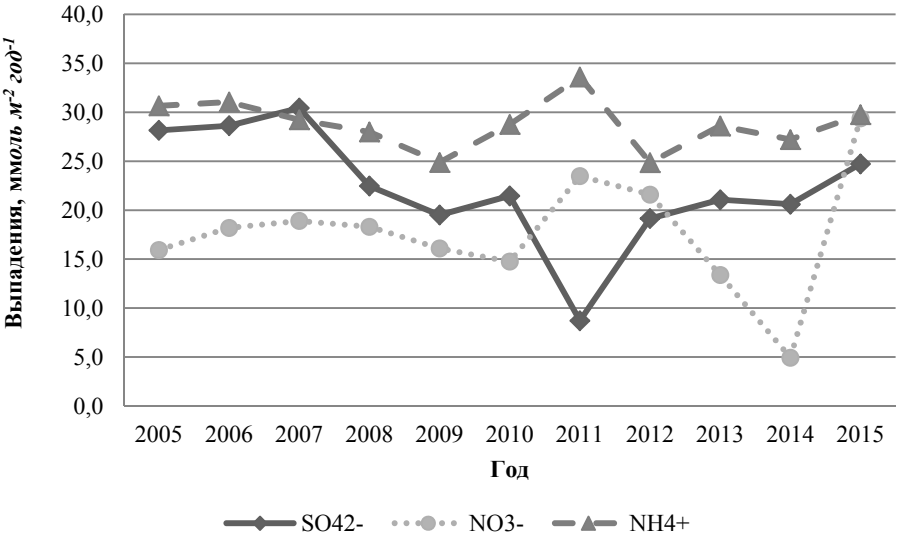


Рис. 2. Изменения количества влажных выпадений (ммоль•м$^{-2}$•год$^{-1}$) соединений серы и азота в атмосферных осадках на станции Приморская за 2005–2015 гг.

Для проверки обоснованности предположения о существовании тенденций была проведена оценка параметров трендов при помощи непараметрического теста Манна-Кендалла (шаблон MS Excel MAKESENS 1.0 [5]). По результатам применения теста к временным рядам рассчитанных величин исследуемых компонентов статистически значимых трендов выявлено не было.

При этом в целом визуально можно отметить на исследуемом 11-летнем интервале наблюдений намечающиеся тенденции снижения концентраций сульфатов и аммония в осадках. Это может проявляться в воздействии на изменение pH атмосферных осадков, для которого заметна тенденция к увеличению значений (рис. 3), однако, также не имеющей по результатам статистической оценки статистически значимого характера.

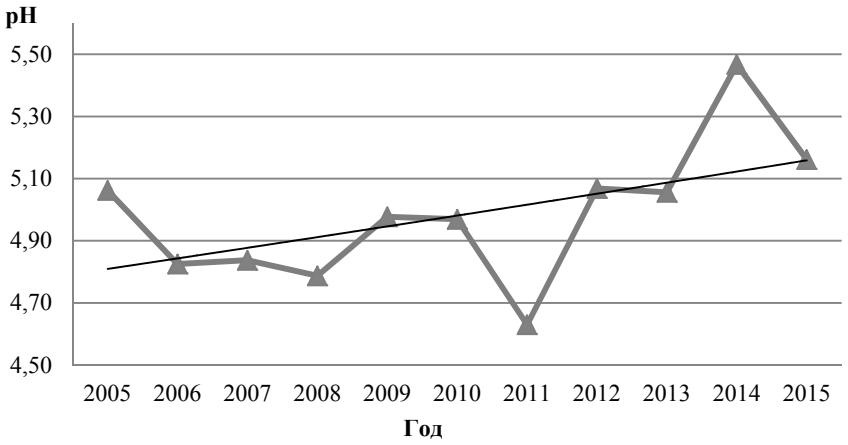


Рис. 3. Изменения среднегодовых значений pH в атмосферных осадках на станции Приморская за 2005–2015 гг.

Для удобства использования в разных региональных исследованиях количественной оценки поступления соединений серы и азота на территорию водосбора малой реки, а также для возможного дальнейшего сравнения полученных результатов с другими территориями, была произведена оценка потока в данных в кг•га$^{-1}$•год (табл. 2)

Таблица 2

Выпадения веществ с атмосферными осадками на станции Приморская за 2005–2015 гг.

Год	Выпадения веществ, кг•га$^{-1}$•год$^{-1}$		
	SO_4^{2-}	NO_3^-	NH_4^+
2005	27,07	9,93	5,53
2006	27,51	11,32	5,60
2007	29,25	11,73	5,28
2008	21,61	11,35	5,05
2009	18,78	9,99	4,50
2010	20,63	9,13	5,18
2011	8,40	14,60	6,09
2012	18,45	13,46	4,52
2013	20,33	8,32	5,16
2014	20,02	3,21	4,90
2015	24,35	18,60	5,43
Среднее	21,49	11,06	5,20

По результатам рассчитанных нами средних значений поступления исследуемых веществ была вычислена средняя общая масса выпадения загрязняющих веществ на всю площадь территории водосбора реки выше створа в районе станции Приморская (около 155 км^2). Суммарные годовые значения в среднем за период 2005–2015 г. составили 333,1 т/год SO_4^{2-}, 171,4 т/год NO_3^-, 80,6 т/год NH_4^+.

Проведённое исследование является одним из важных шагов для изучения общего баланса веществ на территории водосбора и определения механизмов миграции поллютантов.

Авторы выражают благодарность сотрудникам Центра мониторинга окружающей среды ФГБУ «Приморское УГМС», и особенно Марине Шевцовой и Сергею Алданову, за обеспечение результатов измерений по программе ЕАНЕТ.

Список литературы

1. Многолетнее состояние загрязнения природных сред на станциях СКФМ СНГ / Буйволов Ю. А., Парамонов С. Г., Вертянкина В. Ю., Громов С. А., Конькова Е. С., Трифонова-Яковлева А. М., Пастухов Б. В., Срыбный А. В. // Обзор фонового состояния окружающей природной среды на территории стран СНГ за 2015 г. Росгидромет, ИГКЭ, 2017. С. 96–174.

2. Региональное загрязнение воздуха и осадков по данным станций мониторинга ЕАНЕТ / Громов С. А, Трифонова-Яковлева А. М., Бунина Н. А., Ходжер Т. В., Голобокова Л. П., Нецветаева О. Г., Оболкин В. А.,

Потемкин В. Л. // Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2016 год. Росгидромет, ИГКЭ, 2017. С. 63–64.

3. Brimblecombe P. Air composition and chemistry. 2nd ed. Cambridge Environmental Chemistry Series 6. Cambridge Univ. Press, 1996. 180 p.

4. Data Report on the Acid Deposition in the East Asian Region. (Annually from 2005 to 2015). Access: http://www.eanet.asia/product/index.html#datarep.

5. Trend calculations / Air pollution trends in the EMEP region between 1990 and 2012. EMEP/CCC-Report 1/2016. NULU, 2016. P. 68–69.

УДК 551.584.3

Влияние природно-климатических факторов на изменение влажности почвы

Д.-С. М. Завазиева[1] (jiliharasky@gmail.com)
Н. Н. Воропай[2,3] (voropay_nn@mail.ru)

[1]Национальный Исследовательский Томский государственный университет, Томск
[2]Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск
[3] Институт географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, Иркутск

Аннотация. Статья посвящена изучению изменения влажности почвы в течение года и влиянию природно-климатических факторов на рассматриваемые изменения. Был проанализирован годовой цикл влажности почвы на площадках в Тункинской котловине (Юго-западное Прибайкалье, Республика Бурятия): открытой (сгоревший лес) и закрытой (лес) за период с 01. 01. 2012 по 31. 12. 2012, а также изменение влажности в период оттаивания и замерзания почвы на площадках. Исследование показало, что ливневые осадки оказывают большее влияние на изменения влажности почвы по сравнению с обложными осадками; на закрытой лесом площадке значения влажности почвы меньше, чем на открытой площадке; наличие растительности замедляет процесс оттаивания и ускоряет процесс замерзания почвы.

Ключевые слова: влажность почвы, Тункинская котловина, атмосферные осадки, температура почвы.

Влажность почвы – это важный агротехнический параметр в разных науках (метеорология, гидрология, почвоведение, геология, экология и др.), оказывающий серьезное влияние на полноценное функционирование такой экологической системы как биогеоценоз.

Исследования влажности почвы проводились с помощью системы автоматического мониторинга «АПИК» (производство ИМКЭС СО РАН) на песчаном массиве Бадар в Тункинской котловине [1]. Система предназначена для мобильных и стационарных долговременных автоматических измерений и регистрации основных параметров атмосферы и почвы. В ее состав входит датчик влажности грунта TRIME-PICO32. Он работает по методу удельной диэлектрической проницаемости и определяет объемную относительную влажность почвы. Диапазон измерения этого прибора от 0 до 100 %. При объемной влажности почвы от 0 до 40 % его погрешность составляет ± 1 %, а от 40 до 70 % – ± 2 %. Измерения проводятся через каждые 15 минут [2].

Материалами для работы послужили данные наблюдений ИГ СО РАН за влажностью почвы на площадках А26 (сгоревший лес) и А27 (сосновый лес). Из предоставленных данных мы взяли только необходимые нам данные по влажности почвы в процентах и температуры почвы на поверхности и на глубине 15 см с 01.01.2012 по 31.12.2012. Кроме того, при анализе были использованы данные измерения температуры воздуха и сумм атмосферных осадков на ближайшей метеорологической станции Росгидромета (Тунка) за тот же период [3]. Для анализа используется период с момента оттаивания и до момента замерзания почвы.

В незамерзшем состоянии почва находилась на площадке со сгоревшим лесом с 22.03.2012 по 10.11.2012, на закрытой площадке – с 30.03.2012 по 11.11.2012. Средняя суточная температура воздуха на момент оттаивания составляет 0,6 °С. Температура поверхности почвы и на глубине 15 см равна -2 °С.

По наблюдениям за суммой осадков была построена гистограмма за период с 22.03.2012 год по 11.11.2012 (рис. 1). На открытой площадке (ряд 2) высокие значения влажности почвы с 11 апреля по 24 мая связаны с таянием снега и оттаиванием почвы. А резкое увеличение влажности в отдельные дни с 28 мая по 20 октября связано с выпадением осадков. Уменьшение значений влажности почвы можно объяснить отсутствием осадков.

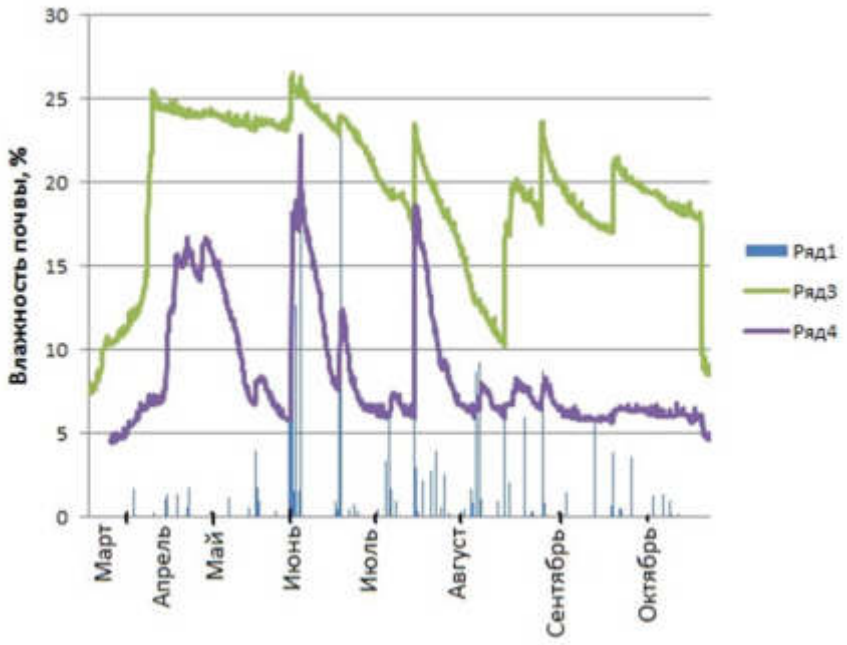


Рис. 1. Распределение значений влажности почвы на площадках А26 (ряд 2), А27 (ряд 3) и суммы осадков (ряд 1)

В тоже время на покрытой лесом площадке (ряд 3) можно заметить, что снег начал таять позже, а почва прогревалась медленнее, это показывают малые значения влажности почвы до 17 апреля. Более позднее таяние снега объясняется закрытостью площадки А27. Значения влажности почвы на закрытой площадке меньше, чем на открытой, так как поверхности почвы достигает небольшое количество осадков.

На рисунке 2 показано изменение влажности почвы в весенний период. Процесс оттаивания на площадке А26 начался 26 марта и закончился 13 апреля. Он продолжался 29 дней. Этот процесс можно разделить на 2 периода: слабое таяние с 26 марта по 9 апреля и активное таяние с 10 апреля по 13 апреля. Скорость изменения влажности в первый период составила 0,24 % в сутки, а во второй – 3,11 % в сутки. Среднее значение температуры на поверхности в период оттаивания составило 2,3 °С, а температура почвы на глубине 15 см была равна -0,7 °С.

На площадке А27 начало процесса оттаивания пришлось на 2 апреля, конец – на 21 апреля. Продолжительность составила 20 дней. Его также можно разделить на 2 периода: с 2 апреля по 16 апреля и с 17 по 21 апреля. Среднее значение температуры на поверхности составило 0,4 °С, а температура почвы на глубине 15 см в этот промежуток времени была равна -0,2 °С. Скорость изменения влажности почвы в первый период составила 0,1 % в сутки, а во второй – 1,8 % в сутки. Температура воздуха в среднем составила 2,2 °С.

Процесс замерзания на площадке А26 сопровождался периодами оттаивания (рис. 3). Это связано с открытостью данной местности. Температура почвы на глубине 15 см колеблется на уровне 0 °С. Среднее значение амплитуды температуры поверхности почвы в период с 1 по 11 ноября равно 2,8 °С. Вышесказанное является причиной скачкообразного изменения влажности почвы в этот период.

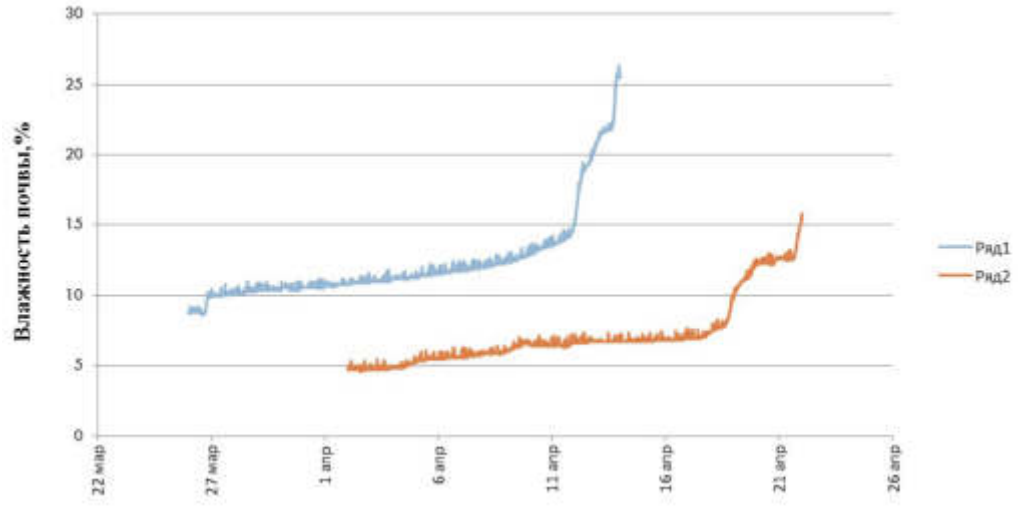


Рис. 2. Распределение влажности почвы во время процесса оттаивания на площадках А26 (ряд 1) и А27 (ряд 2)

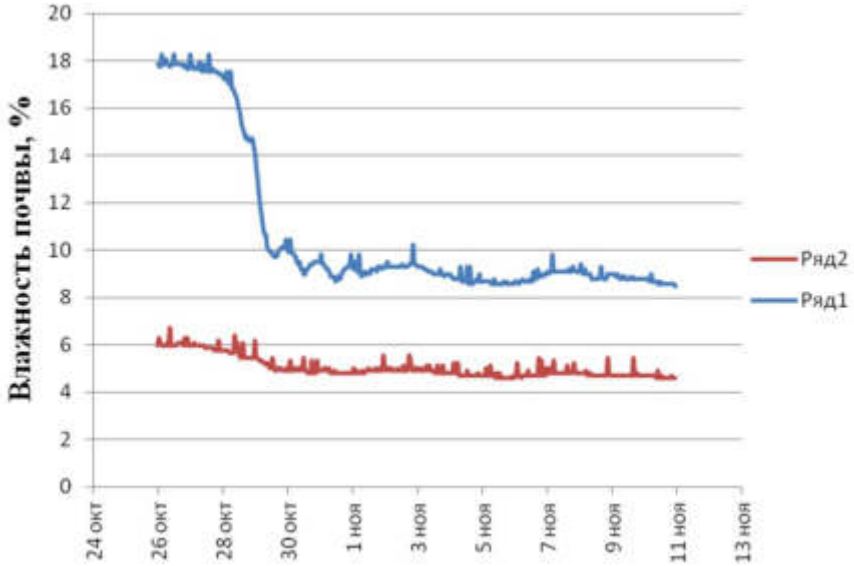


Рис. 3. Распределение влажности почвы во время процесса замерзания на площадках А26 (ряд 1) и А27 (ряд 2)

На площадке А27 процесс замерзания происходит равномернее, без резких скачков. Это объясняется влиянием растительности на площадке. Температура почвы на глубине 15 см опускается до -4 °С. Среднее значение амплитуды температуры поверхности почвы на период с 1 по 11 ноября равно 1,4 °С.

Таким образом, на оголенной площадке в осенний период суточная амплитуда температуры поверхности почвы значительно выше, чем на облесенной. В дневные часы (под прямыми лучами солнца) температура положительна, даже если средняя суточная температура ниже нуля. А это, в свою очередь, замедляет процесс замерзания почвы, при ежедневном оттаивании ее верхнего слоя.

Выводы

Наиболее значимые изменения влажности почвы происходят с начала апреля до середины ноября (с начала процесса оттаивания и до момента замерзания).

На открытой площадке значения влажности почвы больше, чем на закрытой лесом площадке. Промежуток высоких значений намного длиннее. Среднее значение и экстремумы, соответственно, выше. Это связано с более ранним таянием снега и отсутствием препятствий при выпадении осадков.

Закрытая площадка отличается более резкими падениями значений влажности почвы после ливневых осадков. Небольшие суммы осадков здесь перехватываются кронами и не сильно влияют на изменение влажности почвы.

Процессы оттаивания и замерзания сильно зависят от наличия или отсутствия растительности. Наличие растительности замедляет процесс оттаивания и ускоряет процесс замерзания почвы. Получая меньше солнечного тепла, на облесенной площадке снег начинает таять позже и скорость таяния меньше, чем на открытой площадке.

Ливневые осадки приводят к более резким изменениям влажности почвы по сравнению с обложными осадками.

Список литературы

1. Воропай Н. Н., Черкашина А. А., Кураков С. А. Применение терморегистраторов для исследования гидротермического режима почв на территории Тункинской котловины // Международная конференция по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды «ENVIROMIS-2014». Избранные труды. Томск, 28 июня – 5 июля. Томск : Изд-во Том. ЦНТИ, 2014. С. 205–208.

2. Автономный измеритель профиля температуры АИПТ : рук. по использованию. Томск : ИМКЭС, 2008. С. 12.

3. Булыгина О. Н., Разуваев В. Н., Александрова Т. М. Описание массива данных суточной температуры воздуха и количества осадков на метеорологических станциях России и бывшего СССР (TTTR). Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014620942 URL: http://meteo.ru/data/162-temperature-precipitation#описание-массива-данных (дата обращения: 21.04.2017)

УДК 551.513

Динамика возмущений в стратомезосфере при разных фазах квазидвухлетнего колебания

О. С. Зоркальцева[1] (olgak@mail.iszf.irk.ru)
В. И. Мордвинов [1,2] (v_mordv@mail.iszf.irk.ru)
К. К. Кандиева [3] (kanykeikandieva@gmail.com)
А. И. Погорельцев [3,4] (apogor@rshu.ru)

[1]Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск
[2]Иркутский государственный университет, Иркутск
[3]Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
[4]Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург – Петродворец

Аннотация. Для исследования динамических процессов в зимней внетропической стратосфере использована модель циркуляции средней и верхней атмосферы (МСВА) и климатический архив NCEP/NCAR Reanalysis. Сопоставление модельных результатов и данных наблюдений показало, что использованная модель адекватно воспроизводит основные особенности циркуляционных процессов в периоды развития внезапных стратосферных потеплений в стратосфере и мезосфере – зависимость ВСП от фазы квазидвухлетнего колебания (КДК) зонального потока в тропической стратосфере, распространение возмущений средней зональной скорости и средней зональной температуры во время ВСП по вертикали. Специальная обработка результатов расчетов и данных наблюдений показала, что ВСП являются частью собственных нерегулярных колебаний циркуляции в стратосфере и мезосфере, имеющих глобальный масштаб. На характер колебаний влияет фаза КДК в экваториальной стратосфере.

Ключевые слова. Внезапные стратосферные потепления, квазидвухлетнее колебание, моделирование.

Введение

На сегодняшний день, благодаря данным наземных и спутниковых зондирований, накоплен большой объем информации о параметрах средней атмосферы (10–100 км). Хорошо изучена внутригодовая динамика средней атмосферы, обусловленная сезонными изменениями инсоляции. Однако природа и механизм развития внезапных стратосферных потеплений (ВСП), все еще остаются не вполне понятными, несмотря на то, что по данным наблю-

дений изучены уже практически все эпизоды ВСП и в Северном и в Южном полушариях [8; 9; 10; 11; 14; 16].

Согласно традиционной точке зрения, разрушение стратосферного полярного вихря и развитие событий ВСП являются следствием распространения в стратосферу стационарных планетарных волн (СПВ) [15]. Это подтверждают результаты наблюдений и моделирований [7; 9; 14; 17]. В работе [12] найдена устойчивая связь между изменчивостью полярного вихря в стратосфере, стационарными волнами в тропосфере и кольцевыми модами. Влияние СПВ 1 и 2 на динамику стратосферы обсуждается в [19]. Неясными остаются обратные эффекты влияния изменений циркуляции во время ВСП на распространение планетарных волн и особенности взаимодействия между различными слоями стратосферы и мезосферы. Это побуждает исследователей увеличивать вертикальное разрешение модельных расчетов [13] и развивать новые подходы для диагностики нелинейного взаимодействия планетарных волн между собой и со средним потоком [18].

Результаты моделирований показали, однако, что аномалии стратосферной циркуляции и внезапные стратосферные потепления (ВСП) могут быть следствием раскачки и интерференции нормальных атмосферных мод непосредственно в высокоширотной стратосфере [3]. Анализ ВСП по данным наблюдений позволил выявить периодичность в развитии потеплений, которая не только подтверждает эту точку зрению, но и усложняет полную картину развития ВСП [5; 7]. Оказалось, что разрушению полярного вихря в стратосфере предшествует цепочка событий: – за две-три недели до ВСП возрастает вихревая активность в стратосфере; в районе Северной Атлантики вихревой поток проникает в тропосферу. Возрастает активность синоптических процессов, усиливается поток вихревой активности в восточном направлении. В синоптическом представлении wave trains над северной частью Евразии, определяющие поток вихревой активности, часто предшествуют образованию блокингов и крупномасштабным погодным аномалиям над Евразией [4]. Усиление синоптической активности в восточной части Евразии через некоторое время приводит к возрастанию вихревых потоков в стратосферу над востоком Азии и северной частью Тихого океана. Нелинейные взаимодействия возмущений с полярным вихрем и стационарным антициклоном в стратосфере приводят к разрушению полярного вихря и сильному, мажорному потеплению.

Реальная картина развития ВСП включает, видимо, комплекс процессов – собственные колебания в средней атмосфере и внешний форсинг, обусловленный различными причинами, которые можно в большей или меньшей степени интерпретировать в терминах распространения планетарных волн. Получены свидетельства влияния на циркуляцию в полярной стратосфере орографических стационарных волн, квазидвухлетнего колебания, тропосферных блокингов и бегущих в меридиональном направлении возмущений [3]. Примером таких возмущений являются крутильные колебания – вариации средней зональной компоненты скорости в диапазоне 10 – 20 суток. Сопоставление крутильных колебаний и событий ВСП показало, что внезапным стратосферным потеплениям, как правило, предшествует период повышенной активности в тропической стратосфере. Из тропиков возмущения распространяются в средние и высокие широты. Время распространения составляет примерно 10 суток. Рост температуры в полярной стратосфере почти точно совпадал с моментом прихода возмущений в область стратосферного струйного течения [3]. Остается неясным вопрос, являются ли периоды повышенной активности в стратосфере следствием внешнего возбуждения, либо следствием собственных нерегулярных колебаний циркуляции в стратомезосфере (так называемых, стратосферных васцилляций). Для проверки этого предположения мы воспользовались расчетами общей циркуляции атмосферы с помощью модели средней и верхней атмосферы (МСВА). Модельные расчеты на уровне ~ 10 гПа сопоставлялись с данными архива NCEP/NCAR Reanalysis.

Описание модельных экспериментов

Метод моделирования. Для моделирования теплового режима и общей циркуляции атмосферы использовалась трехмерная нелинейная модель циркуляции атмосферы (МСВА) в области высот 0–293 км, реализованная на сетке 5. 625 ° по долготе, 5 ° по широте, 56 уровней по высоте [18]. Шаг интегрирования по времени составлял 225 с. В последней версии МСВА включена новая параметризация эффектов орографических гравитационных волн [1], а также новые климатические распределения озона [8] и паров воды в тропосфере [2], учитывающие зависимость от долготы. Вертикальной координатой модели является безразмерная log-изобарическая высота x=-ln(p/1000), где p – давление в гПа. Нижние граничные условия на уровне 1000 гПа представляют собой распределения геопотенциальной высоты и температуры за 1 января, учитывающие средние зональные значения и стационарные планетарные волны с зональными волновыми числами m=1–5. Для исключения влияния явления Эль Ниньо/Южное Колебание (ЭНЮК) при расчете нижних граничных условий использовались данные наблюдений в январи 1982, 1991, 1994, 2002, 2004 гг., во время которых наблюдалась нейтральная фаза ЭНЮК согласно индексу MEI (Multivariate ENSO Index).

Влияние КДК задавалось дополнительным слагаемым в прогностическом уравнении для зональной компоненты скорости, пропорциональным разности рассчитанных и климатических распределений средних значений зональной скорости ветра для западной и восточной фазы КДК [6]. Дополнительное слагаемое «включалось» в интервале широт 17,5 ° S – 17,5 ° N на высотах 0–50 км. Характерное время «притяжения» модельного среднего зонального потока к наблюдениям составляло 5 суток.

Схема численных экспериментов. Численные эксперименты проводились отдельно для восточной и западной фазы КДК. Длительность каждой реализации составляла 400 модельных дней, в течение первых 120 дней учитывался только среднесуточный нагрев атмосферы. Включение суточных вариаций и постепенное включение дополнительного уравнения для геопотенциала на нижней границе расчетной области происходило после 120 дня и продолжалось до 330 дня. В период с 331 по 400 день (1 января – 11 марта) расчеты проводились с учетом изменения зенитного угла Солнца. Постепенное включение дополнительного уравнения в 121, 122…, 130 день позволило получить ансамбли полей гидродинамических величин, состоящие из 10 реализаций модели, рассчитанных с различными начальными условиями.

Методика обработки модельных данных

Объектом анализа и сопоставления модельных расчетов и данных наблюдений были средние зональные величины температуры и зональной компоненты ветра. Тренды и высокочастотные колебания во временных рядах этих величин исключались с помощью скользящего осреднения в окнах 5 и 20 суток. Ряды сглаженных величин нормировались затем на разность между максимальным и минимальным значением. Нормировка позволила избавиться от широтной и вертикальной зависимости амплитуды вариаций величин. Ранее эти операции применялись нами для выделения крутильных колебаний метеорологических величин в низкочастотном диапазоне [3]. Полученные распределения наносились затем на диаграммы широта-время и высота-время, и сопоставлялись с данными наблюдений, обработанными аналогичным образом. Для анализа распространения возмущений температуры и средней зональной скорости по вертикали и вдоль меридиана по данным наблюдений и результатам моделирования строились взаимные корреляционные кривые между вариациями величин в разных широтных зонах и на разных уровнях атмосферы. Для оценки статистической значимости корреляционных кривых по результатам моделирований рассчитывались среднеквадратичные отклонения оценок коэффициентов корреляции.

Результаты моделирования

На рис. 1 приведен пример изменений во времени распределений средней зональной температуры и средней зональной скорости на высоте примерно 30 км по данным наблюдений зимой 2000/2001 года (слева) и по данным модельных расчетов (справа) для западной

фазы КДК. На верхней панели нанесены вариации температуры, на нижней панели – средней зональной скорости. На диаграммы нанесены графики средней зональной температуры в области экватора (синий цвет) и на широте примерно 60° с. ш. Видно, во-первых, хорошее согласие модельных расчетов и данных наблюдений. Во-вторых, модель достаточно убедительно показывает, что эпизоды потеплений в зимней высокоширотной атмосфере являются следствием собственных колебаний в циркуляции атмосферы. И, в третьих, колебания в циркуляции атмосферы продолжительностью 10–20 суток, следствием которых являются ВСП, имеют глобальный характер и не ограничиваются только высокими широтами Северного полушария. В Южном полушарии по данным наблюдений возмущения достигают ~50° ю. ш., а по модельным расчетам – ~70° ю. ш. Частью возмущений являются крутильные колебания – колебания средней зональной скорости, распространяющиеся в меридиональном направлении. Крутильные колебания хорошо видны в данных наблюдений и, особенно, в модельных расчетах в интервале широт 30–60 °с. ш.

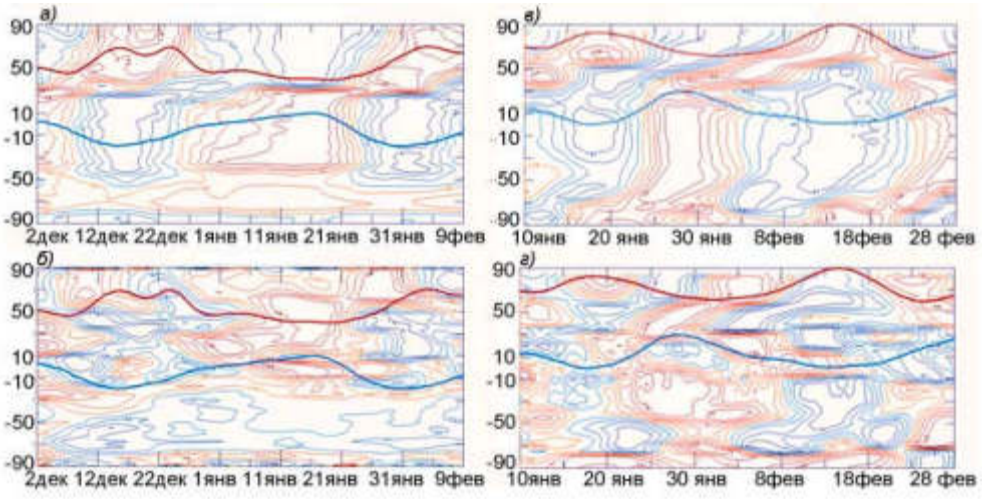


Рис. 1. Распределения среднезональной температуры воздуха (а, б) по данным MUAM (б, г) и среднеднезональной скорости ветра (в, г) по данным NCEP/NCAR Reanalysis(а, в).

Следует отметить, что перечисленные выше особенности характерны для всех реализаций модельных расчетов и для разных лет наблюдений по данным NCEP/NCAR Reanalysis. Это подтверждают приведенные на рис. 2,3 графики коэффициентов корреляции, рассчитанные со сдвигом от -40 дней до +40 дней между изменениями со временем средней зональной температуры (верхняя панель, рис. 2) и средней зональной скорости (верхняя панель, рис. 3) в разных широтных интервалах, усредненные по 10 модельным реализациям. На нижних панелях рис. 2 и рис. 3 приведены графики среднеквадратичных отклонений коэффициентов корреляции. Графики слева относятся к западной фазе КДК, графики справа – к восточной фазе КДК. Во всех реализациях модельных расчетов и при западной и при восточной фазах КДК повторяется одна и та же картина – вариации температуры в умеренных и высоких широтах противоположны по знаку вариациям в низких широтах, как это хорошо видно на рис. 1. Вариации средней зональной скорости в низких и высоких широтах имеют более сложный характер, вариации в высоких широтах смещены по фазе относительно вариаций в низких широтах примерно на 5–10 суток.

По крайней мере, в интервале сдвигов от -10 до +10 дней значения коэффициентов корреляции превышают величину среднеквадратичного отклонения, а в интервале -5…+5 дней – удвоенные значения среднеквадратичного отклонения. Это говорит о том, что статистический разброс между отдельными реализациями невелик и особенности динамики возмущений, приведенные на диаграммах, характерны для всех реализаций модельных расчетов.

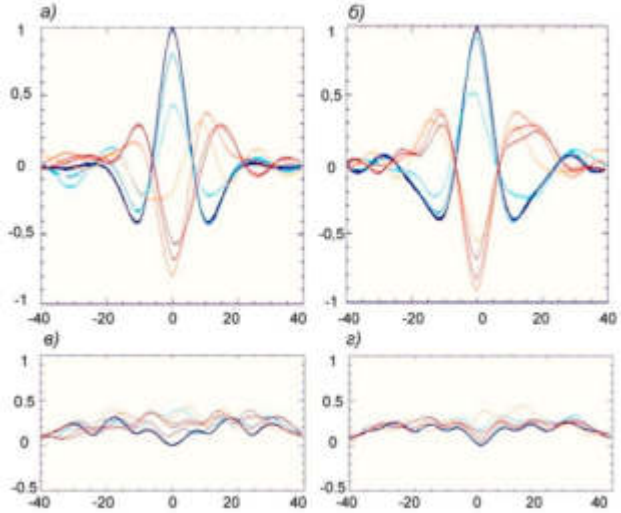


Рис. 2. Верхняя панель – коэффициенты корреляции вариаций средней зональной температуры в разных широтных интервалах, усредненные по 10 модельным реализациям. Графики слева относятся к западной фазе КДК, графики справа – к восточной фазе КДК. Синим цветом выделены графики коэффициентов корреляции между экваториальной зоной (-10° ю. ш. … +5° с. ш.) и низкоширотными зонами (0° с. ш. … +15° с. ш.), (10 °с. ш. … +25° с. ш.), различными оттенками красного цвета – графики коэффициентов корреляции между экваториальной зоной и зонами (20° с. ш. … +35° с. ш.), (30° с. ш. … +45° с. ш.), (40 °с. ш. … +55^{0}с. ш.), (50° с. ш. … +65 °с. ш.), (60° с. ш. … +75° с. ш.); нижняя панель – среднеквадратичные отклонения коэффициентов корреляции, рассчитанные по 10 модельным реализациям

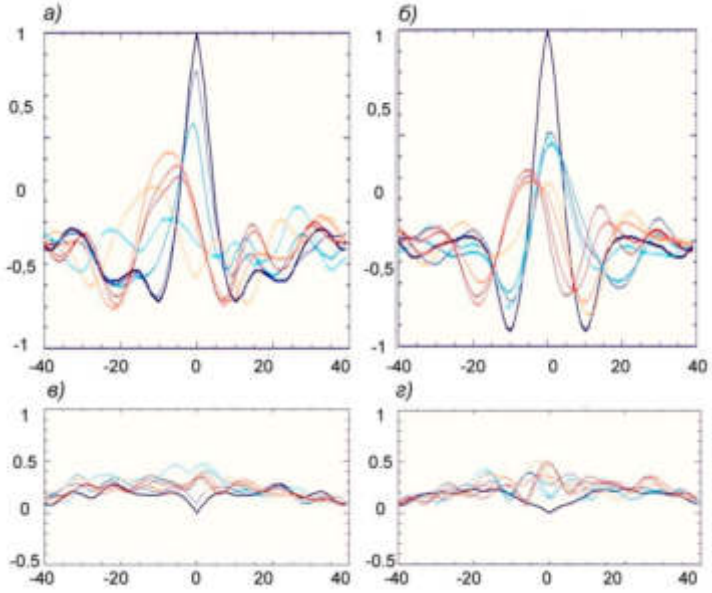


Рис. 3. То же, что и на рис. 2, но для вариаций средней зональной скорости

На основании анализа данных наблюдений считается установленным факт распространения возмущений температуры во время ВСП сверху вниз – из мезосферы в стратосферу, причем знак вариаций температуры в мезосфере и стратосфере чаще всего противоположен. Эту особенность вполне подтверждают модельные расчеты, причем оказывается, что характер вариаций зависит от фазы КДК.

На рис. 4, *а–г* приведены графики изменений со временем средней зональной температуры воздуха на широте 62,5° при западной (*а, в*) и восточной (*б, г*) фазе КДК. Видно, что временной ход температуры воздуха претерпевает значительные изменения в зависимости от фазы КДК. На высоте 31,3 км при западной фазе КДК повышения температуры, обусловленные ВСП, происходят, в основном, в первой половине январе и во второй половине февраля. На высоте 59,6 км первый максимум потеплений отмечается в конце января, а второй макси-

мум в конце периода. При восточной фазе КДК потепления на выбранных высотах менее регулярны, на высоте 31,3 км чаще всего возникают в конце периода. И при западной, и при восточной фазах КДК вариации температуры на высотах 31,3 и 59,6 км происходят в противофазе.

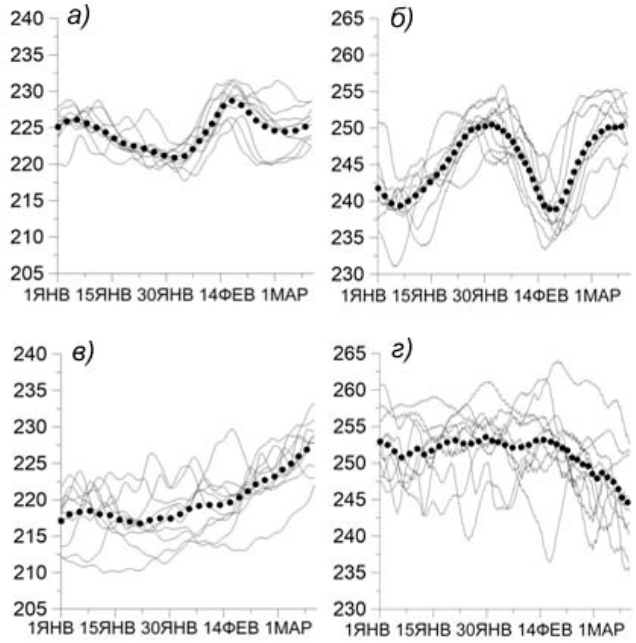


Рис. 4. Вариации температуры воздуха в полярной стратосфере при западной (а, б) и восточной (в, г) фазах КДК на высотах 31,3 км (*а, в*) и 59. 6 км (*б, г*). Пунктирные линии – графики изменений температуры, осредненные по 10 реализациям

Чтобы проанализировать динамику процессов по вертикали более детально, мы построили распределения средней зональной температуры и средней зональной скорости на диаграммах высота-время для широтного круга 62. 5^0 с. ш. для западной и восточной фазы КДК. На рис. 5 приведен пример диаграммы для той же реализации, что и на рис. 1. Диапазон уровней по вертикали охватывает стратосферу, мезосферу и нижнюю часть термосферы.

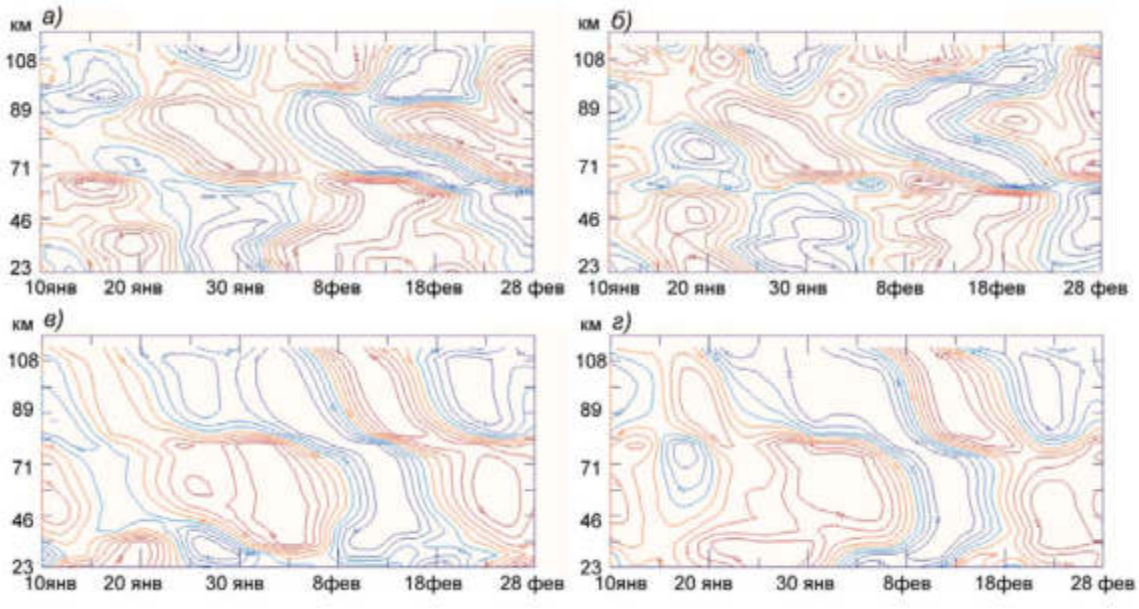


Рис. 5. Распределения по вертикали среднезональной температуры воздуха (*а, б*) и среднеднезональной скорости ветра (*в, г*) для западной (*а, в*) и восточной (*б, г*) фазы КДК

В мезосфере хорошо виден перенос возмущений сверху вниз и в температуре и в зональной скорости. В стратосфере можно видеть движения и сверху вниз и снизу вверх, однако в температуре преобладают все же движения снизу вверх, а в зональной скорости – сверху вниз. . Характер движений одинаков и при западной и при восточной фазах КДК. Основной особенностью распределений температуры является противоположный знак возмущений температуры в стратосфере и мезосфере. Эта особенность прослеживается во всех реализациях модельных расчетов. На рис. 6 приведены распределения коэффициентов корреляции между изменениями со временем средней зональной температуры (верхняя панель) на широте 62. 5^0с. ш. на разных высотах атмосферы, усредненные по 10 модельным реализациям. Графики слева относятся к западной фазе КДК, графики справа – к восточной фазе циркуляции. Синим цветом выделены графики коэффициентов корреляции между вариациями на уровне 31,3 км (в лог-изобарической системе координат) и вариациями величин на уровнях 37,2; 43,4; 49,9 км, различными оттенками красного цвета – графики коэффициентов корреляции между вариациями на уровне 31,3 км и вариациями на уровнях 56,4; 62,7; 68,6; 74,0; 79,0 км. На нижних панелях рис. 6 нанесены графики среднеквадратических отклонений рассчитанных значений коэффициентов корреляции

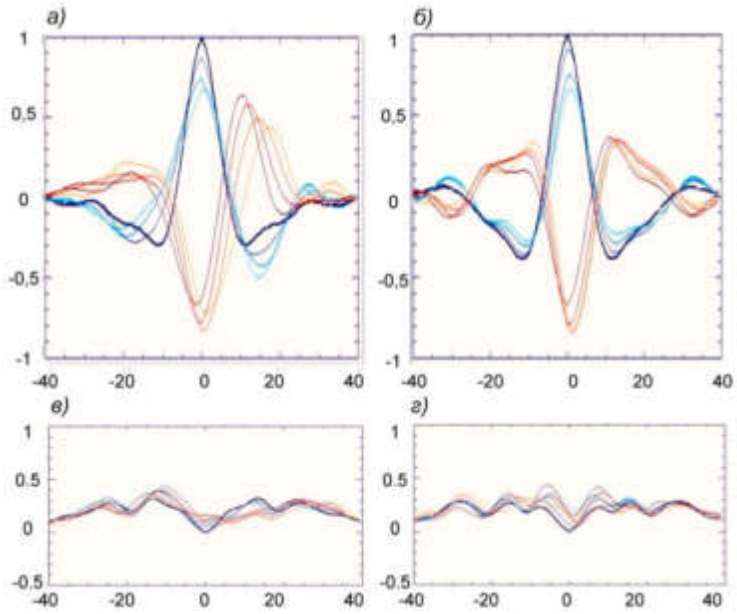


Рис. 6. Коэффициенты корреляции (верхняя панель), рассчитанные со сдвигом от -40 дней до +40 дней, между изменениями со временем средней зональной температуры (*а, б*) на разных уровнях атмосферы, усредненные по 10 модельным реализациям. Графики слева относятся к западной фазе КДК (*а, в*), графики справа – к восточной фазе циркуляции (*б, г*); нижняя панель – среднеквадратичные отклонения коэффициентов корреляции, рассчитанные по 10 модельным реализациям

На графиках коэффициентов корреляции хорошо видна основная особенность в распределении температуры – противоположный характер вариаций в мезосфере и стратосфере, причем в мезосфере смещение корреляционных кривых, соответствующих разным высотам, указывает на перенос возмущений сверху вниз, как при западной, так и при восточной фазах КДК. В интервале сдвигов по времени от -10 до +10 дней значения коэффициентов корреляции превышают величину среднеквадратичного отклонения, а в интервале -5…+5 дней – удвоенные значения среднеквадратичного отклонения.

На рис. 7 приведены распределения средних коэффициентов корреляции (верхняя панель) и среднеквадратических отклонений коэффициентов корреляции (нижняя панель) для вариаций средней зональной скорости, рассчитанные по 10 модельным реализациям. Уровни, для которых рассчитывались коэффициенты корреляции, те же, что и на рис. 6.

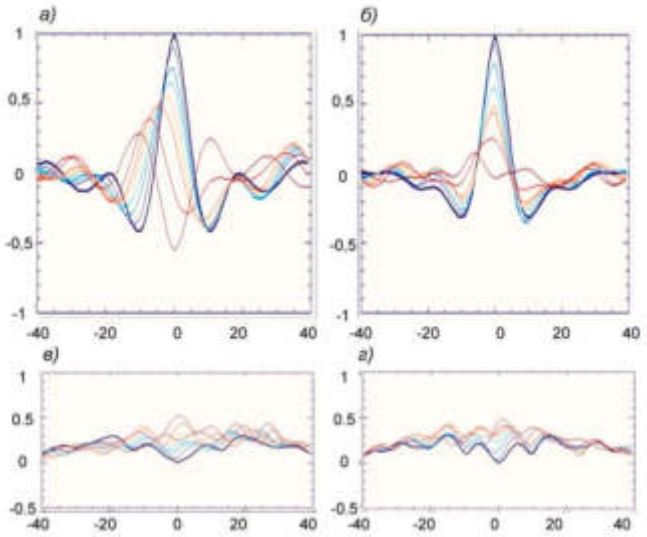


Рис. 7. То же, что и на рис. 6, но для средней зональной скорости

Построенные на рис. 7 для разных уровней средние корреляционные кривые имеют более высокие значения среднеквадратичного отклонения, чем корреляционные кривые для средней зональной температуры, и, следовательно, менее обеспечены статистически, особенно, при восточной фазе КДК. При западной фазе КДК в корреляционных кривых хорошо выражен сдвиг по фазе между вариациями на разных высотах, указывающий на перенос возмущений средней зональной скорости сверху вниз и в мезосфере и в стратосфере.

Для иллюстрации глобального характера колебаний на рис. 8 приведены распределения по вертикали средней зональной температуры (верхняя панель) и средней зональной скорости (нижняя панель) над экваториальной зоной -2. 5^0 ю. ш. – 7. 5^0с. ш. для западной (слева) и восточной (справа) фаз КДК, построенные по тем же реализациям, по которым построены диаграммы на рис. 5. В отличие от хорошо заметных перемещений возмущений средней зональной температуры и средней зональной скорости по вертикали на рис. 5, в экваториальной зоне эти перемещения менее выражены, разные по знаку возмущения в стратосфере и мезосфере развиваются почти одновременно.

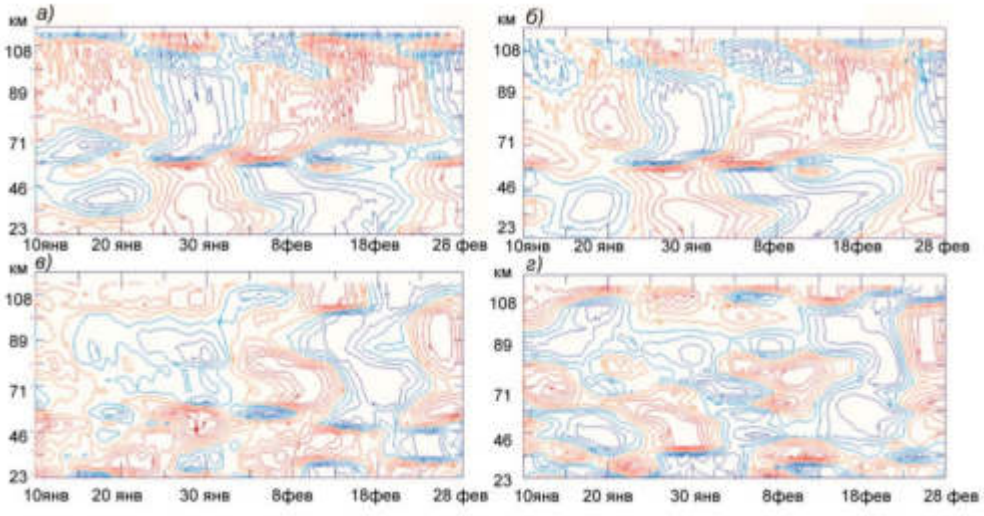


Рис. 8. Распределения среднезональной температуры воздуха (а, б) и среднеднезональной скорости ветра (*в, г*) для западной (*а, в*) и восточной (*б, г*) КДК над широтной зоной 2,5° ю. ш. – 7,5° с. ш.

Выводы

Одной из нерешенных до последнего времени задач в физике средней атмосферы является выявление механизма, ответственного за динамические процессы разрушения полярного вихря в зимней стратосфере и мезосфере и возникновение событий ВСП. Историческими первыми возникли предположения, что ВСП являются следствием усиления распространения снизу вверх из тропосферы длинных планетарных волн и их нелинейного взаимодействия со стратосферным струйным течением. Однако данные наблюдений не дали однозначного ответа на этот вопрос, более того, была выявлена внутренняя структура и периодичность в динамике ВСП, указывающая на то, что ВСП могут возникать и без внешнего возбуждения [5]. Для проверки этой гипотезы была использована модель циркуляции средней и верхней атмосферы и климатический архив NCEP/NCAR Reanalysis. Сопоставление модельных результатов и данных наблюдений показало, что использованная модель адекватно воспроизводит основные особенности циркуляционных процессов в периоды развития событий ВСП в стратосфере и мезосфере – зависимость ВСП от фазы КДК в тропической стратосфере, распространение возмущений средней зональной скорости и средней зональной температуры во время ВСП по вертикали. Так как внешнее возбуждение в модели отсутствовало, выполненные расчеты подтвердили гипотезу возникновения ВСП вследствие собственной неустойчивости циркуляции средней атмосферы. Специальная обработка результатов расчетов и данных наблюдений показала, что ВСП являются частью глобальных нерегулярных колебаний средней атмосферы, развивающихся в обоих полушариях практически на всех высотах стратосферы и мезосферы, причем на характер этих колебаний влияет фаза КДК в экваториальной стратосфере.

Исследование выполнено в рамках проекта II.16.1.2 Программы ФНИ государственных академий на 2013–2020 годы.

Список литературы

1. Гаврилов Н. М., Коваль А. В. Параметризация воздействия мезомасштабных стационарных орографических волн для использования в численных моделях динамики атмосферы // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49, № 3. С. 271–278.
2. Ермакова Т. С., Статная И. А., Федулина И. Н., Суворова Е. В., Погорельцев А. И. Трехмерная полуэмпирическая климатическая модель распределения водяного пара и ее использование в радиационном блоке модели средней и верхней атмосферы // Метеорология и гидрология. 2017. № 9. С. 75–82.
3. Кочеткова О. С., Мордвинов В. И., Руднева М. А. Анализ факторов, влияющих на возникновение стратосферных потеплений // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27, № 8. С. 719–727.
4. Пальмен Э., Ньютон Ч. Циркуляционные системы атмосферы. Л. : Гидрометеоиздат. 1973. 615 с.
5. Погорельцев А. И. Генерация нормальных атмосферных мод стратосферными васцилляциями // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2007. Т. 43, № 4. С. 463–475.
6. Погорельцев А. И., Савенкова Е. Н., Перцев Н. Н. Внезапные стратосферные потепления: Роль нормальных атмосферных мод // Геомагнетизм и Аэрономия. 2014. Т. 54. № 3. С. 387–403.
7. Статистическая неравномерность дат внезапных стратосферных потеплений в зимнем северном полушарии / Е. Н. Савенкова, Н. М. Гаврилов, А. И. Погорельцев, Р. О. Мануйлова // Изв. РАН Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53, № 3. С. 287–295.
8. Суворова Е. Н., Дробашевская Е. А., Погорельцев А. И. Климатическая модель трехмерных распределений озона по данным реанализа MERRA // Учен. зап. РГГМУ. 2017. № 49. С. 38–46.
9. Butler A. H., Sjoberg J. P., Seidel D. J., Rosenlof K. H. A sudden stratospheric warming compendium // Earth Syst. Sci. Data. 2017. Vol. 9. P. 63–76.
10. Chandran A., Collins R. L., Harvey V. L. Stratosphere-mesosphere coupling during stratospheric sudden warming events // Advances in Space Research. 2014. Vol. 53. P. 1265–1289.
11. Chiodo G., Polvani L. M. Reduced Southern Hemispheric circulation response to quadrupled CO2 due to stratospheric ozone feedback // Geophysical Research Letters. 2017. Vol. 44:1. P. 465–474.
12. Gerber E. P., Polvani L. M. Stratosphere–troposphere coupling in a relatively simple AGCM: The importance of stratospheric variability // J. Climate. 2009. Vol. 22. P. 1920–1933.
13. Gerber E. P., Butler A., Calvo N., Charlton-Perez A., Giorgetta M., Manzini E., Perlwitz J., Polvani L. M., Sassi F., Scaife A. A., Shaw T. A., Son S. -W., Watanabe S. // Bull. Amer. Meteor. Soc. 2012. Vol. 93. P. 845–859.
14. Liu H. -L., Roble R. G. A study of a self-generated stratospheric sudden warming and its mesospheric-lower thermospheric impacts using the coupled TIME-GCM/CCM3 // J. Geophys. Res. 2002. Vol. 107. P. 46–95.

15. Matsuno T. A dynamical model of the Stratosphere sudden warming // J. Atmos. Sci. 1971. Vol. 28. P. 1479–1494.

16. Palmeiro F. M., Barriopedro D., García-Herrera R., Calvo, N. Comparing Sudden Stratospheric Warming Definitions in Reanalysis Data // J. Climate. 2015. Vol. 28. P. 6823–6840.

17. Plumb R. A. On the Three-Dimensional Propagation of Stationary Waves // Journal of the Atmospheric Sciences. 1985. Vol. 42.

18. Pogoreltsev A. I., Savenkova E. N., Aniskina O. G., Ermakova T. S., Chen W., Wei K. Interannual and intraseasonal variability of stratospheric dynamics and stratosphere–troposphere coupling during northern winter // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2015. Vol. 136. P. 187–200.

19. Sheshadri A., Plumb R. A., Gerber E. Seasonal Variability of the Polar Stratospheric Vortex in an Idealized AGCM with Varying Tropospheric Wave Forcing // J. Atmos. Sci. 2015. Vol. 72. P. 2248–2266.

УДК 551.581

Динамика основных характеристик снежного покрова на территории Пермского края за период 1950–2017 гг.

А. Д. Крючков (Candy55man@ya.ru)

ПГНИУ, Пермь

Аннотация. Рассмотрены особенности залегания снежного покрова на территории Пермского края, проанализированы характеристики высоты снежного покрова.

Ключевые слова: устойчивый снежный покров, образование и разрушение снежного покрова, продолжительность залегания снежного покрова, высота снежного покрова.

Снежный покров является одной из важных климатических характеристик, которые оказывают существенное влияние на радиационный и циркуляционный режим территории. Данные о снежном покрове используют в качестве параметров климатических и прогностических численных моделей, при оценке влагозапасов, расчете стока и прогноза половодья.

Изменения климата, усиливающиеся в последнее время, оказывают прямое воздействие на трансформацию параметров снежного покрова, что в свою очередь влияет на климат, поэтому необходим постоянный мониторинг подобных изменений.

В настоящей работе проанализирован материал, касающийся образования, разрушения и продолжительности залегания устойчивого снежного покрова, а так же высоты снежного покрова. Были использованы данные наблюдений на 25 метеорологических станциях Пермского края за период 1950–2017 гг.

Расчет характеристик устойчивого снежного покрова произведен в соответствии с методикой ГГО [1].

Образование и разрушение устойчивого снежного покрова

Важными характеристиками устойчивого снежного покрова являются процессы его образования и разрушения. Как правило, образованию и разрушению УСП сопутствуют периоды временного снежного покрова, который под воздействием осенних оттепелей и весенних заморозков, характерных для переходных сезонов, формируется на непродолжительное время и вскоре исчезает.

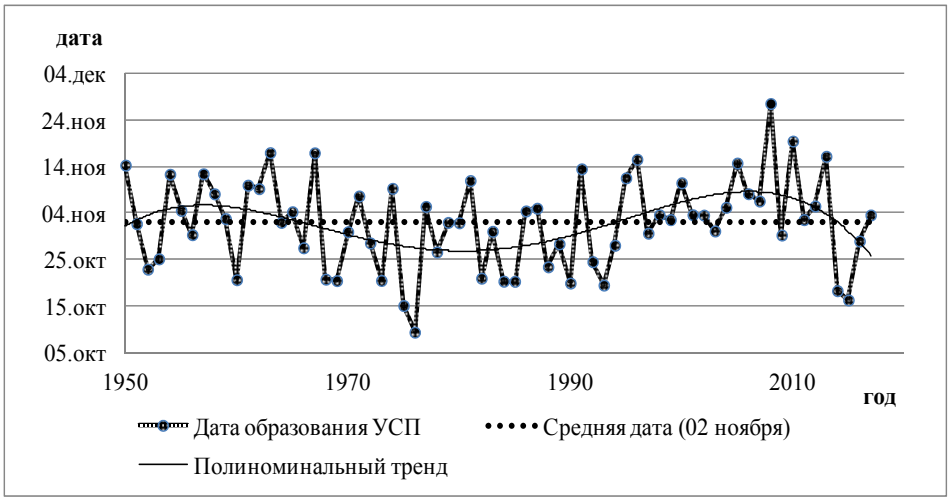
Территориальное расположение Пермского края, а именно большая протяженность с севера на юг и наличие на востоке Уральских гор, приводит к тому, что установление снежного покрова происходит с северо-востока на юго-запад, сход – в обратном направлении.

Средняя дата образования УСП на территории края приходится на 02 ноября. Для сравнения, по данным 1950–1996 гг. образование устойчивого снежного покрова происходило в среднем 24 октября [3], по данным 1950–2010 г. – 31 октября [2]. Самый ранний срок установления снежного покрова – 27 сентября (Вая), самый поздний – 13 декабря (Кунгур, Чернушка, Оханск). Средняя величина ежегодной изменчивости составляет 8 дней, при этом

отклонения в 15 и более дней встречаются в 10 % случаев. Стоит сказать, что в последние годы тенденция к более позднему установлению УСП, наметившаяся с 80-х гг. прошлого века, сменилась на обратную (рис. 1а).

Разрушение устойчивого снежного покрова происходит в среднем 20 апреля (19 апреля для выборки до 1996 г., 20 апреля для выборки до 2010 г.). Отклонения в сроках разрушения снежного покрова не превышают 10 дней в 85 % случаев, максимальная величина – 17 дней. Самый поздний срок разрушения УСП зафиксирован на станции Усть-Черная – 29 мая, самый ранний – 1 апреля – на станциях Гайны и Оса. Линия тренда (рис. 1б) имеет более сглаженный характер, чем на диаграмме образования УСП. Видно, что, начиная с 80-х гг. XX в., просматривается тенденция к более позднему разрушению УСП.

а)



б)

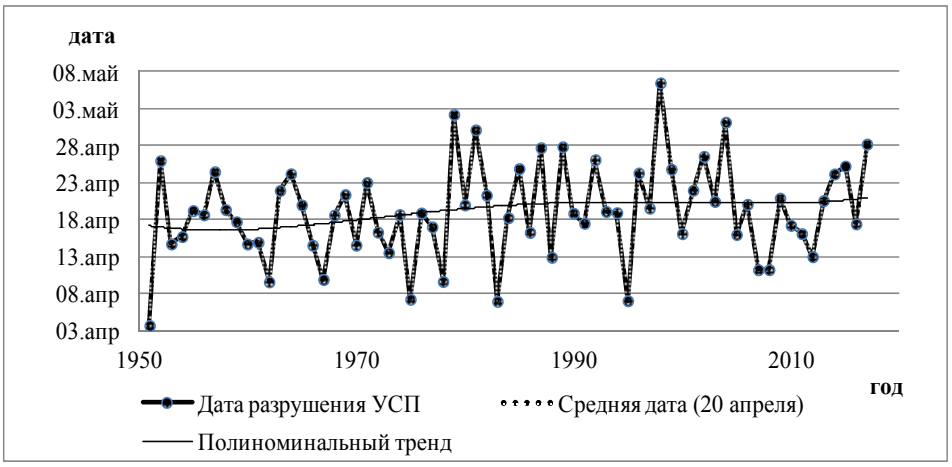


Рис. 1. Средние по Пермскому краю даты образования (а) УСП (1950–2017 гг.) и разрушения (б) УСП (1951–2017 гг.)

Продолжительность залегания устойчивого снежного покрова

Средняя продолжительность залегания снежного покрова в Пермском крае составляет 170 дней, значения варьируются от 155 дней на юге до 193 дней на севере края (табл. 1). Максимальные значения (свыше 200 дней) характерны для северных и северо-восточных станций, а также станций, расположенных ближе к Уральским горам. Так, на станции Чердынь зафиксирована продолжительность УСП 225 дней, станции Усть-Черная и Бисер показали 221 день. Минимальные значения (менее 120 дней) отмечаются на южных и юго-западных территориях. На станции Оханск зарегистрирована продолжительность УСП 103 дня, на станции Чайковский – 107 дней.

Таблица 1

Статистические характеристики продолжительности УСП
на метеостанциях Пермского края

Метеорологическая станция	Продолжительность УСП			СКО
	средняя	максимальная	минимальная	
НЫРОБ	184	209	135	14
ВАЯ	193	217	154	14
У-ЧЕРНАЯ	174	221	127	17
ЧЕРДЫНЬ	183	225	135	16
ГАЙНЫ	173	206	131	15
КОСА	171	206	143	15
КОЧЕВО	171	204	143	14
БЕРЕЗНИКИ	171	200	126	15
КУДЫМКАР	165	197	122	15
ГУБАХА	176	199	145	15
ЧЕРМОЗ	166	198	124	15
ДОБРЯНКА	166	192	127	13
БИСЕР	188	221	150	14
ВЕРЕЩАГИНО	165	202	122	14
ЛЫСЬВА	168	198	130	15
ПЕРМЬ	164	193	113	16
КЫН	172	203	125	15
Б. СОСНОВА	164	192	123	15
ОХАНСК	162	189	103	16
КУНГУР	156	190	112	16
ОСА	159	188	114	15
НОЖОВКА	160	188	113	15
ЧАЙКОВСКИЙ	155	182	107	16
ЧЕРНУШКА	165	192	112	14
ОКТЯБРЬСКИЙ	172	199	128	14
Средняя по краю	170	200	127	-

В целом, по данным ежегодных наблюдений, на всех метеорологических станциях Пермского края отмечается уменьшение средней продолжительности залегания устойчивого снежного покрова (рис. 2). В среднем такие изменения составляют 5 дней, значения колеблются от 2 до 12 дней.

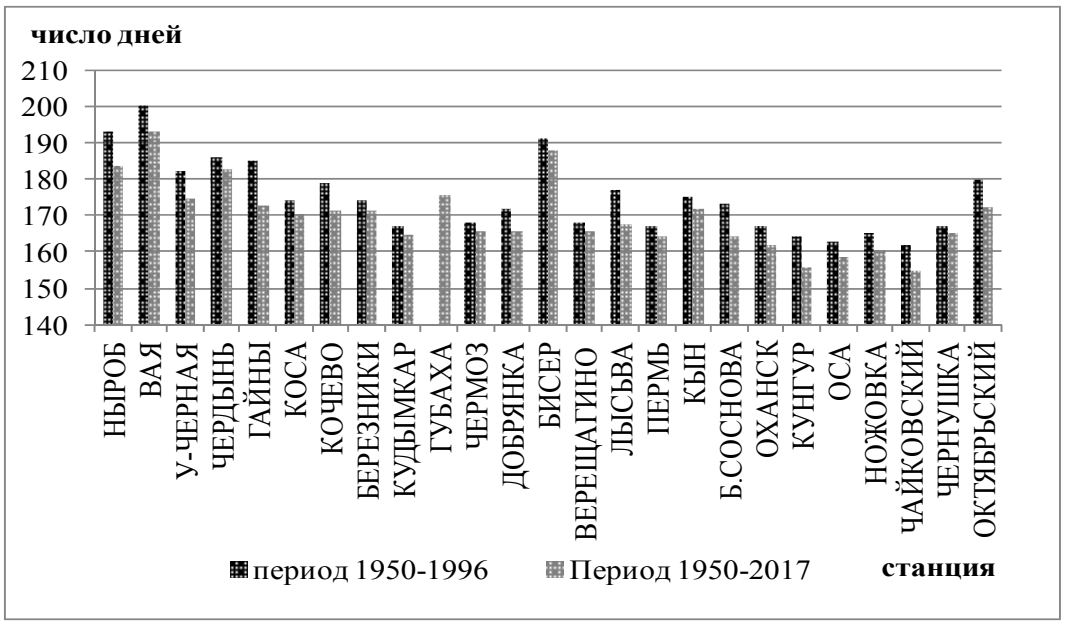


Рис. 2. Изменение средней продолжительности залегания УСП на метеостанциях Пермского края

Ежегодная изменчивость продолжительности залегания устойчивого снежного покрова представлена на рисунке 3. Тенденция к уменьшению продолжительности залегания, которая начала проявляться в 80-е гг. XX в., в конце 00-х гг. сменилась на обратную, что связано с изменением условий образования УСП.



Рис. 3. Продолжительность залегания УСП в Пермском крае (1950–2017 гг.), число дней

Высота снежного покрова

Высота снежного покрова, в зависимости от местоположения метеостанции, от года к году, изменяется в значительных пределах. Кроме того, различия просматриваются и при выборе того или иного периода наблюдений. Пример таких особенностей приведен на рис. 4.

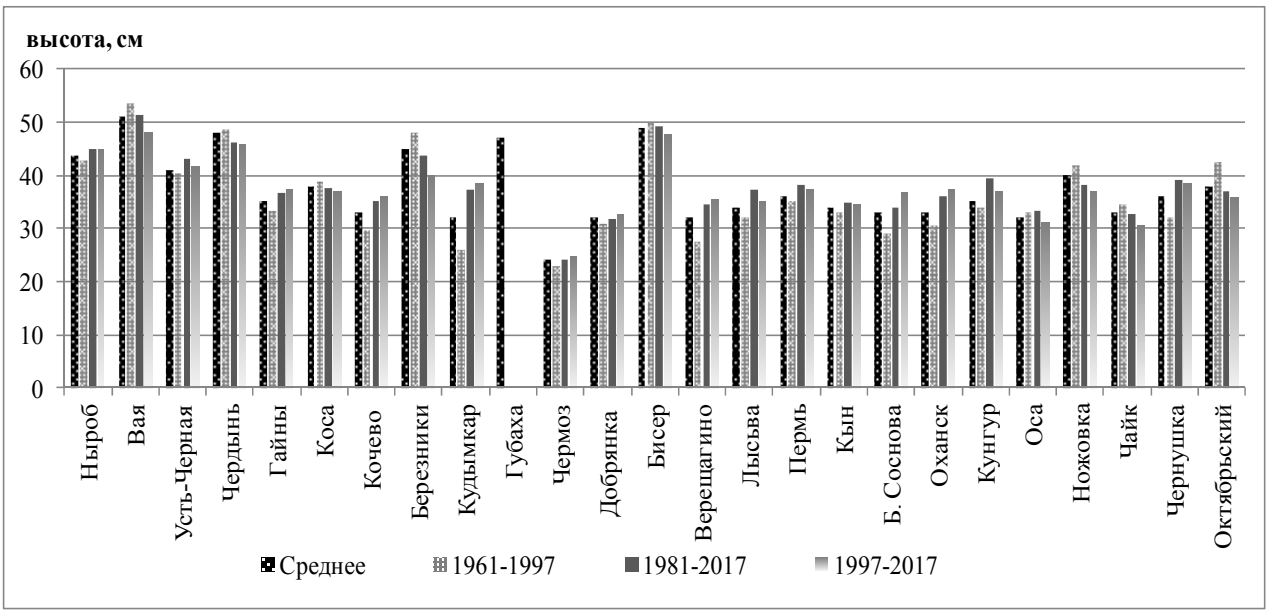


Рис. 4

Средняя высота снежного покрова на территории Пермского края составляет 37 см. Как и в случае с продолжительностью залегания УСП, прослеживается закономерность в меридиональном распределении высот – постепенное уменьшение с севера, северо-востока на юг, юго-запад. Однако стоит отметить, что основные минимумы средней высоты зафиксиро-

ваны на центральных метеостанциях – Добрянка, Оса, Верещагино (32 см) и, в частности, Чермоз (24 см), что можно объяснить влиянием рельефа местности и ветрового режима.

Рассматривая статистически сравнимые между собой периоды 1961–1997 и 1981–2017 гг., можно увидеть, что по данным 15 станций (60 %) отмечается рост средней высоты снежного покрова, а по данным 9 (36 %) – уменьшение. Период 1997–2017 гг. приведен для представления о том, как и с какой скоростью изменялась средняя ВСП на территории Пермского края в последние годы. Станция Губаха до 1992 г. функционировала как наблюдательный пост.

Более подробные характеристики приведены в таблице 2. Видно, что максимальная высота снежного покрова зарегистрирована на станции Бисер – 150 см, близки по значениям станции Вая, Березники (128 см) и Губаха (133 см), минимальная – Чернушка (19 см) и Кудымкар (21 см).

Из анализа максимальной высоты снежного покрова, аналогичного сравнению, примененному к средним высотам, следует, что средние максимумы увеличились на 19 станциях или в 76 % случаев, уменьшение наблюдалось на 5 станциях (20 %) – Вая, Березники, Ножовка, Чайковский, Октябрьский. Последние три станции расположены на юге Пермского края. Кроме того, на 75 % станций наблюдается некоторое смещение достижения максимальной высоты снежного покрова с февраля на март.

Таблица 2

Статистические характеристики высоты снежного покрова
на метеостанциях Пермского края (осреднение по декадам)

Метеорологическая станция	Наибольшая высота за зиму, см			Средняя высота, см
	средняя	максимальная	минимальная	
НЫРОБ	82	113	50	44
ВАЯ	97	128	70	51
У-ЧЕРНАЯ	76	104	42	41
ЧЕРДЫНЬ	89	119	50	48
ГАЙНЫ	66	95	41	35
КОСА	72	99	42	38
КОЧЕВО	63	91	30	33
БЕРЕЗНИКИ	83	128	48	45
КУДЫМКАР	59	97	21	32
ГУБАХА	92	133	67	47
ЧЕРМОЗ	45	84	26	24
ДОБРЯНКА	59	85	37	32
БИСЕР	93	150	54	49
ВЕРЕЩАГИНО	57	100	24	32
ЛЫСЬВА	60	91	32	34
ПЕРМЬ	67	106	45	36
КЫН	64	94	37	34
Б. СОСНОВА	59	93	30	33
ОХАНСК	60	96	31	33
КУНГУР	66	106	25	35
ОСА	59	97	28	32
НОЖОВКА	72	103	44	40
ЧАЙКОВСКИЙ	61	86	37	33
ЧЕРНУШКА	66	115	19	36
ОКТЯБРЬСКИЙ	75	116	48	38
Средняя по краю	70	105	39	37

Выводы

1. Физико-географические особенности территории Пермского края оказывают существенное влияние на условия образования, разрушения и продолжительности залегания устойчивого снежного покрова, вызывая изменения с зонального на меридиональное распределение характеристик на северо-востоке и юго-западе края.

2. В последние годы отмечается тенденция к увеличению продолжительности залегания УСП и средних максимальных высот на большей части станций.

3. При неизменной средней величине высоты снежного покрова происходит перераспределение средних высот: уменьшение высот на северо-востоке и юге края и их прирост в центральной части.

4. Необходимо продолжать изучение влияния рельефа и микроциркуляционных особенностей территории Пермского края на характеристики снежного покрова.

Список литературы

1. Климатология : учебник / О. А. Дроздов [и др.]. Л. : Гидрометеоиздат, 1989. 568 с

2. Сухова О. В. Пространственно-временная изменчивость основных характеристик снежного покрова на территории Пермского края // Геогр. Вестн. 2012. № 3. С. 64–71.

3. Шкляев В. А., Шкляева Л. С. Статистические характеристики устойчивого снежного покрова в Пермском крае // Геогр. вестн. 2010. № 4. С. 68–74.

УДК 551.58(571.53)

Климатические условия на территории Иркутской области

И. В. Латышева[1] (ababab1967@mail.ru), И. С. Будуева[2] (BudуevaIs@mail.ru), А. С. Вушнаева[2] (nv@mail.ru)

[1] Иркутский государственный университет, Иркутск,
[2] Иркутское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, Иркутск

Аннотация. Проведено исследование аномалий температуры воздуха и атмосферных осадков в г. Иркутске в 1887–2016 гг., на основе которого оценены скорости изменения температурно-влажностного режима в различные сезоны года. Проанализированы многолетние изменения агрометеорологических показателей в теплый период года, которые характеризуются уменьшением продолжительности «климатического лета» и беззаморозкового периода, что негативно сказывается на развитии сельского хозяйства территории Иркутской области в последние 20 лет. На фоне преобладающей тенденции повышения температур, сопровождаемой ростом атмосферного давления и геопотенциальных высот, увеличивается вероятность процессов блокирования, и связанных с ними засушливых явлений в летние месяцы и аномально низких температур в холодное время года.

Ключевые слова. Иркутская область, температура воздуха, атмосферные осадки, зональный и меридиональный ветер, блокирование.

Введение

Современные тенденции изменений климата в каждом регионе слагаются из двух составляющих – глобальных вариаций, которые носят крупномасштабный характер, и региональных, обусловленных спецификой региональных синоптических особенностей на фоне неоднородного рельефа [3; 4]. Территория Иркутской области – уникальный регион для исследования климата. Во-первых, он расположен в глубине материка вблизи континентальных центров действия атмосферы – Азиатского антициклона и Центрально-Азиатской депрессии, и в тоже время подвержен влиянию циклонической деятельности и океанического переноса. Учитывая большое количество факторов, темпы изменений климата в Иркутской области – одни из наиболее высоких не только на территории России, но и Северного полушария в целом [1].

Какие метеорологические параметры наиболее чувствительны к изменениям климата? На основании термодинамического уравнения Клапейрона-Клаузиуса увеличение температуры сказывается на увеличении количества водяного пара, и как следствие, количества атмосферных осадков [5]. Поэтому чаще всего для количественной оценки изменений климата используют температуру воздуха и атмосферные осадки [2; 6]. Для характеристики современных изменений климата в качестве примера выбрана метеорологическая станция Ир-

кутск, которая имеет один из наиболее длинных временных рядов регулярных наблюдений в Иркутской области, порядка 130 лет. Данный период был условно разбит на пять равных временных отрезков (~26 лет), что почти соответствует климатическим периодам длительностью порядка 30-летий. Рассматривалось пять временных периодов (I – 1887–1912 гг., II – 1913–1938 гг., III – 1939–1964 гг., IV – 1965–1990 гг., V – 1991–2016 гг.). Рассчитывалось среднее значение температур осадков и их разности по отношению к предыдущему периоду.

Обсуждение результатов

Как показало проведенное исследование, во все рассмотренные периоды отмечался рост средней годовой температуры в г. Иркутске (рис. 1). Однако в последние 26 лет скорость роста температур практически равна предшествующим 78 годам, т. е. фактически беспрецедентная. Если в период начала организации регулярных наблюдений в Иркутске (начало 1880-х гг.) средняя годовая температура была отрицательной и составляла -1,3 °С, то с 1988 года преобладают положительные значения и в настоящее время она составляет 1,2 °С. В многолетних изменениях годовых сумм атмосферных осадков аналогично температуре воздуха суммы осадков растут по отношению к предыдущим периодам, но скорость роста в последние десятилетия уменьшатся. Если в момент начала метеорологических наблюдений в Иркутске выпадало 376 мм в год атмосферных осадков, то сейчас эта сумма возросла до 475 мм, т. е. на 99 мм, что составляет примерно 20 %.

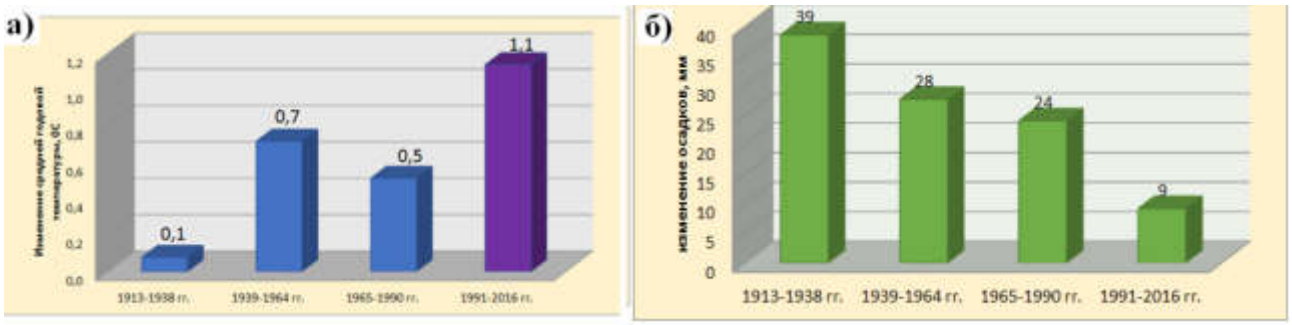


Рис. 1. Изменение средней годовой температуры (а) и годовой суммы осадков (б) по отношению к предыдущему периоду в г. Иркутске

В сезонном отношении в настоящее время во все месяцы года, по отношению к предшествующему периоду, температуры воздуха растут, наиболее быстро в феврале (рис. 2). Обращает внимание смена тенденций падения температур в летние месяцы 1965–1990 гг. на тенденцию роста в настоящий период. В изменениях месячных сумм атмосферных осадков в г. Иркутске также отчетливо выделяются летние месяцы, причем в последние годы в июне и августе суммы атмосферных осадков увеличиваются, а в июле уменьшаются.

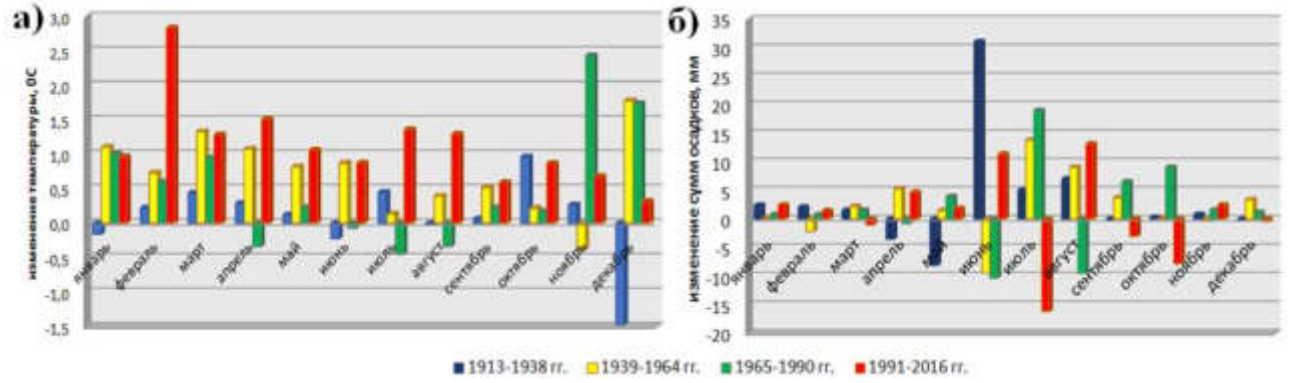


Рис. 2. Изменение средней месячной температуры (а) и сумм атмосферных осадков (б) по отношению к предыдущему периоду в г. Иркутске

Таким образом, современные тенденции изменения климата в г. Иркутске характеризуются увеличением годовых сумм осадков на фоне роста средних годовых температур. Однако скорость роста температур опережает темпы увеличения количества осадков. Кроме того, в последние десятилетия изменения температурно-влажностного режима более выражены в летние месяцы, тогда как во вторую половину XX века был более выражен рост зимних температур, и отмечалось уменьшение атмосферных осадков летом.

В дальнейшем, рассмотрим, как в условиях наблюдаемых тенденций роста температур изменилась продолжительность периода активной вегетации растений или так называемое «климатическое лето». На рис. 3 представлено изменение даты устойчивого перехода средней суточной температуры воздуха через +10 °С весной и осенью и продолжительность климатического лета за последние 20 лет. За исключением последних трех лет весной переход средней суточной температуры сместился на более поздние сроки, в результате, не смотря на рост летних температур, продолжительность климатического лета за исключением трех последних лет уменьшалась.



Рис. 3. Изменение средней многолетней даты устойчивого перехода средней суточной температуры воздуха через +10 °С весной (а), осенью (б)и продолжительности периода со среднесуточной температурой выше 10 °С (в) на агрометстанции Хомутово в 1998–2017 гг.

Кроме того, проявляется тенденция к смещению даты первого осеннего заморозка на более ранние даты и уменьшение продолжительности беззаморозкового периода (рис. 4).

Таким образом несмотря на повышение летних температур за счет более позднего перехода средней суточной температуры воздуха через +10 °С весной и более ранних наступлений заморозков осенью, на территории Иркутской области за последние 20 лет уменьшается продолжительность «климатического лета» и беззаморозкового периода. Поэтому, несмотря на то, что период активной вегетации растений существенно продолжительнее беззаморозкового периода, часто возникает ситуация, когда заморозок на территории Иркутской области наблюдается в период климатической нормы. Поэтому даже в условиях повышения летних температур территория Иркутской области по-прежнему относится к районам рискованного земледелия.

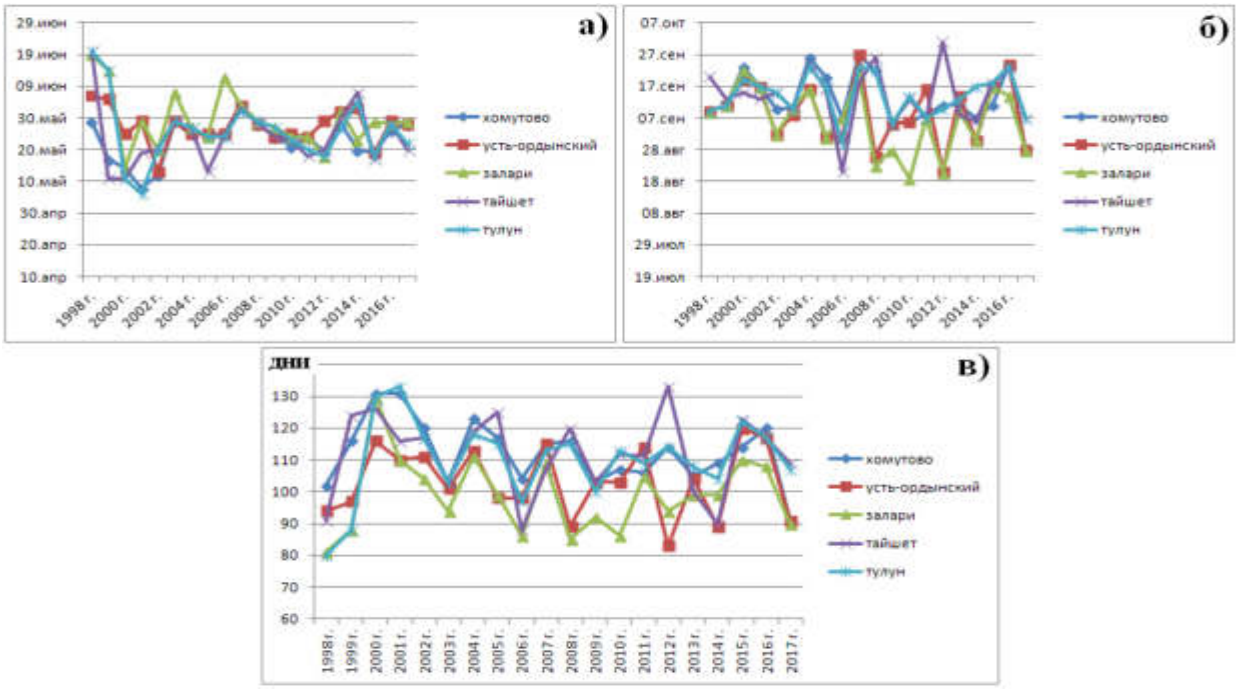


Рис. 4. Изменение средней многолетней даты последнего заморозка (а), первого заморозка (б) и продолжительности беззаморозкового периода (в) на метеостанциях Иркутской области в 1998–2017 гг.

Каковы причины наблюдаемых изменений климата на территории Иркутской области? Носят они локальный или крупномасштабный характер? Исследование аномалий средних месячных температур в начале XXI века указывает на повышение температур, которое носит крупномасштабный характер. Следует отметить, что в теплый период года территория Иркутской области попадает в регион максимального повышения температур на территории Евразии. На высоте 500 гПа (средняя тропосфера), где аномалии геопотенциала отражают как изменение средней температуры в нижнем пятикилометровом слое тропосферы, так и изменение условий цикло- и антициклогенеза, во все месяцы года на территории Иркутской области сохраняется устойчивый геопотенциальных высот (рис. 5). Также именно в теплое время года территория Иркутской области попадает в «эпицентр» максимального роста геопотенциальных высот на территории Евразии. В нижней стратосфере отмечается похолодание.

Таким образом, в значительной толще тропосферы в 2000–2017 гг. над территорией Иркутской области наблюдается рост температур, который наиболее выражен летом и хорошо проявляется в повышенных значениях геопотенциала, что указывает на преобладание процессов антициклогенеза.

Наглядно преобладание антициклогенеза видно по сглаженным по пяти точкам аномалиям средних значений приземного давления, где отчетливо выражена тенденция роста давления на фоне роста приземных температур (рис. 6, *а*). Причем если до 1990-х годов наибольшие темпы повышения отмечались для давления, то в последние годы для температуры воздуха. Более согласовано во времени повышение геопотенциальных высот в средней тропосфере на фоне увеличения температуры воздуха (рис. 6, *б*). Вблизи тропопаузы продолжается рост давления, но практически не изменяются температуры воздуха в последние десятилетия (рис. 6, *в*).

Анализ зональной составляющей ветровых потоков на уровне средней тропосферы (АТ–500 гПа) показал неплохое согласование повышения температуры в Иркутской области на фоне увеличения повторяемости зонального ветра (рис. 7, *а*). В тоже время анализ ветра на высоте струйных течений показал, что в последние годы на территории Иркутской области увеличивается повторяемость как зонального, так и меридионального переноса, что выражается в увеличении числа опасных погодных явлений в регионе.

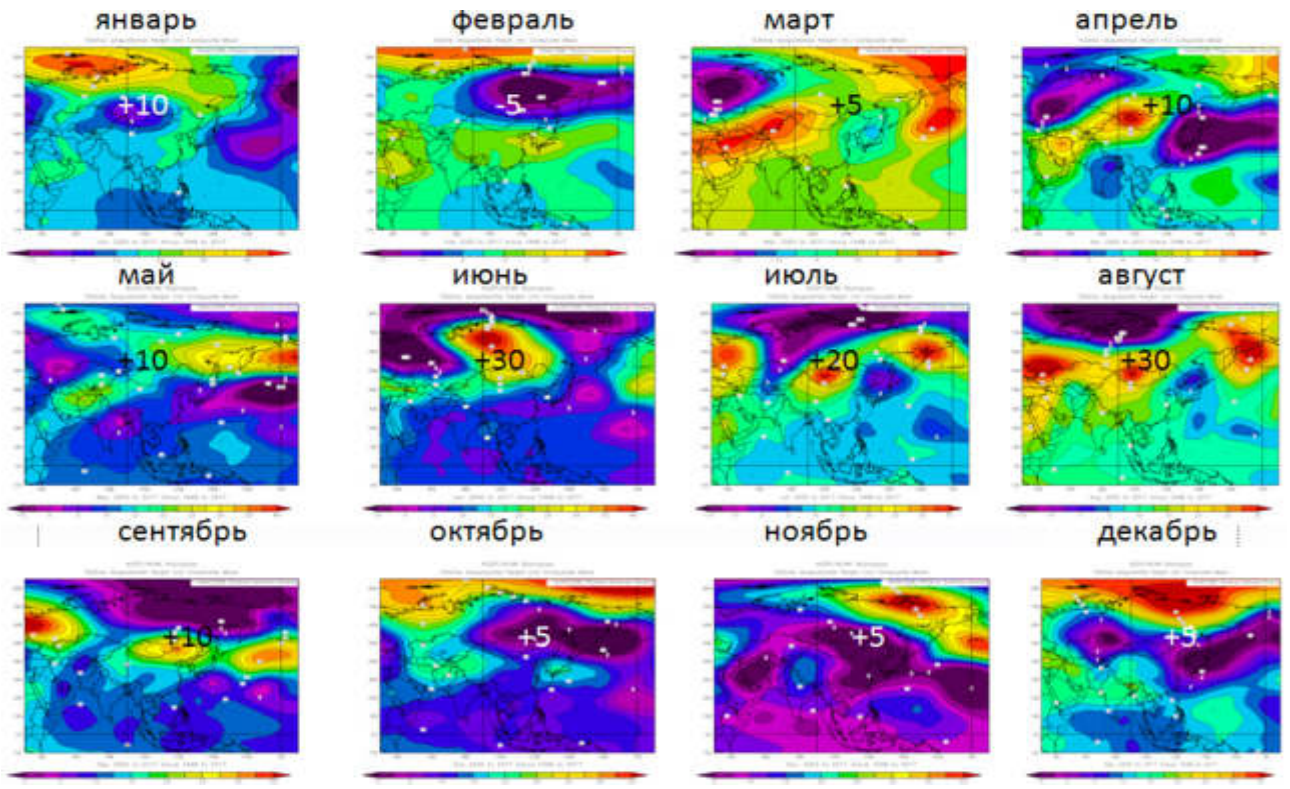


Рис. 5. Аномалии средних геопотенциальных высот АТ-500 гПа в 2000–2017 гг. по отношению к 1948–2017 гг.

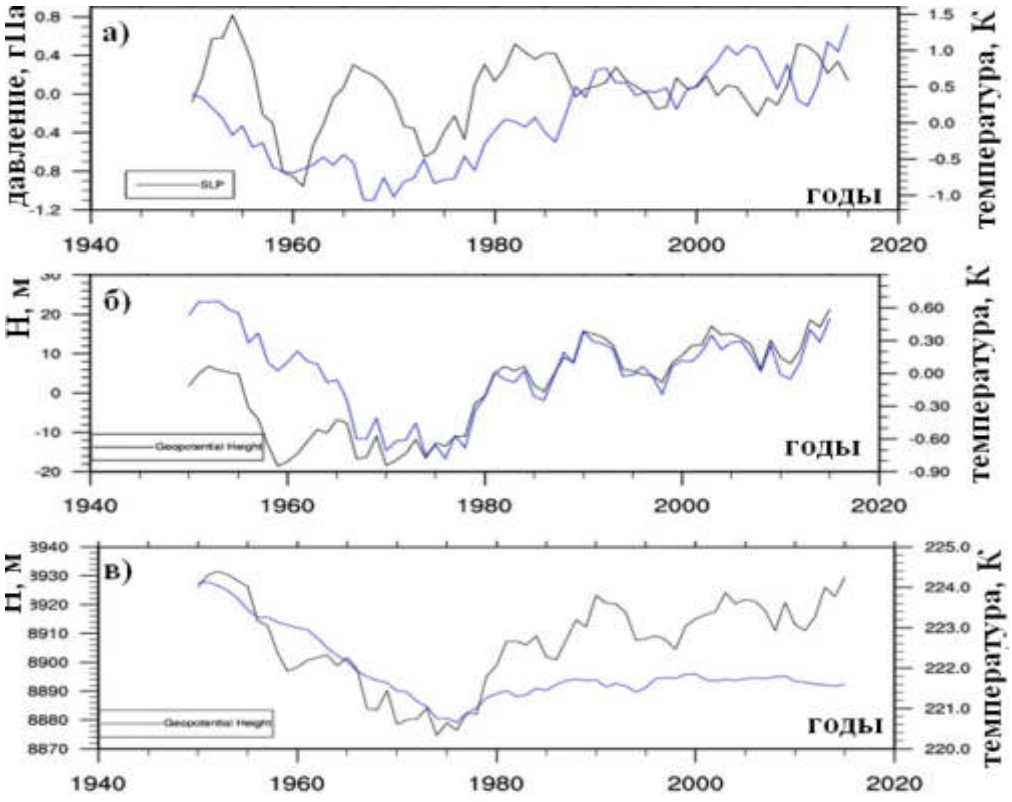


Рис. 6. Аномалии температуры и приземного давления (а), температуры воздуха и геопотенциальных высот АТ–500 гПа (б), температуры воздуха и геопотенциальных высот на АТ–300 гПа (в), осредненные по территории Иркутской области в 1948–2017 гг.

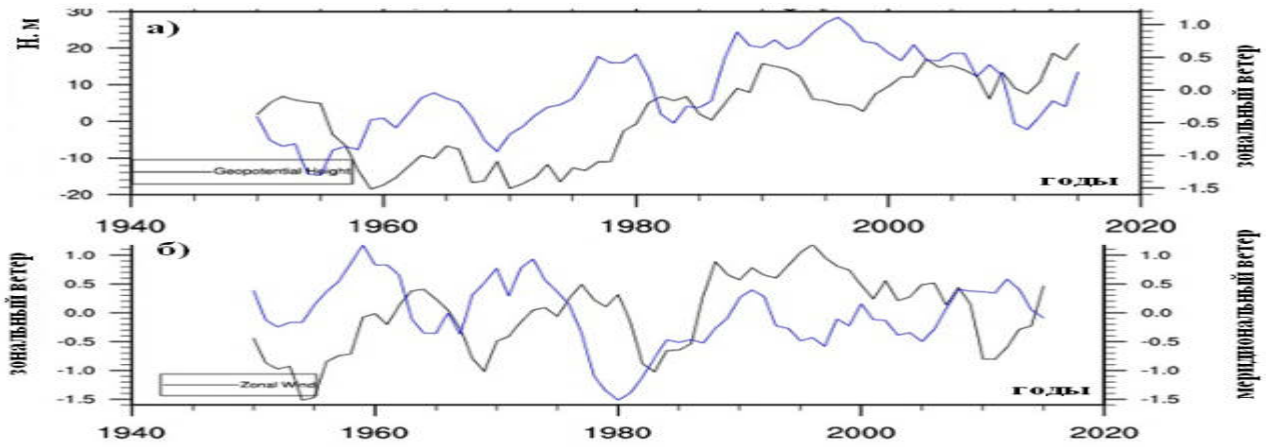


Рис. 7. Аномалии геопотенциальных высот АТ–500 гПа и зонального ветра (а), зонального и меридионального ветра на АТ–300 гПа (б), осредненные по территории Иркутской области в 1948–2017 гг.

Выводы

Таким образом, приведенная статистика подтверждает тесную взаимосвязь региональных погодных аномалий и крупномасштабных климатических изменений последних десятилетий, которые проявляются на территории Иркутской области в высоких темпах роста температур, особенно в летние месяцы, на фоне увеличения количества атмосферных осадков и увеличения вклада зональной и меридиональной составляющих ветра на высотах.

В тоже время на фоне повышения температур происходит повышение атмосферного давления и рост геопотенциальных высот, которые сопровождаются усилением процессов блокирования, и, как следствие, увеличением повторяемости засух в летние месяцы и аномально низких температур в холодное время года.

Список литературы

1. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. М., 2014. 60 с.

2. Сравнительные исследования засух 2010 и 2012 г. на Европейской территории России по метеорологическим MODIS данным / А. Н. Золотокрылин, Т. Б. Титкова, Е. А. Черенкова, В. В. Виноградова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10, № 1. С. 245–253.

3. Сухова М. Г., Журавлева О. В. Динамика изменения температуры воздуха и атмосферных осадков в Чуйской котловине // Изв. вузов. Сев.-Кавказ. регион. Естественные науки. 2017. № 1. С. 124–129.

4. Donat M. G. Updated analysis of temperature and precipitation extreme indices since the beginning of the twentieth century: The HadEX2 dataset // J. Geophys. Res. 2013. Vol. 118. P. 2098–2118.

5. Fyke J., Lenaerts J. T. M., Wang H. Wang Basin-scale heterogeneity in Antarctic precipitation and its impact on surface mass variability // The Cryosphere. 2017. Vol. 11. P. 2595–2609.

6. Rogers C. D. W., Beringer J. Describing rainfall in northern Australia using multiple climate indices // Biogeosciences. 2017. Vol. 14. P. 597–615.

УДК 551.511.33:551.521.31(470.53)

Особенности генерации доступной потенциальной энергии вследствие притоков коротковолновой радиации в атмосфере

И. Л. Лукин (gdtyche@gmail.com)

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

Аннотация. Статья посвящена исследованию генерации доступной потенциальной энергии (ДПЭ) за счет притоков тепла, обусловленных поглощением коротковолновой радиации в атмосфере. Результаты проведенного исследования свидетельствуют о влиянии высоты солнца, массовой доли водяного пара и облачности на генерацию ДПЭ вследствие притока коротковолновой радиации.

Ключевые слова: доступная потенциальная энергия, коротковолновая радиация, водяной пар, облачность.

Энергетический подход в изучении атмосферы обеспечивает единую шкалу при количественной оценке вклада изучаемых процессов в развитие общей циркуляции атмосферы, позволяет глубже понять механизмы этого развития и его прогнозирования, а также является важным этапом в разработке способов активного воздействия на атмосферные процессы [1; 3; 7].

Доступная потенциальная энергия (ДПЭ) атмосферы определяется как разность между полной потенциальной энергией и энергией в устойчивом гидростатическом равновесии. Она представляет собой ту часть полной потенциальной энергии, которая может быть преобразована в кинетическую энергию в рассматриваемой замкнутой системе [2; 4; 7].

В настоящей работе рассмотрен вопрос о генерации ДПЭ вследствие притоков коротковолновой радиации в атмосфере, по методике, изложенной в начатых нами исследованиях о генерации ДПЭ [5, 6]. Расчет генерации ДПЭ производился в пределах области между 45—65 ° с. ш. и 45—82 ° в. д., с шагом 10х10 км на 19 изобарических поверхностях (от 1000 *гПа* до 100 *гПа* через 50 *гПа*) через каждые 3 часа по исходным данным о температуре воздуха (К), массовой доли водяного пара (*кг*/*кг*), альбедо подстилающей поверхности, полученным в Пермском государственном национальном исследовательском университете по данным счета мезомасштабной модели WRF (Weather Research and Forecasting). В результате расчета были получены поля суммарной генерации ДПЭ во всей толще атмосферы.

Центральная часть исследованной области проходит по меридиану 60 ° в. д., что объясняет максимальные и наибольшие средние значения генерации ДПЭ максимальной средней высотой Солнца (9 *ч* ВСВ) для всей территории расчета и наоборот, при полном отсутствии Солнца, генерации не наблюдается. Таким образом, прослеживается прямая зависимость от высоты Солнца.

Было выявлено появление отдельных очагов генерации на фоне, в целом, незначительных ее значений, связанных с безоблачными пространствами, зонами наибольшего влагосодержания и в областях с развитой по вертикали облачностью.

Отсутствие отрицательных значений говорит о том, что ДПЭ может только генерироваться за счет притоков коротковолновой радиации.

Анализ вертикального распределения генерации ДПЭ показал наличие наибольших значений в слое 900–850 гПа (0,4 Вт/м^2), с резким уменьшением к слою 700–650 гПа (около 0,1 Вт/м^2), выше которого наблюдается плавное убывание практически до нуля в верхних слоях, что объясняется двумя основными факторами: облачностью и особенностями вертикального распределения поглощающих масс водяного пара и углекислого газа.

На основе проделанной работы можно сформулировать следующие выводы:

1. За счёт притоков коротковолновой радиации происходит только генерация ДПЭ.

2. Наибольших значений генерация ДПЭ в атмосфере исследованной области достигает в срок 9 *ч* ВСВ.

3. Наибольший вклад в генерацию ДПЭ вносят слои атмосферы от 950 до 850 гПа.

4. Максимумы генерации наблюдаются на безоблачных пространствах с наибольшим влагосодержанием и в областях с развитой по вертикали облачностью.

Список литературы

1. Ван Мигем Ж. Энергетика атмосферы. Л. : Гидрометеоиздат, 1977. 327 с.
2. Калинин Н. А. Исследование доступной потенциальной энергии циклонов умеренных широт // Метеорология и гидрология. 1997. № 1.
3. Калинин Н. А. Мониторинг, моделирование и прогноз состояния атмосферы в умеренных широтах /Перм. гос. нац. исслед. ун-т. Пермь, 2015. 308 с.
4. Калинин Н. А., Ветров А. Л. Генерация доступной потенциальной энергии вследствие крупномасштабной конденсации в циклонах умеренных широт // Метеорология и гидрология. 2002. № 4.
5. Калинин Н. А., Лукин И. Л. Генерация доступной потенциальной энергии вследствие притока длинноволновой радиации в атмосфере // Метеорология и гидрология. 2014. № 3.
6. Калинин Н. А., Лукин И. Л. Генерация доступной потенциальной энергии вследствие притока коротковолновой радиации по данным модели WRF // Геогр. вестн. 2015. № 3.
7. Лоренц Э. Н. Природа и теория общей циркуляции атмосферы. Л. : Гидрометеоиздат, 1970. 260 с.

УДК 551.583.13

Климат города Иркутска: современные колебания температурных характеристик последних десятилетий

Е. В. Максютова (emaksyutova@irigs.irk.ru)

Институт географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, Иркутск

Аннотация. Для территории города и его окрестностей за период 1981–2010 гг. определены показатели теплообеспеченности. Самыми теплыми, с суммой активных температур выше 10 °С от 1400–1600 °С, являются наиболее освоенные и заселенные широкие долины. Отепляющего влияние озера Байкал и города сказывается на сумме отрицательных температур от -1800 до -2000 °С на достаточно большой территории, включающей город и побережье водохранилища до озера. По условиям увлажнения, используя гидротермический коэффициент Г. Т. Селянинова, отмечается увеличение повторяемости засух и засушливых лет. Экстремально теплые вегетационные периоды года чаще отмечаются с 2000-х годов.

Ключевые слова: данные наблюдений, суммы температур выше 10 °С, суммы отрицательных температур, гидротермический коэффициент Г. Т. Селянинова, экстремальные условия тепла и влаги

Климат г. Иркутска и его окрестностей определяется сложным сочетанием положения в центре Евроазиатского материка и смягчающим влиянием оз. Байкал и Иркутского водохранилища. Одной из важнейших характеристик климата является температура воздуха и ее колебания.

Данные наблюдений указывают на наиболее значительное потепление за последние десятилетия именно на территории Сибири, а годовые изменения определяются колебаниями зимней температуры [3; 4]. В зимний период среднемесячные величины температуры воздуха имели положительное отклонение за счет сокращения числа дней с низкими температурами минус 25, минус 30 °С и ниже. На фоне ощутимого повышения зимних температур отмечается и некоторое сокращение продолжительности отопительного периода. Учитывая циклический характер изменения температурного режима говорить в целом о сокращении расходов тепловой энергии на обогрев помещений преждевременно [8].

Цель работы – определить показатели теплообеспеченности (суммы температур выше 10 °С, суммы отрицательных температур) на территории города и его окрестностей; для города Иркутска выделить годы с экстремальными условиями тепла в вегетационный (май-сентябрь) и зимний (ноябрь-март) периоды года. Для выделения экстремальных величин использовались отклонения на 1,5 среднеквадратического отклонения σ и более, которые выходят за пределы полуамплитуды наблюдаемых колебаний элементов климата и относятся к сезонным климатическим экстремумам [5].

Исходными данными послужили наблюдения месячного разрешения из базы данных ВНИИГМИ−МЦД [1; 2] для гидрометеорологических станций (ГМС) Иркутск, Исток Анга-

ры, Патроны, Бохан, Хомутово, Усть-Ордынский, а также ориентировочно Подкаменная и Смоленщина [7].

По данным наблюдений на ГМС Иркутск отклонения средней месячной температуры воздуха за последние 30 лет (1981–2010 гг.) относительно предыдущего многолетнего периода до 1980 г. [6] были положительными во все месяцы года, а превышения составили от 0,6–1,7 °С в мае–сентябре до 2,8–3,7 °С в декабре–феврале, а годовые отклонения − 1,8 ° С.

Для территории города и его окрестностей за период 1981–2010 гг. определены показатели теплообеспеченности. Самыми теплыми, с суммой активных температур выше 10 °С от 1400–1600 °С, являются наиболее освоенные и заселенные широкие долины. Ландшафты склонов и плато со светлохвойной растительностью ограничены преимущественно суммами температур 1200–1400 °С. Более холодные с суммами температур 1000–1200 °С относятся к побережью оз. Байкал, а также к горным участкам с темнохвойной таежной растительностью.

Важное практическое значение представляет дифференциация этих территорий по условиям увлажнения. В качестве относительной оценки территории по условиям увлажнения был использован гидротермический коэффициент Г. Т. Селянинова (ГТК) за май-сентябрь 1981–2010 гг. Средние многолетние величины ГТК составляют от 1,2 в мае до 2,0 в июле. В отдельные годы при недостатке влаги и высоких температурах воздуха возникают засушливые явления. В мае отмечалось максимальное количество как засушливых лет (ГТК < 0,8), так и лет с сильной засухой (ГТК < 0. 4). За последние десятилетия увеличивается повторяемость засушливых условий в мае (таблица).

Таблица 1

Повторяемость засух и сильных засух (%) на ГМС Иркутск за различные периоды

Интенсивность засухи	Месяцы				
	V	VI	VII	VIII	IX
	1892–1980 гг.				
ГТК < 0,8	22	18	9	6	10
ГТК < 0,4	7	6	2	0	1
	1981–2010 гг.				
ГТК < 0,8	40	13	13	10	3
ГТК < 0,4	10	0	0	0	0

По характеру увлажнения в мае территории города и его окрестностей подразделяются на очень засушливую (ГТК < 1) – лесостепные участки, засушливую (ГТК =1÷1,5) – территория города и долин, влажную (ГТК >1,5) – побережье оз. Байкал и горные участкам с темнохвойной таежной растительностью.

Дифференциация ресурсов холода в окрестностях города формируется под воздействием ряда факторов, среди которых часто местные факторы выступают ведущими. Самые теплые участки (с суммой температур ниже -1800 °С) относятся к побережью оз. Байкал. Наложение отепляющего влияния озера и города сказывается на сумме отрицательных температур от -1800 до -2000 °С на достаточно большой территории, включающей территорию города и побережье водохранилища до озера.

На лесостепных участках, за пределами города, суммы температур снижаются до -2400 °С и ниже. Ландшафты склонов и плато со светлохвойной растительностью ограничены преимущественно суммами температур -2000…-2200 °С.

По данным наблюдений ГМС Иркутск были выделены годы с экстремальными условиями в вегетационный период года. Это экстремально холодные условия − 1983 и 1989 гг., когда средняя температура воздуха за сезон была ниже среднемноголетних условий на 2,1 и 1,7 σ соответственно. Экстремально теплые условия наблюдались в 2007 и 2015 гг. − средняя температура воздуха за сезон составила 15,2–15,6 °С и была выше среднемноголетних условий на 1,6–2,1 σ. В экстремально теплый и экстремально сухой 2002 г. средняя температура воздуха за сезон составила 15,6 °С (2,1σ), а осадков выпало мало 218 мм (-1,7σ). Экстремально влажным был 1994 г., когда осадков выпало 610 мм при норме в 356 мм.

Для зимних сезонов выделяется экстремально теплый 2001/2002 год, когда средняя сезонная температура воздуха была (-9,0) °С. В экстремально холодные зимы 1984/1985, 2000/2001, 2009/2010 гг. среднесезонная температура составляла -15,6…-16,2 °С (ГМС Иркутск) и была ниже средней многолетней на 1,8 и 2,2 σ соответственно.

Экстремально мало осадков 40 мм выпало в зиму 1989/1990 года. Экстремально много (около 100 мм) осадков выпало в зиму 1980/1981, 2003/2004 гг.

В целом, в Иркутске и его окрестностях в условиях современных температурных колебаний отмечается снижение числа дней с низкими температурами, увеличение повторяемости засух и засушливых лет. Экстремально теплые вегетационные периоды года чаще отмечаются с 2000-х годов.

Список литературы

1. Булыгина О. Н., Разуваев В. Н., Трофименко Л. Т., Швец Н. В. Описание массива данных среднемесячной температуры воздуха на станциях России. Свидетельство о гос. регистрации базы данных № 2014621485. URL: http://meteo.ru/data/156-temperature#описание-массива-данных.

2. Булыгина О. Н., Разуваев В. Н., Коршунова Н. Н., Швец Н. В. Описание массива данных месячных сумм осадков на станциях России. Свидетельство о гос. регистрации базы данных № 2015620394. URL: http://meteo.ru/data/158-total-precipitation#описание-массива-данных

3. Груза Г. В., Ранькова Э. Я. Оценка предстоящих изменений климата на территории Российской Федерации // Метеорология и гидрология. 2009. № 11. С. 15–29.

4. Кабанов М. В. Сезонные закономерности наблюдаемого потепления в Сибири // Оптика атмосферы и океана. 2009. № 1. С. 7–10.

5. Ляхов М. Е. Климатические экстремумы в центральной части европейской территории СССР в XIII−XX вв. // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1984. № 6.С. 68–74.

6. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Сер. 3, Многолетние данные. Ч. 1−6. Вып. 22. Л. : Гидрометеоиздат, 1991. 604 с.

7. Справочник по климату СССР. Вып. 22, Ч. 2. Л. : Гидрометеоиздат, 1966. 360 с.

8. L. B. Bashalkhanova and E. V. Maksyutova Influence of Temperature Variations During a Cold Period on the Conditions of Life of the Population in East Siberia //Geography and Natural Resources. 2014. Vol. 35, N 1. P. 55–62.

УДК 551. 513(57. 2)

Исследование мезометеорологических процессов самоочищения воздушной среды Байкальской котловины

П. А. Найденов (pavelnaidenov@geogr.isu.ru)

Иркутский государственный университет, Иркутск

Аннотация. Приведены некоторые результаты исследований ветрового режима Байкальской котловины как важнейшего фактора самоочищения атмосферы.

Ключевые слова: озеро Байкал, ветровой режим, самоочищение атмосферы.

Актуальность тематики работы обусловлена рядом факторов и прежде всего недостаточной изученностью особенностей природных процессов самоочищения воздушной среды территорий котловинного типа со сложным рельефом с учетом действия переменных внешних течений. Актуальность предлагаемого исследования многократно увеличивается в условиях роста антропогенных выбросов газовых и твердых загрязняющих веществ при ускоряющемся современном расширении промышленного и сельскохозяйственного производства. Эти вопросы тесно связаны с необходимостью своевременного принятия мер по охране природы в случае ухудшения экологической обстановки и возникновении критических ситуаций.

В рамках проведения исследования впервые исследуются скорости объемного взаимодействия котловинного воздуха с внешними потоками и статистические связи термодинамических характеристик, влияющих на механизмы самоочищения воздушной среды. Реалистичность результатов основана на использовании накопленных (архивных и справочных)

данных метеорологических характеристик Байкальского региона и фонового воздействия внешних факторов. На основе обобщенного опыта исследований ветрового режима Байкальской котловины впервые предложена методика исследований и оценки механизмов очищения воздушной среды Байкальской котловины и их предельных возможностей в условиях максимумов антропогенной нагрузки.

Основной целью данного исследования является выявление особенностей и предельных возможностей природного механизма очищения воздушной среды Байкальской котловины от естественного и антропогенного загрязнения. Для этого необходимо оценить динамические характеристики действующих природных процессов очищения воздуха Байкальской котловины и их потенциал. Затем следует разработать методику исследований механизма очищения воздушной среды Байкальской котловины, используя накопленные (архивные и справочные) данные метеорологических характеристик региона и фонового воздействия внешних факторов. Также нужно построить физическую модель природного механизма, позволяющего количественно оценить фактический потенциал самоочищения воздуха котловины для определенных погодных и климатических условий.

Воздушная среда Байкальской котловины со всех окружена склонами гор. Исключением являются только район дельты Селенги, а также выходы долин крупных рек, таких как Баргузин, Верхняя Ангара и Ангара. С Северо-западной стороны вдоль озера тянутся склоны Приморского и Байкальского хребтов. На Юго-востоке это хребты Хамар-Дабан, Улан-Бургасы и Баргузинский. Такая форма рельефа позволяет сравнить Байкальскую котловину с вытянутым карьером, длина которого составляет около 650 км, средняя ширина – 40 км, а глубина, если считать от поверхности воды, от 500 метров до 1,5 километров.

Необходимость изучения метеорологический режима карьеров и, главным образом, особенности циркуляции воздуха в них вызвали к жизни новую отрасль прикладной метеорологии – микроклимат карьеров. Специалисты горного дела называют эту дисциплину аэрологией карьеров. Исследования в этой области ведутся разными группами специалистов примерно с 60-х годов двадцатого века. Основной движущей силой данных исследований является широкое развитие открытого способа добычи полезных ископаемых и вместе с тем необходимостью повышения производительности труда, безопасности работ, здоровье горнорабочих и многого другого.

В настоящее время разработано множество способов как интенсификации естественного проветривания воздушной среды карьеров, так и её принудительного продувания. Следует отметить работы специалистов горной промышленности: А. С. Морина, М. М. Конорева, А. А. Скочинского, В. С. Никитина, Н. В. Мельникова, В. В. Ржевского, К. Н. Трубецкого. Значительный вклад в решение теоретических и практических вопросов проблемы искусственного проветривания карьеров внесли Ф. А. Абрамов, В. С. Азаров, А. А. Бакланов, В. И. Белоусов, П. В. Бересневич, Н. З. Битколов, М. В. Блонский, ЯЗ. Бухман, А. Д. Вассерман, А. А. Вершинин, О. С. Гершун, Ю. В. Гуль, Б. Я. Дробот, В. М. Дубенюк, В. И. Еремеев, В. В. Забелин, А. В. Зберовский, В. И. Звяга, И. И. Иванов, Г. В. Калабин, К В. Кочнев, В. И. Куликов, О Б. Левинский, С И. Луговский, Е. Г. Максимов, В. А. Михайлов, Е. Г. Морозов, П. И. Мустель, Г. Ф. Нестеренко, А. И. Павлов, Э. В. Парахонский, О. Ю. Ригина, В. А. Рогалев, С. М. Росляков, Б. А. Семененко, В. В. Силаев, В. И. Сытенков, К. З. Ушаков, Н. Г. Фатуев, С. С. Филатов, Б. Д. Чижов, П. Ч. Чудаков, Э. Я. Шмалько и многие другие [1].

В то же время силами специалистов ГГО им. Воейкова было проведено множество метеорологических экспедиций на карьеры. В ходе исследований были использованы всевозможные метеорологических методы, начиная от анализа традиционных наблюдений на метеостанциях и заканчивая шаропилотными и самолётными наблюдениями. Значительный вклад внесли П. А. Воронцов, Н. З. Битколов, В. И. Селицкая, И. И. Честная, Е. В. Петрова, Н. Ф. Белов, Л. В. Безлюдова, Л. А. Хандожко, Е. М. Егоров, И. И. Иванов, Н. С. Тюнякина, А. А. Кислицкий, Ф. М. Силин и многие другие [2].

Конечно, работа в этой области метеорологии ведётся и за рубежом. Особенно продвинулись учёные из США, Канады и Германии. Отечественные авторы чаще всего ссылаются на результаты исследований именно этих специалистов [3].

Очевидно, что в рамках исследования микроклимата карьеров была проведена большая работа. Однако невозможно напрямую применить все эти наработке к воздушной среде Байкальской котловины. Выделим несколько причин:

1. Размеры исследуемого объекта во многом несоизмеримы. Обычно ширина рукотворных карьеров относится к их глубине, как два к одному, иногда достигается соотношение пять к одному. В Байкальской котловине те же соотношения порядка сорока к одному, если рассматривать поперечные сечения. Таким образом, по совокупности геометрических параметров, котловина не может быть отнесена к категории глубоких или сверхглубоких карьеров по классификации горного дела.

2. Склоны карьеров для добычи полезных ископаемых обычно имеют одинаковый уклон, лишены растительности и не имеют выходящих к ним долин. Склоны Байкальской котловины, напротив, имеют различную подстилающую поверхность, различный уклон, иногда переходящий в равнину, а также изрезаны долинами рек и ущельями

3. Воздушная среда Байкальской котловины расположена над огромной массой воды озера Байкал

4. Байкальская котловина имеет в длину около 650 км и вытянута практически вдоль меридиана. Такое расположение способствует высокой контрастности климатических особенностей между северной и южной частью озера.

Все эти особенности оказывают большое влияние на особенности климата Байкальской котловины и в частности на её продуваемость. Очевидно, что процессы очищения атмосферы над Байкалом происходят только естественным образом, без привлечения организационных, технологических и технических средств, используемых в карьерах. Положительное или отрицательное влияние названных особенностей котловины ещё предстоит выяснить.

На рис. 1 представлены исследуемые профили рельефа Байкальской котловины. Кроме того, на рис. 1 указаны точки, для которых имеются данные Реанализа Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды. Исследуемый период с 1979 г. по настоящее время.

В качестве физической модели Байкальской котловины для измерения объёмного расхода воздуха используется горизонтальный полуцилиндр переменного сечения с максимальной глубиной 3 км и длиной 650 км. Данная физическая модель с указанием площадей сечений представлена на рис. 2.

В табл. 1 приведены расчёты по расходу воздуха при продольном направлении ветра. Модули скорости по высоте здесь представлены в виде модельных эпюр для трёх случаев: 1; 5 и 10 м/с на высоте 10 м. Закон распределения логарифмический. Модельные эпюры скоростей представлены на рис. 2.

Таблица 1

Расчёты по расходу воздуха при продольном направлении ветра

		Модуль скорости на высоте 10 м (м/с)	1	5	10
Площади сечений (км^2)		Средние модули скорости эпюр (м/с)	1,68	8,41	16,83
121,5		Расходы через каждое сечение (км^3)	0,20	1,02	2,04
93,5			0,16	0,79	1,57
110			0,19	0,93	1,85
167,4			0,28	1,41	2,82
131,1			0,22	1,10	2,21
78,3			0,13	0,66	1,32
Средняя площадь сечений (км^2)		Средний расход воздуха (км^3)	0,20	0,98	1,97
117,0					
Объём котловины общий (км^3)		Расход воздуха через котловину за сутки (км^3)	17005	85024	170049
76028		Количество обновлений воздушной среды Байкальской котловины за сутки	0,22	1,12	2,24

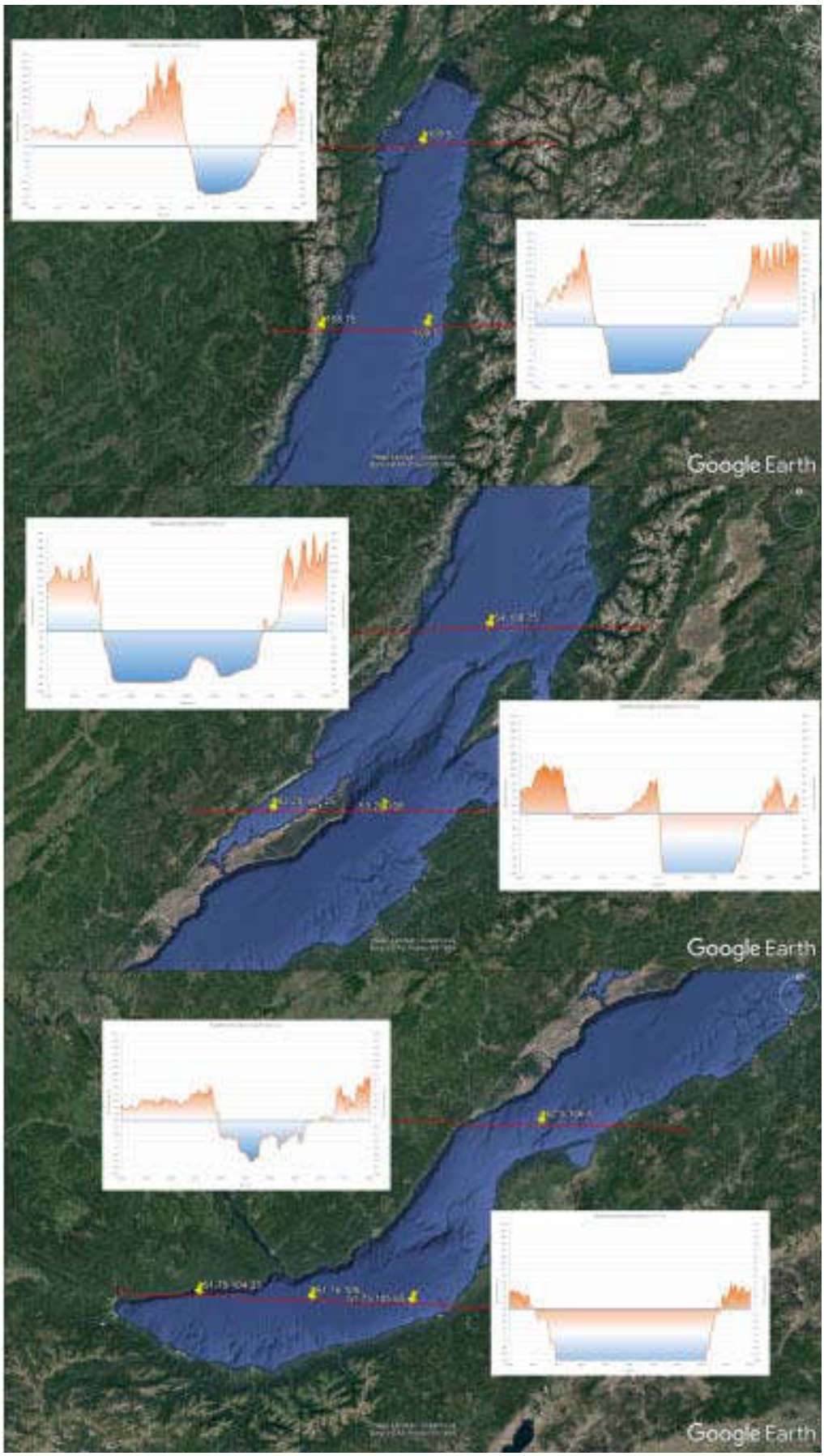


Рис. 1. Исследуемые профили рельефа

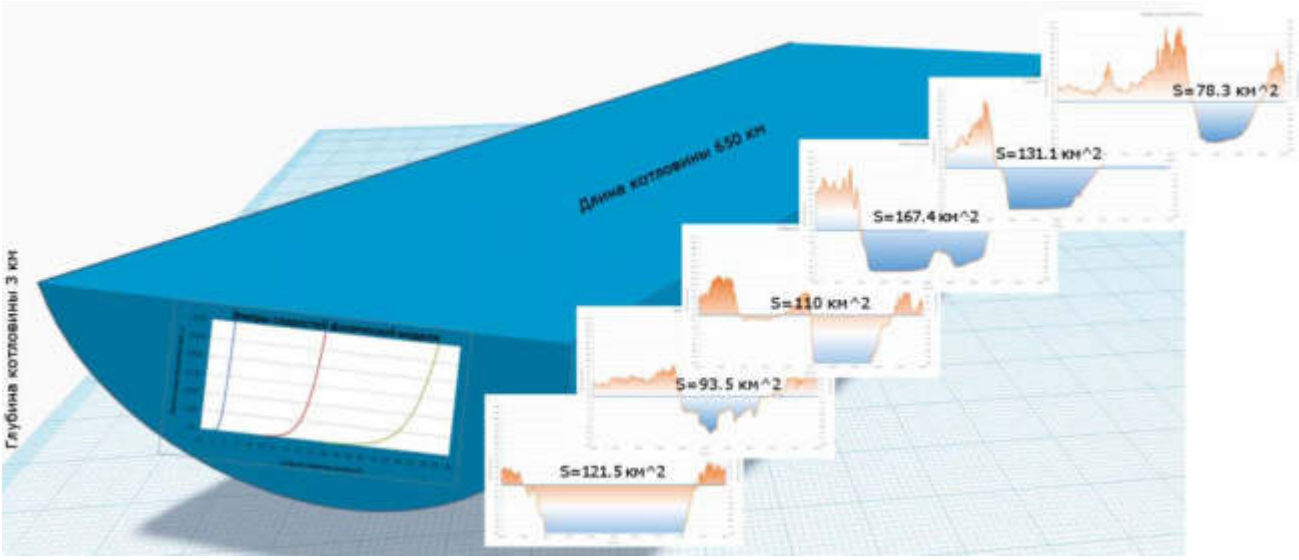


Рис. 2. Физическая модель Байкальской котловины

При проведении аналитического обзора динамики среднемесячного модуля скорости ветра за период с 1979 по 2017 г. **выявлено следующее:**

1. Практически во все месяцы графики среднемесячного модуля скорости ветра на высотах свыше полутора километров показывают тенденции к изменению. На высотах от 10 метров до полутора километров величина и знак тенденций показывают изменение, которое зависит как от обозреваемого месяца, так и от района Байкальской котловины. На высоте 2 метра от поверхности модули скорости практически не испытывают изменения за наблюдаемый период.

2. В зимний период (декабрь-февраль) на высоте свыше полутора километров наблюдается переход тенденций от отрицательной в декабре и январе к положительной в феврале. На высотах от 10 метров до полутора километров незначительная отрицательная тенденция наблюдается только в январе в средней части Байкальской котловины.

3. В весенний период (март-май) наблюдается общее снижение модуля скорости на всех высотах. В марте проявляется различие между северной частью Байкальской котловины, где тенденции на повышение модуля скорости на высотах от 10 метров сохраняются, и южной частью котловины, где тенденция на всех высотах практически нейтральна. При этом распределение модулей скорости по высоте схоже с зимним периодом. Далее в апреле и мае модуль скорости, а также тенденции снижаются

4. В летний период (июнь-август) обзор данных подтверждает результаты более ранних исследований Н. В. Савиновой, которые показали, что данных период характеризуется на Байкале наиболее низкими модулями скорости по всему высотному профилю. Наиболее слабыми ветрами характеризуется июль. В данный период по всей котловине устанавливается наиболее спокойный климат

5. В осенний период (сентябрь-ноябрь) синоптическая обстановка на Байкале меняется. Модули скорости ветра на высоте растут. Проявляется различие в скорости между приземным и более высокими слоями. При этом тенденции в данный период отрицательные по всей территории Байкальской котловины

Таким образом, анализируя данные Реанализа, можно проследить сезонный ход модуля скорости ветра, показанный ранее в работах Казанцевой, Тараканова, Савиновой и других. Однако факт, что динамика модуля скорости ветра над территорией Байкальской котловины на высотах от 10 м и выше на протяжении наблюдаемого периода показывает изменение как в большую, так и в меньшую сторону, является научной новизной, ранее не упоминавшейся.

Список литературы

1. Морин А. С. Обоснование технологии трубопроводного проветривания глубоких карьеров : дис. … д-ра техн. наук. Красноярск, 2011. 211 с.
2. Конорев М. М. Искусственная вентиляция и пылегазоподавление в атмосфере карьеров : дис. … д-ра техн. наук. Екатеринбург, 1999. 364 с.
3. Метеорологический режим карьеров // Тр. Гл. геофиз. обсерватории им. Воейкова. Вып. 270. Л., 1970. С. 172.

УДК 551.509.13

Методические работы, проведенные в Иркутском филиале ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета» по повышению качества прогнозирования в 2017 г.

М. Н. Обухова (meteoirk@bk.ru)

Иркутский филиал ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета», Иркутск

Аннотация. Представлены основные формы и результаты проведения методических работ в подразделениях Иркутского филиала ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета», которые отражают широкий спектр мероприятий, реализованных на примере 2017 г.

Ключевые слова: метеорологическое обеспечение гражданской авиации, методическое обеспечение, безопасность полетов.

Методические работы по повышению качества прогнозирования в Иркутском филиале ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета» в 2017 г. включали:

1) внесение изменений в документы, определяющих характер авиаметеообеспечения на аэродромах и по районам полётов метеорологического обеспечения полетов в границах ответственности Иркутского филиала, взаимодействие с потребителями с целью улучшения авиаметеообеспечения;

2) актуализацию и выпуск документов, касающихся технологии прогнозирования и оформления рабочих записей прогнозистов;

3) повышение профессионального уровня специалистов с прогностическими функциями через проведение разборов, составление описаний синоптических ситуаций, анализы метеорологических и синоптических условий погоды по многолетним данным для выявления прогностических признаков опасных для авиации явлений погоды;

4) мониторинг и анализ прогностической информации, выпускаемой специалистами Иркутского филиала, оказание при необходимости методической помощи специалистам при обнаружении ошибок и возникновении замечаний;

5) разработку и усовершенствование методов, технологий прогнозирования явлений и условий погоды, а также поиск новых, взаимодействие с научно-исследовательскими институтами и другими организациями;

6) улучшение и разработку новых программных продуктов, обеспечивающих автоматизацию процессов при подготовке прогнозов погоды и проверку выпускаемой прогностической информации с целью максимального сокращения ошибок.

Отдельной программой под кураторством начальника АМСГ Иркутск-2 Т. В. Боровской идёт целый ряд мероприятий по повышению профессионального уровня специалистов с прогностическими функциями на АМСГ Чита.

В связи с вводом Инструктивного материала по форматам метеорологической информации (Приказ Росгидромета от 16.01.2017 № 4) и Инструктивного материала по специальным сообщениям AIREP (Приказ Росгидромета от 02.02.2017 № 24) в Иркутском филиале выполнен комплекс мероприятий по их введению, в том числе организованы составление и передача специалистами АМСГ Братск прогнозов TREND по аэродрому Усть-Кут для вклю-

чения их в сводки погоды. Кроме того, обновлены Инструкции по метеообеспечению полетов на всех аэродромах обслуживания, доработана программа удаленного доступа ПАК UniMAS с целью отображения всех действующих сообщений AIREP и установлена в систему предполётной метеорологической подготовки экипажей ВС и веб-страницу, используемую в качестве резервного способа передачи метеоинформации на рабочие места специалистов служб ОВД на аэродроме Иркутск.

В целях реализации приказа Росгидромета от 04.07.2017 № 304 о вводе Инструктивного материала по SIGMET и AIRMET организовано его изучение со специалистами Иркутского филиала и органов ОВД, внесены изменения в веб-программу формирования сообщений SIGMET.

Актуализация и выпуск документов, касающихся технологии прогнозирования и оформления рабочих записей прогнозистов предусматривала:

1. В связи с открытием в структуре Иркутского филиала ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета» обособленных подразделений АМСГ Чита и ОГ Чара с 15 мая 2017 г. был подготовлен и утвержден ряд документов, включающих 6 наименований, в числе которых Инструкции по порядку оформления и ведения оперативных журналов и по порядку ведения бланков и оформления журналов расчетных методов прогноза метеорологических величин и явления погоды.

2. В целях оптимизации записей бортовой погоды, получаемой от экипажей ВС и для отмены Журнала бортовой погоды на бумажном носителе и фиксации всей информации в электронном журнале, были подобраны сокращения для обозначения метеопараметров и метеоэлементов (из Doc 8400 «Сокращения и коды ИКАО»), которые используются в сообщениях с бортов ВС. Измененный формат электронного журнала бортовой погоды внедрён во всех подразделениях Иркутского филиала ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета». Добавлена функция единого сетевого электронного журнала бортовой погоды, позволяющая просматривать из любого подразделения сведения о бортовой погоды, зафиксированные по всей зоне ответственности Иркутского филиала ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета».

3. В связи с обновлением программного комплекса ГИС «ОКЕАН» и в целях повышения качества прогностической работы было подготовлено распоряжение Иркутского филиала ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета» по заполнению и использованию «Таблицы параметров атмосферы, характеризующих ее состояние» от 16. 05. 2017 г. № 15.

Методическая работа, направленная на повышение профессионального уровня специалистов подразделений с прогностическими функциями, предусматривала:

1) С целью повышения профессионального уровня специалистов с прогностическими функциями и в соответствии с Планом производственной деятельности Иркутского филиала ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета» на 2017 г. от 07.02.2017 проводятся под непосредственным контролем ведущего синоптика методической группы М. Н. Обуховой разборы по неоправдавшимся прогнозам погоды с обязательной подготовкой заключений об их качестве.

В 2017 г. на заключение в АМЦ Иркутск представлены разборы АМСГ Братск, Улан-Удэ, Иркутск-2, АМЦ Иркутск, АМСГ Киренск.

Исследование синоптиками причин ошибочности прогнозов погоды является одним из способов совершенствования профессиональных знаний. Результатом проделанной работы можно считать выявление прогностических признаков образования опасных явлений погоды на аэродроме для дальнейшего использования в оперативной практике.

2) Целый ряд работ направлен на повышение профессионального уровня специалистов прогностической группы АМЦ Иркутск. Для этих целей в АМЦ Иркутск Обуховой М. Н. был выпущен План методических мероприятий по повышению профессионального уровня специалистов прогностической группы на 2017 г. от 07.02.2017. Согласно плану специалисты проводят методические работы, основанные на проведении анализа статистических данных по условиям образования ОЯ погоды в различные периоды года.

3) Для проведения совместных технических учеб и профессионального развития синоптиков АМЦ Иркутск и АМСГ Иркутск-2 привлекается ведущий синоптик методической группы АМЦ Иркутск И. В. Латышева. Также Латышева И. В. принимает участие в обсуждении синоптической ситуации при прогнозировании погоды на дневных докладах специалистов прогностической группы АМЦ Иркутск.

В 2017 г. Латышевой И. В. был подготовлен Справочно-консультационный материал «Проведение анализа состояния атмосферного процесса, условий погоды и причин ошибочности прогнозов по аэродрому» для применения при составлении прогнозов погоды по аэродрому, описаний синоптических ситуаций, разборов неоправдавшихся прогнозов. В целях выполнения решения Заседания научно-технического совета от 11.08.2017. Протокол № 3 на сеть АМЦ/АМСГ с прогностическими функциями были высланы тесты, подготовленные Латышевой И. В. для проверки усвоения справочно-консультационного материала. До конца 2017 г. планируется дальнейшая работа по разъяснению и получению навыков использования справочно-консультационного материала со специалистами АМЦ Иркутск, АМСГ Иркутск 2 при личном взаимодействии, со специалистами АМСГ Братск (в качестве эксперимента) – через Skype.

Также Латышевой И. В. подготовлены Климатические описания по аэродромам Киренск, Братск в соответствии с требованиями РД 52.21.692-2007.

Мониторинг прогностической информации, выпускаемой специалистами Иркутского филиала – отдельное направление в методических работах, выполняемое с целью улучшения качества выпускаемой прогностической продукции Иркутским филиалом ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета» и сокращению количества ошибок, который включает:

1. Мониторинг прогностической информации, выпускаемой АМСГ Братск, Улан-Удэ, Киренск, с проверкой своевременности выпуска коррективов, согласования прогнозов погоды и предупреждений, анализ результатов автоматизированного мониторинга ОРМЕТ данных АМСГ, поступивших из ЦВАМП, ведущим синоптиком методической группы АМЦ Иркутск М. Н. Обуховой.

На основании проверок проводилось тестирование специалистов на знание критериев к выпуску коррективов к прогнозам погоды. При необходимости выпускаются методические рекомендации по результатам анализа и проверки.

2. Постоянный контроль работы специалистов прогностической группы АМЦ Иркутск, проведения фронтального анализа, обоснований прогнозов погоды по аэродромам и районам метеорологического обеспечения полётов в зоне ответственности АМЦ Иркутск, полная проверка выпускаемых прогнозов погоды по аэродромам и районам, предупреждений по аэродромам, в том числе о сдвиге ветра, сообщений SIGMET, AIREP Special, AIRMET на предмет соблюдения форматов, согласованности, соответствия метеорологическим и синоптическим условиям, ведущим синоптиком прогностической группы Н. П. Таборовой.

Иногда итогом проверки специалистов прогностической группы АМЦ Иркутск являются составление разборов неоправдавшихся прогнозов погоды, объяснительных с описанием синоптических ситуаций, обоснованием прогнозов погоды и фронтальных анализов. Таким образом, в этом году по заданию начальника АМЦ Иркутск выполнены: описание синоптической ситуации на аэродроме Иркутск Андреевой Н. В., сравнительный анализ двух синоптических ситуаций при ухудшении видимости в дыму на аэродроме Бодайбо Андреевой Н. В., объяснительные с обоснованием фронтального анализа Шахаевым И. В. и Ивановой А. С., разбор неоправдавшегося прогноза погоды на аэродроме Иркутск Г. Сметаниным.

Разработка и усовершенствование методов, технологий прогнозирования явлений и условий погоды, а также поиск новых, взаимодействие с научно-исследовательскими институтами и другими организациями предусматривали:

1. В целях улучшения качества авиационных прогнозов, выпускаемых АМЦ/АМСГ/ОМС, с 15.02.2017 Сибирский региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт (ФГБУ СибНИГМИ) по заказу ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета» приступил к подготовке и выпуску прогностической продукции на основе

численных моделей атмосферы COSMO-SIB (и GFS в качестве резервной, начиная с 15.03.2017) по Урало-Сибирскому региону согласно письма ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета» № АМТК-01/19-313 от 15.02.2017, для использования данной продукции синоптиками в качестве экспериментальной продукции при подготовке авиационных прогнозов погоды.

2. В целях освобождения от лишней нагрузки в оперативной работе специалистов подразделений с прогностическими функциями и их начальников, было принято решение: предварительно в АМЦ Иркутск Обуховой М. Н. провести анализ оправдываемости прогностической продукции на основе численных моделей COSMO-SIB ФГБУ «СибНИГМИ» по а сети АМЦ/АМСГ ИФ за март 2017 г.

За основу критериев оценки оправдываемости были использованы критерии из Приложения № 1 к ФАП № 60.

В период с 10 по 13 апреля 2017 г. начальником АМЦ Иркутск С. А. Гаращук данные результатов анализа были представлены на совещании в г. Новосибирске. В соответствии с отчетом совещания на Заседании научно-технического совета Иркутского филиала от 28. 04. 2017 г. было принято решение:

– использовать прогностические данные ФГБУ «СибНИГМИ» о направлении и скорости ветра, отсутствии/наличии осадков в качестве консультативного материала при прогнозировании на сети АМЦ/АМСГ Иркутского филиала;

– дополнительно по согласованию с ФГБУ «СибНИГМИ» провести выборочную оценку оправдываемости только по количеству и высоте нижней границы облаков за период июнь-июль 2017 г;

– провести оценку оправдываемости метода прогноза гроз ФГБУ «СибНИГМИ» в Иркутском филиале за период с 29. 05. 2017 по 31.08.2017.

Данные для расчета оправдываемости по количеству и высоте нижней границы облаков собирались в каждодневной практике специалистами АМСГ Иркутск 2, расчет оправдываемости был произведен М. Н. Обуховой.

Результаты выборочной оценки оправдываемости представлены в табл. 1. Высота нижней границы облачности оценивалась с учетом превышений аэродромов над средним уровнем моря. Случаи с вертикальной видимостью в туманах, дымках и дыме не учитывались. Анализ показал отсутствие особых различий и каких-либо закономерностей в результатах оправдываемости на отдельные сроки 09, 12, 15, 18, 21, 24 ч.

Таблица 1

Средняя оправдываемость (%) прогностических данных по облачности численных моделей атмосферы от 00.00 и 12.00 ВСВ в период июнь-июль, разработанной ФГБУ «СибНИГМИ»

Аэродромы	Облачность от 00.00 ВСВ		Облачность от 12.00 ВСВ	
	количество	ВНГ	количество	ВНГ
Иркутск	89,3	61,3	92,8	61,3
Иркутск-2	84,6	64,1	87,4	66,5
Братск	78,0	50,0	79,2	51,7
Улан-Удэ	87,4	37,0	86,0	33,7
Нижнеудинск	63,9	30,1	74,5	30,2
Усть-Кут	89,1	54,7	84,8	54,5
Киренск	80,0	61,2	84,3	67,0
Ербогачен	78,2	54,5	77,0	50,0
Бодайбо	74,7	32,5	78,0	32,4
Мама	76,2	42,3	78,7	42,6
Нижнеанагрск	77,8	60,3	79,8	60,6
Таксимо	70,0	45,0	73,2	40,6

Анализ оправдываемости прогностической продукции ФГБУ «СибНИГМИ» по количеству и высоте нижней границы облачности по 12 аэродромам Иркутского филиала показал:

• высокую среднюю оправдываемость (≥70 %) по количеству облачности как от срока 00.00 ВСВ, так и от 12.00 ВСВ, кроме данных по а/д Нижнеудинск от 00.00 ВСВ;

• низкую среднюю оправдываемость (≤ 37 %) по высоте нижней границы облачности по аэродромам Улан-Удэ, Нижнеудинск, Бодайбо.

Сравнительный анализ средней оправдываемости от 00.00 и 12.00 ВСВ по продукции ФГБУ «СибНИГМИ» по количеству и высоте нижней границе облачности в марте и июне-июле показал:

• по количеству облачности средняя оправдываемость стала значительно выше в среднем на 25 % предыдущих данных по всем 12 аэродромам;

• по аэродромам Братск, Усть-Кут, Киренск, Ербогачен, Нижнеангарск оправдываемость по высоте нижней границе облачности в среднем стала выше на 20 %;

• по аэродромам Мама, Бодайбо оправдываемость по высоте нижней границы облачности осталась на низком уровне;

• ПО аэродромам Улан-Удэ, Нижнеудинск и Таксимо оправдываемость по высоте нижней границы облачности понизилась на 15 %.

Полученные данные переданы для дальнейшего анализа в ФГБУ «СибНИГМИ».

На основании полученных результатов рекомендовано использовать прогностические данные ФГБУ «СибНИГМИ» только о количестве облачности в качестве консультативного материала на сети АМЦ/АМСГ Иркутского филиала.

В рамках проведения оценки оправдываемости метода гроз ФГБУ «СибНИГМИ» специалистами АМЦ Иркутск, АМСГ Братск, Улан-Удэ, Киренск была собрана статистика с определением барических полей при прогнозе гроз, рассчитаны значения оправдываемости прогнозов гроз на явление, предупрежденности явления и критерия Пирси-Обухова. Все материалы собраны и отправлены в ФГБУ «СибНИГМИ» для обработки и дальнейшего анализа.

Полученные результаты по оценке оправдываемости метода прогноза гроз ФГБУ «СибНИГМИ» в Иркутском филиале за период с 29.05.2017 по 31.08.2017 представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты по оценке оправдываемости метода прогноза гроз ФГБУ «СибНИГМИ» в Иркутском филиале за период с 29.05.2017 по 31.08.2017

Аэродром	Оправдываемость, %	
	В радиусе 50 км	В радиусе 100 км
Иркутск	28,8	21,1
Нижнеудинск	26,9	17,3
Бодайбо	15,8	8,4
Улан-Удэ	32,5	54,4
Нижнеангарск	**65,2**	54,5
Таксимо	**57,9**	15,8
Братск	10,4	22,7
Усть-Кут	24,2	51,2
Киренск	16,5	17,8
Ербогачён	38,3	38,3

Таким образом приемлемую оправдываемость метода гроз ФГБУ «СибНИГМИ» (на наличие явления) показали прогнозы по аэродромам Нижнеангарск (65 %) и Таксимо (58 %) в радиусе 50 км. По остальным аэродромам оправдываемость метода оказалось низкой от 10 до 38 % в радиусе 50 км, от 8 до 54 % в радиусе 100 км.

В связи с этим в 2018 г. запланирована апробация индексов неустойчивости TT, CT, VT на а/д Иркутск, выделенных ранее заместителем начальника АМСГ Иркутск 2 по методической работе И. Ю. Лобычевой, и возобновление работ по выявлению индексов неустойчивости TT, CT, VT на а/д Нижнеудинск.

3. Большой вклад в уточнение и автоматизацию расчетных методов прогноза явлений и условий погоды в Иркутском филиале вносит заместитель начальника по методической работе АМСГ Иркутск 2 И. Ю. Лобычева:

• Выполнена разработка и автоматизация расчета синоптико-статистического метода ограниченной видимости в снегопаде на аэродроме Иркутск (≤ 1000 м). Специалисты АМЦ

Иркутск и АМСГ Иркутск 2 провели производственное испытание с регулярной оценкой метода в период 01.01 по 30.04.2017. С 10 по 12 мая 2017 г. была проведена итоговая оценка оправдываемости метода:

1) по а/д Иркутск: общая оправдываемость составила 66 %, оправдываемость прогноза видимости в снегопаде ≤ 1000 м – 33 %; оправдываемость прогноза видимости в снегопаде > 1000 м – 92 %;

2) по а/д Иркутск-2 (Восточный): общая оправдываемость составила 62 %, оправдываемость прогноза видимости в снегопаде ≤ 1000 м – 80 %; оправдываемость прогноза видимости в снегопаде > 1000 м – 43 %.

На заседании научно-технического совета Иркутского филиала от 11.08.2017 было принято решение использовать в оперативной работе метод ограниченной видимости в снегопаде ≤ 1000 м специалистами АМЦ Иркутск и АМСГ Иркутск 2.

• Выполнено техническое задание по уточнению синоптико-статистического метода прогноза низкой облачности на аэродроме Иркутск.

• Проводилось тестирование индексов неустойчивости TT, CT, VT по а/д Иркутск за период май-август 2016 г. По результатам которого были выделены диапазоны значений индексов неустойчивости TT, CT, VT для прогноза гроз на а/д Иркутск и АМСГ Иркутск 2 по данным май-август 2016 г. Затем они были уточнены по данным электронного архива АМЦ Иркутск за период май-август 2007–2011 гг.

Была создана таблица для автоматического расчета индексов в оперативной работе.

На основании проведенного испытания и систематизации полученных результатов:

• изучена и оценена возможность применения данных индексов неустойчивости;

• сформированы шкалы градации индексов, характерные для АМЦ Иркутск, АМСГ Иркутск 2.

Постоянно проводится мониторинг качества обоснования прогноза погоды синоптиками АМЦ/АМСГ и подготовка предложений по улучшению прогнозирования. Курируется на сети АМЦ/АМСГ с прогностическими функциями Иркутского филиала опытная эксплуатация Системы автоматической верификации авиационных прогнозов погоды (САВАП).

4. На ряду с этим, в АМЦ Иркутск продолжается усовершенствование системы раннего прогнозирования туманов Гаращук С. А. при тесном взаимодействии со специалистами ЗАО «ИРАМ», для этого ведется контроль за работой системы и оперативное принятие мер по устранению возникающих замечаний.

В целях сокращения «ложных тревог» было подготовлено техническое задание по выделению диапазонов критериев метеопараметров для включения в СПО системы раннего прогнозирования туманов ЗАО «ИРАМ», в соответствии с которым:

• программист I категории методической группы АМЦ Иркутск Д. В. Хартанов выделил случаи с туманом за декабрь 2012–2016 гг.;

• начальник АМЦ Иркутск С. А. Гаращук проанализировала прогностические метеорологические и синоптические параметры при туманах и без туманов. На основании этого выделены диапазоны критериев для включения в настройки СПО системы раннего прогнозирования туманов ЗАО «ИРАМ».

Аналогичная работа проведена для летних месяцев.

5. Одновременно с другими мероприятиями, с 2016 года АМЦ Иркутск принимает участие в проекте по согласованию выпуска сообщений SIGMET в зонах приграничных РПИ Хабаровска, с февраля 2017 г. РПИ Красноярска и с августа 2017 г. с территорией ответственности ФГБУ «Якутское УГМС». Между смежными ОМС проводится по SKYPE и посредством ICQ обсуждение с обязательным заполнением электронного журнала согласования SIGMET: синоптической ситуации, местоположения фронтальных разделов; имеющихся данных наблюдений, включая сообщения с борта воздушных судов; прогностической информации о возникновении и/или сохранении явления(ий), получаемой с использованием синоптических и численных методов прогноза погоды, включая прогнозы ВЦЗП.

Улучшение и разработка новых программных продуктов

В АМЦ Иркутск по инициативе и с постоянным сопровождением со стороны М. Н. Обуховой, Н. П. Таборовой и других специалистов методической группы ведется разработка программистом I категории методической группы АМЦ Иркутск Д. В. Хартановым и усовершенствование существующих программных продуктов.

Так, в 2017 г. для оптимизации работы синоптиков АМЦ Иркутск на рабочих местах «МВЛ» разработана программа автоматического нанесения давления QNH на карту районов метеорологического обеспечения полетов в границах ЦПИ Нижнеудинска и районам 1–7В. В процессе идет доработка программы автоматического нанесения давления QNH на карту для всех районов метеорологического обеспечения в границах ответственности Иркутского филиала.

Для исключения возможных ошибок при составлении сообщений SIGMET Хартанов Д. В. провел работу по усовершенствованию web-программы формирования сообщений SIGMET в части добавления форматно-логической проверки сообщений SIGMET.

С учетом результатов анализа автоматизированного мониторинга ОРМЕТ данных ЦВАМП ведется постоянная доработка web-программы формирования прогнозов TAF в части усовершенствования форматно-логической проверки.

Повышение профессионального уровня специалистов с прогностическими функциями на АМСГ Чита

По отдельной программе под кураторством начальника АМСГ Иркутск 2 Т. В. Боровской выполняются мероприятия по повышению профессионального уровня специалистов с прогностическими функциями на АМСГ Чита (в связи с вливанием её в структуру Иркутского филиала с 15. 05. 2017 г.):

В первую очередь в мае и июле прошли обучение в АМЦ Иркутск начальник АМСГ Чита Е. В. Бутина и ведущий синоптик АМСГ Чита М. В. Злыгостева, где они:

• ознакомились с рабочими местами специалистов методической группы, группы наблюдений, рабочими функциями начальника АМЦ Иркутск и ведущего синоптика прогностической группы, организацией работы подразделения;

• изучили ведение делопроизводства, оформление рабочих мест, заполнение оперативных журналов в соответствии с СМК;

• прошли стажировку на рабочих местах синоптиков на «Основном», «МВЛ» и «Вылетах и РЦ», в том числе: изучив технологию работы с программным комплексом ГИС Метео, освоив технологию прогнозирования с заполнением и использованием Таблицы метеопараметров, характеризующих состояние атмосферы.

Итогом этой стажировки стал выпуск «Плана повышения качества прогностического обеспечения полетов на АМСГ Чита» от 01. 08. 2017 г., в соответствии с которым до 20. 10. 17 г. под непосредственным контролём начальника АМСГ Иркутск 2 Т. В. Боровской выполняется обучение специалистов, обеспечивающих прогностические функции АМСГ Чита, работе ГИС «Метео», обоснованию прогнозов.

С 24. 10. по 10. 12. 2017 г. уже под контролем АМЦ Иркутск планируется закрепление и проверка полученных навыков работы с ГИС Метео и умению специалистов обосновывать прогнозы погоды с использованием её компонент.

Одновременно с этим, с 25. 10 по 05. 11. 2017 г. под контролем АМСГ Иркутск 2 организовано обучение специалистов АМСГ Чита работе с ГИС «Океан».

Выводы

1. В 2017 г. выполнен большой объем работ специалистами методической группы АМЦ Иркутск, который включает анализ и внедрение новых регламентирующих документов на сеть Иркутского филиала и постоянное непосредственное взаимодействие с потребителями на всех уровнях: от экипажей ВС до руководства органов ОВД.

2. Осуществляется постоянное вовлечение специалистов прогностической группы АМЦ Иркутск (при большой нагрузке в оперативной работе), специалистов АМСГ Иркутск 2

в тестирование новых методов и технологий прогнозирования, в апробацию уточненных и разработанных методов.

3. Одновременно с этим, высокие требования к постоянному профессиональному росту специалистов прогностической группы АМЦ Иркутск для выполнения возлагаемых на них функций. Так, помимо выполнения заданий в рамках АМЦ Иркутск, некоторые специалисты идут учиться в магистратуру и аспирантуру географического факультета ИГУ. В 2016 г. синоптик I категории А. С. Иванова получила степень кандидата географических наук, в 2017 г., И. В. Шахаев закончил магистратуру и ему присвоена квалификация «Магистр гидрометеорологии» направленность «Метеорология». В настоящее время студентами магистратуры второго года обучения специальности метеорология являются С. А. Гаращук, О. В. Куприянович, которые постоянно при поддержке И. В. Латышевой – и. о. зав кафедры метеорология и охраны окружающей атмосферы, выступают с докладами о научных исследованиях в международных, межвузовских конференциях. Высокий уровень специалистов позволяет им участвовать в мероприятиях международного масштаба, так А. С. Иванова в июне 2015 г. приняла участие в семинаре и совещании рабочей группы, касающихся выпуска SIGMET сообщений, в г. Токио Япония. В 2017 г. её кандидатура выдвинута для участия в метеорологическом обеспечении соревнований XXIX Всемирной зимней универсиады 2019 г. (г. Красноярск).

Тем не менее, не умоляется вклад специалистов сети прогностических подразделений, которые помогают тестировать новые методики прогнозирования, уточнять действующие документы.

Таким образом в век высоких технологий и в период постоянного повышения международных требований к выполнению авиаметеообеспечения в РФ, на фоне экономического кризиса от специалистов Иркутского филиала требуется высокий уровень профессиональной подготовки, способность к быстрому решению сложных задач и, конечно, трудолюбие.

УДК 551.521.12

Мониторинг составляющих радиационного баланса в коротковолновой части спектра на территории Тункинской котловины

Т. В. Парежева[1] (t.parezhewa@mail.ru), Н. Н. Воропай[2,3] (voropay_nn@mail.ru)

[1]Томский государственный университет, Томск
[2]Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск
[3]Институт географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, Иркутск

Аннотация. Статья посвящена анализу основных составляющих радиационного баланса на метеостанции Тунка за период с 16 июля 2015 г. по 8 сентября 2016 г. с использованием данных, полученных с двух экспериментальных приборов – АПИК-33 и АПИК-23.

Ключевые слова: Радиационный баланс, коротковолновый спектр, суммарная радиация, отраженная радиация, альбедо, годовой ход, месячный ход.

Радиационный баланс земной поверхности – важнейший компонент теплового баланса земной поверхности, один из основных климатообразующих факторов. Изучение особенностей радиационного баланса в различных частях земного шара является одной из важнейших задач метеорологии. Слепящий солнечный диск во все времена будоражил умы людей, служил благодатной темой для легенд и мифов. Ещё с древности люди догадывались о его воздействии на Землю.

В истории исследований излучательной способности Солнца (солнечной активности) можно выделить два основных этапа. Первый (с начала XVII до настоящего времени) отра-

жает научные наблюдения за состоянием солнечной активности. Второй (с начала XX века до настоящего времени) этап включает еще и непосредственные измерения солнечной радиации [1]. На сегодняшний день существует много разных публикаций посвященных солнечной радиации. Авторы рассматривают взаимосвязи между составляющими радиационного баланса и другими природно-антропогенными характеристиками (состав атмосферного воздуха, метеоусловия, растительный покров, человеческая деятельность и др.). Существует множество работ связанных с использованием новых методов и технологий в изучении и исследовании солнечной радиации [2–10 и др.].

Территория исследования – юго-западное Прибайкалье. Основная цель работы – характеристика составляющих радиационного баланса в коротковолновой части спектра на метеостанции Тунка (Республика Бурятия). Для получения информации о характеристиках атмосферы, в том числе и о коротковолновой радиации, на территории метеостанции сотрудниками Института географии СО РАН были установлены два экспериментальных прибора – АПИК-33 и АПИК-23 (атмосферно-почвенный измерительный комплекс [8]). Для описания характеристик радиационного баланса на территории Сибири, особенно в горных районах, в настоящее время не достаточно информации в связи с редким расположением актинометрических станций. Применение автоматического оборудования поможет расширить эти знания.

Оба прибора работают в автоматическом режиме, накапливают информацию. Они имеют одинаковую конструкцию системного блока, но разные приемные поверхности [3; 4]. В АПИК-33 используется «голова» пиранометра Янишевского, а в АПИК-23 – экспериментальный датчик суммарной солнечной радиации, который был изготовлен в ИМКЭС СО РАН. С этих приборов и были получены данные за период с 16 июля 2015 г. по 8 сентября 2016 г. с 15-минутным шагом по времени. Так как оборудование является экспериментальным, в процессе эксплуатации выявлены некоторые недостатки, которые были учтены. Основной недостаток АПИК-33 – конструкция приемного устройства. Пиранометр Янишевского не предназначен для постоянного использования, так как в нем не предусмотрена защита от неблагоприятных условий. Полученные данные в первые несколько дней были качественными, а после выпадения обильных осадков результаты измерения отраженной радиации оказались далекими от реальных. Это было связано с тем, что вода смогла просочиться внутрь стеклянного колпака приемной части прибора, обращенной вниз. В связи с этим полученные данные по отраженной радиации, нельзя использовать. Второй прибор (АПИК-23), в виде второпластовой трубки был установлен значительно раньше пиранометра АПИК-33. К сожалению, при калибровке датчика приходящей радиации в момент установки оборудования, была допущена ошибка, которая обнаружилась на начальном этапе обработки информации. Таким образом, в дальнейшей работе нами были использованы данные о приходящей радиации по результатам измерений АПИК-33, по отраженной радиации – АПИК-23. Пропускная способность приемной поверхности в АПИК-23 не такая, как у стекла, и чтобы получить корректные значения приходящей и отраженной радиации необходимо ввести поправочные коэффициенты в показания АПИК-23, рассчитанные при совместном анализе одновременных наблюдений АПИК-23 и АПИК-33 за период без осадков.

В дальнейшем для анализа изменений солнечной радиации в течение года на метеостанции Тунка были рассчитаны месячные суммы суммарной (Q), отраженной радиации ($R_{k)}$, средние месячные значения альбедо ($A_{k)}$ и радиационный баланс в коротковолновой части спектра ($B_{k)}$.

Согласно результатам расчета радиационный баланс в коротковолновой области спектра (B_k) за год составил 1526,34 МДж/м^2. На рисунке 1 представлено изменение B_k в течение года. Наибольшие значения наблюдались в теплые месяцы (май, 276,15 МДж/м^2), когда приходящая солнечная радиация намного больше уходящей, а наименьшие значения – в холодные месяцы (декабрь -63,31 МДж/м^2). Небольшое уменьшение B_k в июне можно объяснить тем, что происходит уменьшение суммарной радиации, а она в свою очередь связана с наличием переменной облачности и пожаров вблизи данной территории. Влияние осадков в этом месяце незначительно.

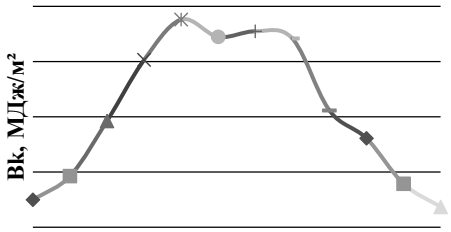


Рис. 1. Годовой ход месячных сумм коротковолновой части радиационного баланса

Анализируя основные составляющие радиационного баланса в течение года видно, что с увеличением продолжительности светового дня значения средних суточных сумм суммарной и отраженной радиации увеличиваются. Наибольшие значения месячных сумм суммарной солнечной радиации наблюдались в теплые месяцы (477,23 МДж/м^2), а наименьшие значения – в холодные месяцы (60,98МДж/м^2). Сумма отраженной солнечной радиации изменяется от 64,53 МДж/м^2 (декабрь) до 100,54 МДж/м^2 (май). Годовой ход R_k имеет два максимума – в марте и в мае, которые связаны с изменением подстилающей поверхности (рис. 2). В марте большое значение R_k связано с наличием свеже выпавшего снега, который в свою очередь увеличивает отражательную способность подстилающей поверхности. В апреле наблюдается уменьшение R_k, что в свою очередь объясняется таянием снега. Увеличение отраженной радиации в мае связано с увеличением светового дня.

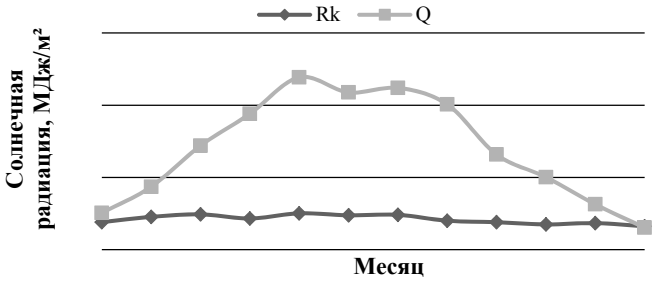


Рис. 2. Годовой ход отраженной и суммарной солнечной радиации

Альбедо зависит от характера подстилающей поверхности (цвет, влажность, шероховатость и т. д.). Влажные темные почвы могут иметь меньшие значения альбедо, а сухие и светлые – большие. В целом темные и шероховатые почвы отражают лучистую энергию меньше, чем светлые и гладкие. В годовом ходе альбедо максимальное значение наблюдается зимой (94 %), когда вся подстилающая поверхность застелена свежим выпавшим снегом, а по мере его загрязнения и таяния альбедо уменьшается. Наименьшие значения альбедо приходятся на лето (22 %) (рис. 3).

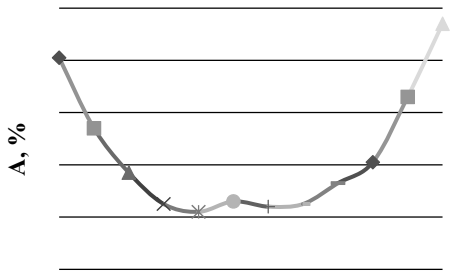


Рис. 3. Годовой ход альбедо подстилающей поверхности

Для описания месячного хода суточных величин коротковолновой радиации были выбраны два месяца – январь и июль. Значения суточных сумм суммарной и отраженной солнечной радиации за июль (рис. 4, *б*) характеризуется большей межсуточной изменчивостью и имеет более высокие значения, чем в январе (рис. 4, *а*). Основными причина изменений сумм солнечной радиации является переменная облачность, состояние подстилающей поверхности, а также увеличение продолжительности светового дня.

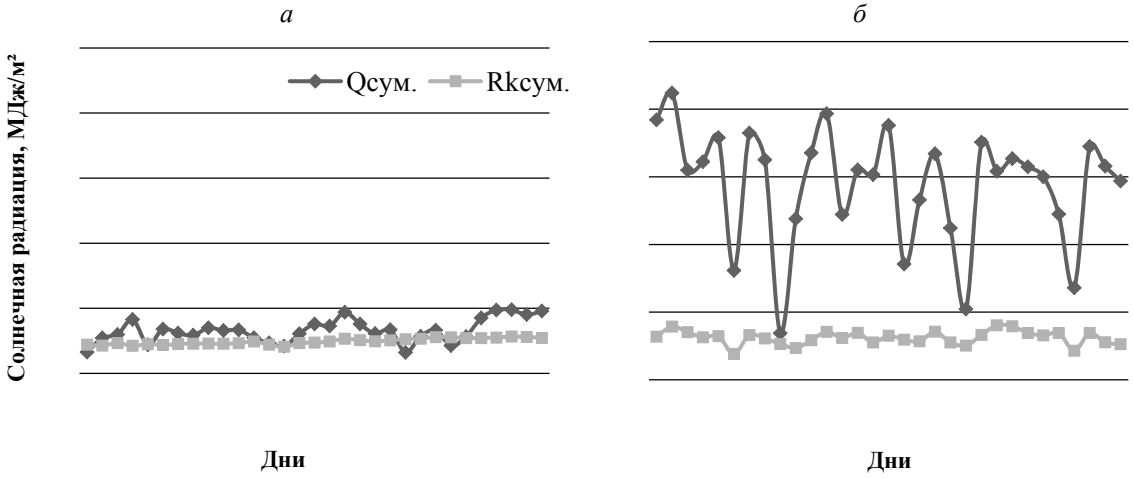


Рис. 4. Месячный ход суточных сумм суммарной (Q) и отраженной (Rk) солнечной радиации за январь (а) и июль (б) 2016 г.

Затем в каждом из двух выбранных месяцев проанализированы пара дней, а именно, самый пасмурный (09.07.2016 и 22.01.2016) и самый ясный (01.07.2016 и 29.01.2016), для того чтобы проследить влияние облачности на изменение солнечной радиации в течение суток при разной продолжительности солнечного сияния. В зимний и в летний месяц изменения сумм суммарной радиации прямо пропорциональны изменению высоты Солнца. Наибольшие значения наблюдаются в полуденное время. Так в январе в самый пасмурный день значения сумм суммарной солнечной радиации не превышают 1,61МДж/м^2, а в самый ясный день – 4,88МДж/м^2. В суточном ходе изменения сумм суммарной радиации почти прямо пропорциональны изменению высоты Солнца. Наибольшие значения $Q_{сум.}$ наблюдаются в полуденное время. Так наибольшее значение $Q_{сум.}$ 22 января составила 0,09 МДж/м^2 в 14:00, а 29 января – 0,25 МДж/м^2 в 14:00. В эти дни хорошо выражен суточный ход.

В летний месяц в самый пасмурный день значения сумм суммарной солнечной радиации не превышают 3,43 МДж/м^2, а в самый ясный день – 19,2 МДж/м^2. значения сумм суммарной солнечной радиации значительно отличаются. Наибольшие значения $Q_{сум.}$ наблюдаются в полуденное время. Так наибольшее значение $Q_{сум.}$ 9 июля составило 0,15 МДж/м^2 в 13:30, а 1 июля – 0,55 МДж/м^2 в 14:00. При этом в ясный день четко выражен суточный ход в отличие от пасмурного.

Резкие падения сумм солнечной радиации связаны с наличием переменной облачности. Зимой облачность почти на 65 % ослабляет солнечную радиацию, а летом на 81 %.

Заключение

В результате комплексного исследования изменения годового хода составляющих радиационного баланса на метеостанции Тунка за рассматриваемый период можно сделать вывод, что радиационный баланс в коротковолновой части спектра, суммарная и отраженная радиация принимают наибольшие значения в теплые месяцы, а наименьшие значения в холодные месяцы. Альбедо же наоборот принимает максимальные значения в холодное время, а наименьшие значения в теплое время, что связано с изменение подстилающей поверхности в течение года [5].

Список литературы

1. Федоров В. М. Исторические этапы в изучении многолетних вариаций солнечной активности [Электронный ресурс]. URL: http://solar-climate.com/sc/sactivnost.htm (дата обращения: 14.04.2017).
2. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / Г. В. Алексеев [и др.]. М. : Росгидромет, 2014. С. 61.
3. Егоров Б. Н. Влияние облаков верхнего и среднего ярусов на потоки радиации у поверхности океана // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 1998. Т. 34, № 3. С. 374–379.
4. Шильков А. В., Цветкова И. Л., Шилькова С. В. Система „ATRAD“ для расчетов атмосферной радиации: реконструкция микросечений поглощения и рассеяния // Мат. моделир. 1996. Т. 8, № 8. С. 104–127.
5. Хлебникова Е. И. Региональные климатические изменения основных составляющих радиационного баланса земной поверхности на территории России.
6. Байкова И. М. Особенности многолетнего изменения коэффициента прозрачности атмосферы и составляющих солнечной радиации в Сибири и на Дальнем Востоке в 1967–1986 годах // Метеорология и гидрология. 1998. № 1. С. 29–35.
7. Мониторинг радиационных потоков аппаратно-программным комплексом SUN / В. А. Розенталь [и др.]. // Оптика атмосферы и океана. 1999. Т. 12, № 1. С. 82–86.
8. Густокашина Н. Н. Многолетние колебания коротковолновой радиации и количества облаков на территории Предбайкалья // Геосистемные исследования в Сибири : сборник / Ин-т геогр. СО РАН. Иркутск, 1999. С. 90–100.
9. Трофимова О. В. О суточном ходе прямой солнечной радиации, поступающей на различно ориентированные наклонные поверхности гелиоприемников // Тр. / ГГО. 2013. Вып. 568. С. 238–249.
10. Скляднева Т. К. Режим солнечной радиации на территории Западной Сибири и ее роль в фотохимических процессах : автореф. дис. … канд. физ. -мат. наук. Томск, 2015. С. 24.
11. Кураков С. А. Система автономного мониторинга состояния окружающей среды // Датчики и системы. 2012. № 4. С. 29–32.
12. Стернзат М. С. Метеорологические приборы и наблюдения. Л. : Гидрометеоиздат, 1968. С. 222.
13. Пивоварова З. И. Радиационные характеристики климата СССР. СПб. : Гидрометеоиздат, 1977. 335 с.

УДК 551.509.13

Новые формы работы с потребителями авиационной метеорологической информации

А. Б. Петровский (meteoirk@bk.ru)

Иркутский филиал ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета», г. Иркутск

Аннотация. Рассматриваются формы представления и технологии доведения авиационной метеорологической информации до потребителей, используемые в подразделениях Иркутского филиала ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета».

Ключевые слова: метеорологическое обеспечение гражданской авиации, формы представления метеорологической информации

Для организации, занимающейся метеорологическим обеспечением гражданской авиации, важной задачей является усовершенствование услуг, предоставляемых потребителям авиационной метеорологической информации. Для выполнения этой задачи специалистами Иркутского филиала ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета» постоянно ведётся доработка имеющихся и создание собственных программных средств.

Основным программно-аппаратным комплексом, используемым в подразделениях Иркутского филиала ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета», для приёма, хранения, обработки и передачи информации является программно-аппаратный комплекс (ПАК) UniMAS. В его состав входит сервер удалённого доступа Web Interface, предназначенный для получения и передачи метеорологической информации посредством удалённого подключения пользователей к системе по локальной сети или сети интернет [2].

Стандартный веб-интерфейс ПАК UniMAS обладает рядом недостатков:

• процедура выборки информации из базы данных достаточно продолжительна по времени и в среднем составляет 5 действий пользователя для каждого метеосообщения;

• отсутствует функция форматно-логического контроля выпускаемой метеоинформации.

Для ускорения процесса выборки информации, снижения его трудоёмкости и для предоставления информации потребителям в более удобном и наглядном виде специалистами Иркутского филиала ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета» была произведена доработка Web-интерфейса ПАК UniMAS.

В 2012 году на базе доработанного Web-интерфейса ПАК UniMAS была разработана система удалённой самоподготовки экипажей воздушных судов. Интерфейс системы был максимально упрощён, но при этом в системе был сохранён весь необходимый функционал. В период с 2012 по 2017 г. производилось внедрение этой системы в подразделения Иркутского филиала ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета». В настоящее время данная система успешно эксплуатируется в АМЦ Иркутск, на АМСГ Братск, Улан-Удэ, Нижнеудинск, Бодайбо, Усть-Кут, Киренск, Чита. Использование этой системы позволило упростить процесс получения метеоинформации экипажами воздушных судов (ВС), организовать метеорологическое обеспечение по типу «Брифинг», снизить трудозатраты дежурных специалистов, ответственных за метеорологическое обеспечение ВС.

Специалистами Иркутского филиала ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета» постоянно ведётся доработка системы по следующим направлениям:

• информационная безопасность;

• повышение быстродействия;

• соответствие регламентирующим документам;

• удобство в использовании.

Для пользователей, подключающихся к системе по сети интернет с мобильных устройств (авиакомпания «Ангара»), была разработана мобильная версия системы.

С целью защиты системы от несанкционированного доступа производится регулярное обновление паролей для пользователей, работающих с системой удалённо. Пароли, выдаваемые пользователям, меняются каждые 6 месяцев или при подозрении на утечку учетных данных.

В 2016 году в систему была добавлена функция просмотра сведений о погоде, получаемых с бортов ВС.

С вводом Инструктивного материала по специальным сообщениям AIREP и на основании ФАП-60 с 03.04.2017 в систему удалённой самоподготовки экипажей воздушных судов добавлена функция отображения всех действующих на момент получения консультации сообщений AIREP Special. В рамках внедрения Инструктивного материала по SIGMET/AIRMET, введённого приказом Росгидромета от 04.07.2017 № 304, также было подготовлено соответствующее обновление программного обеспечения.

В связи с поступающими запросами от экипажей ВС и в соответствии с п. 70 ФАП-60 после предварительных консультаций с представителями авиакомпании «Аэрофлот» и специалистами отдела метеообеспечения единой системы ОрВД ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета» было организовано включение в предоставляемую полетную документацию дополнительных карт прогноза ветра и температуры с дискретностью 3 часа, выпускаемые ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета» по данным ВЦЗП Лондон.

Для выявления фактов несанкционированного доступа к системе, определения объёмов предоставляемой информации и анализа работы системы была создана программа сбора статистики. Данная программа позволяет определить, какую информацию пользователь запрашивал и просматривал за определённый период времени.

Данная система также используется и для метеорологического обеспечения органов организации воздушного движения (ОВД) на аэродроме Иркутск. Так с февраля 2015 года в АМЦ Иркутск в качестве основного средства доведения метеорологической информации до органов ОВД на аэродроме Иркутск используется комплекс автоматизации метеорологического обслуживания (КАМО) процессов управления воздушным движением (УВД) «Метео-

сервис». Назначением КАМО «Метеосервис» является автоматизация сбора, хранения, обработки метеорологических сводок, визуализация метеоинформации на рабочих местах автоматизированных систем УВД [1]. Изначально данный комплекс обладал рядом недостатков: интерфейс просмотра картографической информации был неудобен в использовании, отсутствовала возможность резервного способа доведения метеорологической информации. Поэтому разработчиками комплекса НПО «ЛЭМЗ» совместно со специалистами АМЦ Иркутск была произведена интеграция КАМО «Метеосервис» с системой удалённого доступа к ПАК UniMAS:

• в систему включена страница просмотра картографической информации с оптимизированным интерфейсом;

• разработана система отображения действующих сообщений SIGMET как в текстовом, так и в картографическом виде с отображением зоны действия и текста сообщения.

• в качестве резервного способа доведения метеорологической информации разработана система отображения метеоинформации в реальном времени. Обновление информации происходит в ежеминутном режиме, поступление специальных сводок сопровождается цветовой индикацией.

Для исключения ошибок и повышения качества метеоинформации, выпускаемой подразделениями Иркутского филиала ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета», были разработаны программы форматно-логического контроля сводок METAR, SPECI, прогнозов TAF, прогнозов GAMET. В случае наличия ошибок в тексте или сокращённом заголовке метеосообщения на странице, где осуществляется ввод текста сообщения, отображается предупреждение об ошибке. По мере выявления ошибок в работе программ ведётся их регулярная доработка. Тестирование программы форматно-логического контроля было проведено в нескольких филиалах ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета» и по результатам оперативно-производственного совещания Росгидромета в августе 2017 г. было принято решение о необходимости её доработки и внедрения в авиаметеорологические подразделения ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета».

В целом, разработка и внедрение собственных программных продуктов, позволяет Иркутскому филиалу ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета» повысить уровень метеорологического обеспечения, осуществить экономию денежных средств, оптимизировать производственные процессы.

Список литературы

1. Комплекс автоматизации метеорологического обслуживания (КАМО) процессов УВД «Метеосервис». Руководство по эксплуатации. Общая часть. М. : АО НПО «ЛЭМЗ», 2015. С. 93.

2. Универсальный метеорологический телекоммуникационный комплекс маршрутизации сообщений и файлов UniMAS. Программное обеспечение. Руководство оператора М. : ООО «М-Стар», 2012. С. 77.

УДК 550.385

Глобальная электрическая схема цепи магнитосферно-ионосферно-атмосферного взаимодействия

П. А. Седых (pvlsd@iszf.irk.ru), И. Ю. Лобычева (loir@iszf.irk.ru)

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск

Аннотация. Глобальная атмосферная электрическая цепь замыкается через высокоширотную ионосферу, и на состояние и изменения атмосферного электрического поля могут оказывать влияние магнитосферные возмущения. Процесс проникновения электрического поля солнечного ветра сложен, это явление нелинейно. Генерация конвекции плазмы в геомагнитосфере связана с процессами во фронте головной ударной волны. Совместное действие конвекции плазмы и питч-угловой диффузии электронов и протонов ведет к формированию распределения плазменного давления в магнитосфере. Как известно, объемные токи связаны с распределением плазменного давления в магнитосфере. Дивергенция этих объемных токов дает пространственное распределение продольных токов, т. е. магнитосферных источников ионосферных токовых систем. Продольные токи соединяют магнитосферу и ионосферу в единую электрическую цепь. Обсуждается вопрос о влиянии резкого возрастания электрического поля солнечного ветра через посредство глобальной электрической цепи во время магнитосферных возмущений на формирование облачного слоя (экранирующего слоя). Рассматривается также проблема влияния магнитосферных возмущений на вариации атмосферного электрического поля в полярных и авроральных широтах.

Ключевые слова: электрическое поле, магнитосферные возмущения, атмосфера, метеорологические процессы

Введение

Известно, что существуют различные ключевые факторы изменения климата Земли, а сам земной климат является продолжением космического климата. Данное исследование совмещает различные подходы и является продолжением работ [3, 8]. В предлагаемой работе обсуждается одна из самых актуальных и в то же время вызывающая самые сильные дискуссии проблема современной геофизики. Это воздействие магнитосферных возмущений на состояние нижней атмосферы и погоду. Исследования по воздействию солнечной активности на атмосферные процессы особенно стали актуальными в последнее время [4].

Мощность атмосферных процессов на несколько порядков превышает поток энергии из солнечного ветра в геомагнитосферу и мощность экстремально сильных магнитосферных возмущений. Как показано в [8] поток энергии из магнитосферы в атмосферу во время сильной бури был порядка $1{,}5\cdot10^{19}$ (эрг/с) $\cdot$ 24 $\cdot$ 3600=$1{,}2\cdot10^{24}$ эрг/сут, что на 2–3 порядка меньше мощности атмосферных процессов. Из-за этого представляется на первый взгляд крайне маловероятно, чтобы геомагнитная активность могла бы существенно воздействовать на состояние нижней атмосферы. Однако, как известно, в результате уменьшения (или увеличения) прозрачности атмосферы изменяется и поступление солнечной энергии в нижнюю атмосферу [9,10]. Энергия, необходимая для создания атмосферного оптического экрана, на несколько порядков меньше амплитуды вызываемых этим экраном вариаций потока солнечной энергии, поступающей в нижнюю атмосферу[9; 10].

Одна из важных проблем – это вопрос о влиянии резкого возрастания электрического поля солнечного ветра (или электрического поля магнитосферной конвекции) через посредство глобальной электрической цепи во время магнитосферных возмущений на формирование облачного слоя. В [9] был сделан вывод о том, что этот слой действует как экран, замедляющий радиационное выхолаживание воздуха, лежащего на ледяном куполе центральной Антарктики. Результаты [9; 10] демонстрируют влияние сильного южного ММП и соответствующего геоэффективного межпланетного эл. поля на атмосферные процессы в центральной Антарктике, где имеет место крупномасштабная система вертикальной циркуляции в зимние сезоны. Влияние межпланетного электрического поля осуществляется через ускорение воздушных масс, вторгающихся в нижнюю атмосферу из тропосферы, и образование облачности над Антарктикой, где вторгающиеся воздушные массы входят в поверхностный

слой. Облачность ведет к резкому потеплению в поверхностной атмосфере, потому что облачный слой (экран) эффективно отражает длинноволновое излучение, идущее от ледяной поверхности, но не влияет на процесс адиабатического потепления вторгающихся воздушных масс. Влияние межпланетного электрического поля на облачность обнаруживается для периодов минимума солнечной активности, когда эффект Форбуш-понижения отсутствует. Ускорения вторгающихся воздушных масс сопровождаются резким увеличением атмосферного давления в приполюсной области, которая приводит к усилению катабатического ветра. В [10] предполагается, что результирующее вторжение холодных воздушных масс в акваторию океанов и морей Южного полушария ведет к нарушению обычных взаимосвязей между флуктуациями нормального давления в субтропическом антициклоне (расположенному в юго-восточной части Тихого океана) и Австралийско-Индонезийском циклоне, поскольку развитие события Эль-Ниньо строго следует аномальным атмосферным процессам в Антарктике.

Глобальная атмосферная электрическая цепь замыкается через высокоширотную ионосферу, и на состояние и изменения атмосферного электрического поля могут оказывать влияние магнитосферные возмущения. Для продолжения исследования возможного влияния магнитосферных возмущений на характер развития метеорологических процессов в атмосфере рассмотрим проблему проникновения стороннего электрического поля из солнечного ветра.

Принципиальная эл. схема цепи взаимодействия.

Электрическое поле вдоль фронта головной ударной волны и электрический потенциал определяется значением нормальной компоненты скорости солнечного ветра и тангенциальной компоненты ММП [5].

Потенциал магнитопаузы находится из условий баланса вещества, поступающего через фронт ударной волны и уходящего из переходного слоя через магнитопаузу и через зазор между фронтом головной ударной волны и магнитопаузой. Если считать, что силовые трубки эквипотенциальны, то движение содержимого плазменных трубок полностью определяется движением их экваториального следа. Таким образом, достаточно определить распределение потенциала в экваториальной плоскости внутри границ, одна из которых – магнитопауза, изображается параболой, а вторая – плазмопауза, окружностью. Задача решается в параболических координатах, в которых оператор Лапласа выглядит наиболее просто. Решение ищется в виде разложения в ряд по ортогональным функциям стандартным способом. Характер распределения электрического поля по меридиану *утро – вечер* вполне соответствует классическому распределению, полученному по данным спутниковых измерений. Значимость результата состоит в том, что электрическое поле конвекции (с учетом коротации) получено «из первых принципов», и точно определен источник мощности для поддержания конвекции, а граничные условия на магнитопаузе не заданы исходя из интуитивных соображений, а получены из решения общей задачи.

Процесс проникновения электрического поля солнечного ветра сложен, это явление нелинейно.

Генерация конвекции плазмы в геомагнитосфере связана с процессами во фронте головной ударной волны[5]. Совместное действие конвекции плазмы и питч-угловой диффузии электронов и протонов ведет к формированию распределения плазменного давления в магнитосфере. Как известно, объемные токи связаны с распределением плазменного давления в магнитосфере. Дивергенция этих объемных токов дает пространственное распределение продольных токов, т. е. магнитосферных источников ионосферных токовых систем [7]. Продольные токи соединяют магнитосферу и ионосферу в единую электрическую цепь. Атмосферная проводимость стремительно падает уже между полярной ионосферой и слоем на высоте ~ 10 км.

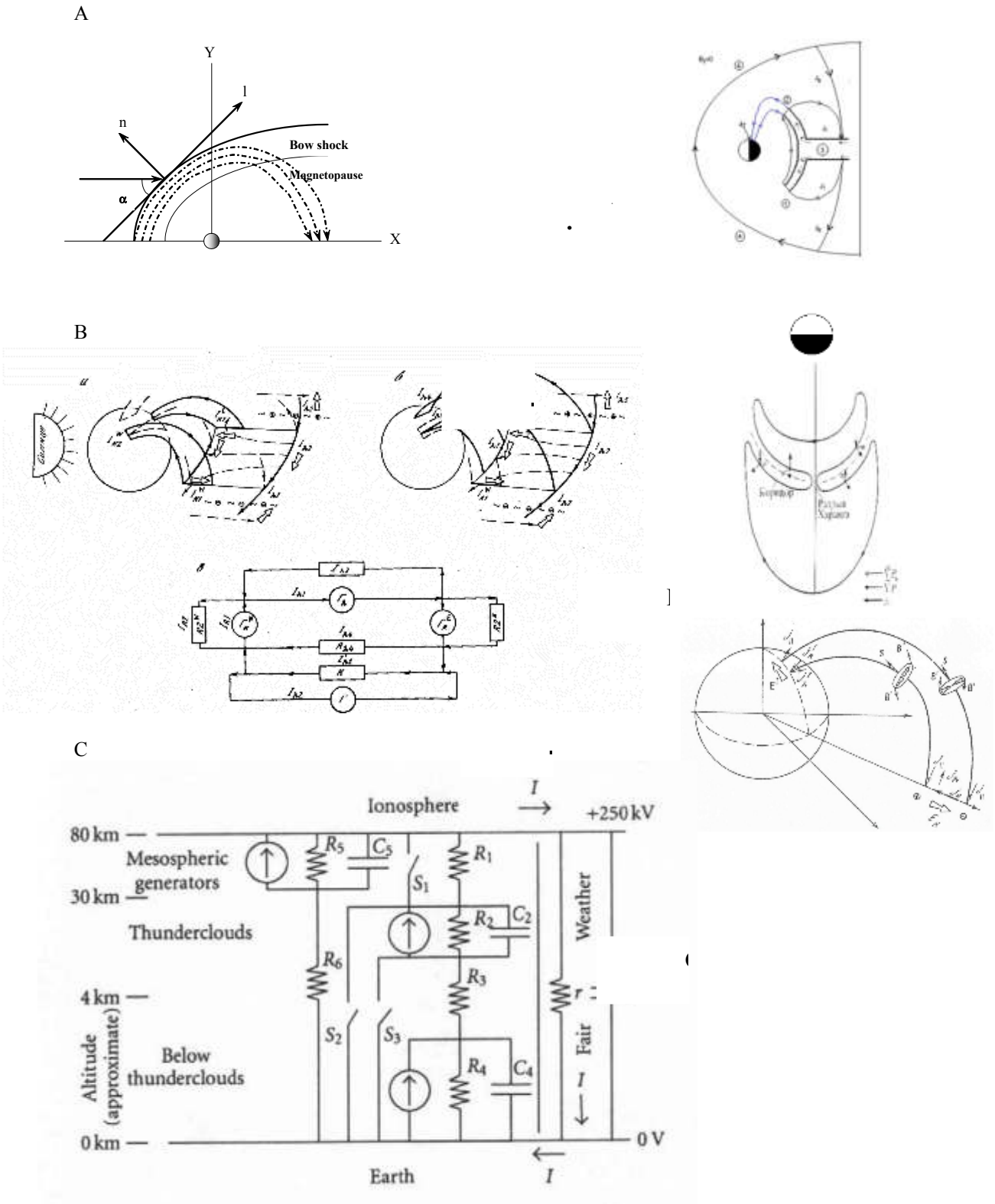


Рис. 1. Схема расположения функциональных блоков в геомагнитосфере и проникновение электрического поля (А). Схематически показаны линии эл. тока.

В – схема расположения магнитосферно-ионосферных токов в пространстве: *а* – система питания меридиональных токов, *б* – система питания широтных токов, *в* – эквивалентная схема цепи магнитосферно-ионосферных токов [7].

С – эквивалентная эл. схема для атмосферной цепи [6]

Очень интересный механизм, предложенный в [9] нуждается в дальнейшем рассмотрении и улучшении. Влияние магнитосферных возмущений на вариации атмосферного электрического поля наиболее отчетливо проявляется в полярных и авроральных широтах. Эффекты магнитосферных возмущений в вариациях атмосферного электрического поля были, например, обнаружены во время магнитных бурь и на средних широтах [1; 2].

По-существу, нет прямой непосредственной глобальной электрической цепи, через которое было бы возможно резкое возрастание электрического поля солнечного ветра во время магнитосферных возмущений.

Известно, что основным источником глобальной атмосферной электрической цепи и вариаций приземного атмосферного электрического поля является грозовая активность, мировые центры которой находятся в центральной части Африки, Азии и Америки (глобально интегрированный эффект этих гроз проявляется одновременно на всей Земле в изменениях напряженности электрического поля атмосферы).

Предложенная эквивалентная электрическая схема цепи взаимодействия может быть использована для понимания механизма воздействия геомагнитной активности на сложную нелинейную систему атмосферных процессов.

Работа выполнена в рамках научной темы № 0344–2016–0005.

Список литературы

1. Эффект магнитной бури в вариациях атмосферного электрического поля в средних широтах / Н. Г. Клейменова, О. В. Козырева, С. Михновски, М. Кубицки // Геомагнетизм и аэрономия. 2008. Т. 48, № 5. С. 650–659.

2. Клейменова Н. Г., Козырева О. В., Кубицки М., Оджимек А., Малышева Л. М. Влияние суббурь в ночном секторе Земли на вариации приземного атмосферного электрического поля в полярных и экваториальных широтах // Геомагнетизм и аэрономия, 2012. Т. 52, № 4. С. 494–500.

3. Седых П. А., Лобычева И. Ю. К вопросу о влиянии сильных магнитосферных бурь на метеорологические процессы в нижней атмосфере // Оптика атмосферы и океана: Физика атмосферы : сб. докл. XVIII Междунар. симп. Томск : Изд. ИОА СО РАН, 2012. CD-R. ISBN 978–5-94458–126–6. D299-D302.

4. Bucha V. Changes in geomagnetic activity and global temperature during the past 40 years // Stud. Geophys. Geod., AS CR, Prague, Inst. Geophys. 2012. Vol. 56. P. 1095–1107.

5. Ponomarev, E. A., Sedykh, P. A., Urbanovich, V. D. Generation of electric field in the magnetosphere, caused by processes in the bow shock // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2006. Vol. 68, Issue 6. pp. 679–684.

6. Rycroft, M. J. Electrical processes coupling the atmosphere and ionosphere: an overview // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2006. Vol. 68, N 3–5. P. 445–456.

7. Sedykh P. A., Ponomarev E. A. A structurally adequate model of the geomagnetosphere // Stud. Geophys. Geod., AS CR, Prague, Inst. Geophys. 2012. Vol. 56. P. 110–126, doi: 10.1007/s11200–011–9027–3.

8. Sedykh P. A., Lobycheva I. Yu. Concerning the lower atmosphere responses to magnetospheric storms and substorms // International Journal of Atmospheric Sciences, Hindawi Publ. Corp. Vol. 2013, ID130786. P. 1–9.

9. Troshichev O. A., Janzhura A. Temperature alterations Antarctic ice sheet initiated by the disturbed solar wind // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2004. Vol. 66. P. 1159–1172.

10. Troshichev O. A. Solar wind influence on atmospheric processes in the winter Antarctica // Russian-Chinese Workshop on Space Weather. Irkutsk, 2012.

УДК 550.385

Методика исследования влияния магнитосферных возмущений на метеорологические процессы в нижней атмосфере

П. А. Седых (pvlsd@iszf.irk.ru), И. Ю. Лобычева (loir@iszf.irk.ru)

Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск.

Аннотация. Во время бури и суббури ионосфера подвергается достаточно значительному джоулеву нагреву, мощность высыпающихся энергичных частиц очень велика, огромная энергия увеличивает температуру ионосферы, вызывает крупномасштабные ионные дрейфы и нейтральные ветры. Изучение глобального распределения проявлений геомагнитных возмущений в атмосферных данных охватывает те регионы, где можно искать ответственные за это атмосферные явления. Тропический циклогенез является одним из самых важных в прикладном отношении и изучаемых аспектов в динамике метеорологических мезомасштабных процессов. Для исследования возможного влияния магнитосферных возмущений на характер развития метеорологических процессов в атмосфере мы отбираем примечательные события, каждое из которых имело свою особенность.

Ключевые слова: магнитосферные бури, суббури, электрическое поле, атмосфера.

Для исследования возможного влияния мощных магнитосферных бурь на характер развития метеорологических процессов в атмосфере, для исследования взаимосвязи магнитосферных возмущений с изменением метеорологического фона после них в течение времени до 10 сут., для каждой магнитосферной бури мы использовали магнитограммы наземных станций, значения AE-индекса (AU, AL), значения Dst-индекса и рассчитывали некоторые параметры, характеризующие энергетику магнитосферных возмущений. Для исследования изменений геомагнитной активности и метеорологических параметров исследуемая высокоширотная область была разделена на шесть зон с характерными типами температурных изменений[7]: Тихоокеанская, Канадская, Атлантическая, Европейская, Сибирская и Дальневосточная. Цель работы – показать или исключить возможность влияния сильных магнитосферных возмущений на метеорологические процессы в нижней атмосфере и погоду.

Обнаружение связи между магнитосферными бурями и метеорологическими эффектами в атмосфере затруднено из-за слабости воздействия геомагнитных бурь на тропосферу в сравнении с множеством других факторов, влияющих на нее. Изучение глобального распределения проявлений геомагнитных возмущений в атмосферных данных охватывает те регионы, где можно искать ответственные за это атмосферные явления. Тропический циклогенез является одним из самых важных в прикладном отношении и изучаемых аспектов в динамике метеорологических мезомасштабных процессов. Особое внимание будет уделено для каждого из следующих четырех основных регионов циклогенеза: Северо-восток и центр Тихого океана, Северо-запад Тихого океана, Атлантика. Таким образом еще одна важная цель работы – исследовать в динамике структуры циклонов, периоды со специфическими особенностями, с внезапными изменениями их треков, и связать их с вариациями параметров возмущенной геомагнитосферы.

Данные по магнитосферным возмущениям

Магнитосферная буря 3 мая 1986 г. в интервале (0000–1100)UT, которая исследовалась в рамках международного проекта CDAW9C, состоит из цепочки 4 суббурь[4]. Событие 3 мая 1986 г. – относится к сильной магнитосферной буре, произошедшей во время 21-го цикла солнечной активности. Для данной бури характерно то, что значения AE-индекса достигали значений порядка 1400–1500 нТл, а вот значения Dst-индекса достигали значений всего порядка -70–80 нТл. Данное событие примечательно тем, что буря состоит из 4 суббурь, а в результате таймирования каждой из 4-х суббурь были выделены фазы суббури. Пользуясь терминологией работы [1], назовем эти фазы, соответственно, фазой роста (1), активно-конвективной фазой (2), взрывной фазой (3) и фазой восстановления (4). Данные по событию 3 мая 1986 г. (рис. 1) могли бы использоваться для того, чтобы проследить вклад и

каждой фазы суббури (загрузка-разгрузка энергии) в сложный комплекс процессов в нижней атмосфере.

Магнитосферная буря 13–14 марта 1989 г. – относится к сильнейшей магнитосферной буре с начала космической эры (рис. 2), произошедшей во время 22-го цикла солнечной активности[6]. Максимальной интенсивности геомагнитная буря достигла 13 марта 1989 г., когда Dst-индекс достиг рекордного значения порядка -600 нТл [6]. Исследованию данной бури посвящено множество работ, и ради экономии места мы не будем приводить графики геомагнитных индексов, характеризующих эту бурю.

Резкий всплеск солнечной активности в октябре-ноябре 2003 г. привел (см. рис. 3) к сильным магнитосферным бурям (достаточно хорошо изученное явление) с высокими значениями AE-индекса в период 28–31 октября 2003 г. и Dst-индекса (порядка -400 нТл) [2].

Мощность джоулева нагрева ионосферы $U_j=\int_S \Sigma_P E^2 dS$ рассчитывается, например, с помощью методов AMIE [9] или оценивается на основе эмпирических формул, как функция AE-индекса[5]: U_j=0,33AE, где U_j – в ГВт, AE-индекс в нТл. Мощность высыпающихся в ионосферу энергичных частиц U_a также можно оценить на основе эмпирических формул вида U_a=1,75· (AE/100+1,6)· 10^{10} (Вт) [5].

В таблице 1 представлены тропические циклоны, которые наблюдались в годы магнитосферных возмущений.

Таблица 1

Регион	1986 г *	1989 г*	2003 г *
Североатлантика	Июнь, август, сентябрь, ноябрь	Июнь, июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь	Апрель, июнь, июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь
Восточная часть Тихого океана	Май, июнь, июль, август, сентябрь, октябрь	Январь, май, июнь, июль, август, сентябрь, октябрь	Январь, май, июнь, июль, август, сентябрь, октябрь
Западная часть Тихого океана	В течение всего года	Январь, апрель, май, июнь, июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь	Апрель, май, июнь, июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь

*Указаны месяцы, когда наблюдались шторма в этих годах.

Особое внимание необходимо проявить к вопросу о влиянии резкого возрастания электрического поля солнечного ветра через посредство глобальной электрической цепи во время магнитосферных возмущений на формирование облачного слоя. Это необходимо для того, чтобы проверить предположения о том, что этот слой может действовать как экран, замедляющий радиационное выхолаживание воздуха, лежащего на ледяном куполе центральной Антарктики (в результате, в приземном слое атмосферы происходило бы потепление, а выше облачного слоя — похолодание [3; 11]).

Заключение

Особое внимание мы уделили также вопросу о влиянии резкого возрастания электрического поля солнечного ветра через посредство глобальной электрической цепи во время магнитосферных возмущений на формирование облачного слоя. Это необходимо для того, чтобы проверить предположения о том, что этот слой может действовать как экран, замедляющий радиационное выхолаживание воздуха, лежащего на ледяном куполе центральной Антарктики (в результате, в приземном слое атмосферы происходило бы потепление, а выше облачного слоя — похолодание) [11]. Глобальная атмосферная электрическая цепь замыкается через высокоширотную ионосферу, и на состояние и изменения атмосферного электрического поля могут оказывать влияние магнитосферные возмущения. По-существу, нет прямой непосредственной глобальной электрической цепи, через которое было бы возможно резкое возрастание электрического поля солнечного ветра во время магнитосферных возмущений. Процесс проникновения электрического поля солнечного ветра сложен, это явление нелинейно [8; 10]. Воздействие геомагнитосферных возмущений на тропосферу слабо в сравнении с множеством других факторов, влияющих на нее.

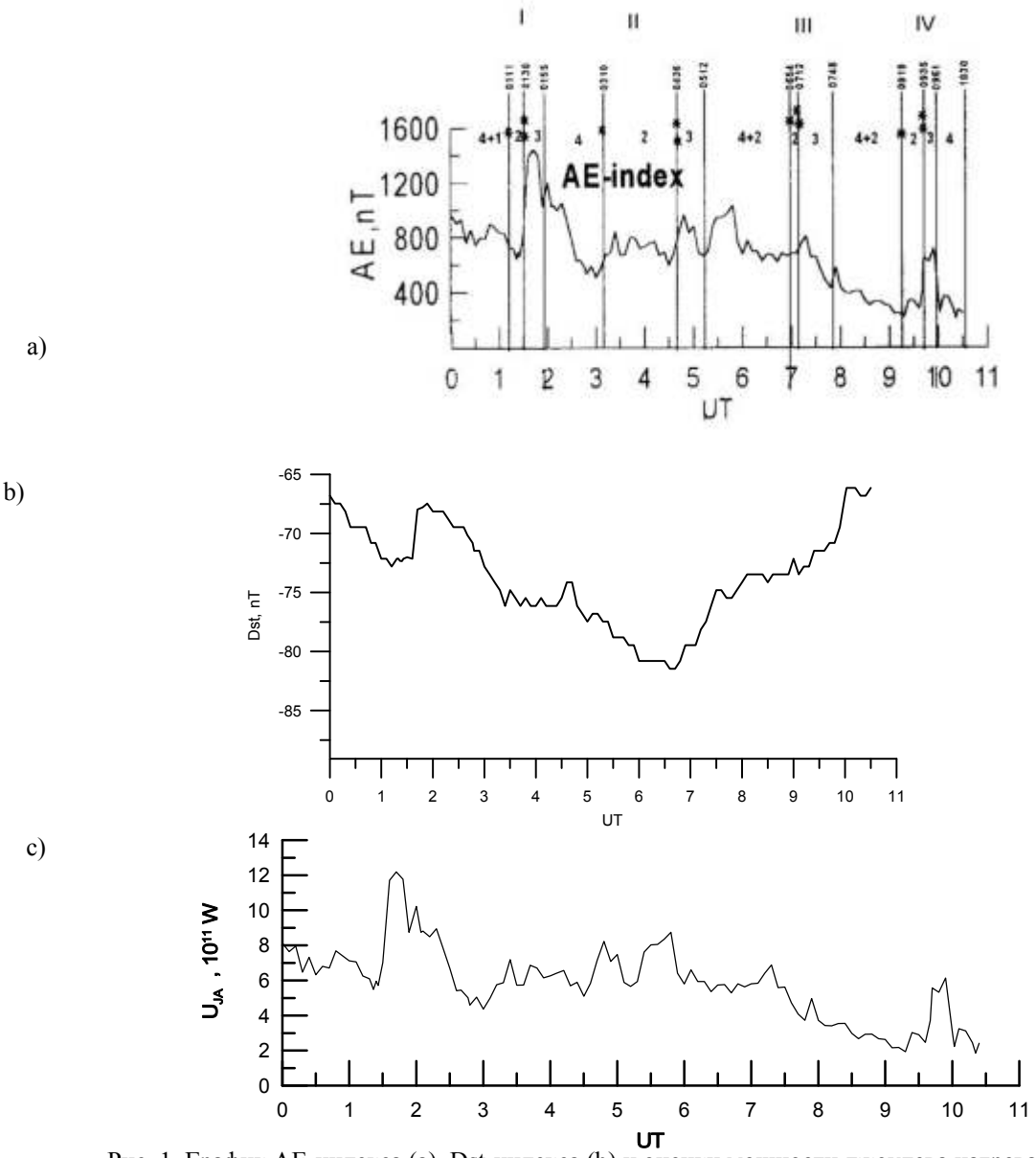


Рис. 1. График AE-индекса (a), Dst-индекса (b) и оценки мощности джоулева нагрева ионосферы и мощности высыпающихся в ионосферу энергичных частиц (c) для цепочки суббурь CDAW9C, 3 мая 1986 г.[4]

Как видно из таблицы в 1986 г в мае наблюдался шторм в Восточной части Тихого океана. Но данный шторм существовал с 22–29 мая, что не может быть связано с магнитной бурей (3 мая 1986 г.), а подтверждает климатологию тропических циклонов (в Тихом океане тропические циклоны возникают с мая по ноябрь). Нами оценивалась степень влияния магнитосферных бурь на развитие или подавление тропического циклогенеза. Сравнивались скорости движения циклона и время их жизни. В результате исследования нами было показано, что магнитная буря в марте 1989 г. не оказала непосредственного влияния на характер развития тропического циклогенеза. Что касается бурь в октябре-ноябре 2003 г., то нельзя ответить также однозначно, так как в октябре-ноябре 2003 года наблюдалось более 5 интенсивных и длительных циклонов. Шторм в Североатлантике 13 октября – 1 ноября просуществовал максимально долго (19 дней) при среднем времени жизни циклона в Атлантике 9 суток. В октябре 2003 г. в Восточной части Тихого океана наблюдалось 3 выхода тропического циклона: Hurricane Nora (1–9 октября, с максимальным ветром 41м/с); Tropical Storm Olaf (3–8 октября с максимальной скорость 30 м/с); Tropical Storm Patricia (20–26 октября с максимальной скоростью ветра 31 м/с). Дальнейшие исследования необходимы для того, чтобы проверить, что магнитные бури могут влиять на стимулирование тропического циклона, или

же что наличие магнитосферных возмущений препятствует возникновению тропического циклона, способствует его завершению (подавляет ураган). Необходимо дальнейшее исследование характера влияния геомагнитосферных возмущений на тропический циклогенез, так как характер влияния имеет региональные особенности (peculiarities). Для этого требуется исследование также других типов магнитосферных возмущений (sawtooth events – пилозубообразные возмущения, stationary magnetospheric convection events – события стационарной магнитосферной конвекции, супер-суббури, экстра-бури) и возможного их воздействия на сложную нелинейную систему атмосферных процессов.

Результаты настоящего исследования будут необходимы для разработки механизмов влияния солнечной активности на состояние нижней атмосферы и погоду, и тем самым позволят определить подходы к решению проблемы солнечно-земных связей.

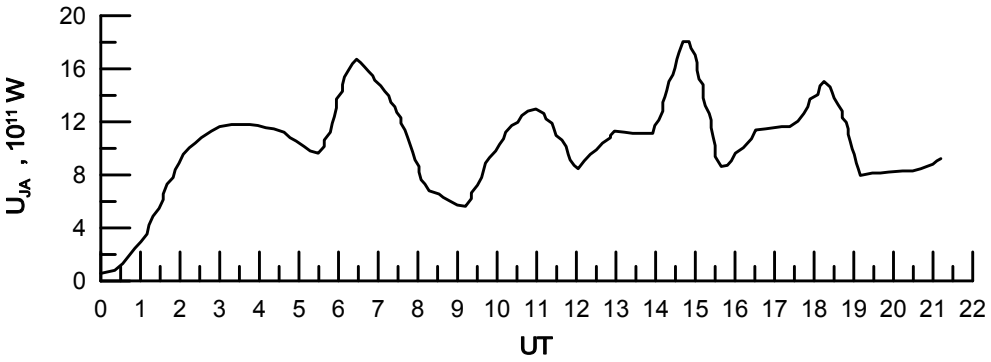


Рис. 2. Оценки мощности джоулева нагрева ионосферы и мощности высыпающихся в ионосферу энергичных частиц для бури 13 марта 1989 г.

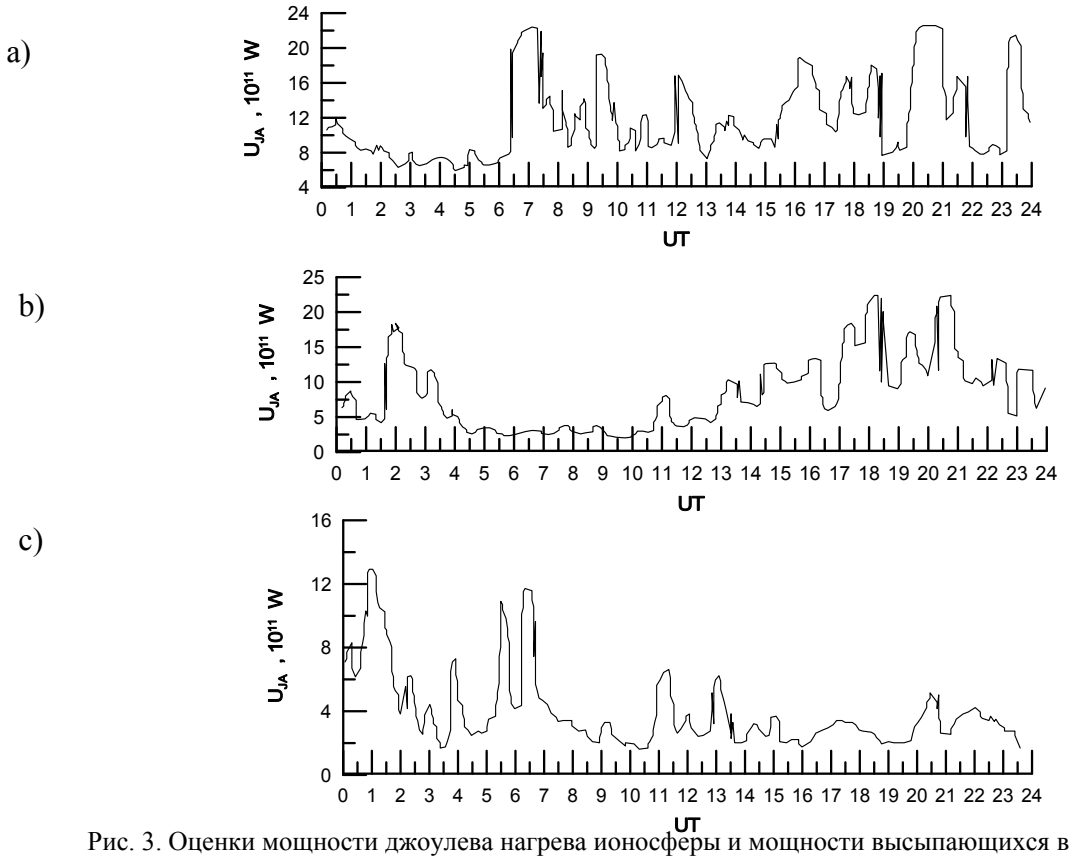


Рис. 3. Оценки мощности джоулева нагрева ионосферы и мощности высыпающихся в ионосферу энергичных частиц: a) 29 октября 2003 г. ; b) 30 октября 2003 г.; c) 31 октября 2003 г.

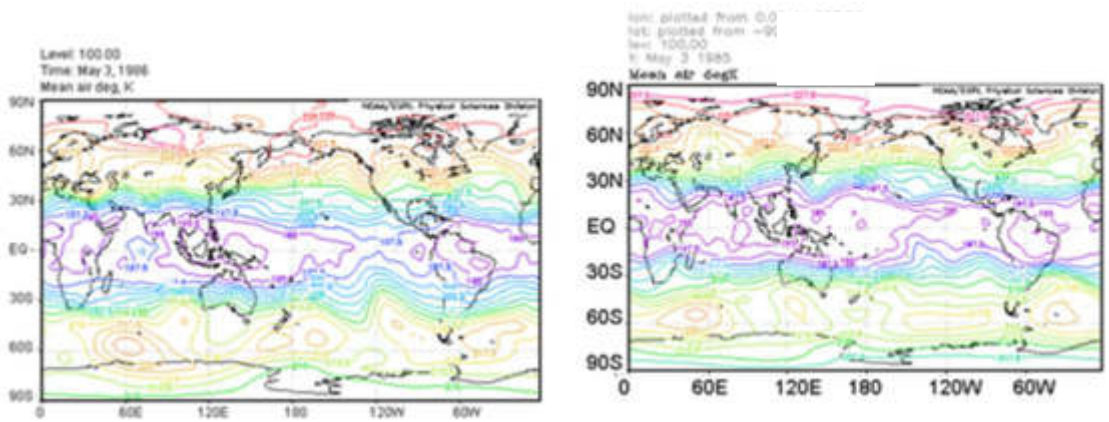


Рис. 4. Средняя температура на уровне 100 гПа. Пример реанализа для цепочки суббурь 3 мая 1986 г. (а). и для спокойного дня (значения АЕ-индекса ≤100 нТл) 3 мая 1985 г. (б)

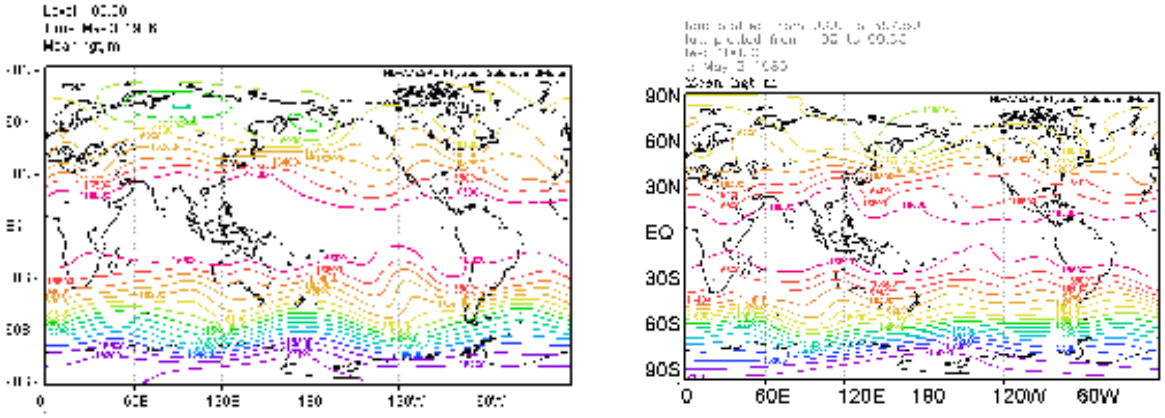


Рис. 5. Высота изобарической поверхности на уровне 100 гПа Пример реанализа для 3 мая 1986 г. (а) и для спокойного дня (значения АЕ-индекса ≤100 нТл) 3 мая 1985 г. (б)

Авторы благодарны создателям и разработчикам следующих сайтов за предоставленные данные по магнитосферным возмущениям, данные метеорологических процессов в атмосфере и тропических циклонов:

1) [http://www.nhc.noaa.gov/pastall.shtml];

2) [http://www.csc.noaa.gov/hurricane_tracks];

3) [http://www.aoml.noaa.gov/hrd/hurdat/ ushurrlist18512007.txt];

4) [http://russian.wunderground.com/hurricane/hurrarchive. asp?region=at];

5) [ftp://ftp.cdc.noaa.gov]; 6) [http://www.viems.ru/ asnti/ntb/ntb502/oboc5.html].

Работа выполнена в рамках научной темы № 0344–2016–0005.

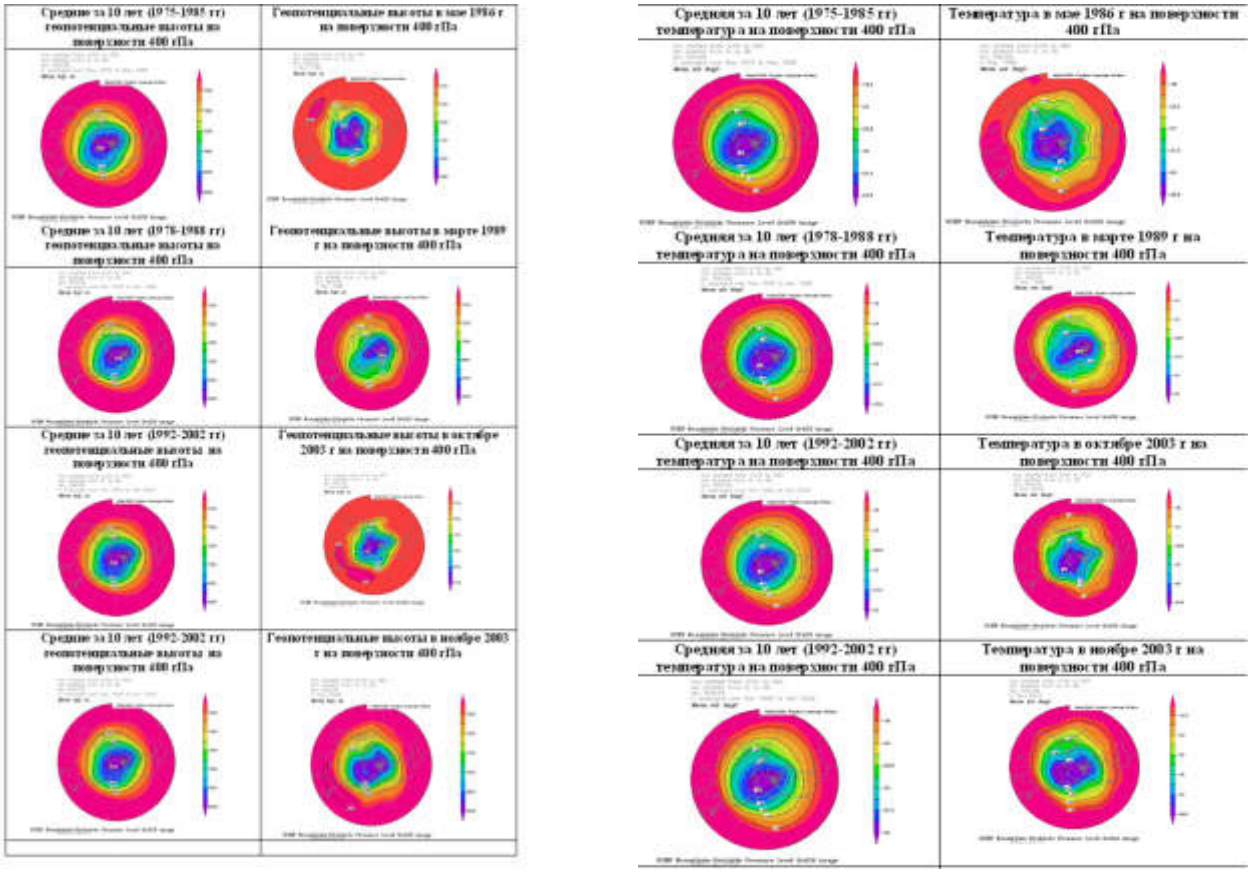


Рис. 6. Пример сравнения осредненных за 10 лет геопотенциальных высот и температуры на поверхности 400 гПа и тех же параметров в год, наблюдавшегося возмущения.



Рис. 7. Пример информации о тропических циклонах, март 1989 г.

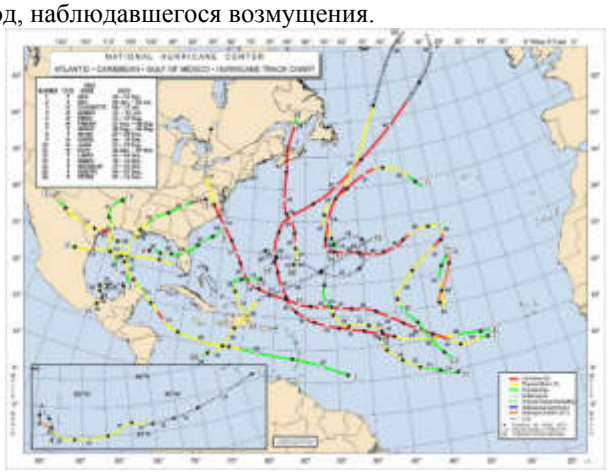


Рис. 8. Пример информации о тропических циклонах для событий 2003 г.



Рис. 9. Пример информации об изменении скорости ветра при тропическом циклоне в Восточной части Тихого океана в мае 1986 г.

Список литературы

1. Физика околоземного космического пространства / Ю. П. Мальцев [и др.]. КНЦ РАН. ПГИ, 2000. Т. 1. С. 216.
2. Магнитные бури в октябре 2003 года / М. И. Панасюк [и др.] // Коллаборация “Солнечные экстремальные события 2003 года (СЭС-2003)” // Косм. исслед. 2004. Т. 42, № 5. С. 489–534.
3. Пудовкин М. И. Влияние солнечной активности на состояние нижней атмосферы и погоду // Образоват. Журн. 1996, № 10, С. 106–113.
4. Седых П. А., Миненко Л. В. Исследование суббурь CDAW9C // Сборник БШФФ. Иркутск, 1999. Т. 2. С. 562–576.
5. Estimation of ionospheric electrodynamics parameters using ionospheric conductance deduced from Bremsstrahlung X-ray image data / B. H. Ahn, H. W. Kroehl, Y. Kamide, D. J. Gorney // J. Geophys. Res. 1989. Vol. 94. P. 2565.
6. Hajkowicz L. A. Global onset and propagation of large-scale travelling ionospheric disturbances as a result of the great storm of 13 March 1989 // Planetary and Space Science. 1991. Vol. 39. P. 583–593.
7. Panin G. N., Vyruchalkina T. J., Solomonova I. V. Analysis of climatic tendencies in high latitudes of Northern hemisphere // Izvestiya of Russian Academy of Sciences. V. Geography. 2008. N 6. P. 31–41.
8. Ponomarev E. A., Sedykh P. A., Urbanovich V. D. Generation of electric field in the magnetosphere, caused by processes in the bow shock // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. Elsevier Science. 2006. Vol. 68, Issue 6. P. 679–684.
9. Richmond, A. D., Lu, G., Emery, B. A., Knipp, D. J. The AMIE procedure. // Adv. Space Res., 1998, 22, 1, 103–112.
10. Sedykh P. A. On the role of the bow shock in power of magnetospheric disturbances // Sun & Geosphere. Special issue of ISWI/United Nations/NASA/JAXA/AGU/ESA. 2011. Vol. 6(1). P. 27–31.
11. Troshichev O. A., Janzhura A. Temperature alterations Antarctic ice sheet initiated by the disturbed solar wind // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2004. Vol. 66. P. 1159–1172.

УДК 551.52

Формирование и динамика температурного режима приземного слоя атмосферы Ямало-Ненецкого автономного округа

М. Д. Симакин (simakin_m@mail.ru)

Пермский государственный национально-исследовательский университет, Пермь

Аннотация. Представлены результаты исследования процессов, оказывающих наибольшее влияние на температурный режим Ямало-Ненецкого автономного округа, а также результаты анализа изменчивости температурного режима в сезонном и многолетнем масштабах.

Ключевые слова: температурный режим, Ямал, климат.

В настоящее время интерес всего мира к Арктическому региону значительно вырос. Так как Арктика является той самой наиболее чувствительной частью глобальной климатической системы, в которой развиваются сильные естественные флуктуации климата с неарктическими её частями вследствие взаимодействий между компонентами арктической системы и изменений за пределами климатической системы в целом. [1] Вся территория Ямало-Ненецкого автономного округа входит в Арктическую зону России и является одним из передовых субъектов в освоении и изучении Арктики. В регионе базируется основная часть добычи углеводородов.

Температурный режим приземного слоя атмосферы Ямало-Ненецкого автономного округа рассматривается на основе анализа данных из архива метеорологических наблюдений на береговых, островных и внутриматериковых станций за период с 1990 по 2016 г.

В качестве объекта анализа были выбраны четыре метеостанции, расположенные меридионально с минимальным разбросом по широте, в четырёх климатически неоднородных районах субъекта: метеостанция им. Попова на острове Белом, станция Марре-Сале на одно-

имённом мысу, метеостанция в г. Салехард, метеостанция Тарко-Сале. В северных и северо-западных частях региона температурный режим формируется под влиянием циркуляционных процессов в акватории Северно-Ледовитого океана и северной Атлантики, а также адвекцией тепла и влаги. К юго-востоку всё большее влияние оказывают сибирский центр действия атмосферы, большее количество солнечной радиации, а так же арктические воздушные массы. Большое влияние на состояние температурного режима в регионе оказывают ледовые условия в Карском море и состояние многолетнемёрзлых пород.

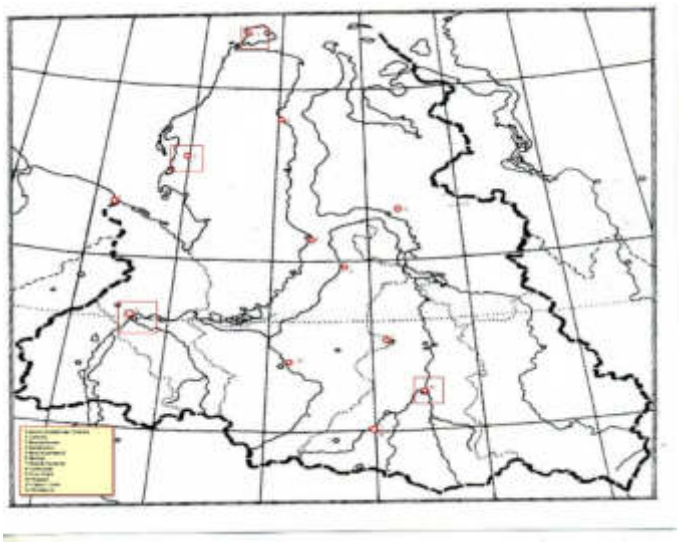


Рис. 1. Карта-схема расположения метеостанций

На рис. 2 представлены амплитуды колебания температуры за 1990 год. Здесь видна тенденция к увеличению амплитуды колебания температуры воздуха в материковой части и уменьшению в прибрежной части района. Относительная близость Атлантического океана слегка смягчает суровость климата Карского моря, однако острова Новой Земли являются преградой на пути адвекции тепла.

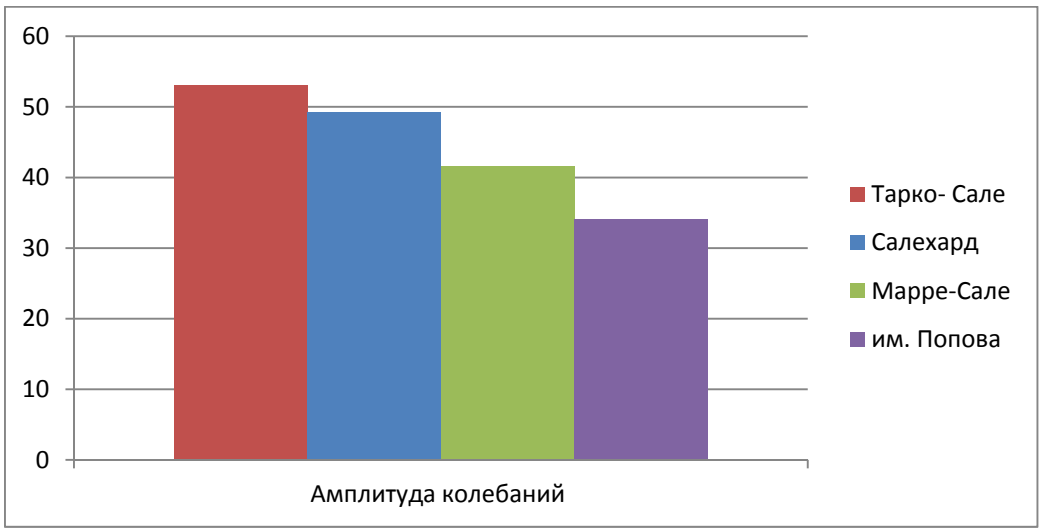


Рис. 2. Среднегодовая амплитуда колебаний температур

Обзор температурного режима на метеостанциях за 1990 год

Для более чёткого представления характера температурного режима был построен график распределения среднегодовой температуры воздуха по месяцам (рис. 3) По причине нефункционирования некоторых станций в определённые годы, для визуализации был выбран 1990 год, как год с наиболее полной информацией со станций.

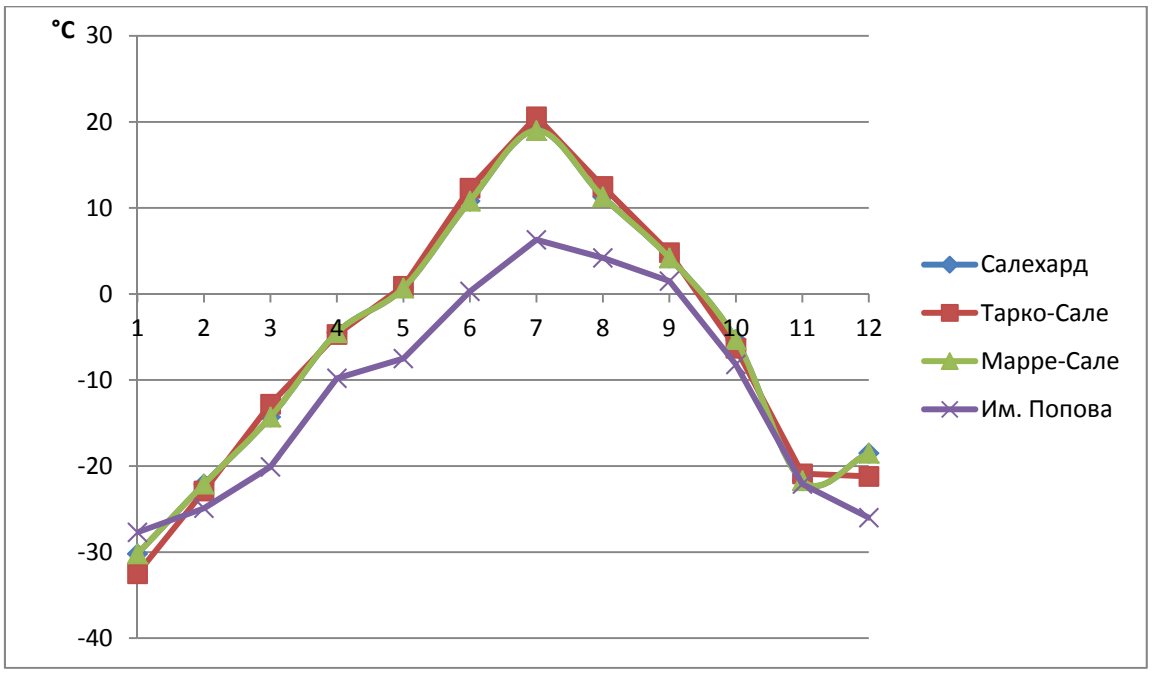


Рис. 3. График распределения температуры за 1990 год

Метеорологическая станция Тарко-Сале расположена в северной части Западно-Сибирской низменности на правом берегу р. Пяку-Пур, которая на расстоянии 3 км к северу от станции сливается с р. Айвоседе-Пур, образуя реку Пур. Рельеф местности равнинный, местами заболоченный [4]. На графике распределения температуры на станции за 1990 год видно практически симметричное распределение температуры с пиковым значением +20,6 °С в июле. Минимальная температура воздуха отмечалась в январе и составила -32,5 °С. Среднегодовая температура воздуха в приземном слое атмосферы составила -5,9 °С. Амплитуда составила 53,1 °С.

Метеостанция Салехард находится вблизи окружного центра. Расположена на Полуйской возвышенности Западно-Сибирской равнины. В месте слияния Полуя и Оби. [4] Кривая распределения температуры по месяцам станции Салехард имеет схожий вид с кривой станции Тарко- Сале. По анализу данных на 1990 год, максимальное значение температуры приходилось на июль – +19 °С. Минимальная отметка достигала значения в январе – -30,2 °С. Средняя амплитуда колебаний же составила 49,2 °С, что немногим меньше значения на предыдущей станции.

Метеорологическая станция Марре-Сале находится на юго-западной оконечности полуострова Ямал, недалеко от устья реки Марре-Яга, на мысе Марре-Сале. Является одной из старейших полярных метеорологических станций. Согласно графику, мы видим, что по состоянию на 1990 г. самым тёплым месяцем является июль (+13,4 °С), самым холодным- январь (-28,1 °С). Менее ярко выраженный градиент температуры обусловливается географическим положением метеостанции и, непосредственно, близостью Карского моря. На графике видны более сглаженные значения температуры в марте-апреле.

Метеостанция им. М. В. Попова расположена на северо-западной оконечности острова Белый, в Карском море. Функционирует с 1933 года. Является единственным местом обитания людей на острове. Поверхность острова покрыта тундровой растительностью. Имеется много термокарстовых озёр. От Ямальского полуострова остров Белый отделен проливом Малыгина, ширина которого в самом узком месте 9 км. Температурный режим острова существенно смягчается за счёт своего месторасположения. На графике распределения среднегодовой температуры по месяцам за 1990 год наблюдается ярко выраженное сглаживание кривой. Своих максимальных показателей температура достигала в июле 6,3 °С. Минимальное значение приходилось на январь и достигало отметки -27,7 °С. Амплитуда колебаний температуры составила 34,0 °С.

Обзор межгодовой изменчивости температуры воздуха

На рис. 4 представлены межгодовые колебания температуры воздуха в пункте Тарко-Сале. Сравнение показателей проведено относительно нормы. Нормальная температура воздуха для пункта Тарко-Сале (относительно нормам 1961- 1990гг.) составляет -6,1 °С. Построены линейный тренд и уравнение тренда. Согласно графику, за период с 2001 по 2015 г. (за исключением 2006, 2009 и 2010 годов) аномалия температуры воздуха сохраняла положительный знак. Наибольшая аномалия температуры отмечалась в 2011 году и составила 3,4 °С выше нормы. Согласно расчётам, рост температуры за рассматриваемый временной период (1990–2015 гг.) составляет 0,1 °С/год или 2,7 °С/25 лет.

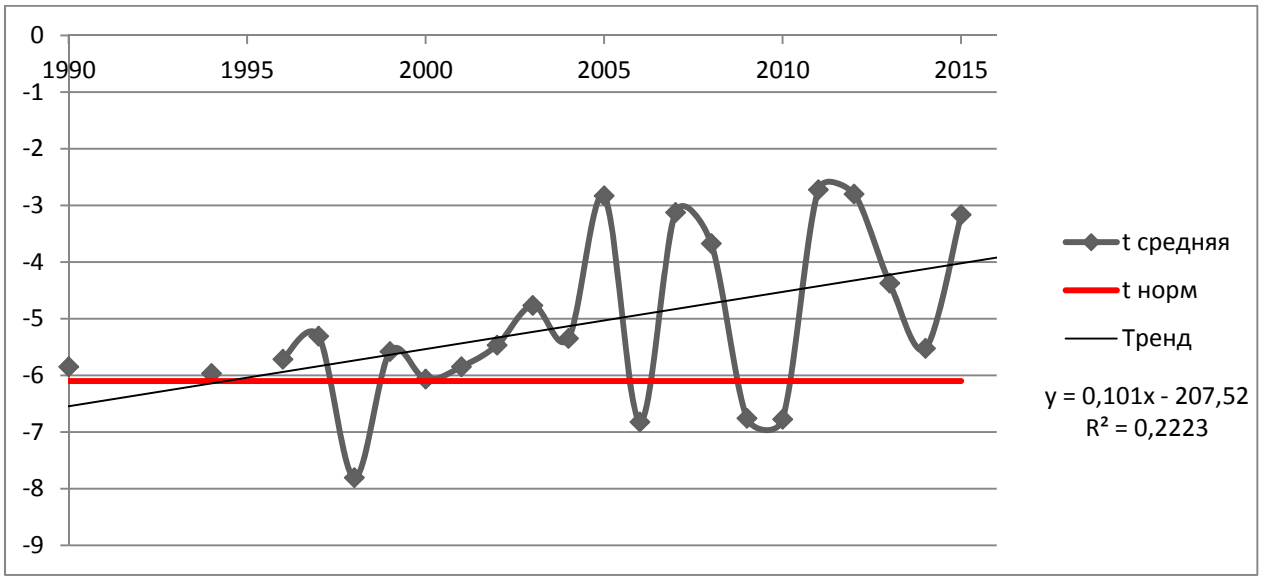


Рис. 4. Межгодовые колебания температуры воздуха Тарко-Сале

На рисунке 5 можно увидеть общий тренд изменения температуры за период с 1990 по 2015 г. в пункте Салехард. Норма 1961–1990 гг. для Салехарда составлял -5,7 °С. Наибольшие положительные аномалии температуры наблюдались в 1995 и 2012 гг. (2,7 °С и 2,4 °С соответственно). Согласно тренду, рост температуры составляет 2 °С/25 лет.

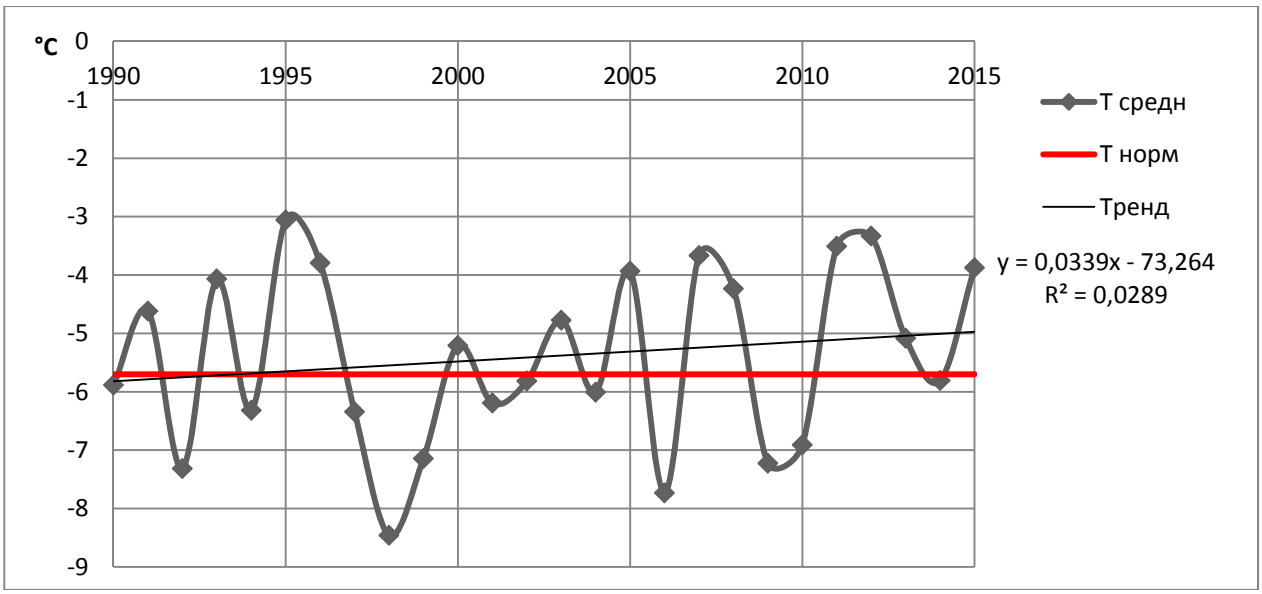


Рис. 5. Межгодовая изменчивость. Салехард

По имеющимся обрывочным данным был построен график межгодового распределения температуры в пункте Марре-Сале (рис. 6). Так можно отметить, что в общей картине, наблюдается положительный тренд температуры воздуха. Согласно графику, самым тёплым годом был 1995 г., когда среднегодовая температура составляла -4,8 °С. Самым холодным же оказался 1998 г. (-10,7 °С).

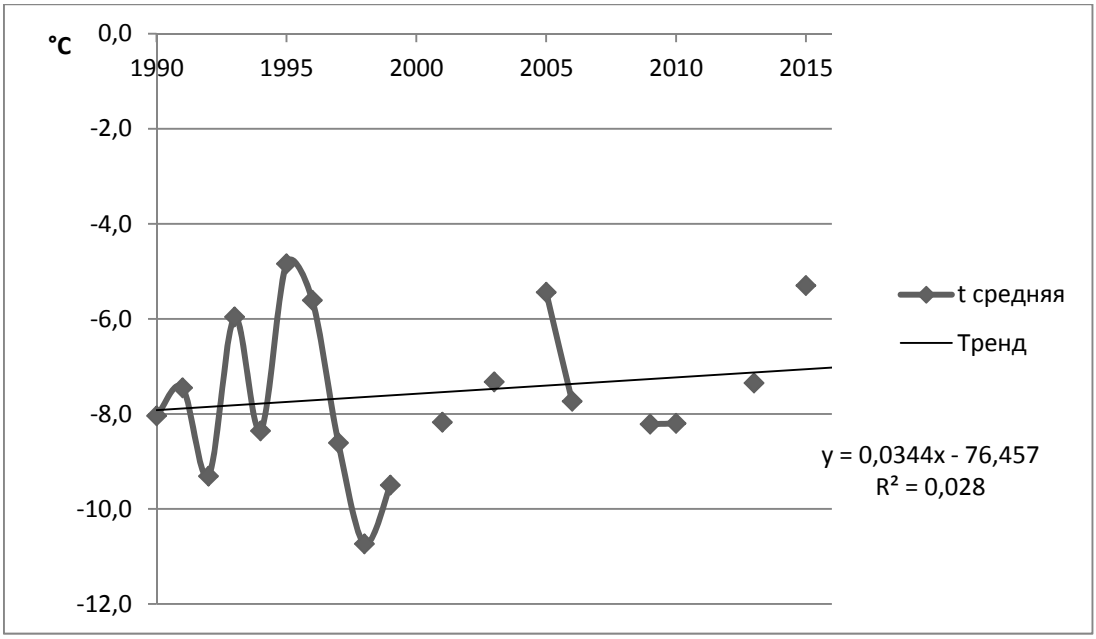


Рис. 6. Среднегодовые значения температуры 1990–2015 гг.

Опираясь на имеющиеся данные с метеостанции им. Попова во ВНИИГМИ-МЦД, был построен график межгодовых колебаний температуры и была проведена линия тренда (рис. 7). По данным с шести лет, у которых можно было высчитать среднегодовую температуру воздуха, виден положительный тренд изменчивости среднегодовой температуры. Согласно расчётам, рост температуры составляет 0,2 °С/год или 4 °С/25 лет.

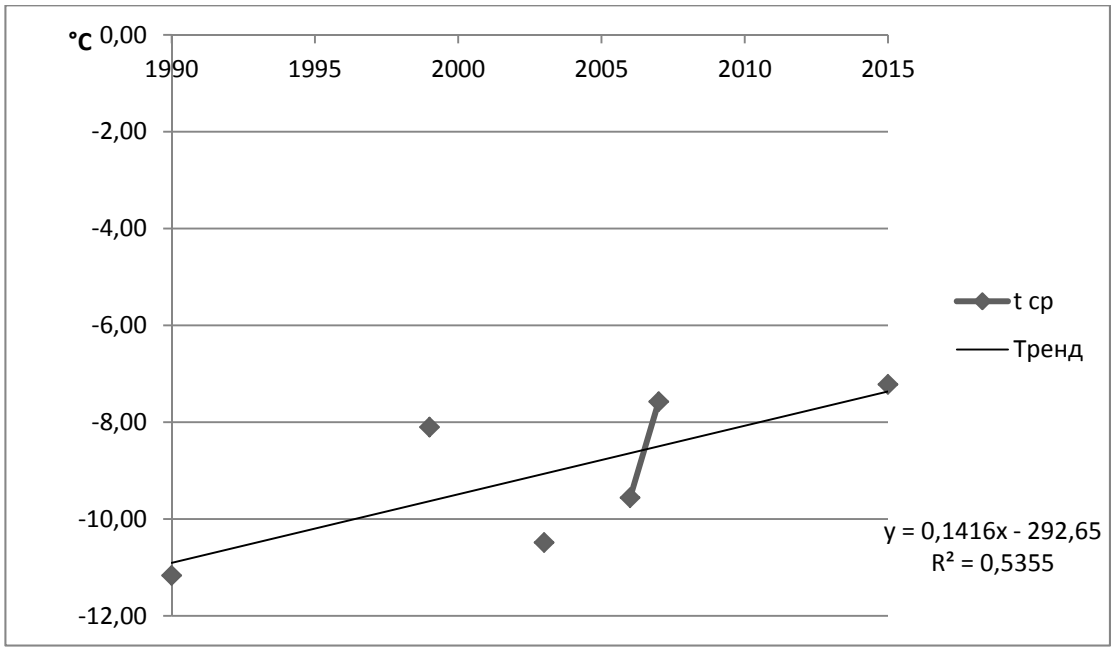


Рис. 7. Межгодовое распределение средней температуры на метеостанции им Попова

Взаимосвязь температурного и ледового режимов

Как мы видим, на всех четырёх графиках межгодового распределения средней температуры воздуха за период с 1990 по 2016 г. – на станциях наблюдается положительный знак тренда межгодовой изменчивости температуры. На формирование температурного режима в изучаемом районе в тот или иной год оказывают своё влияние множество факторов. В том числе, состояние ледовых условий в Карском море. Модельные расчёты, условия образования, а также прогнозы ледовой обстановки подробно описаны в работе [2].

Как мы можем увидеть на графике 10 , за период с 1990 по 2016 год наблюдается отрицательная динамика тренда ледовитости Карского моря, что говорит об общей тенденции снижения ледовитости. Наименьшие значения, из общей динамики, приходятся на максимальные значения среднегодовой температуры в 1995 и 2012 гг.

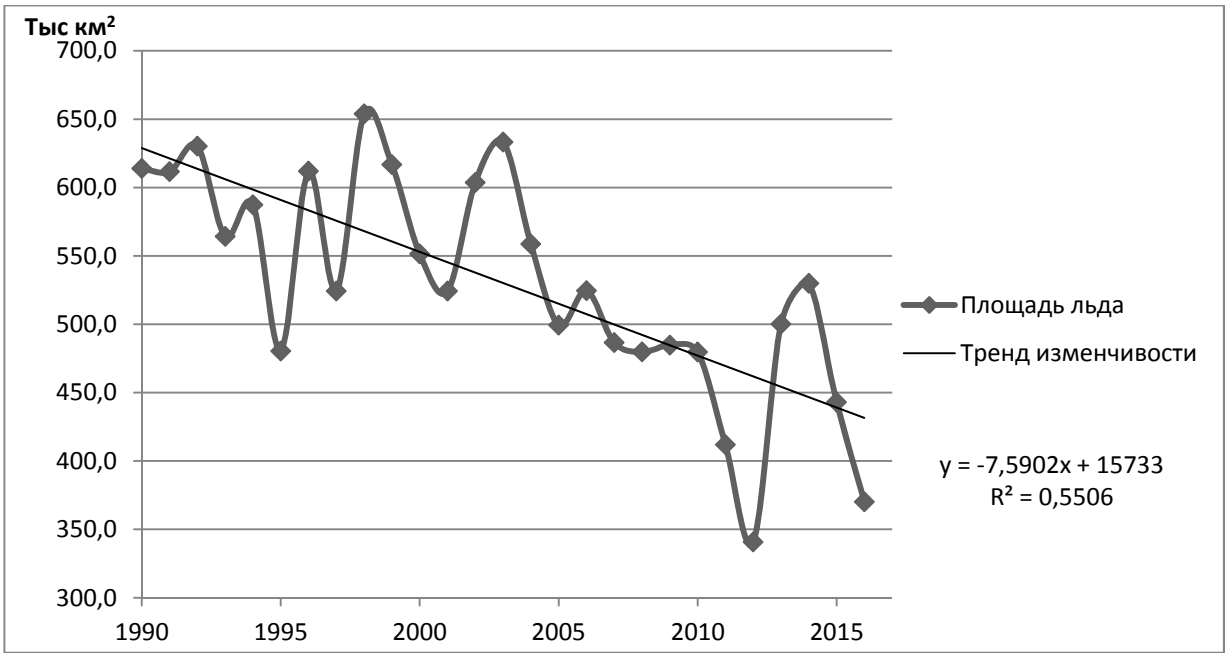


Рис. 8. Динамика ледовитости Карского моря

На рисунке 9 видна ледовая обстановка во всей СПО на 12–14 февраля 2012 г. На нём видно, что большая часть юго-западной части Карского моря не покрыта льдом, а остальная часть схвачена молодым льдом, толщиной до 30 см.

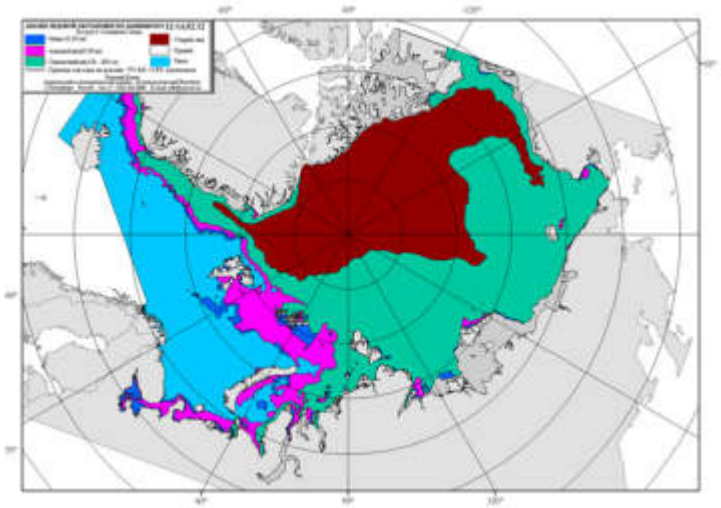


Рис. 9. Ледовые условия северной полярной области

Общее снижение ледовитости Карского моря происходит на фоне общего потепления климата. На фоне изменения температурного режима приповерхностного слоя воздуха происходят так же и изменения в ледообразовании. От температуры воздуха в октябре-апреле и в июне, зависит толщина наросшего льда зимой и интенсивность его таяния летом. Таким образом, можно сделать предположение, что основной причиной наблюдаемых многолетних изменений ледовитости моря являются соответствующие изменения циркуляции с северной полярной области [1]. В начале 90-х гг. поступили первые сведения о необычно высоких температурах в слое воды атлантического происхождения к северу от Карского моря [7] В апреле 1993-го экспедиция «Север-45» зафиксировала температуру на 1 ° выше средней.

Математически были высчитаны коэффициенты корреляции для всех станций, чтобы оценить степень воздействия ледовых условий на среднегодовую температуру воздуха. Результаты вычислений можно увидеть в таблице 1.

Таблица 1

Коэффициенты корреляции tcp и ледовых условий

Тарко-Сале	Салехард	Марре-Сале	Им. Попова
-0,6	-0,5	-0,5	-0,7

Как мы видим из расчётов, ледовые условия оказывают непосредственное воздействие на температуру в районе метеостанции им. Попова, что очевидно, исходя из её месторасположения. Корреляционная связь ослабевает до средних значений в центре субъекта и вновь возрастает до 63 % в районе Тарко-Сале.

Заключение

Визуализация данных реанализа поля температуры помогла продемонстрировать межгодовую изменчивость температурного режима приземного слоя атмосферы Ямало-Ненецкого автономного округа. Построенные тренды указывают на повсеместный рост среднегодовой температуры. Представленный график ледовитости Карского моря помог определить состояние ледового режима в периоде 1990- 2016 гг. По нему явно видно, что следы значительных положительных аномалий температуры приходились на годы со значительной площадью открытой воды. Отрицательный знак коэффициента корреляции говорит об обратной зависимости ледового и температурного режимов. Были высчитаны темпы роста температуры за рассматриваемый временной период. Данные расчёта совпадают с моделью распределения роста температуры СПО из открытых источников (рис. 10.) [6].

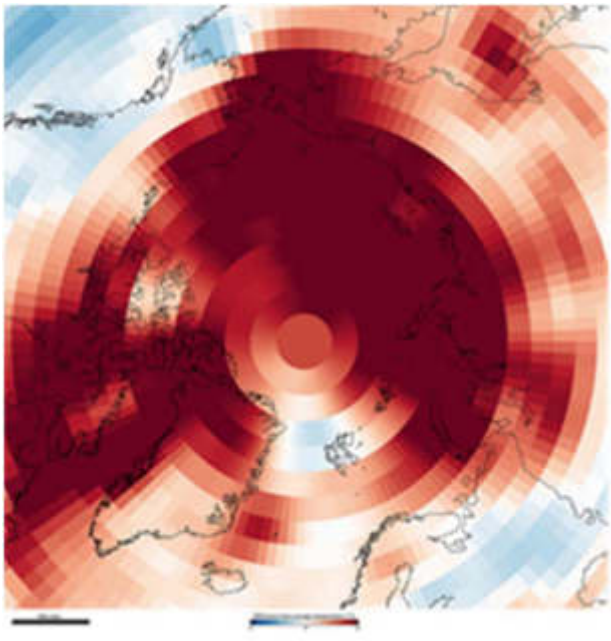


Рис. 30. Модель роста температуры 1981–2010 гг.

Список литературы

1. ААНИИ. Формирование и динамика современного климата Арктики / ред. Г. В. Алексеев. СПб. : Гидрометеоиздат, 2004.
2. Старцева А. В. Изменчивость ледового покрова Карского моря. СПб. : РГГМУ, 2016
3. Аисори – Удаленный доступ к ЯОД-архивам. URL: http://aisori.meteo.ru/ClimateR
4. Анализ климатических данных на территории Ямало-Ненецкого АО за последние годы / В. Н. Разуваев. ВНИИГМИ-МЦД, 2012.
5. Государственный научный центр «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт. URL: www.aari.ru / (дата обращения: 11.12.2017)
6. National Oceanic and Atmosphere Administration (NOAA's Climate Program Office) URL: www.noaa.gov
7. Quadfasel D. Warming in the Arctic // Nature. 1991. N 350. P 385.

УДК 551.582.2

Вариация площади снежного покрова осенью и Арктическое колебание последующей зимой в Сибири

Т. А. Худякова[1] (tat. khudyakova@yandex.ru),
Ю. В. Мартынова[2] (foxyj13@gmail.com)

[1]Томский государственный университет, Томск
[2]Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск

Аннотация. Представлены результаты исследования вариации площади снежного покрова в октябре и его влияния на Арктическое колебание в последующую зиму для периода 1979–2016. На основе данных о площади снежного покрова для каждого года периода были рассчитаны максимальные значения площади снега в октябре, а также была найдена интенсивность ее увеличения в течение этого месяца. Также были рассчитаны средние за зимний сезон (декабрь-февраль) индексы Арктического колебания. Проведенный корреляционный анализ показал наличие значимой линейной связи между максимальной площадью снежного покрова и интенсивностью его прироста в октябре, с одной стороны, и средним за последующий зимний сезон индексом Арктического колебания, с другой стороны, только для периодов с малой длиной.

Ключевые слова: снежный покров, площадь снега, интенсивность прироста, Арктическое колебание, Сибирь, корреляционный анализ.

Общее описание и актуальность исследования

Арктическое колебание (АК) является частью общей циркуляции атмосферы. АК в поле атмосферного давления в полярных и средних широтах Северного полушария, и проходит положительную и отрицательную фазы. В отрицательной фазе наблюдается относительно высокое давление над полюсом и низкое в средних широтах (около 45< с. ш.). В положительной же фазе наблюдаются противоположные условия. При смене фаз АК происходит усиление (положительная фаза АК) или ослабление (отрицательная фаза АК) циркуляции вокруг полюса, что оказывает существенное влияние на погодные условия регионов Северного полушария, в частности, внося вклад в формирование теплых зим в Скандинавии и Сибири (положительная фаза АК) [1].

Как правило, положительная и отрицательная фазы АК поочередно меняются. Однако, с 1970-х годов Арктическое колебание больше проявляется в положительной фазе: атмосферное давление над полюсом аномально высокое, а над большей частью Северной Америки и северной Евразии наблюдает температура выше обычной [1].

Исследованиям различных аспектов влияния снежного покрова, формирующегося осенью на обширных территориях суши, на крупномасштабную циркуляцию Северного полушария, посвящено множество работ, однако до сих пор нет исчерпывающего объяснения всех особенностей механизма рассматриваемого влияния. Джеймс Фостер был одним из первых ученых, кто занялся изучением влияния формирующегося осеннего снежного покрова на

атмосферные условия последующей зимы. В 1983 году он вместе с соавторами опубликовал результаты расчетов корреляций между снежным покровом, формирующемся на обширных территориях Северной Америки и Евразии, и температурой воздуха в зимний период, которые показали наличие взаимосвязей между ними [5].

Большое внимание влиянию снежного покрова, формирующегося осенью, на Арктическое колебание уделяется в работах J. Cohen. В статье 2011 года была представлена связь между аномалиями снежного покрова в октябре и приземными температурами в зимние месяцы. В данной статье утверждается, что положительная тенденция снежного покрова за последние два десятилетия способствовала значительному вкладу в охлаждение восточных территорий Северной Америки и севера Евразии, где снежный покров значительно коррелирует с зимними приземными температурами. По мнению J. Cohen бóльшая часть наблюдаемого охлаждения над Северным полушарием является откликом на увеличение снежного покрова, а также на увеличение взаимосвязей между стратосферой и тропосферой, которые приводят к динамическому отклику циркуляции Северного полушария [3; 4].

Интерес как иностранных, так и отечественных ученых к этой теме не утихает до сих пор. Например, в работе В. В. Поповой с соавторами показано, что не во все периоды однозначно можно говорить о значимости связей между площадью снега и поведением АК [2]. Однако, среди множества работ о взаимосвязях снега с АК не даётся точного описания причин нестационарности данного влияния. В данном исследовании будет проведена работа по выявлению периодов, где прослеживаются эти связи.

Цели исследования: 1) определение межгодового поведения площади осеннего снежного покрова в Сибири и Арктического колебания в зимний сезон; 2) выявление периодов проявления влияния вариации площади осеннего снежного покрова в Сибири на Арктическое колебание.

Данные и методика исследования

Для исследования связей между площадью осеннего снежного покрова и поведения Арктического колебания была выбрана территория Сибири, которая, как известно, за счет своей обширности как по широте, так и по долготе, играет значительную роль в радиационном балансе Северного полушария зимой, и, следовательно, может оказывать существенное влияние на Арктическое колебание. В рамках исследования была рассмотрена территория Западной Сибири, располагающаяся между 55º–74º с. ш. и 60º–90º в. д.

Ниже представлена исследуемая территория Западной Сибири (рисунок 1).

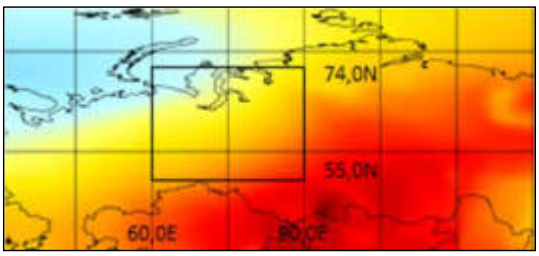


Рис. 1. Исследуемая территория Западной Сибири (55º–74º с. ш., 60º– 90º в. д.)

В качестве данных для исследования брались недельные данные по снежному покрову в октябре, которые были получены с помощью спутников NOAA, использующие радиометры высокого разрешения (Advanced VHRR), и доступные для скачивания на официальном сайте Лаборатории по изучению снежного покрова Ратгерского университета (https://climate.rutgers.edu/snowcover/). Из представленного набора данных для исследования был выбран период с 1979 по 2016 г. Для каждой выбранной недели октября была рассчитана величина общей площади снега для территории Западной Сибири. Для каждого года были рассчитаны максимальные месячные значения площади снежного покрова в октябре, которые характеризуют снежный покров, сформировавшийся к концу месяца, и разница между

максимальным и минимальным значениями площади снежного покрова в октябре, с помощью которой прослеживается скорость прироста снега в течении указанного месяца.

В настоящей работе также использовались индексы АК, полученные на основе данных реанализа NCEP/NCAR и взятые с официального сайта Центра прогнозирования климата Национальной метеорологической службы США (http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_ao_index/ao.shtml). Были выбраны индексы АК для каждого зимнего месяца (декабря, января, февраля) за период с 1979 по 2016 г., на основе которых затем для каждого исследуемого года в выбранном периоде были определены средние значения за зимний сезон (декабрь-февраль).

Используя полученные ряды данных были вычислены значения коэффициентов корреляции между максимальными месячными значениями площади снега и интенсивностью площади снега в октябре, с одной стороны, и средним за зимний сезон индексом Арктического колебания, с другой. Коэффициенты корреляции рассчитывались по всему ряду 1979–2016, а также по всем вложенным рядам, т. е. для подпериодов, выбранных из периода 1979–2016. Так, имея период данных 38 лет, сначала считалась корреляция для всего выбранного периода. Затем период уменьшался на 1 год, и считалась корреляция для подпериодов 1979–2015 и 1980–2016. После чего период уменьшался ещё на 1 года, и рассчитывалась корреляция для подпериодов 1979–2014, 1980–2015, 1981–2016. Аналогичные расчеты осуществлялись до уменьшения длины периода вплоть до 10 лет.

Предварительно перед вычислением каждого отдельно взятого коэффициента корреляции, для каждого участвующего в вычислении временного ряда, была проведена процедура исключения тренда, что позволило исключить влияние низкочастотной составляющей и сосредоточить внимание на связи вариаций рассматриваемых параметров.

Для работы с данными по снежному покрову использовалось программное обеспечение (ПО) NCO (netCDF Operators) и CDO (The Climate Data Operators) [6]. Оба ПО включают в себя набор операторов для обработки полей климатических характеристик (https://code.mpimet. mpg. de/projects/cdo/), удобных для работы с файлами в формате netCDF.

Результаты исследования

В результате расчетов были построены поля значений полученных коэффициентов корреляции, где по горизонтальной оси графиков отложены годы, которые являются началом периода, по которому рассчитывались коэффициенты корреляции, а по вертикальной оси – длина периода.

Далее представлены поля вычисленных коэффициентов корреляции (рис. 2).

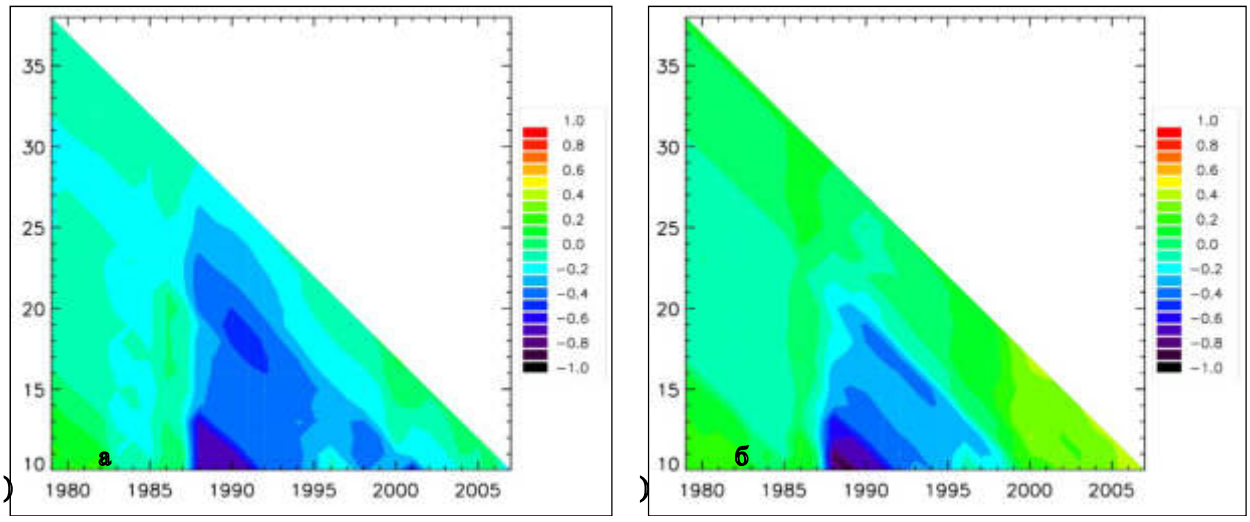


Рис. 2. Значения коэффициентов корреляции между индексом Арктического колебания в зимний сезон и максимальным месячным значением площади снежного покрова (а), интенсивностью площади снега (б) в предшествующем октябре

Проанализировав полученные коэффициенты корреляции между максимальными месячными значениями площади снега, интенсивности площади снега в октябре, с одной стороны, и средним за зимний сезон индексом Арктического колебания, с другой (рис. 2), можно отметить, что наибольшие значения корреляций наблюдаются в периоды, длиной 13–14 лет с начала периода 1988, 1989 годы. Таким образом, наибольшие связи между максимальной площадью снега, а также интенсивностью прироста снега в октябре и индексом АК присутствуют на небольших временных рядах.

С помощью t-теста была также проведена проверка на значимость полученных коэффициентов корреляции. Далее на рис. 3 представлены только значимые для уровня значимости α = 0,1 значения коэффициентов корреляции.

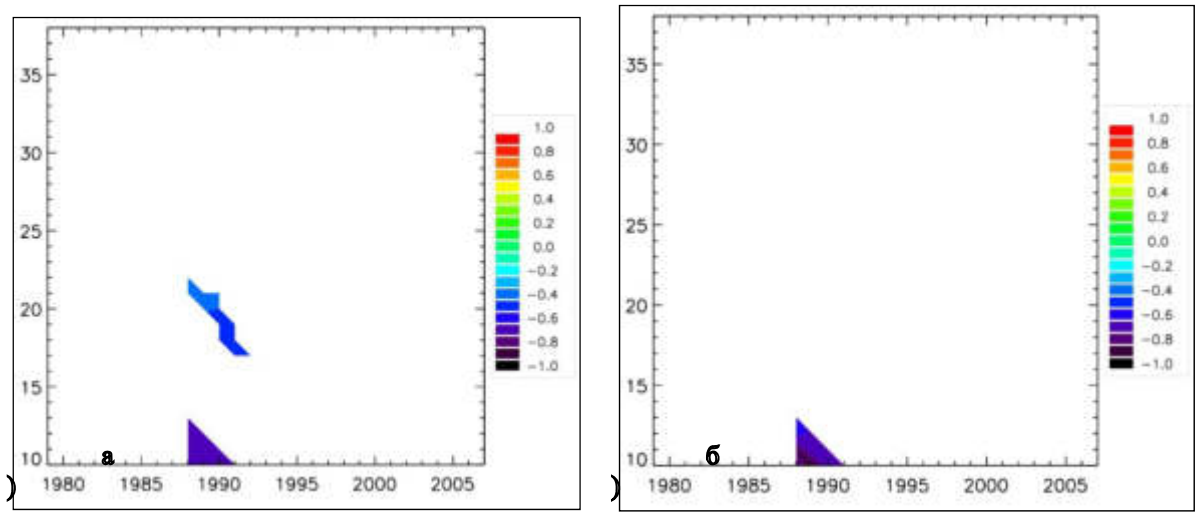


Рис. 3. Поля значимых (α=0,1) значений коэффициентов корреляции между индексом Арктического колебания в зимний сезон и максимальным месячным значением площади снежного покрова (а), интенсивностью площади снега (б) в предшествующем октябре

Значимые для α=0,1 коэффициенты корреляции между характеристиками площади снежного покрова, сформировавшегося в октябре, и средним за последующий зимний сезон индексом АК получены для отдельных периодов небольшой длины, 10–13 лет. Кроме того, значимая линейная связь получена между максимальным значением площади снега в октябре и индексом АК для отдельных периодов длительностью 16–23 года. При уровне значимости α=0,05, статистически значимые корреляции отмечаются лишь для небольших временных рядов, 10–13 лет (таблицы 1 и 2).

Таблица 1

Значимые при α=0,1 коэффициенты корреляции между интенсивностью прироста площади снега в октябре и средним за последующий зимний сезон индексом АК. Жирным выделены коэффициенты корреляции значимые при α = 0,05

№	Длина периода	Период	Корреляции
1	**10**	**1988–1997**	**-0,705**
2	**11**	**1988–1998**	**-0,808**
3	**12**	**1988–1999**	**-0,557**
4	**13**	**1988–2000**	**-0,578**
5	**10**	**1989–1998**	**-0,857**
6	**11**	**1989–1999**	**-0,600**
7	**12**	**1989–2000**	**-0,621**
8	**10**	**1990–1999**	**-0,651**
9	**11**	**1990–2000**	**-0,659**
10	**10**	**1991–2000**	**-0,648**
11	17	2000–2016	0,432
12	16	2001–2016	0,420

Таблица 2

Значимые при α = 0,1 коэффициенты корреляции между максимальными значениями площади снежного покрова в октябре и средним за последующий зимний сезон индексом АК. Жирным выделены коэффициенты корреляции значимые при α=0,05

№	Длина периода	Период	Корреляции
1	**10**	**1988–1997**	**-0,639**
2	**11**	**1988–1998**	**-0,626**
3	**12**	**1988–1999**	**-0,619**
4	**13**	**1988–2000**	**-0,616**
5	21	1988–2008	-0,370
6	22	1988–2009	-0,366
7	23	1988–2010	-0,347
8	**10**	**1989–1998**	**-0,648**
9	**11**	**1989–1999**	**-0,633**
10	**12**	**1989–2000**	**-0,623**
11	20	1989–2008	-0,389
12	21	1989–2009	-0,373
13	**10**	**1990–1999**	**-0,716**
14	**11**	**1990–2000**	**-0,679**
15	18	1990–2007	-0,435
16	**19**	**1990–2008**	**-0,443**
17	20	1990–2009	-0,402
18	21	1990–2010	-0,362
19	**10**	**1991–2000**	**-0,674**
20	17	1991–2007	-0,449
21	**18**	**1991–2008**	**-0,454**
22	19	1991–2009	-0,398
23	17	1992–2008	-0,408
24	10	2001–2010	-0,545

Рассматривая весь выбранный период в 38 лет (1979–2016 гг.), можно отметить, что, начиная с 1988 и до 2000 г. для периодов, длиной 10–13 лет, Арктическое колебание в зимний сезон было преимущественно в положительной фазе (рис. 4) с максимальным значением индекса в зиму 1988 г. равным 2,688. Для этих периодов и соответствуют наибольшие и статистически значимые коэффициенты корреляции.

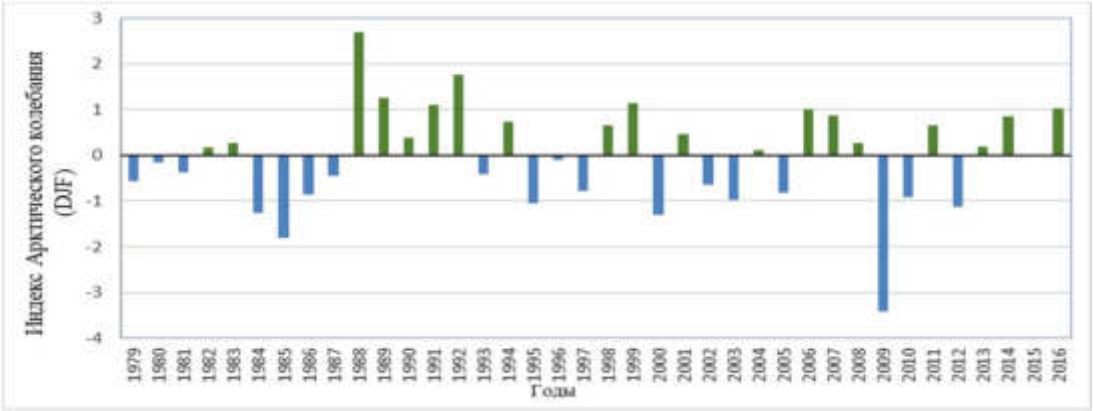


Рис. 4. Средний за зимний сезон индекс Арктического колебания, 1979–2016 гг.

Необходимо отметить, что интенсивность прироста снега в течении октября находится в некоторой противофазе с индексом АК, средним за последующий зимний сезон (рисунки 4 и 5). Так, в годы наименьшей интенсивности прироста площади снега (1987, 1991, 1998), наблюдаются высокие положительные значения индексов АК.

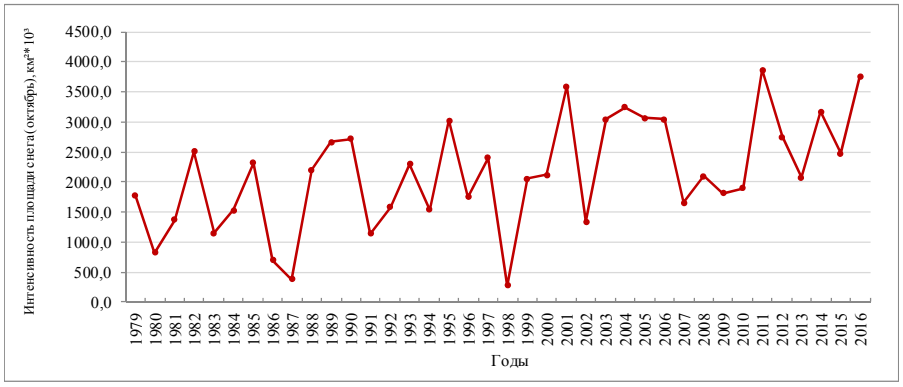


Рис. 5. Интенсивность прироста площади снежного покрова в октябре, 1979–2016 гг.

Временная изменчивость максимальной площади снега в октябре в течение рассматриваемого периода 1979–2016 гг. имеет схожий вид с изменчивостью интенсивности прироста снега. Так, в годы с меньшими значениями максимальной площади (1988, 1991, 1994, 2007) наблюдаются преимущественно положительные индексы Арктического колебания (рисунки 4 и 6).

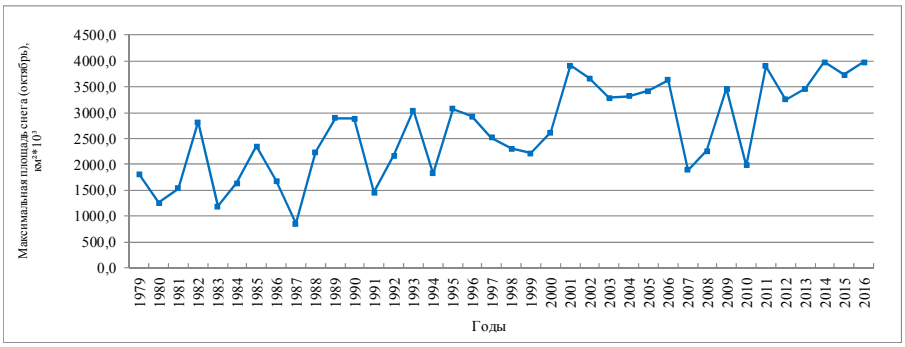


Рис. 6. Максимальная площадь снежного покрова в октябре, 1979–2016 гг.

В целом также наблюдается тенденция увеличения как максимальной месячной площади снежного покрова в октябре, так и интенсивности прироста снега в течении осеннего месяца.

Заключение

В октябре на территории всей Западной Сибири происходит основное формирование снежного покрова, наблюдается его постепенный прирост от начала месяца к концу.

Проведенный корреляционный анализ показал наличие значимой при $\alpha = 0{,}05$ линейной связи между максимальной площадью снежного покрова и интенсивностью его прироста в октябре, с одной стороны, и средним за последующий зимний сезон индексом Арктического колебания, с другой стороны, только для периодов с малой длиной (10–13 лет), начиная с 1988 года. Расчеты при уровне значимости $\alpha = 0{,}1$ показали наличие значимых линейных связей еще и для периодов с длиной 18–19 лет, начиная с 1990 года.

Найденные периоды, длиной 10–13 лет, характеризующиеся наибольшими и значимыми корреляциями в межгодовом ходе соответствуют положительным значениям индекса Арктического колебания, которые наблюдались в конце XX века (1988 – 2000 гг.).

Интенсивность прироста снега в течении октября, также, как и максимальная площадь снега в октябре, находятся в некой противофазе с индексом АК. В годы с меньшими значениями интенсивности и максимальной площади наблюдаются положительные значения индекса Арктического колебания в последующий зимний сезон.

Список литературы

1. Моханакумар К. Взаимодействие стратосферы и тропосферы / пер. с англ. Р. Ю. Лукьяновой ; под ред. Г. В. Алексеева. М. : Физматлит, 2011. 452 с.
2. Попова В. В., Ширяева А. В., Морозова П. А. Сроки установления снежного покрова на севере Евразии: прямые и обратные связи с крупномасштабной атмосферной циркуляцией // Лёд и Снег. 2014. Т. 54, № 3. С. 39–49.
3. Cohen J. Eurasian snow cover variability and links with stratosphere-troposphere coupling and their potential use in seasonal to decadal climate predictions. Climate Test Bed Joint Seminar Series. NCEP, Camp Springs, Maryland, 2011 [Electronic resource]. URL: http://www.nws.noaa.gov/ost/climate/STIP/FY11CTBSeminars/ jcohen_062211.pdf
4. Stratosphere-troposphere coupling and links with Eurasian land-surface variability / J. Cohen, M. Barlow, P. J. Kushner, K. Saito // J. Climate. 2007. Vol. 20 P. 5335–5343.
5. Foster J., Owe M., Rango A. Snow cover and temperature relationships in North America and Eurasia // J. Clim. Appl. Meteor. 1983. Vol. 22. P. 460–469.
6. Ralf Quast. CDO User's Guide: Climate Data Operators: Version 1.4.1. [Electronic resource] / MPI for Meteorology. Hamburg, 2009. The electronic version of the printing publication. URL: http://www.rsmas.miami.edu/users/rajib/cdo.pdf

---

УДК 551.515(571.53)

Мезометеорологические особенности побережья оз. Байкал по данным прогностической модели GFS

Д. В. Царенкова (tsarenkova.diana@yandex.ru)

Иркутский государственный университет», Иркутск

Аннотация. Предпринята попытка исследования мезометеорологических особенностей побережья оз. Байкал по выходным данным прогностической модели GFS, на основе которых проанализированы пространственно-временные вариации распределения характеристик ветра, атмосферных осадков, влагосодержания облаков, потенциальной энергии конвективной неустойчивости на примере летних месяцев 2017 г. Выделены районы с наибольшей вероятностью развития конвекции и связанных с ней опасных явлений погоды.

Ключевые слова: оз. Байкал, ветер, температура воздуха, мгновенная плотность энергии ветра, потенциальная энергия конвективной неустойчивости.

Введение

В последние десятилетия межгодовые вариации уровня воды крупных озёр всё чаще рассматриваются как индикаторы для оценки региональных гидрологических последствий изменений климата. Не является исключением оз. Байкал, где в последние годы нарушена присущая ему цикличность с периодом ~20–30 лет и отмечается продолжительный маловодный период [1]. Необходимо также отметить возросшую в последние годы антропогенную нагрузку на побережье оз. Байкал [2]. В этой связи важно исследовать не только климатические, но и мезоклиматические особенности озера.

В работе предпринята попытка начать исследование мезометеорологического режима побережья оз. Байкал по ежедневным данным прогностической модели GFS по следующим параметрам: температура воздуха, трехчасовые сумм осадков, направление и скорость ветра, мгновенная плотность энергии ветра; влагосодержание облаков; потенциальная энергия конвективной неустойчивости [3]. На рис. 1 показана схема расположений метеорологических станций, в районе которых снимались исследуемые характеристики. Видно, что выбор точек охватывает по возможности всю акваторию озера Байкал. В качестве периода исследования взяты летние месяцы 2017 года.



Рис. 1. Схема расположения метеорологических станций

Обсуждение результатов

Исследование характеристик ветра на побережье оз. Байкал показало, что устойчивые ветровые потоки сохраняются в течение всех летних месяцев только на северной оконечности озера и в районе ст. Листвянка – это северо-западный и западный ветер. Над остальной акваторией направление ветра очень изменчиво. Например, на ст. Баргузинский заповедник в начале лета преобладал юго-западный ветер или култук, в середине лета северо-восточный или верховик, а в конце лета северо-западный или горная (рис. 2).

Самым теплым месяцем на побережье является июль, за исключением ст. Баргузинский заповедник, где максимум наблюдался в августе. Рассчитывался пространственный градиент температур, который был максимальным в июне и составил 7,9 °С, в июле 7,2 °С, в августе уменьшается до 4,5 °С. Таким образом, температурные контрасты на побережье оз. Байкал уменьшаются к концу лета.

Поле средних значений трехчасовых сумм атмосферных осадков более однородное. Выделяется максимум осадков на юго-западном побережье (ст. Бугульдейка). Минимум осадков выпадает на северо-восточной станции Баргузинский Заповедник. В целом, на западном побережье осадков выпадает больше, чем на восточном. Причина – это эффект нисходящих движений и размывания облачности при смещении господствующих ветров западной четверти над более прохладным водоёмом в летние месяцы.

Значительные различия выявлены в распределении потенциальной энергии конвективной неустойчивости, которая характеризует условия, благоприятные для развития конвекции, и связанных с ней опасных явлений, таких как грозы, ливни и шквальный ветер. Минимальные значения выявлены на северо-восточном побережье оз. Байкал, а максимальные на южной оконечности озера. Средние значения составили 39 Дж/кг в июне, 86 Дж/кг в июле и 59 Дж/кг в августе, т. е. максимальные значения приходятся на период максимальных температур.

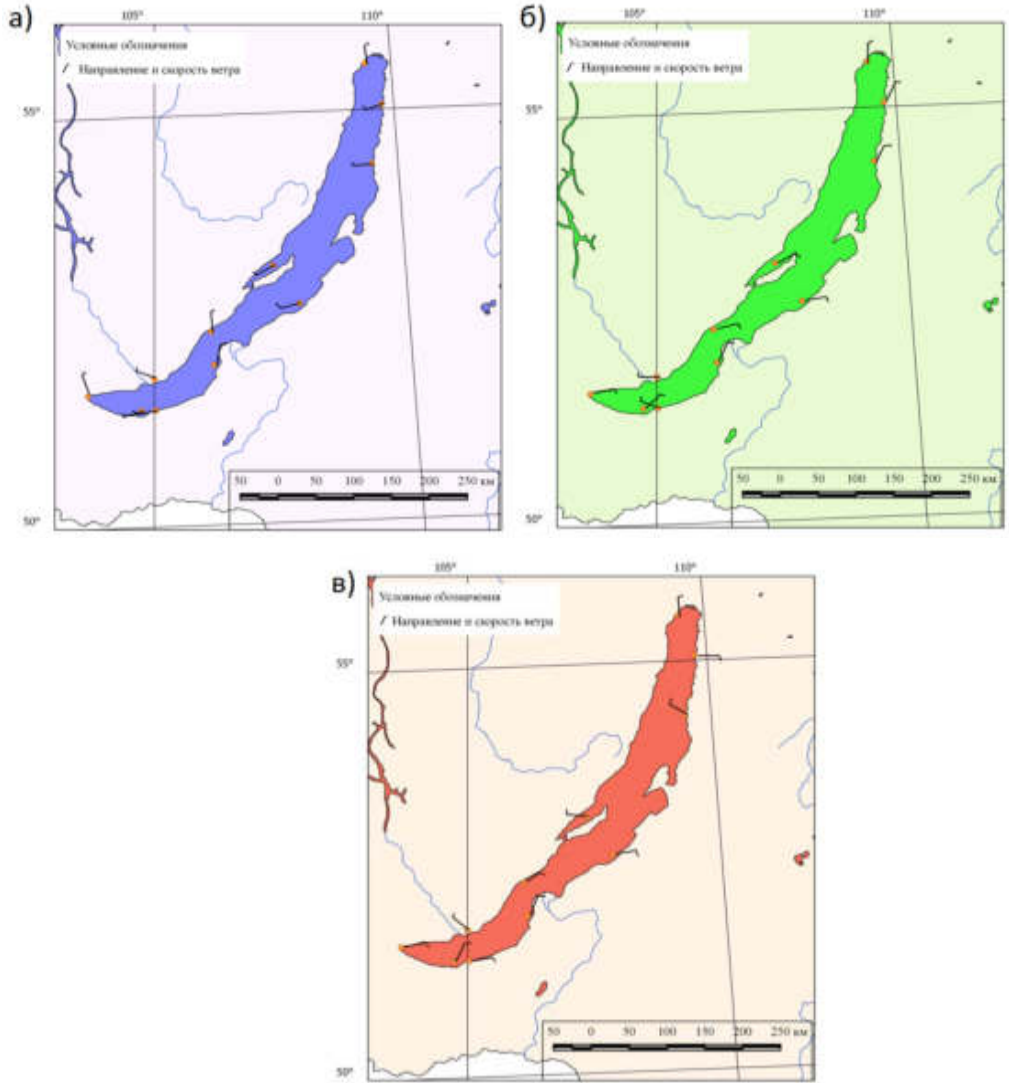


Рис. 2. Распределение господствующих направлений ветра на побережье оз. Байкал в летние месяцы 2017 г.

В таблице 1 представлены характеристики мгновенной плотности энергии ветра на разных уровнях тропосферы. Интересно, что в июне и июле наиболее высокие средние значения отмечаются на уровне 250 гПа, т. е. вблизи тропопаузы, в августе на уровне средней тропосферы. В сезонном отношении энергия ветра максимальна в августе и наименьших значений достигает в июне. В пространственном отношении в июне максимумы приходятся на западное и восточное побережье, в июле это средняя часть оз. Байкал, в августе это восточное побережье.

В заключении были проанализированы снимки облачного покрова по данным архива ИСЗФ СО РАН [4] для случаев с максимальными значениями осадков, влагосодержания и потенциальной энергии конвективной неустойчивости. Выявлено, что интенсивные осадки (≥3,6 мм/3 часа) наблюдались на фоне локальных конвективных ячеек при развитии конвекции в дневные часы либо при выходе монгольского циклона (рис. 3).

Выводы

Проведенное исследование позволило впервые для побережья оз. Байкал начать исследования мезомасштабных особенностей метеорологических полей температуры воздуха, направления и скорости ветра, выпавших сумм атмосферных осадков, количественно оценить влагосодержание облаков, энергию конвективной потенциальной неустойчивости, что может быть использовано при оценке рекреационных ресурсов оз. Байкал.

Таблица 1

Средние значения мгновенной плотности энергии ветра (кВ/м^2) на разных уровнях тропосферы на побережье оз. Байкал

Станция	Июнь			Июль			Август		
	уровень, гПа			уровень, гПа			уровень, гПа		
	850	500	250	850	500	250	850	500	250
Листвянка	0,09	0,13	0,18	0,89	0,85	1,07	2,15	4,60	3,59
Култук	0,04	0,03	0,05	0,78	0,76	0,98	2,32	4,29	3,64
Байкальск	0,07	0,07	0,12	0,93	0,91	1,03	2,29	4,70	3,60
Танхой	0,06	0,07	0,11	0,96	0,99	1,05	2,30	4,76	3,55
Посольское	0,20	0,16	0,24	0,89	0,91	1,22	2,36	5,01	3,36
Бугульдейка	0,22	0,15	0,26	0,97	0,84	1,24	2,17	4,81	3,36
Хужир	0,12	0,08	0,19	0,99	0,54	1,14	2,22	3,47	3,31
Гремячинск	0,09	0,09	0,17	1,03	0,63	1,24	2,48	3,85	3,03
Нижнеангарск	0,05	0,05	0,04	0,73	0,28	0,61	2,01	2,21	2,24
Фролихинский заказник	0,02	0,03	0,01	0,74	0,30	0,55	2,20	2,30	2,25
Баргузинский зап.	0,09	0,09	0,05	0,86	0,37	0,78	2,44	2,58	2,54
Среднее значение	0,10	0,09	0,13	0,89	0,67	0,99	2,27	3,87	3,13

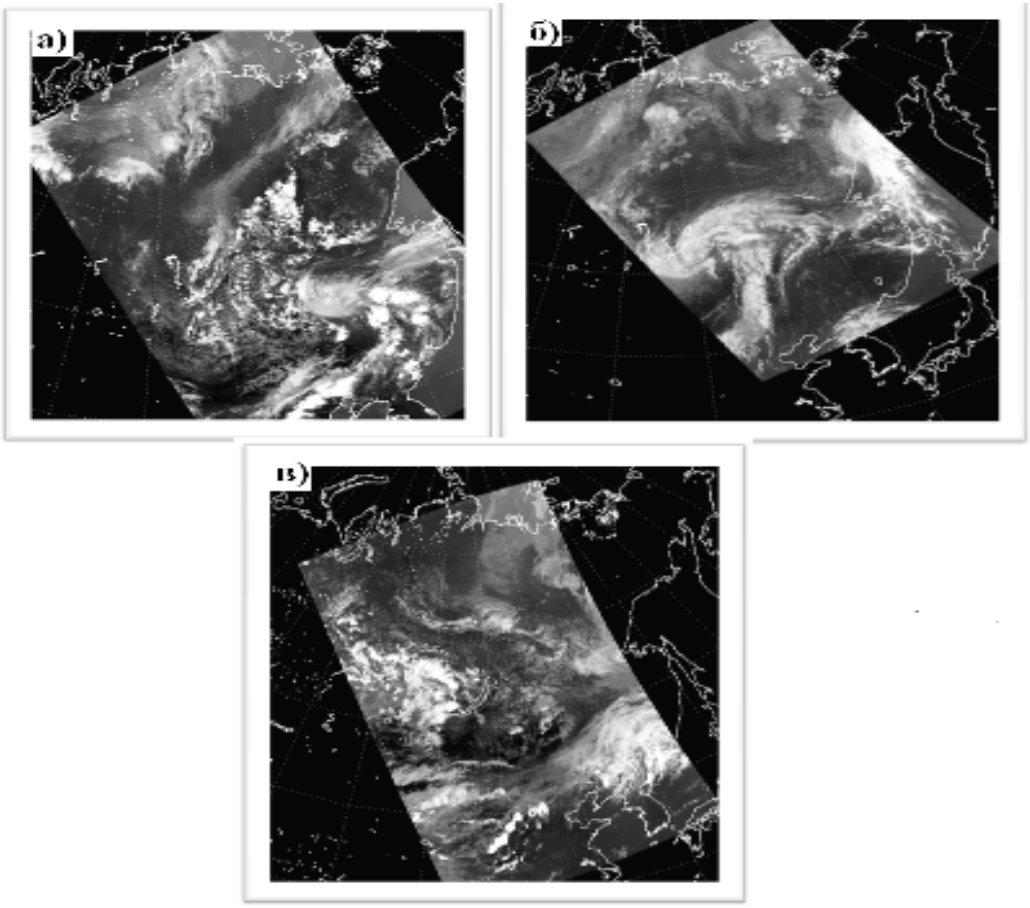


Рис. 3. Снимки облачности для случаев с максимальными суммами осадков летом 2017 г. при развитии локальных конвективных ячеек (а), смещении южного циклона (б) и при скоплении кучево-дождевых облаков (в)

Установлено, что режим направления ветра наиболее устойчив на северной и южной оконечности оз. Байкал. Различия средних значений температур максимальны в начале лета и минимальны в августе.

В распределении трехчасовых сумм атмосферных осадков выделяется максимум на юго-западном побережье и минимум на северо-восточной оконечности оз. Байкал. Наибольшие значения потенциальной энергии конвективной неустойчивости наблюдаются в июле на южной оконечности оз. Байкал, а наименьшие в июне на северо-восточном побережье.

Впервые проведен анализ космических снимков облачности для случаев с максимумами осадков, влагосодержания облаков и энергии конвективной потенциальной неустойчивости, где отчетливо проявляется вклад мезомасштабных конвективных систем и южных циклонов.

Список литературы

1. Атлас. Иркутская область: экологические условия развития/ М. : Роскартография ; Иркутск : Ин-т географии СО РАН, 2004. С. 90
2. Особенности современных изменений притока воды в озеро Байкал / В. Н. Синюкович, Л. Н. Сизова, М. Н. Шимараев, Н. Н. Курбатова // География и природные ресурсы. 2013. № 4. С. 57–63.
3. URL: http://earth.nullschool.net // (дата обращения: 2.02.2018).
4. URL: http://atmos.iszf.irk.ru/ru/sputnik/clouds (дата обращения: 2.02.2018).

УДК 551.582.2

Тенденции изменения температуры воздуха на территории Сибири в XX–XXI вв.

О. С. Чупина (chupina.ru.3.@mail.ru)[1], Н. Н. Воропай (voropay_nn@mail.ru)[1,2]

[1]Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск
[2]Институт географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, Иркутск

Аннотация. Изучается изменение температуры воздуха на территории Южной Сибири. С помощью разработанной в ИМКЭС СО РАН Web-GIS «Климат» были рассчитаны и проанализированы многолетние средние месячные значения и тенденции изменения температуры воздуха за период с 1979 по 2012 г. Средние месячные температуры изменяются по территории от -37 °С (январь, Якутия) до 21,3 °С (июль, Яблоновый хребет). Тенденции изменения средней годовой температуры -0,8 … 4,4 °С/10 лет. Результаты расчета сравнивались с фактическими значениями на метеорологических станциях за этот же период.

Ключевые слова: температура воздуха, сложный рельеф, тенденции, Web-GIS «Климат».

Введение

В настоящее время основным источником метеорологической информации при исследованиях климата и его моделировании являются архивы данных измерений на метеорологических станциях. В свою очередь метеорологические станции в горных районах располагаются в долинах рек и не отображают всей климатической картины. Горы занимают более 50 % территории Российской Федерации. В связи с этим множество ученых занимается изучением особенностей климатических и микроклиматических характеристик, а также факторов, вносящих наибольший вклад в атмосферные процессы над горной территорией. Одной из причин ошибок в прогнозах и моделировании климата может быть активная инверсионная деятельность, которая формируется в горах в зимний период. К таким выводам пришло множество исследователей в своих работах [2, 8, 12 и др.]. Разнообразие ландшафтов приводит к формированию локального микроклимата, а он влияет на общую картину макроклимата и климата в целом [9].

Исходя из этого районы со сложным расчленённым рельефом нуждаются в более детальном исследовании. В последние годы одним из источников метеорологической информации является реанализ. В работе использованы данные реанализа ERA Interim. Обработка данных проведена с помощью Web-GIS «Климат».

1. Территория исследования

Горы Южной Сибири – одна из наиболее крупных горных территорий России: ее площадь более 1,5 млн. км^2 (рис. 1). Большая часть территории располагается в глубине материка на значительном расстоянии от океанов. С запада на восток горы Южной Сибири

протягиваются почти на 4500 км – от равнин Западной Сибири до хребтов побережья морей Тихого океана. Они образуют водораздел между сибирскими реками, стекающими к Северному Ледовитому океану, и реками, отдающими свои воды бессточной области Центральной Азии, а на крайнем востоке – Амуру.

На западе и севере горы Южной Сибири отделены от соседних стран четкими естественными границами, чаще всего совпадающими с уступами окраинных участков гор над прилегающими равнинами.

В состав этой горной страны входят такие горные массивы и хребты как Алтай, Кузнецкий Алатау, Салаирский кряж, Восточный Саян, Западный Саян, Танну-Ола, хребет Обручева, Сенгилен, Хамар-Дабан, Хэнтей, хребет Яблоновый, хребет Черского, Баргузинский хребет, Витимское плоскогорье, Становое нагорье, хребет Каларский, хребет Удокан, Патомское нагорье, Аладанское нагорье, Становой хребет [4]. Значительная приподнятость территории над уровнем моря служит главной причиной отчетливо выраженной высотной зональности в распределении ландшафтов, из которых наиболее типичны горно-таежные. Сильно пересеченный рельеф и большие амплитуды его высот вызывают существенное разнообразие и контрастность природных условий.

Рельеф гор Южной Сибири очень разнообразен. Тем не менее, они имеют и много общего: современный рельеф их сравнительно молодой и сформировался в результате новейших тектонических поднятий и эрозионного расчленения в четвертичное время. Другая характерная особенность гор Южной Сибири – распределение основных типов рельефа в виде геоморфологических поясов или ярусов – объясняется их разным современным гипсометрическим положением.



Рис. 1. Физико-географическое положение территории исследования

Климат страны определяется ее географическим положением в южной половине умеренного климатического пояса и во внутренней части материка Евразии, а также особенностями контрастного рельефа.

Положение гор Южной Сибири в наиболее удаленной от морей части Евразии обусловливает особенности атмосферной циркуляции. Зимой над страной формируется область высокого атмосферного давления (азиатский антициклон), центр которого располагается над Монголией и Забайкальем. Летом внутренние части материка сильно нагреваются, и здесь устанавливается пониженное атмосферное давление. В результате прогревания поступающих сюда атлантических и арктических воздушных масс над горами происходит формирова-

ние континентального воздуха. Над южными районами страны, где континентальный тропический воздух приходит в соприкосновение с более прохладным воздухом умеренных широт, располагается монгольский фронт, с которым связано прохождение циклонов и выпадение атмосферных осадков. Однако основная масса летних осадков поступает сюда в результате процессов переноса масс атлантического воздуха, приходящих с запада.

В горах Южной Сибири выделяется несколько высотных почвенно-растительных зон: горно-степная, горно-лесостепная, горно-таежная и высокогорная [7].

2. Материалы, используемые в исследовании

Из 161 станций, которые расположены на территории Южной Сибири, в данной работе используется 5 – Барнаул, Киренск, Чара, Хилок, Оленья речка (рис. 2). Станции выбраны с учетом следующих критерии: длиннорядность, равномерное расположение, различие ландшафтных условий. Метеорологический параметр для исследования – многолетняя средняя месячная температура воздуха с 1979 по 2012 гг. Данные были взяты из базы данных ВНИИ ГМИ МЦД [3].



Рис. 2. Расположение метеорологических станций

Так же исходным материалом для исследования послужили данные реанализа ERA Interim за период 1979 по 2012 г. на уровне 2 м, с пространственным разрешением 0,75×0,75˚, с шестичасовым временным интервалом.

Для расчетов использована Web-GIS «Климат», разработанная в ИМКЭС СО РАН и предназначенная для вычислительной обработки и визуализации больших массивов геофизических данных через унифицированный веб-интерфейс. В нее входят метеорологическая модель Weather Research and Forecasting (WRF) и глобальная модель промежуточной сложности «Planet Simulator», данные глобального и регионального климатического моделирования, полученные на моделях, развернутых на кластерах ТГУ, МГУ, СО РАН и СибНИГМИ, а также высокопроизводительное распределенное хранилище данных результатов моделирования и метеорологических наблюдений [5; 11].

3. Анализ полученных результатов

С помощью Web-GIS «Климат» были рассчитаны средние месячные температуры воздуха, а также тенденции изменения средней месячной и средней годовой температуры воздуха за период с 1979 по 2012 г. Выявлено, что минимальные значения температуры воздуха наблюдаются в январе на северо-востоке территории (Якутия,-37,7 °С). В районе Алтайских гор в зимнее время максимальные для территории значения (-15,0 °С). В июле наиболее высокая средняя многолетняя температура воздуха в районе хребтов Яблоновый, Хэнтей (21,3 °С). Очаги относительно низких температур в горах Алтая и в районе Хакасии (15,1 °С). В среднем за год, наиболее низкие температуры воздуха (до -7,0 °С) наблюдаются

в Якутии в горах Алтая и Восточного Саяна. Наиболее теплый участок в Южной Сибири расположен в районе Алтайских гор.

В летний период тенденции температуры воздуха на территории Южной Сибири положительны (рис. 3). В районе Байкала наблюдается наиболее низкие их значения, на юге территории – наиболее высокие. В зимний период максимальный рост температуры воздуха зафиксирован на северо-востоке рассматриваемой территории, тенденции уменьшаются при движении на юго-запад. При этом, в районе Саян и Алтая наблюдается понижение температуры за период исследования. Тенденции изменения средней годовой температуры -0,08 … 0,44 °С/10 лет. Результаты исследования соответствуют оценкам климатических изменений, представленными во Втором оценочном докладе Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации [1], согласно которому многолетнее изменение температуры воздуха на исследуемой территории за период с 1976 по 2006 г. равно 0,43 °С/10 лет.

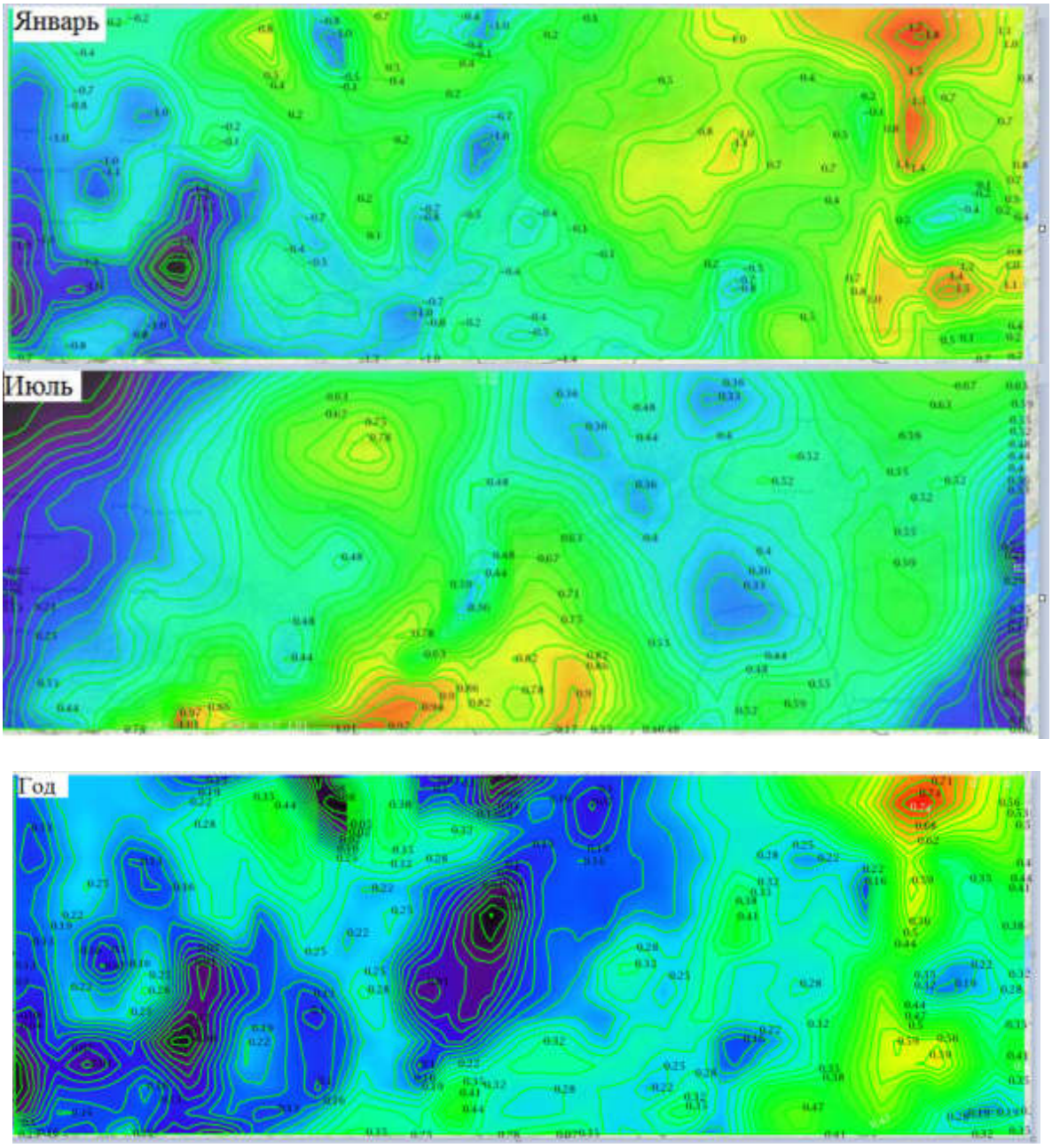


Рис. 3. Тенденции изменения средней месячной и средней годовой температуры воздуха за период 1979–2012 гг. на территории Южной Сибири

Сравнению результатов расчетов по данным метеорологических станций и по данным реанализов посвящен ряд работ [6; 10; 13 и др.]. Нами было проведено сравнение значений, полученных на основе анализа данных реанализа ERA Interim с температурами воздуха на метеорологических станциях, которые располагаются на исследуемой территории (табл. 1).

Таблица 1

Значения температуры воздуха по данным реанализа и данным, полученным на метеорологических станциях, на территории Южной Сибири за период с 1979 по 2012 г., °С

	Данные метеостанций					Данные реанализа ERA Interim				
	Барнаул	Оленья речка	Киренск	Чара	Хилок	Барнаул	Оленья речка	Киренск	Чара	Хилок
I	-16,2	-17,9	-27,2	-32,7	-25,2	-16,1	-22,9	-25,6	-29,4	-21,6
II	-13,8	-14,9	-22,4	-27,2	-19,7	-14,0	-15,9	-20,3	-23,5	-17,7
III	-6,7	-9,3	-12,7	-16,9	-10,3	-6,4	-7,9	-12,4	-17,5	-9,5
IV	3,8	-2,5	-1,4	-3,8	0,1	3,8	0,3	-2,4	-5,8	0,2
V	12,8	4,3	8,1	5,5	8,0	12,6	8,7	6,8	2,0	8,5
VI	18,1	10,2	15,5	13,7	14,4	17,9	13,6	14,6	10,1	15,3
VII	19,9	12,7	18,2	16,6	17,0	19,9	15,9	16,8	14,1	17,6
VIII	17,3	10,7	14,7	13,5	14,3	17,5	13,3	14,0	10,6	14,6
IX	11,1	5,2	6,6	5,2	6,9	11,2	6,7	5,8	2,1	7,1
X	3,8	-2,3	-2,3	-5,8	-1,8	3,6	-0,8	-3,8	-8,5	-1,3
XI	-6,3	-10,9	-16,1	-20,9	-13,1	-6,3	-10,2	-15,6	-21,1	-11,6
XII	-13,0	-16,1	-24,7	-30,6	-21,7	-13,1	-17,4	-23,7	-28,1	-19,5

Анализ разностей между восстановленной многолетней средней температуры воздуха и фактической показал, что в большинстве случаев наибольшие различия приходятся на зимний период (рис. 4). Максимальная разность на станции Оленья речка в январе (5,0 °С), также большие разности в течении всего года наблюдаются на станции Чара, вероятно, это связано с тем, что обе эти станции находятся в условиях сложного горного рельефа. Остальные же станции расположены в равнинных условиях. Понижение разностей наблюдается в летний период и в начале осени, далее – снова рост разностей температуры воздуха.

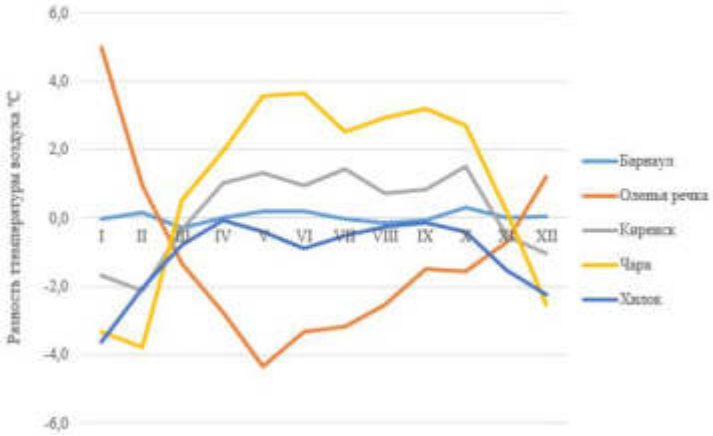


Рис. 4. Разность между средними многолетними значениями температуры воздуха по данным реанализа ERA Interim и по данным метеорологических станций на территории Южной Сибири за период с 1979 по 2012 г.

Заключение

Таким образом, в ходе исследования были получены и проанализированы карты пространственной изменчивости многолетней средней температуры воздуха и ее тренда на территории Южной Сибири за период с 1979 по 2012 г.

Выявлено, что минимальная средняя месячная температура на всей исследуемой территорией составляет -37,7 °С (январь, Якутия), максимальная составила 21,3 °С (июль, Яб-

лоновый хребет). Минимальные значения тенденции наблюдаются в зимние месяцы, максимум в летний период.

Максимальные различия между данными реанализа ERA Interim и данными наблюдения на метеорологических станциях наблюдаются в холодный сезон года в горной местности.

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных исследований СО РАН IX.138.2.

Список литературы

1. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / Г. В. Алексеев [и др.] ; Гос. науч. центр РФ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт» Федер. службы России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. М., 2014.
2. Барри Р. Г. Погода и климат в горах. Л. : Гидрометеоиздат, 1984. Т. 312.
3. Описание массива данных среднемесячной температуры воздуха на станциях России [Электронный ресурс] / О. Н. Булыгина, В. Н. Разуваев, Л. Т. Трофименко, Н. В. Швец. 2017. URL: https://meteo.ru (дата обращения: 30.12.2017).
4. Физико-географическое районирование СССР. Характеристика региональных единиц / ред. Н. А. Гвоздецкий. М. : Изд-во МГУ, 1968. 575 с.
5. Геоинформационная веб-система для исследования региональных природно-климатических изменений и первые результаты ее использования / Е. П. Гордов, И. Г. Окладников, А. Г. Титов, В. Ю. Богомолов, Т. М. Шульгина, Е. Ю. Генина // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25, № 2. С. 137–143
6. Кокорев В. А., Шерстюков А. Б. О метеорологических данных для изучения современных и будущих изменений климата на территории России // Арктика XXI век. Естественные науки. 2015. № 2 (3). С. 5–23.
7. Самойлова Г. С. Типы ландшафтов гор Южной Сибири. М. : Изд-во МГУ, 1973. С. 55.
8. Севастьянов В. В. Климат высокогорных районов Алтая и Саян. Томск : Том. гос. ун-т, 1998. С. 202.
9. Сухова М. Г., Русанов В. И., Винокуров Ю. И. Климаты ландшафтов Горного Алтая и их оценка для жизнедеятельности человека. Изд-во Сиб. отд-ния РАН, 2004.
10. Шульгина Т. М. Разработка и применение комплекса программ для анализа региональных изменений климата на основе данных моделирования : автореф. дис. … канд. техн. наук. Томск, 2012. С. 15.
11. URL: http://project.climate.scert.ru/ (дата обращения: 30.12.2017)
12. Temperature lapse rate in complex mountain terrain on the southern slope of the central Himalayas / D. B. Kattel [et al.] // Theoretical and applied climatology. 2013. Vol. 113, N 3–4. P. 671–682.
13. Development of computational module of regional aridity for web-GIS “Climate” / A. A. Riazanova, N. N. Voropay, I. G. Okladnikov, E. P. Gordov // The open access volume of IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2016. Vol. 48, Number 1.

Секция

МОНИТОРИНГ, МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ СУШИ

УДК 556.52

Динамическая модель речных систем бассейна озера Байкал

И. Ю. Амосова (irinaamosova_83@mail.ru), Е. А. Ильичева (lenail3663@mail.ru)

Институт географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, Иркутск

Аннотация. Рассмотрены речные системы притоков озера Байкал – Верхней Ангары и Баргузина. Для них создана динамическая модель, построенная на основе обработки материалов SRTM. Настоящее исследование ориентировано на определение удельных характеристик и состава русловой сети для выявления индикационных возможностей оценки максимального стока и возникновения опасных гидрологических явлений.

Ключевые слова: динамическая модель, речные системы, озеро Байкал, структурная гидрография, экстремальный сток.

Введение

Широкое использование современных аэрокосмических средств позволяет перейти к дистанционной индикации гидрологических характеристик с построением динамической модели речных систем (РС). Применение структурно-гидрографического метода делает возможным более детально исследовать закономерности строения РС по динамической модели и рассчитать водоносность рек для районов с разнообразными физико-географическими условиями при невозможности выбора метода гидрологической аналогии. Рисунок речных систем как результат геолого-геоморфологических, гидрологических и климатических факторов, выступает в качестве индикатора характеристик стока. В периоды повышенной водности интенсивно увеличивается количество элементов первого, а в отдельных случаях второго и даже третьего порядков, в зависимости от физико-географических особенностей строения речного бассейна. Именно такое увеличение элементов и создает динамическую модель речных систем. Закономерности строения русловой сети в такой модели остаются неизменными, а порядок систем, как правило, возрастает. Динамическая модель является индикатором максимального стока.

Объект и методы исследования

Р. Верхняя Ангара, вторая по водности после р. Селенги, стекает с южного склона Делюн-Уранского хребта и впадает в залив Ангарский сор. Котловина ее ограничена Верхне-Ангарским, Делюн-Уранским, Южно- и Северо-Муйским хребтами [1]. Р. Баргузин, берет начало в пределах отрогов Южно-Муйского хребта и впадает в Баргузинский залив. Бассейны рассматриваемых речных систем характеризуются горным рельефом, склоны хребтов в значительной степени изрезаны множеством водно-эрозионных долин. Пади и распадки, преимущественно правосторонних водно-эрозионных (элементарных) звеньев, часто заканчиваются конусами выноса и загромождениями из валунов и гальки. В верхнем течении и р. Баргузин и р. Верхняя Ангара имеют горный, бурный характер, изобилуя порогами и перекатами, в речной системе Баргузина притоки рек при впадении образуют многочисленные во-

допады. На этом участке встречается большое количество каровых озер. Среднее течение рек приурочено к Верхе-Ангарской впадине и Баргузинской котловине, соответственно, гидрографическая сеть осложнена наличием большого количества озер, болот и заболоченных земель. Нижнее течение также сильно заболочено.

В бассейне р. Баргузин насчитывается более 4000 озер, суммарная их площадь 155 км^2 (0,7 % площади водосбора) [2]. Поверхность Баргузинской котловины изрезана множеством проток и староречий, значительно заболочена, площадь, занятая болотами и заболоченными землями составляет около 6 % (около 1300 км^2) площади водосбора.

В бассейне р. Верхняя Ангара повсеместно встречаются следы древнего оледенения, с которым связано образование большого количества каровых озер. Общая площадь, занятая озерами (в том числе и пойменными), составляет около 200 км^2 (0,8 %) от площади водосбора. Болота занимают около 4 % (856 км^2) площади бассейна, на участках среднего и нижнего течения долина наиболее заболочена.

Речная сеть исследуемой территории рассматривается как динамическая модель. Модель создана на основе графа речной сети, построенного по цифровой модели рельефа. По программе «Энтропия» (автор Б. И. Гарцман) определен состав речной сети и структурные характеристики.

Исследования максимального стока состоят в сопоставлении результатов автоматизированной обработки структуры водно-эрозионной сети с русловой сетью, полученной по топографическим картам.

Результаты и их обсуждение

Речная система – это не только совокупность постоянно действующих водотоков. Она также включает временные потоки, которые в период повышенной водности (период весеннего снеготаяния и ливневые осадки) вырабатывают свою долину и в дальнейшем указывают направление стока. Большую часть года сток на этих водотоках отсутствует. Такие водотоки и являются водно-эрозионными элементами первого порядка, формирующие динамическую модель.

Динамическая модель речных систем Баргузина и Верхней Ангары рассматривается как идеальная. Предпринята попытка применить модель Хортона-Стралера на озерно-болотную сеть. Граф построен по совокупности тальвегов на поверхности бассейна, включая ложбины стока длиной от 100 м. Так как озера и болота рассматриваемой территории проточные, они используются в расчетах как линейные объекты водно-эрозионной сети. Именно такая русловая сеть будет функционировать при интенсивном увлажнении и экстремальных метеоусловиях.

Речные системы Верхней Ангары и Баргузина занимают относительно пониженные участки поверхности суши (впадина и котловина соответственно), имеют различные черты водного режима, но схожи по гидроморфометрическим характеристикам бассейна и русловой сети (табл. 1).

Несмотря на меньшие значения площади, средней и максимальной высоты водосбора, протяженности коренного русла РС Верхняя Ангара, уклоны поверхности бассейна и водной поверхности выше, по сравнению с аналогичными параметрами РС Баргузин. Главной отличительной особенностью выступает рисунок русловой сети, что отражается в дифференциации структурно-гидрографических характеристик, выявляя при этом индивидуальные условия формирования максимального стока.

Гидроморфологический коэффициент для замыкающего створа р. Верхней Ангары в два раза ниже, чем для р. Баргузин. Это говорит об условной молодости РС В. Ангары. Вследствие чего, видно, что для нее характерно значительное количество водно-эрозионных элементов и, соответственно, большая суммарная протяженность системы, а также высокое значение коэффициента эрозионного расчленения поверхности бассейна.

По водному режиму исследуемая территория относится к двум районам: Баргузинский и Верхнеангарский [2]. Баргузинский район характеризуется повышенным увлажнением территории и небольшим испарением. Объем стока талых и дождевых вод примерно одинаков, в меженный период водность рек повышена.

Таблица 1

Гидроморфометрические и структурно-гидрографические характеристики бассейнов и русловой сети динамической модели РС Баргузин и Верхняя Ангара

Параметры	Речная система	
	Верхняя Ангара	Баргузин
Площадь водосбора	20 639	21 174
Длина реки, км	438	480
Средняя высота водосбора, м	863	870
Максимальная высота водосбора, м	2600	2797
Уклон водосбора,°	19,8	17,6
Уклон водной поверхности,°	7,0	5,3
Суммарная длина, км	14 820	13 791
Коэффициент эрозионного расчленения, км/км^2	0,72	0,65
$Q_{ср}$, м^3/с	268	125
$Q_{мах\ набл}$, м^3/с	1860	1110
ГМК	55	110
Магнитуда (количество водно-эрозионных элементов I порядка)	5165	4888

В Верхнеангарском районе значительная часть стока приходится на период весенне-летнего половодья, а зимняя межень отличается очень низким стоком. Территория характеризуется высоким увлажнением и весьма низким испарением.

И структурно-гидрографические, и гидролого-морфометрические параметры указывают на благоприятные условия формирования стока рассматриваемой территории.

В результате исследования динамической модели РС Верхней Ангары и Баргузина рассчитан максимальный сток для замыкающего створа и в устье (табл. 2).

Таблица 2

Расчет экстремального стока в бассейнах р. Баргузин и Верхняя Ангара

	$Q_{ср}$, м^3/с	$Q_{мах\ набл}$, м^3/с	$M_{энт}$, (карта м-ба 1:200 000)	$M_{энт}$, динамическая модель	$M_{стр\ мах}$	$Q_{мах\ расч}$ м^3/с
В. Ангара – с. В. Заимка	268	1860	1319,434	3216,830	1,38	3628
В. Ангара-устье			1349,712	3330,612		3756
Баргузин – с. Баргузин	125	1110	1105,079	2929,230	1,00	2354
Баргузин-устье			1203,276	3206,629		2577

Примечание: $Q_{ср}$ и $Q_{мах\ набл}$ – средний многолетний и максимально наблюденный расход воды, м^3/с[2]; $M_{энт}$ – суммарная энтропия, бит; $M_{стр}$ – структурный модуль, м^3/(с·бит).

Таким образом, максимальная приточность в оз. Байкал от рр. Верхняя Ангара и Баргузин составит 6333 м^3/с. Слой стока по бассейнам рек Баргузин и Верхняя Ангара будет равен 3,5 и 5,5 м соответственно. Такой сток является катастрофическим, повлечет за собой прохождение опасных гидрологических явлений.

Заключение

Главной отличительной особенностью схожих по физико-географическим и гидролого-морфометрическим характеристикам речных систем является рисунок русловой сети, являющийся первичным индикатором водоносности. Количество водно-эрозионных элементов, их распределение и взаимосвязь делает каждую речную систему уникальной. Метод структурной гидрографии с использованием современных аэрокосмических снимков позволяет создавать динамические модели речных систем, выступающие в качестве индикатора экстремально высокого стока.

Работа выполнена в рамках программы НИР Института географии им. В. Б. Сочавы СО РАН (№ 0347-2016-0003) при финансовой поддержке РФФИ в рамках проектов № 16-05-00286_а и № 17-29-05052-офи_м.

Список литературы

1. *Афанасьев А. Н.* Водные ресурсы и водный баланс бассейна озера Байкал. Новосибирск : Наука, 1976. 238 с.
2. Ресурсы поверхностных вод СССР. Л. : Гидрометеоиздат, 1973. Т. 16, вып. 3. 400 с.

УДК 628.316.12+573.6; 579.695

Микробные топливные элементы как альтернативный способ очистки сточных вод

О. А. Бархатова[1] (barhat@geogr.isu.ru), П. А. Журавлев (protivo-glaz67@gmail.com)[1], Г. О. Жданова[1] (zhdanova86@ya.ru), О. Ф. Вятчина[1] (olgairk3@rambler.ru), Ю. О. Горбунова[1] (iuliia_gorbunova_93@mail.ru), С. Е. Плеханов[2] (plekhanovse@yandex.ru)

[1] Иркутский государственный университет, Иркутск
[2] Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва

Аннотация. Исследована способность ряда коммерческих комплексных микробиологических препаратов генерировать электричество в микробных топливных элементах (МТЭ). Среди изученных микробных консорциумов наиболее высокой электрогенной активностью в МТЭ при утилизации пептона обладали микробиологические препараты «Доктор Робик 109» (ООО «ВИПЭКО», Россия), «Байкал ЭМ-1» (ООО «ЭМ-Кооперация», Россия) и «Восток ЭМ-1» («Приморский ЭМ-Центр», Россия). Препарат «Доктор Робик 109» также достаточно интенсивно вырабатывал электрический ток при использовании в качестве субстратов подсолнечного масла, избыточной фитомассы элодеи. Это позволяет рекомендовать его для применения в технологии МТЭ для очистки сточных вод различных типов – коммунальные стоки, сточные воды животноводства, производственные стоки жироперерабатывающей и других отраслей пищевой промышленности, а также для переработки избыточной фитомассы водных растений после их использования в фиторемедиации.

Ключевые слова: микробные топливные элементы, очистка сточных вод, микроорганизмы-биоагенты, «Доктор Робик 109», «Байкал ЭМ-1», «Восток ЭМ-1».

Введение

Микробные топливные элементы (МТЭ) являются одни из перспективных направлений альтернативной энергетики. Они позволяют получать электрический ток, одновременно перерабатывая отходы или трансформируя загрязнители – компоненты сточных вод. Таким образом, значимость МТЭ обоснована не только с технологической, но и с экологической точки зрения. В последние годы, наряду с очисткой загрязненных стоков и получением электричества, также получила развитие область изучения МТЭ в качестве биосенсорного инструмента для анализа различных соединений [6]. Недавно начаты исследования возможности применения МТЭ в биогидрометаллургии – для извлечения ионов металлов из сточных вод, различных отходов, хвостов производств [8].

Интенсивность работы МТЭ в любом из перечисленных биотехнологических направлений определяется химической природой и концентрацией веществ, которые могут служить субстратами для соответствующих микроорганизмов-биоагентов. Поэтому важным звеном в данном исследовательском направлении является поиск микроорганизмов, которые могут активно трансформировать различные соединения в МТЭ с одновременным генерированием электричества.

Наиболее широко используемым в МТЭ субстратом является ацетат. Так, например, в работах [5; 11; 12; 18; 22; 26; 28] показано генерирование электрического тока в МТЭ при задействии в качестве субстрата $(CH_3COO)^-$ бактериями *Thermincola ferriacetica, Escherichia coli, Desulfuromonas acetoxidans, Geobacter sulfurreducens, Bacillus subtilis*. Для многих видов продемонстрирована способность продуцировать ток в присутствии в качестве субстрата

глюкозы – *Saccharomyces sp., Escherichia coli, Proteus vulgaris, Clostridium beijerinckii, Clostridium butyricum, Rhodoferax ferrireducens, Saccharomyces cerevisiae, Gluconobacter oxydans, Pseudomonas mendocina, Pseudomonas pseudoalcaligenes, Stenotrophomonas acidaminiphila, Paenibacillus lautus, Bacillus subtilis* [1; 3–5; 10; 13–15; 20; 23; 24; 26; 27].

В исследовании [9] показано использование культурой *Klebsiella pneumonae* в МТЭ другого сахара – лактозы, а в [7] штамм *Corynebacterium* sp. утилизировал в МТЭ широкий круг субстратов: от органических кислот до сахаров и спиртов. В работе [11] показано, что штамм *Geobacter metallireducens* способен окислять ароматические соединения, например, бензоат и толуол. Так при инокуляции *Geobacter metallireducens* в ячейку МТЭ и добавлении 0,48 мМ бензоата, весь бензоат был окислен до CO_2 [11]. Авторами исследования [4] показано генерирование электричества в МТЭ культурой *Bacillus subtilis* при добавлении глицерола. Также субстратами в МТЭ служат крахмал [16], целлюлоза [25], пшеничная солома [29], пиридин [29], фенол [17], нефтезагрязнения [19].

Однако сточные воды зачастую загрязнены не одним-двумя видами загрязнителей, а имеют обширный многокомпонентный состав. Вероятно, для очистки таких стоков более эффективным будет применение не отдельных культур микроорганизмов, а их консорциумов, включающих в себя штаммы, способные к разложению различных групп загрязнителей. Такими подобранными микробными композициями, способными к активной трансформации различных загрязнителей, являются микробиологические препараты, применяемые для выгребных ям и септиков, для ускорения компостирования отходов и т. д.

Целью данной работы явилась оценка электрогенной активности в МТЭ некоторых коммерческих микробиологических препаратов и поиск субстратов, пригодных для их работы в МТЭ.

Устройство и принцип работы МТЭ

Принцип действия МТЭ основан на анаэробном окислении различных субстратов микроорганизмами с последующей передачей электронов от микроорганизмов на поверхность электрода. На рисунке 1 показана схема работы МТЭ. Бактерии находятся в анодной камере, там же находится и субстрат. В катодной камере проводится аэрация для интенсификации процессов восстановления кислорода до воды. Анодная и катодная камеры разделены протонообменной мембраной, которая позволяет протонам из анодной камеры переходить в катодную и в тоже время задерживает диффузию кислорода в обратном направлении. Микроорганизмы на поверхности анода, либо в жидкой среде камеры окисляют субстрат и передают электроны на электрод. Так как анод и катод соединены проводником, то из-за возникающей в результате действия микроорганизмов разности потенциалов между электродами, между ними начинает протекать электрический ток, что регистрируется измерительной аппаратурой (рис. 1).

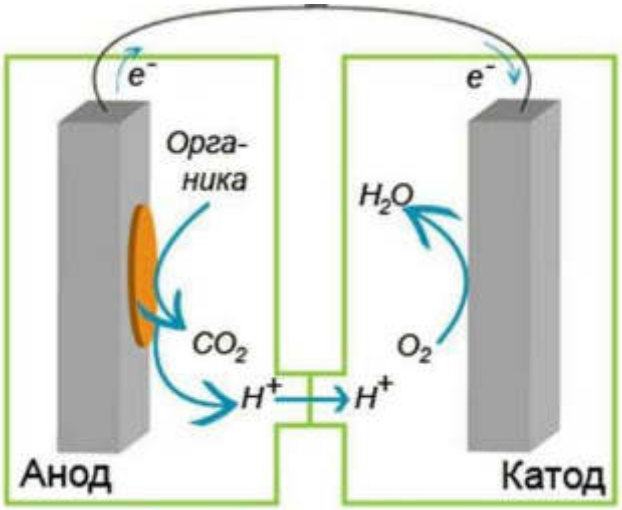


Рис. 1. Устройство МТЭ

Материалы и методы исследования

Эксперименты проводили с использованием макетов МТЭ, сконструированных в НИИ биологии «ИГУ» [2]. Они представляли собой 2-камерную ячейку из оргстекла. Камеры между собой были соединены протонообменной мембраной «МФ-4СК» (ЗАО «Пластполимер», Санкт-Петербург, Россия). Каждая из камер имеет отверстия для размещения рабочих электродов, которыми служила углеродная ткань «Урал» («Светлогорскхимволокно», Беларусь). В катодной камере также располагалось дополнительное отверстие, что позволяло осуществлять аэрацию католита. Внесение субстрата и биоагента в анолит осуществляли при помощи стерильного шприца через специальную резиновую заглушку в боковой части БТЭ [2]. Такая модификация ячейки позволяет осуществлять отбор проб или внесение субстратов и биоагентов без нарушения стерильности и анаэробных условий в анолите (рис. 2).

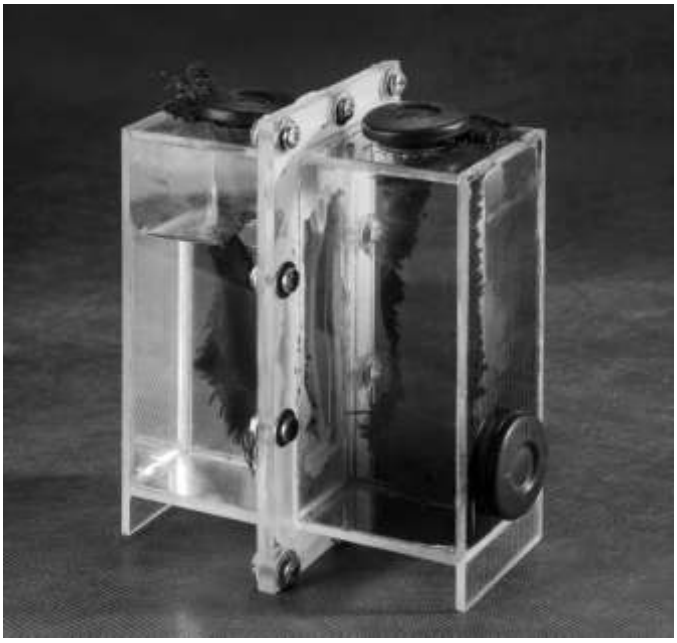


Рис. 2. Микробный топливный элемент, используемый в работе

Основной рабочей средой в МТЭ являлась стерильная модельная сточная вода следующего состава (мг/л): натрий углекислый 50,0; калий фосфорно-кислый однозамещенный 25,0; аммоний фосфорно-кислый двузамещенный 25,0; кальций хлористый 7,5; магний серно-кислый 5,0 (ГОСТ Р 50595-1993). Стерилизацию проводили автоклавированием при 1 атм в течение 45 мин.

Перед началом работы обе камеры МТЭ стерилизовали 3 %-ным раствором перекиси водорода в течение 20 мин. После этого каждый отсек МТЭ промывали стерильной водой, чтобы удалить остатки H_2O_2, и помещали под ультрафиолет на 15 мин. Далее с соблюдением всех правил асептики заполняли камеры МТЭ модельной сточной водой – анодную – полностью до самого верха, чтобы вместить воздух из камеры, катодную – на 2–3 см ниже верхнего уровня отсека – для возможности аэрирования католита. Через специальные отверстия в верхней части МТЭ помещали электроды из углеродной ткани, которые фиксировали резиновыми пробками, плотно прилегающими к оргстеклу. Биоагенты и субстрат вносили при помощи стерильного шприца через специальную резиновую заглушку в боковой части анодной камеры.

В качестве субстратов для исследуемых микробиологических препаратов использовали пептон мясной (0,5 г/л), растительное масло (подсолнечное, рафинированное, дезодорированное, вымороженное «Высший сорт», изготовитель ОАО «Аткарский маслоэкстракционный завод», город Аткарск.) (0,1 мл/л), растительную массу водного растения *Elodea canadensis* (1 г/л сухой массы).

Биоагентами в МТЭ служили коммерческие комплексные микробиологические препараты, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Исследуемые коммерческие микробиологические препараты

	Наименование препарата, информация о производителе	Краткое описание препарата
11	Препарат «Восток-ЭМ1» (Изготовитель: «Приморский ЭМ-Центр», Владивосток, Россия)	Концентрированная культура эффективных микроорганизмов, находящаяся в устойчивом неактивном состоянии и предназначенная для длительного хранения. Основу концентрата составляют микроорганизмы трех групп: фотосинтезирующие, молочнокислые бактерии и дрожжи
22	Препарат «Байкал-ЭМ1» (Изготовитель: ООО «ЭМ-Кооперация», Россия)	Микробиологическое удобрение, содержит молочнокислые, фотосинтезирующие бактерии, бактерии, фиксирующие азот, сахаромицеты, культуральную жидкость
33	«Биэм» (ИП Дугарова Д. Ц., Республика Бурятия, г. Улан-Удэ)	Микробиологический препарат для устранения запахов и утилизации отходов. Состав: смесь микробиологических культур, продукты жизнедеятельности микроорганизмов, питательная среда
44	«Тамир» (ООО «ЭМ-Кооперация», Россия)	Микробиологический препарат, содержащий живые природные микроорганизмы, метаболиты, культуральную жидкость
55	«Биоасенизатор» (ООО «НПП «Биосинтез», Россия)	Биоактиватор для переработки содержимого выгребных ям, содержит сухие почвенные микроорганизмы, наполнитель
66	Препарат «Доктор Робик» для выгребных ям и септиков (ООО «ВИПЭКО», Россия)	Сильнодействующая композиция из 4 специально отобранных культур микроорганизмов (споры). Культуры способны утилизировать жиры, белок, крахмал, целлюлозу, мочевину
77	Биопрепарат «Санэкс» (ЗАО «К&К», Россия)	Смесь ферментов и микроорганизмов, ускоряющих естественный биологический процесс. Уничтожает запахи, разлагает продукты жизнедеятельности, включая пищевые отходы, жиры, крахмал, целлюлозу
88	Препарат «Удачный» для туалетов и выгребных ям (ООО НВП «БашИнком» Россия)	Состав: споры бактерии, способные освобождать полезные энзимы, расщепляющие отходы, наполнитель

Жидкие препараты вносили в анодное пространство МТЭ в количестве 20 мл, сухие – 1 г. Регистрацию напряжения проводили при помощи автоматической системы регистрации данных на основе микропроцессорной платы «Arduino Mega 2560»; силы тока – при помощи мультиметра «DT32 DIDGITAL».

Статистическая обработка экспериментальных данных была проведена с использованием пакета программ Microsoft Office. Выводы сделаны при вероятности безошибочного прогноза $P > 0{,}95$.

Результаты и обсуждения работы

Эксперименты выявили следующее. Все исследуемые препараты генерировали электрический ток при использовании в качестве субстрата пептона. Однако при этом, прирост ЭДС, которую вырабатывали исследуемые биоагенты, значительно отличался, что свидетельствует о различной электрогенной активности исследуемых микробиологических препаратов. Так, хороший прирост напряжения (около 400 мВ) за 3 сут. эксперимента отмечали в МТЭ, содержащих препараты «Доктор Робик 109», «Байкал-ЭМ1», «Восток-ЭМ1». Консорциумы микроорганизмов «Экстрасол» и «БиЭм» давали в условиях наших опытов прирост напряжения только до 260 мВ. Низкой электрогенной активностью обладали препараты «Биоасенизатор», «Тамир», «Удачный», «Санэкс». Прирост напряжения, генерируемого этими биоагентами, не превышал 100 мВ (рис. 3).

На основании результатов данного эксперимента, для дальнейших исследований были выбраны препараты «Доктор Робик 109», «Байкал-ЭМ1», «Восток-ЭМ1», как наиболее перспективные для работы в МТЭ.

На следующем этапе работы была проведена оценка способности отобранных биоагентов генерировать электрический ток, когда субстратами служили подсолнечное масло и высушенная биомасса водного растения – элодеи канадской. Наибольшей электрогенной активностью при использовании всех перечисленных субстратов обладал комплексный микробиологический *п*репарат «Доктор Робик 109».

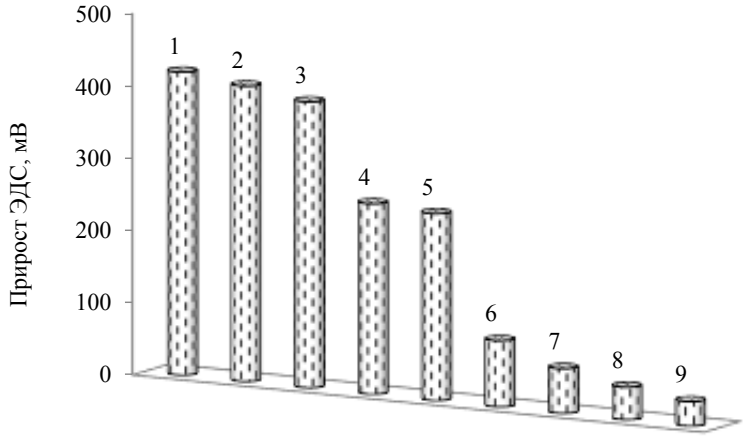


Рис. 3. Прирост напряжения, генерируемого в МТЭ исследуемыми коммерческими микробиологическими препаратами: *1* – Доктор Робик; *2* – Байкал ЭМ-1; *3* – Восток ЭМ-1; *4* – Экстрасол; *5* – БиЭм; *6* – Биоасенизатор; *7* – Тамир; *8* – Удачный; *9* – Санэкс (среда – модельная сточная вода, субстрат – пептон 0,15 г/л, электроды – углеродная ткань)

Так, в МТЭ с добавлением растительного масла напряжение, генерируемое препаратом «Доктор Робик 109К», возрастало за 2 сут. инкубирования до 177,8 мВ, за 5 сут. – до 390 мВ (рис. 4).

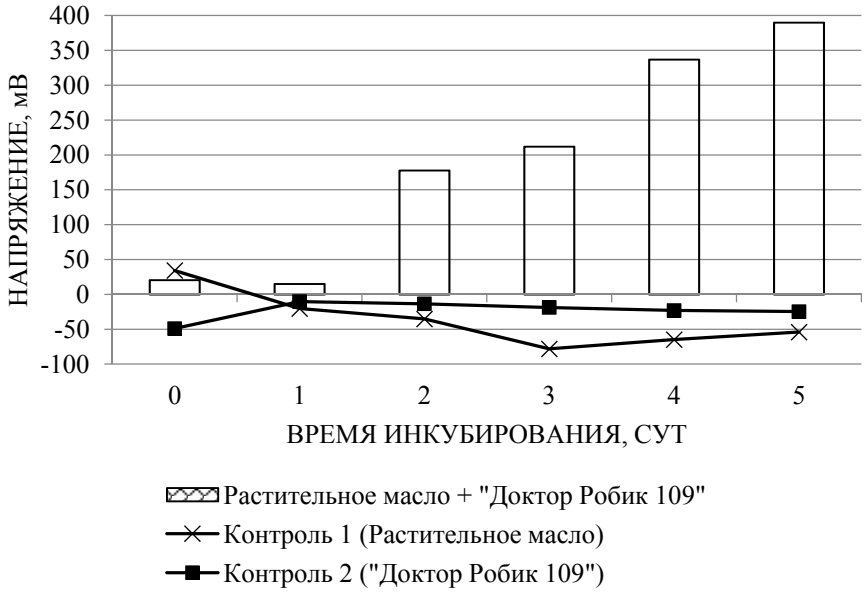


Рис. 4. Динамика напряжения, генерируемого в МТЭ микробным препаратом «Доктор Робик» при использовании в качестве субстрата подсолнечного масла (0,1 мл/л) (среда – модельная сточная вода, электроды – углеродная ткань)

Аналогичная закономерность прослеживалась при измерении силы тока в эксперименте. На 2 сут. прирост силы тока составил 110 μA, к 5 сут. этот показатель составлял 324 μA (рис. 5).

Эксперименты выявили способность микроорганизмов препарата «Доктор Робик 109К» генерировать электричество в МТЭ при использовании в качестве субстрата растительной массы водного растения *Elodea canadensis*. Так, при добавлении фитомассы элодеи в анолит данный биоагент за 3 сут. инкубирования генерировал ЭДС до 225 мВ, а к 10 сут. этот показатель возрастал до 500 мВ и оставался стабильным на протяжении последующих 5 сут. эксперимента (рис. 6).

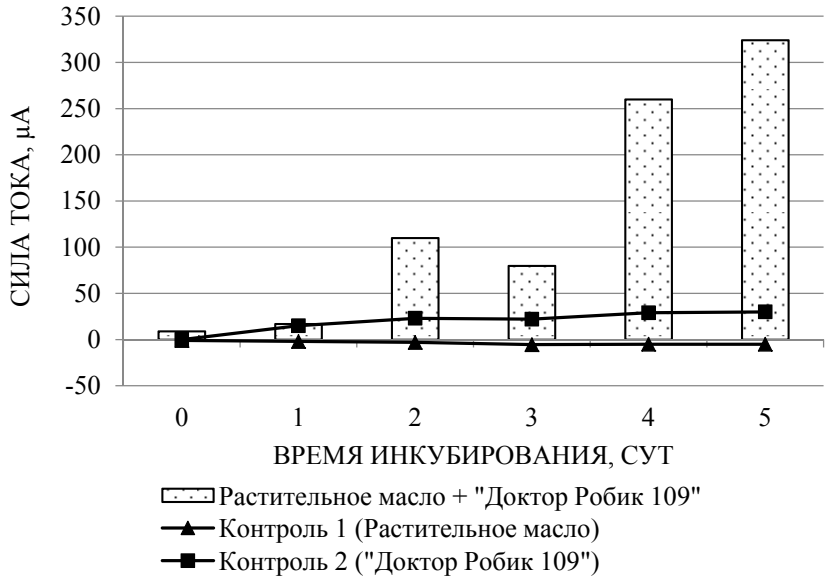


Рис. 5. Динамика силы тока, генерируемого в МТЭ микробным препаратом «Доктор Робик» при использовании в качестве субстрата подсолнечного масла (0,1 мл/л) (среда – модельная сточная вода, электроды – углеродная ткань)

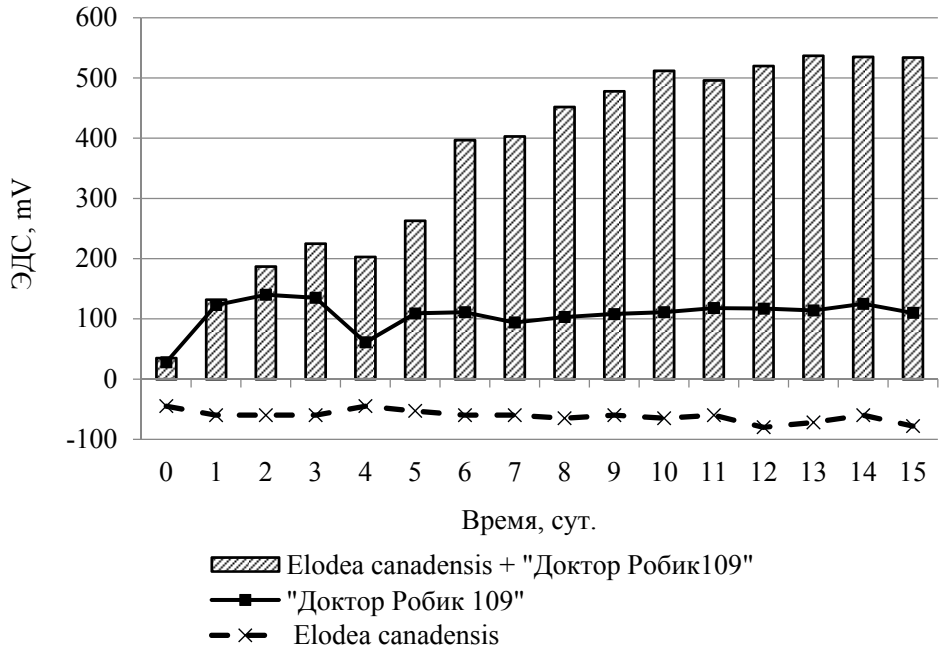


Рис. 6. Динамика напряжения, генерируемого в МТЭ микробным препаратом «Доктор Робик» при использовании в качестве субстрата фитомассы *Elodea canadensis* (1 г/л сухой массы) (среда – модельная сточная вода, электроды – углеродная ткань)

Аналогичную тенденцию наблюдали при измерении силы тока. Последовательное увеличение этого показателя происходило в МТЭ, содержащих одновременно микробный препарат и элодею. На 15 сут. эксперимента сила тока, генерируемая препаратом «Доктор Робик 109К», составила 364 μA. В контрольных ячейках, содержащих микроорганизмы без элодеи, сила тока не повышалась выше, чем 32 μA. В варианте МТЭ с элодеей, но без добавления препаратов на протяжении всего эксперимента ток не зафиксирован (рис. 7).

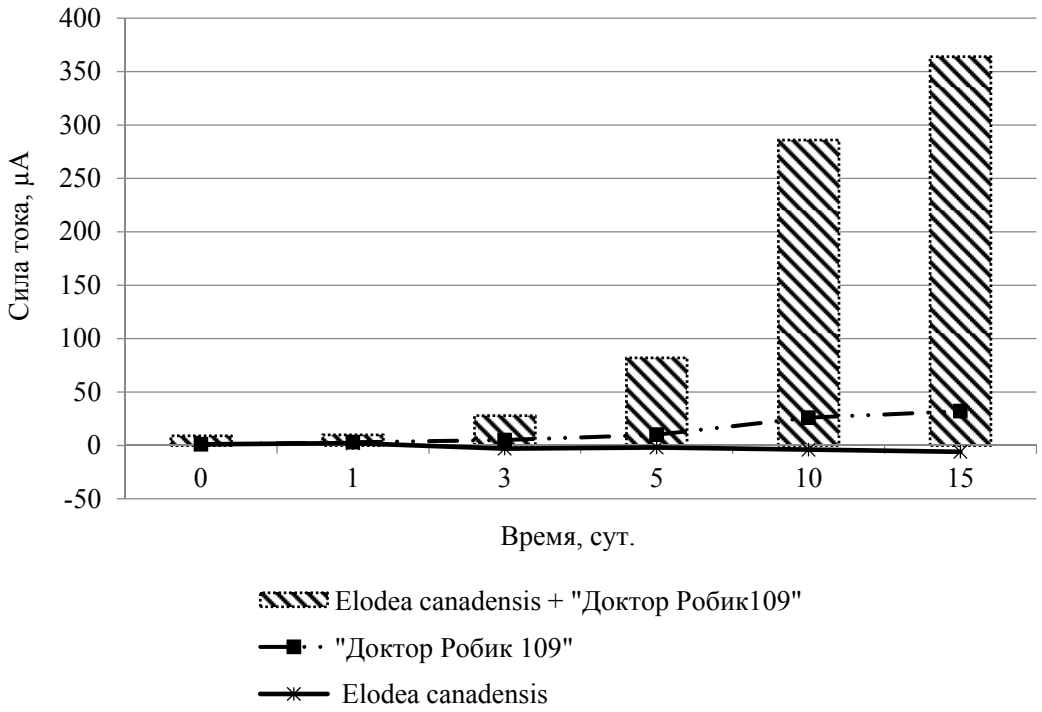


Рис. 7. Динамика силы тока, генерируемого в МТЭ микробным препаратом «Доктор Робик» при использовании в качестве субстрата фитомассы *Elodea canadensis* (1 г/л сухой массы) (среда – модельная сточная вода, электроды – углеродная ткань)

Заключение

Таким образом, экспериментально показана принципиальная возможность получения электрического тока в МТЭ с использованием в качестве биоагентов комплексных коммерческих микробиологических препаратов. Наибольшей электрогенной активностью из испытанных микробных консорциумов обладал микробиологический препарат для выгребных ям и септиков «Доктор Робик 109». Показана его способность к генерированию электрического тока при использовании в качестве субстратов пептона, подсолнечного масла, фитомассы элодеи. Такой обширный круг субстратов, приемлемых для работы в МТЭ данного биоагента, позволяет рекомендовать «Доктор Робик 109» для применения в технологии МТЭ для получения электричества в ходе очистки сточных вод различных типов – коммунальных стоков, сточных вод животноводства, пищевой промышленности (жироперерабатывающие предприятия и т. д.), а также утилизации избыточной фитомассы водных растений после их использования в фиторемедиации.

Использование в качестве биоагентов в МТЭ коммерческих комплексных микробиологических препаратов может быть более перспективным, чем применение отдельных штаммов, поскольку препараты являются специально подобранной композицией активных микроорганизмов-деструкторов. Наличие в составе препарата различных видов микроорганизмов обуславливает их более высокую устойчивость к факторам среды и условиям культивирования. Кроме того, микробные ассоциации способны к элиминированию более широкого спектра соединений, чем отдельные штаммы, поэтому они более перспективны для очистки сточных вод, которые обычно имеют многокомпонентный состав.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (проект RFMEFI58317X0060 «Биоремедиация и биоконверсия отходов с помощью комплекса фотосинтетических организмов и гетеротрофов в аэробных и анаэробных условиях с генерированием биоэнергии», соглашение № 14.583.21.0060 от 17 июля 2017 г.).

Авторы признательны генеральному директору «Приморский ЭМ-Центр» (Владивосток, Россия) Севериной В.Я. за любезно предоставленный препарат «Восток-ЭМ1».

Список литературы

1. Биотопливные элементы на основе наноуглеродных материалов / В. А. Алферов [и др.] // Наносистемы. 2014. Т. 6, № 2. С. 187–208.

2. Биоэлектрохимический элемент / Н. Д. Борохоев, Г. О. Жданова, В. М. Толстой, А. Э. Ржечицкий / Патент РФ на полезную модель № 168093 от 05.07.2016.

3. *Василов Р. Г.*, Решетилов А. Н., Шестаков А. И. Биотопливные элементы // Природа. 2013. № 12. С. 65–70.

4. Анод микробного биотопливного элемента на основе терморасширенного графита и мембранных фракций бактериальных клеток *Gluconobacter oxydans* / А. Е. Китова [и др.]. // Современная наука: Актуальные проблемы и пути их решения. 2014. С. 12–15.

5. Разрядные характеристики микробного топливного элемента на основе микроорганизма *Escherichia coli* / Е. В. Кузьмичева [и др.] // Электрохим. энергетика. 2007. Т. 7, № 1. С. 33–37.

6. *Понаморева О. Н.* Биосенсоры и биотопливные элементы на основе целых клеток микроорганизмов и выделенных из них ферментов. Обзор // Изв. Тул. гос. ун-та. Естеств. науки. 2009. Вып. 1. С. 138–157.

7. Генерация электрической энергии в биотопливном элементе на основе клеток микроорганизмов / А. Н. Решетилов [и др.] // Вестн. биотехнологии. 2005. № 2. С. 54–62.

8. A review on sediment microbial fuel cells as a new source of sustainable energy and heavy metal remediation: mechanisms and future prospective / S. Z. Abbas, M. Rafatullah, N. Ismail, M. I. Syakir // International Journal of energy research. 2017. 23 p. DOI: 10.1002/er.3706.

9. Microbial fuel cell for production of bioelectricity from whey and biological waste treatment / D. Dalvi Aishwarya [et al.] // International Journal of Advanced Biotechnology and Research. 2011. Vol. 2, e 2. P. 263–268.

10. *Allen M. J.* The electrochemical aspects of some biochemical systems-IX. The anomalous behaviour of *E. coli* with mixed substrates / Electrochimica Acta. 1966. Vol. 11 (10). P. 1503.

11. Electrode-reducing microorganisms that harvest energy from marine sediments / D. R. Bond [et al.] // Science. 2002. Vol. 295. P. 483–485.

12. *Bond D. R.*, Lovley D. R. Electricity production by Geobacter sulfurreducens attached to electrodes // Applied and Environmental Microbiol. 2003. Vol. 69, N 3. P. 1548–1555.

13. *Chaudhuri S. K.*, Lovley D. R. Electricity Generation by Direct Oxidation of Glucose in Mediator-less Microbial Fuel Cells // Nat. Biotechnol. 2003. Vol. 21. P. 1229–1232.

14. Electron-transfer coupling in microbial fuel cells. 2. Performance of fuel cells containing selected microorganism-mediator-substrate combinations / G. M. Delaney [et al.] // J. Chem. Technol. and Biotechnol. 1984. Vol. 34 (1). P. 13.

15. *Kumari S.*, Mangwani N., Das S. Low-voltage producing microbial fuel cell constructs using biofilm-forming marine bacteria // Current Science. 2015. Vol. 108, N 5. P. 925–932.

16. *Lu N.* Electricity generation from starch processing wastewater using microbial fuel cell technology // Biochem. Eng. J. 2009. N 43. P. 246–251.

17. *Luo H.* Phenol degradation in microbial fuel cells // Chem. Eng. J. 2009. N 147. P. 259–264.

18. *Marshall C. W., May H. D.* Electrochemical evidence of direct electrode reduction by a thermophilic Gram-positive bacterium *Thermincola ferriacetica* // Energy Environ. Sci. 2009. Vol. 6. P. 699–705.

19. *Morris J. M.*, Jin S. Feasibility of using microbial fuel cell technology for bioremediation of hydrocarbons in groundwater. J. Environm. Sci. Health A: Tox // Hazard. Subst. Environm. Eng. 2008. N 43. P. 18–23.

20. *Niessen J.*, Schroder U., Scholz F. Exploiting complex carbohydrates for microbial electricity generation – a bacterial fuel cell operating on starch // Electrochem. Commun. 2004. Vol. 6. P. 955–958.

21. Glycerol degradation in single-chamber microbial fuel cells / V. R. Nimje [et al.] // Bioresource Technology. 2011. Vol. 102. P. 2629–2634.

22. Electrode reaction of *Desulfovibrio desulfuricans* modified with organic conductive compounds / D. H. Park [et al.] // Biotechnol. Techniques. 1997. Vol. 11. P. 145.

23. *Potter M. C.* Electrical effects accompanying the decomposition of organic compounds // Proc. R. Soc. Ser. B. 1912. Vol. 84. P. 260–276.

24. A novel microbial fuel cell stack for continuous production of clean energy / M. Rahimnejad [et al.] // International journal of hydrogen energy. 2012. Vol. 37. P. 5992–6000.

25. *Ren Z.*, Steinberg L., Regan J. M. Electricity production and microbial biofilm characterization in cellulose-fed microbial fuel cells // Water Sci. Technol. 2008. N 58. P. 617–622.

26. *Sharma Suresh K.*, Bulchandani B. D. Comparative Study of Various Substrate and Microorganisms in a Laboratory Designed Microbial Fuel Cell // International Journal of Research in Chemistry and Environment. 2012. Vol. 2, Issue 3. P. 168–174.

27. Glucose metabolism in a microbial fuel cell. Stoichiometry of product formation in a thionine-mediated *Proteus vulgaris* fuel cell and its relation to coulombic yields / C. F. Thurston [et al.] // Journd of General Microbiology. 1985. Vol. 131. P. 1393–1401.

28. *Vandevivere P.*, Verstraete W. Environmental applications in Basic biotechnology // Cambridge University Press. 2001. P. 531–557.

29. *Zhang Y.*, Li M., Liu G. Generation of electricity and analysis of microbial communities in wheat straw biomass-powered microbial fuel cells // Appl. Environ. Microbiol. 2009. N 75. P. 3389–3395.

УДК 574.6:543.641(282.256.16)

Возможности программы Canoco для анализа и обработки гидрохимических и гидрологических данных на примере реки Иртыш (Омская область)

А. А. Бабарико[1] (anna_babariko@mail.ru),
О. П. Баженова[1] (olga52@bk.ru), Н. В. Иванова[2]

[1] Омский государственный аграрный университет им. П. А. Столыпина, Омск
[2] Омский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды с региональными функциями, Омск

Аннотация. С помощью методов главных компонент (*Principal Component Analysis, PCA*) и ординации в программе для многомерного статистического анализа *CANOCO* проведен анализ некоторых гидрохимических и гидрологических показателей р. Иртыш (Омская область) за 2014–2016 гг. – содержание кислорода, ХПК, $БПК_5$, скорость течения, расход воды. Полученные результаты указывают на сложный нелинейный характер взаимосвязи выбранных показателей вне зависимости от водности года.

Ключевые слова: программа CANOCO, метод главных компонент, метод ординации, гидрохимия, гидрология, Иртыш, Омская область.

Введение

Река Иртыш является главной водной артерией Омской области, обеспечивающей потребности населения, промышленности и сельского хозяйства в пресной воде, поэтому мониторинг состояния ее экосистемы является важной задачей для региона. На Иртыше работает несколько гидрологических постов Федерального государственного бюджетного учреждения «Омский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды с региональными функциями» (ФГБУ «Омский ЦГМС-Р»), на которых ведутся в полном или частичном объемах гидрологические и гидрохимические наблюдения [4].

Получаемые в результате гидрохимического мониторинга данные содержат более пятидесяти показателей, применяемых для оценки текущего состояния реки. Эти показатели измеряются в разных единицах, сильно варьируются по абсолютному значению и пределам колебания их величин. Представить целостную картину состояния реки, а также выделить наиболее важные в данный момент времени гидрохимические показатели, работая с таким большим набором разнородных величин, достаточно тяжело. Если появляется необходимость в прогнозировании дальнейшего состояния реки, то количество данных резко возрастает, так как для построения адекватной модели необходимо учитывать многолетние наблюдения.

В настоящее время большую помощь в анализе гидрохимических данных оказывают различного рода математические модели и информационные технологии, которые, органично сочетаясь друг с другом, дают мощный инструмент для работы с большим количеством данных. Большие возможности в этом отношении предоставляет прикладное программное обеспечение CANOCO [5], являющееся одной из самых популярных программ для многомерного статистического анализа с использованием методов ординации в области экологии и ряда смежных областей. Нами был использован метод главных компонент *Principal Component Analysis* (PCA). Этот метод является одним из основных способов уменьшения размерности данных, при этом потери информации минимальны. Главные компоненты – это линейные комбинации исходных статистических величин. Переход от исходных (наблюдаемых) факторов к векторам главных компонент осуществляется посредством поворота координатных осей. Сущность вычисления главных компонент заключается в определении корреляционной (ковариационной) матрицы для исходных факторов X_j и нахождении характеристических чисел (собственных значений) матрицы и соответствующих векторов. Характеристические числа являются дисперсиями новых преобразованных переменных и для каждого характеристического числа соответствующий вектор дает вес, с которым старые переменные входят в новые [5].

Материалы и методы

Содержание растворенного кислорода характеризует кислородный режим водоема и имеет важнейшее значение для оценки экологического и санитарного состояния водоема [2]. Кислород необходим для дыхания гидробионтов и самоочищения водоемов. Снижение его концентрации свидетельствует об изменении биологических процессов в водоеме, о его загрязнении интенсивно окисляющимися органическими веществами. Кислородный режим водных объектов относится к числу весьма динамичных процессов во времени и в пространстве. В зависимости от совокупности различных факторов может иметь место как недосыщение, так и перенасыщение воды кислородом. Кислород попадает в поверхностные воды в основном из воздуха и связан со скоростью течения воды, турбулентностью, температурным и ветровым режимами. С повышением температуры вода теряет кислород и наоборот. Суммарным показателем санитарного состояния воды по загрязнению легко окисляющимися веществами является биохимическое потребление кислорода ($БПК_5$). Этот показатель применяется также для оценки самоочищения воды. Для оценки содержания органических веществ в воде и степени ее загрязнения находят химическое потребление кислорода (ХПК) [1, 3]. Учитывая важность этих показателей для оценки состояния экосистемы реки, особый интерес представляет установление зависимости между ними с целью прогнозирования динамики изменения степени эвтрофирования и загрязнения среднего течения Иртыша.

Целью применения PCA являлась проверка гипотезы о линейной зависимости между некоторыми гидрохимическими и гидрологическими показателями р. Иртыш в 2014–2016 гг.

Использование различных программ в конкретных целях имеет ряд особенностей, описав которые можно облегчить работу других исследователей. В связи со значительными затратами времени, необходимыми для освоения указанного метода и отсутствием детального ее изложения в одном литературном источнике мы приводим полное описание примененной нами методики в данной работе.

Имеющиеся данные по гидрохимии и гидрологии р. Иртыш задаются в программе CANOCO в виде таблицы, в качестве Labels (метки, названия) используются даты снятия показаний, они же будут использоваться на диаграмме в качестве обозначения точек в новой системе координат, построенной по методу PCA (рис. 1).

Для анализа данных CANOCO предлагает выбрать линейный (PCA) или унимодальный (DCA) метод ординации. PCA метод дает в результате анализа линейные корреляционные уравнения, связывающие между собой все заданные гидрохимические данные (кислород, ХПК, $БПК_5$, расход воды, скорость течения). Исходные данные можно преобразовать, используя предложенные варианты (например, логарифмическую формулу), а также центрировать и нормировать их как по строкам, так и по столбцам. Центрирование осуществляется вычитанием средних арифметических из их наблюдаемых значений (т. е. среднее арифметическое значение приравнивается к нулю), при этом направление шкалы и ее единицы измерения остаются при этом неизменными. Суть нормирования состоит в переходе к другому масштабу – стандартизированным единицам измерения, т. е. каждое измерение нормализуется таким образом, чтобы минимальное и максимальное значение по данному измерению были равны –1 и 1 соответственно.

Такую предварительную обработку имеет смысл применять только в том случае, когда есть основания полагать, что различные входные данные имеют различный масштаб (или единицы измерения, как в нашем случае), но при этом обладают примерно одинаковой ценностью для модели. Операции центрирования и нормирования можно использовать совместно. Применяя операции центрирования и нормировки к данным, мы получаем диаграммы, изображенные на рис. 2.

Labels	Кислород, мг/дм	ХПК	БПК5	Скорость, м/с	Расход, м3/с
23.04	11	20.5	2.8	0.94	1770
14.05	8.9	18.9	1.5	0.9	1680
28.05	9.3	18.5	2.2	0.7	897
18.06	8	9.8	1.3	0.78	1090
25.06	6.7	18.4	0.9	0.6	828
02.07	7	17.2	1.2	0.77	993
16.07	7.8	14.7	1.9	0.71	764
23.07	8.6	18	2.7	0.67	623
13.08	7.6	3.4	0.7	0.63	636
20.08	6.3	6.7	0.7	0.71	733
03.09	8.3	23.6	0.7	0.66	592
10.09	9	9.2	1	0.66	610
23.09	9.3	10.1	1.8	0.64	642
08.10	10.8	15.4	2.1	0.67	667
29.10	11.6	11.4	1.7	0.73	1040
05.11	11.9	18.9	1.7	0.58	600

а) р. Иртыш, п. Новая Станица, середина реки, 2014 г.

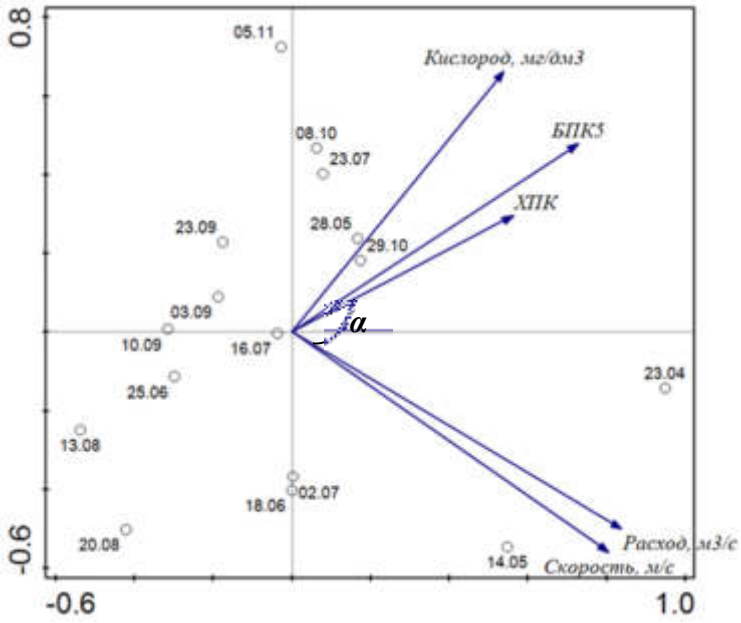
Labels	Кислород, м	ХПК	БПК5	Скорость, м/	Расход, м3/с
22.04	10.7	41.8	1.4	0.73	1525
13.05	7.1	49.3	2.5	1.05	2310
20.05	8.5	45	1.8	1.13	2760
27.05	8.1	47.6	1.4	1.08	2610
17.06	8.2	45.6	0.7	0.87	1720
25.06	8.9	6	2.5	0.94	1750
01.07	7.2	17.9	3.7	0.77	1350
15.07	9	5.2	1.4	0.85	1340
29.07	7.9	7.8	1.6	0.82	1190
12.08	8.3	10.3	1.4	0.76	890
26.08	8.6	32.3	1.7	0.63	677
09.09	9	12.4	2	0.61	605
07.10	10.3	8.5	1.7	0.65	722
14.10	12.3	8.6	2	0.63	717
21.10	11.9	6.1	1.7	0.61	696
05.11	11.9	17.9	1	0.4	562

б) р. Иртыш, п. Новая Станица, середина реки, 2015 г.

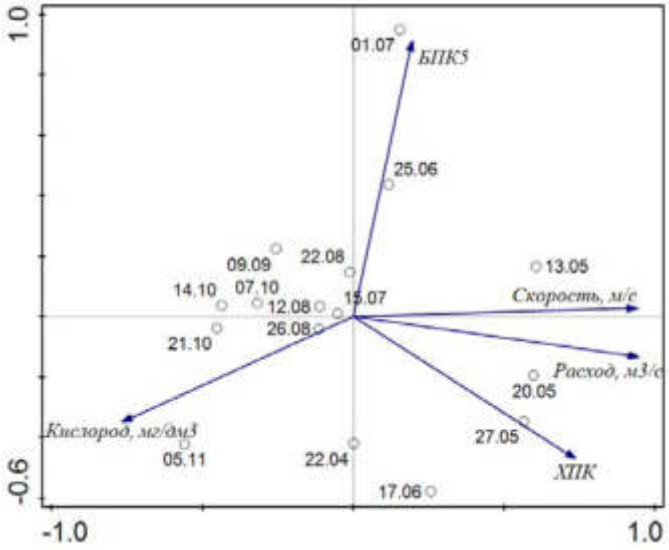
Labels	Кислород, м	ХПК	БПК5	Скорость, м/	Расход, м3/с
20.04	8.8	8.6	1.4	0.92	1760
11.05	8.3	14.1	1.4	1.03	2430
18.05	8.7	13.2	1.7	1.1	2970
25.05	7	12.2	1.9	1.03	2790
01.06	8.3	14	1.7	0.99	2380
08.06	8.4	8	4.7	1	2200
22.06	7.7	5.4	1.3	0.81	1450
07.07	8	8.8	1	0.92	1730
13.07	7	5.4	0	0.92	1730
27.07	6.4	7.7	0	0.99	1990
03.08	7.4	6	1.4	0.98	1960
10.08	7.8	6.3	1.7	0.96	1900
24.08	8.4	11.5	1.6	0.92	1970
07.09	7.4	11.6	1.7	0.77	1510
18.09	8.4	6.6	1.6	0.75	905
21.09	8.1	5.2	1.7	0.72	795
05.10	8.6	9.8	2	0.72	775
12.10	10.4	6.8	1.8	0.7	812
19.10	11.9	5.5	1.3	0.68	783
09.11	11.4	18.8	1.3	0.44	602

в) р. Иртыш, п. Новая Станица, середина реки, 2016 г.

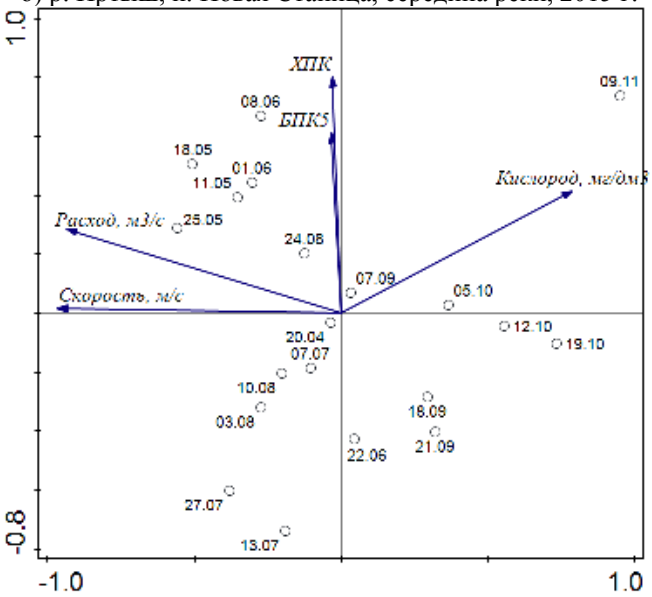
Рис. 1. Данные по гидрохимии и гидрологии р. Иртыш в районе пос. Новая Станица за 2014–2016 гг.



а) р. Иртыш, п. Новая Станица, середина реки, 2014 г.



б) р. Иртыш, п. Новая Станица, середина реки, 2015 г.



в) р. Иртыш, п. Новая Станица, середина реки, 2016 г.

Рис. 2. Ординационная диаграмма гидрохимических и гидрологических данных р. Иртыш в районе пос. Новая Станица за 2014–2016 гг.

Результаты

Особо важное значение имеет при этом интерпретация полученных данных. Каждая стрелка на рис. 2 указывает в направлении наибольшего увеличения значений для соответствующих показателей (например, вектор расхода воды на всех трех диаграммах рис. 2 указывает на середину-конец мая, что соответствует половодью). Угол между стрелками (на рис. 2 обозначен только один угол – α) указывает на знак корреляции между показателями: приближенная корреляция положительна, когда угол острый и отрицательна, когда угол больше 90°. В нашем случае, на рис. 2, *а* (данные 2014 г.) угол острый между двумя любыми гидрохимическими показателями, следовательно, корреляция положительна, т. е. все исследуемые гидрохимические показатели обнаруживают линейную зависимость. На рисунке 2, *б* (данные 2015 г.) угол α между кислородом и другими показателями больше 90°, следовательно, корреляция отрицательная. Интересен тот факт, что практически одинаковые по водности 2014 и 2015 гг. (маловодные) дают резко различающие результаты, что может быть обусловлено либо случайными факторами (например, стоками отходов или другим антропогенным воздействием), либо неадекватностью применяемого метода. Многоводный 2016 г. (рис. 2, *в*) обнаруживает как положительную (например, между кислородом, ХПК и $БПК_5$), так и отрицательную корреляцию (между кислородом, расходом воды и скоростью течения реки).

Таким образом, анализируя исходные данные и полученные в результате PCA анализа результаты можно сделать вывод, что взаимосвязь между выбранными гидрохимическими и гидрологическими показателями реки Иртыш нелинейная и описывается более сложными уравнениями. Поскольку используемый в работе метод не позволил установить однозначные связи для наиболее важных гидрохимических и гидрологических показателей реки, в дальнейшем необходимо провести анализ другими методами, предлагаемыми программой CANOCO.

Список литературы

1. *Гетманец И. А.*, Артеменко Б. А. Гидрохимическая оценка уровня загрязнения воды реки Миасс на территории Челябинской области // Фундамент. исслед. 2013. № 10-6. С. 1248–1252. URL: https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=32525 (дата обращения: 19.01.2018).

2. *Михайлова Л. В.*, Чемагин А. А., Медведева И. Н. Ретроспективный анализ и современное состояние гидрохимического режима р. Иртыш в нижнем течении // Вестн. рыбохоз. науки. 2015. Т. 2, № 2 (6). С. 60–75.

3. Региональные особенности высокого уровня загрязненности рек Обь-Иртышского бассейна / О. С. Решетняк [и др.] // Вода: химия и экология. 2013. № 6. С. 3–9.

4. Обь-Иртышское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды [Электронный ресурс] : Федер. гос. бюджет. учреждение. URL: http://omsk-meteo.ru/ (дата обращения 18.01.2018).

5. *Ter Braak*, C. J. F. CANOCO Reference Manual and User's Guide: Software for Ordination (version 5.0) // Cajo JF ter Braak, Petr Smilauer. Wageningen : Biometris, 2012. 496 p.

УДК 556.555.7

К вопросу о параметризации эмиссии метана с поверхности водохранилищ

М. Г. Гречушникова[1,2] (allavis@mail.ru), И. А. Репина[1,3] (iar.ifaran@gmail.com), В. М. Степаненко[1] (stepanen@srcc.msu.ru), А. Ю. Артамонов[3] (sailer@ifaran.ru), В. С. Казанцев[3] (kazantsev@ifaran.ru), В. А. Ломов[1] (lomson620@mail.ru)

[1] МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва
[2] ФГБУН ИВП РАН, Москва
[3] ФГБУН ИФА им. А. М. Обухова РАН, Москва

Аннотация. Приведен обзор факторов, влияющих на эмиссию метана с поверхности водохранилищ, а также обзор выполненных оценок глобальной эмиссии с поверхности водохранилищ мира. Выявлен недоучет эмиссии с поверхности водохранилищ РФ, отсутствующих в используемой базе данных водохранилищ.

Ключевые слова: метан, эмиссия, удельный поток, водохранилища.

Введение

Увеличение концентрации в атмосфере парниковых газов (ПГ) является общепризнанным фактом и рассматривается в качестве одной из возможных причин климатических изменений, которые вызывают в свою очередь изменения режима и объема стока рек, что имеет последствия в социальной сфере. Актуальной задачей является инвентаризация выбросов ПГ различных источников с целью возможного их сокращения, а также параметризация их эмиссии с подстилающей поверхности для задания условий взаимодействия с атмосферой в климатических моделях. К традиционно рассматриваемым естественным и антропогенным источникам парниковых газов (болота, озера, свалки и полигоны захоронения твердых бытовых отходов, объекты сельского хозяйства, электроэнергетики и др.) в последнее время отнесены и водохранилища. Выделение парниковых газов в водоемах в целом и в водохранилищах в частности происходит из-за микробного разложения органического вещества, которое содержится в затопляемых водохранилищами почвах и растительности, поступающего с водосбора, продуцируемого в водоеме гидробионтами. Интенсивность выбросов ПГ связана с морфометрическими параметрами водохранилищ ГЭС, геоэкологическими условиями их размещения, гидрологическим режимом и их возрастом и др.

Метан входит в число важнейших парниковых газов по вкладу в радиационный форсинг, оказывая влияние на тепловой баланс климатической системы. Метан образуется в строго анаэробных условиях за счет деятельности метаногенных архей и окисляется метанотрофными микроорганизмами как в аэробных, так и в анаэробных условиях [5]. К числу антропогенных источников метана относят свалки, полигоны ТБО, объекты сельского хозяйства, а также искусственные водные объекты. Исследования масштабов эмиссии метана на акваториях водохранилищ проводятся с учетом как диффузионного, так и «пузырькового» потоков [9; 11; 23]. В некоторых работах особо выделяют поток метана при разложении макрофитов и приводятся оценки эмиссии метана в атмосферу при сезонном поступлении накопленных за периоды стратификации запасов метана в гиполимнионе при наступлении периодов конвекции, например, в [20]. Помимо изучения эмиссии метана в отношении влияния на климатические изменения актуально исследование его содержания в водоемах, поскольку в комплексе с другими ингредиентами концентрация метана может служить индикатором протекания внутриводоемных процессов и экологического состояния водных экосистем [6].

Влияние различных географических факторов на эмиссию метана

Температура воды. CH_4 является конечным продуктом анаэробного разложения органического вещества, и выбросы CH_4 из водохранилищ зависит от температуры [18]. Повышение температуры может увеличить деятельность микробов. Метаногенные бактерии гораздо более чувствительны к температуре, чем метанотрофные [4], а оптимальная темпера-

тура для производства CH_4 и окисления составляет около 25 °С. При колебании температуры воды в диапазоне, приемлемом для обоих видов бактерий, больше CH_4 будет произведено, когда температура повышается, а производительность CH_4 уменьшается, когда температура. По данным [8] в умеренном поясе эмиссия метана меняется от 0 до 1720 мгCH_4/(м^2*сут), в субтропическом поясе от 0,5 до 582 мгCH_4/(м^2*сут), в тропическом и субэкваториальном – от 0,5 до 3935 мгCH_4/(м^2*сут). Такой разброс значений указывает на то, что климат не является доминирующим фактором, влияющим на величину эмиссии, однако можно отметить, что в более теплых широтах величина эмиссии имеет склонность к увеличению, относительно широт умеренного климатического пояса.

Глубина водохранилища. CH_4 будет окисляться метанотрофными бактериями, когда поток газа (пузырьковый или диффузный поток) проходит через толщу воды, содержащую растворенный кислород, небольшое количество CH_4 будет выбрасываться в атмосферу. Метан в большем объеме попадает в атмосферу из мелководных районов по сравнению с глубоководными областями, потому что будет окислено меньше CH_4 при более коротком расстоянии между поверхностью и донными отложениями водохранилища – источником метана. Возникновение пузырьков эпизодично [3], они чаще образуются в областях с глубиной менее 10 м [14]. На водохранилище Gatun (Панама) эмиссия CH_4 составляет только 10–200 мгCH_4/(м^2*сут) в районе глубиной около 7 м, в то время как значения эмиссии достигают 300–2000 мгCH_4/(м^2*сут) в районе с глубиной менее 2 м [14]. Диффузные потоки CH_4 в мелководных районах значительно выше, чем в районах, глубже 7 м на водохранилищах LaGrande-2 и Laforge-1 [19]. Аналогичная закономерность обнаружена и на Можайском водохранилище [1]. Статистически значимая зависимость эмиссии метана от средней глубины водохранилища не установлена, однако наибольшие ее значения приходятся на глубины до 10 м. В умеренном климатическом поясе наблюдается увеличение потока метана для водохранилищ с глубиной больше 70 м, что не соответствует изначальной теоретической модели процесса и может быть объяснено преобладанием других факторов, участвующих в формировании и транспортировки метана в водоеме.

Возраст водохранилища. Для молодых водохранилищ эмиссия метана невелика, так как органическое вещество, погребенное при заполнении водохранилища еще не подвержено активным процессам биодеградации. Далее эмиссия быстро возрастает из-за вовлечения метаногенов в процесс деструкции погребенной органики, и на протяжении всей дальнейшей жизни водоема уменьшается, если нет значительного ее поступления с водами притоками или в результате антропогенной деятельности. Рост величины эмиссии метана приходится в умеренном поясе на водохранилища возраста от 20 до 50 лет, а в субтропическом поясе, не смотря на малое количество данных, на 25–37 лет. В субэкваториальном поясе можно отметить большие величины эмиссии метана сразу после заполнения водохранилища и постепенное снижение этой величины на протяжении жизни водоема. Это может указывать на разное время начала разложения органического вещества в разных климатических зонах.

Содержание кислорода. Эмиссия CH_4 на границе воздух-вода положительно связана с концентрациями CH_4 в поверхностном слое, а они в свою очередь зависят от растворенного в воде кислорода (РК). Концентрации РК уменьшается с глубиной, что уменьшает окисление CH_4 в гиполимнионе. Следует отметить, что любые биологические процессы внутри водоема напрямую связаны с режимом РК. Его поступление в воду происходит несколькими способами.

1. Фотосинтез. Он происходит в фотическом слое в светлое время суток. При интенсификации процесса фотосинтеза содержание углекислого газа исчерпывается, но продуцирование продолжается с использованием гидрокарбонатных и в меньшей степени карбонатных ионов.

2. Взаимодействие с атмосферой. При охлаждении воды или при активном потреблении РК недонасыщенность восполняется инвазией (поглощение водой атмосферного кислорода).

3. Поступление с речными водными массами. В зависимости от сезона и основного источника питания, содержание растворенного кислорода в речных водных массах различно. При преобладании поверхностного стока над подземным – половодье или сильный паводок, водные массы насыщены кислородом. При этом в паводки речная вода при поступлении в

водохранилище может распространяться по русловой ложбине, обогащая придонные водохранилищные водные массы, находящиеся в зоне аноксии. В период межени основным источником питания реки являются поземные воды, что обуславливает низкое содержание кислорода в речной водной массе.

Основные расходные составляющие РК: эвазия (обратный процесс инвазии), сток водных масс через гидроузел, процессы дыхания водных организмов и деструкции органического вещества.

Содержание РК в воде определяется температурой и прозрачностью воды (проникновение солнечных лучей). В период летней стратификации при образовании термоклина в нижних горизонтах формируются бескислородные условия: на поверхности происходит продукция кислорода, а в придонных слоях – активное его потребление. На вертикальное распределение РК влияет трофический статус водоема. Продукционно-деструкционные процессы в совокупности с гидродинамическими определяют внутригодовой режим растворенного в воде кислорода. Размеры зон аноксии, наблюдаемых практически ежегодно, изменяются в зависимости от гидрометеорологических условий года. Таким образом, значительная сезонная и межгодовая изменчивость кислородного режима в малопроточных водохранилищах [2] в значительной степени будет определять и масштабы пространственной-временной изменчивости эмиссии метана с их поверхности.

Другие экологические переменные. На эмиссию CH_4 также влияют скорость ветра, скорость движения воды и разница температур воздух-вода, что приводит к нестабильности границы раздела сред. Эти переменные оказывают влияние на эмиссию CH_4 путем изменения коэффициента обмена (K) на границе воздух-вода [7;, 15]. Кроме того, выбросы CH_4 из водохранилищ также зависят от особенностей затопленной зоны, поступления органики с притоками [10], первичной продукции водных растений, времени водообмена, погодных условий и особенностей морфометрии.

Оценки глобальной эмиссии с поверхности водохранилищ

В одной из комплексных работ, посвященной оценкам глобальной эмиссии с поверхности водохранилищ [26] применен метод географической аналогии и районирования. По литературным источникам собраны сведения об эмиссии CH_4 для 76 водохранилищ, находящихся в различных климатических условиях. Данные собраны преимущественно по водоемам Северной и Южной Америки, единичные сведения характеризуют Европу, нет данных из Африки, Азии и Австралии. В расчетах использованы данные о водохранилищах из БД Global Lakes and Wetlands Database (GLWD) [16]. БД включает водохранилища с площадью поверхности более 10 км^2 и 47 водохранилищ с площадью 1–10 км^2. Озера с зарегулированным стоком исключены из расчета, поскольку эти водные объекты были на карте мира и ранее. Итого суммарная учтенная площадь составляет 205 000 км^2.

Для параметризации эмиссии метана водохранилища разделены на 4 группы в соответствии с гидроклиматическими природными условиями: бореальную, умеренную, субтропическую и тропическую. Для каждой группы определено среднее значение эмиссии и ее суммарная величина с учетом площади, занимаемой водохранилищами (рис. 1). Согласно данным этой оценки суммарная эмиссия составляет 4,8 Тг CH_4/год.

Полученные ранее оценки суммарной эмиссии с водохранилищ имеют довольно большой диапазон различий: 2–4 Тг CH_4/год [17], 69 Тг CH_4/год [22], 95–122 Тг CH_4/год [12]. Столь высокая оценка в последней работе связана с учетом дегазации метана при сбросах в нижний бьеф. Оценка V. L. Louis авторы [26] считают завышенной, поскольку в ней был произведен учет эмиссии в том числе с поверхности зарегулированных озер.

В соответствии с рекомендациями по измерению потоков [25] для адекватной оценки эмиссии парниковых газов с поверхности водохранилищ рекомендованы ежемесячные измерения потоков. Минимально необходимое количество измерительных компаний – четыре газа в год. В исходных данных, использованных в работе [26] сведения об эмиссии с поверхности водохранилищ Бразилии взяты из работы [24]. Между тем, сведения об эмиссии в ней приведены по материалам экспедиций в различные месяцы 1992, 1997, 1998 и 1999 гг.

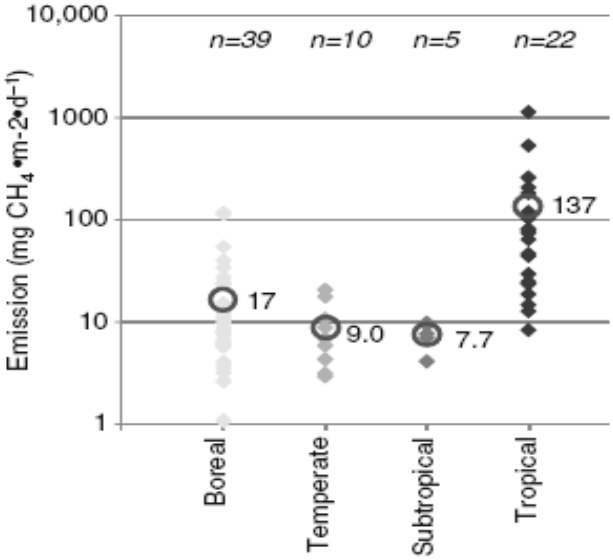


Рис. 1. Масштабы изменчивости эмиссии метана с поверхности водохранилищ различных гидроклиматических поясов [по: 26]

Наиболее поздняя оценка, выполненная в работе [8] учитывает все недочеты предыдущих оценок (включение в расчет акватории зарегулированных озер, неоднородные данные по эмиссии и т. д.) и составляет 13,4 Тг CH_4/год. Однако и в этой работе по-прежнему в основе используется БД Global Reservoir and Dam Database (GRanD) [13], в которой присутствуют всего 50 водохранилищ РФ.

Итак, несмотря на наличие многих работ по оценкам эмиссии метана с поверхности водохранилищ данный вопрос остается открытым. Несомненно, методический подход, примененный в работе [26], должен лечь в основу будущих уточняющих расчетов. Прежде всего, необходимо выявить причины столь больших расхождений в оценках удельного потока (УП) метана с поверхности водохранилищ в различных гидроклиматических условиях. Они могут быть связаны с различиями в водном режиме (проточности) и трофическом статусе. Поэтому имеет смысл производить более детальное деление водоемов на подгруппы внутри каждой зоны. Далее необходимо уточнение характерных значений УП (средних за год) по водоемам из каждой группы с наиболее детально изученным режимом эмиссии метана. При отсутствии подробных внутригодовых натурных данных следует использовать возможности математического моделирования [21], предварительно откалибровав модель по имеющимся натурным данным.

На Можайском водохранилище, входящем в систему водоснабжения г. Москвы и расположенном на западе Московской области, с 2015 г. в сезон открытой воды производятся измерения эмиссии метана методом плавучих камер, регулярный отбор проб на рейдовой вертикали в Красновидовском плесе и при периодических гидролого-гидрохимических съемках по продольной оси водохранилища. Подробные внутрисезонные измерения на Можайском водохранилище (рис. 2) выявили большую внутрисезонную изменчивость содержания метана в поверхностном и придонном слоях этого мезотрофно-евтрофного водоема, связанную с развитием бескислородных условий при небольшой проточности (рис. 3).



Рис. 2. Схема Можайского водохранилища с пунктами отбора проб вдоль затопленной русловой ложбины

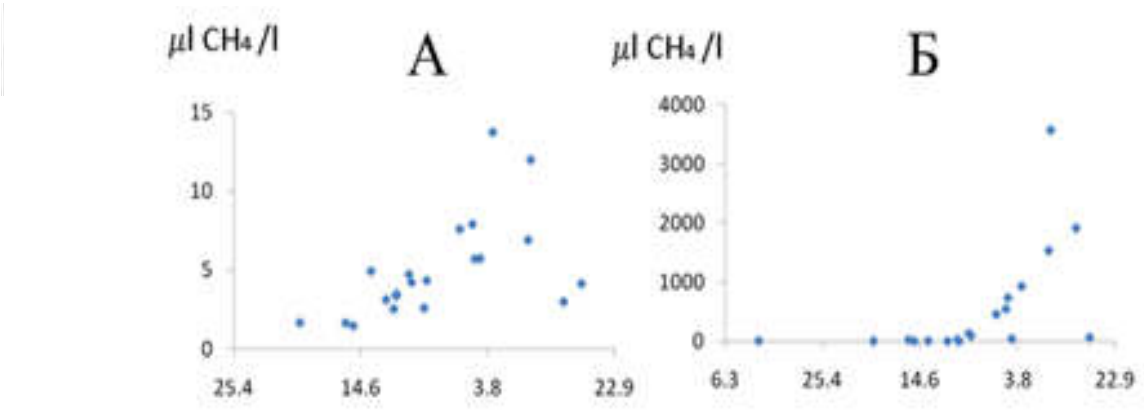


Рис. 3. Содержание метана в поверхностном и придонном слое Красновидовского плеса Можайского водохранилища в 2017 г.

Расчет диффузионного потока метана в атмосферу произведен методом тонкого поверхностного слоя TBL [15] с использованием параметризации коэффициента обмена по [7]. Для рейдовой вертикали (станция IV, рис. 2) с наиболее частыми измерениями характерной закономерностью является увеличение в течение лета разности значений общей эмиссии и диффузионного потока, которая характеризует пузырьковую эмиссию, возрастающую к моменту начала разрушения до 90 % общего потока (рис. 4).

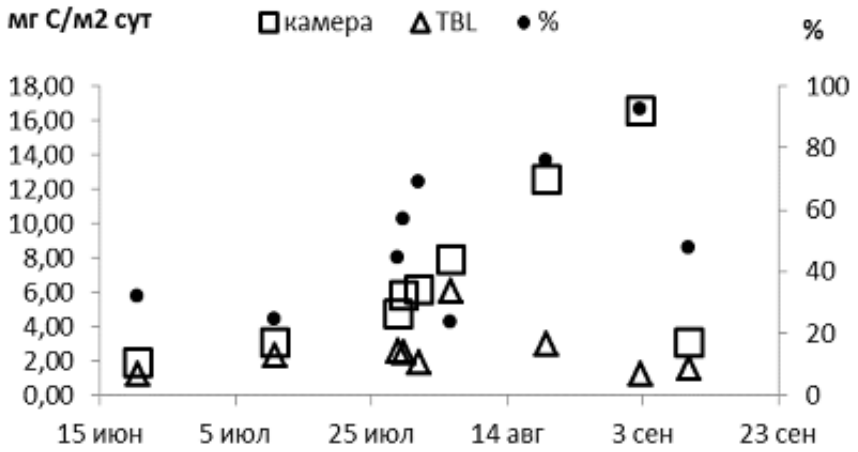


Рис. 4. Удельный поток метана, определенный методом плавучих камер, и расчетные значения диффузионного потока методом TBL и доля пузырькового потока на рейдовой станции Красновидовского плеса в 2017 г.

По материалам постановки плавучих камер выявлено значительное увеличение эмиссии метана к моменту окончания периода летней стратификации (к концу августа), когда бескислородная зона достигает наибольшего объема водоема [2] и уменьшается градиент температуры воды в водной толще. В начале периода осенней конвекции эмиссия, определенная методом плавучих камер, уменьшается на порядок (рис. 5). При интерполяции полученных значений и расчете УП за период открытой воды среднее его значение составляет 90 ($мгCH_4$-С/$м^2$*сут), что соответствует верхней границе значений эмиссии для водоемов бореальной зоны (рис. 1).

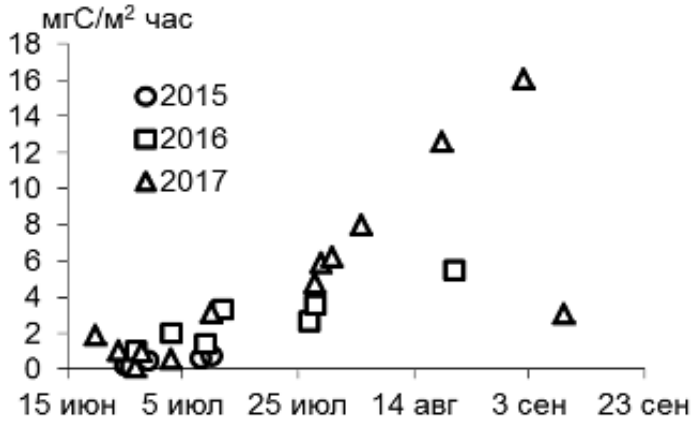


Рис. 5. Удельный поток метана, определенный методом плавучих камер на рейдовой станции Красновидовского плеса (ст. IV, см. рис. 2)

Расчет диффузионного потока для станций, расположенных вдоль затопленного русла (табл. 1) по материалам пяти гидрологических съемок показал: во-первых, увеличение значений диффузионного потока в течение летнего периода для всех районов водохранилища, отличающихся средней глубиной; во-вторых, имеется тенденция уменьшения диффузионного потока к плотине. Это связано с фактором глубины (окисление метана в большей толще воды при наличии более глубокого перемешанного и аэрированного эпилимниона). В приплотинном плесе диффузионный поток на порядок меньше, чем в верховьях в начале лета при образовании прямой стратификации. В конце августа довольно большие значения характерны на станции IV, отличающейся от V глубиной и термической структурой. Таким образом, при расчете интегральной эмиссии с поверхности водохранилищ необходимо непременно учитывать ее пространственно-временные изменения, которыми отличаются водохранилища долинного типа (к которому относится большинство искусственных водоемов мира).

Таблица 1

Диффузионный поток в 2017 г., рассчитанный методом TBL, мгCH_4-C/м^2*сут.

Станция (см. рис. 1) и характерная глубина района	8 июня	18 июня	4 июля	10 июля	20 августа
I (6 м)	2,3		5,3	13	11,2
II (8 м)	1,2	4,7	2,3	6	19,7
III (10 м)	1,5	4,5	3	3	13,6
IV (14 м)	0,6	2,8	1,5	2	10,3
V (20 м)	0,4	1,2	1,6	3	4,3

Результаты полевых наблюдений показали значительную пространственно-временную изменчивость эмиссия метана с поверхности малопроточного долинного водохранилища. Аналогичные закономерности могут быть характерны и для других долинных водохранилищ, особенно с большим временем водообмена, что делает актуальным вопрос и применении математического моделирования, поскольку охватить наблюдениями все водоемы невозможно.

Следующим пунктом оценки глобальной эмиссии является уточнение количества водохранилищ. В базе данных GRanD [13] приведены сведения о 6862 водохранилищах площадью более 0,1 км^2 (рис. 6). Из них 104 водоема указаны, как зарегулированные озера. Итого суммарная площадь водохранилищ без учета озер в подпоре составляет по данным этой БД 251147 км^2. Предварительный анализ показал, что например на территории зарубежной Европы не учтены 12 водохранилищ площадью 23 км^2. В БД присутствуют только крупные водохранилища на территории России и СНГ. Между тем в этой БД отсутствуют небольшие водохранилища в бассейнах Днепра, Кубани, Дона и Волги (т. е. не учтены дополнительные площади акваторий 165, 621, 1854 и 15 700 км^2 соответственно). Единичными водоемами

представлена азиатская часть России, между тем как небольшие водохранилища по площади занимают там около 2530 км^2. Следовательно, суммарная площадь водохранилищ составляет около 272 040 км^2, т. е. на 25 % больше, чем учтено в работе [26].

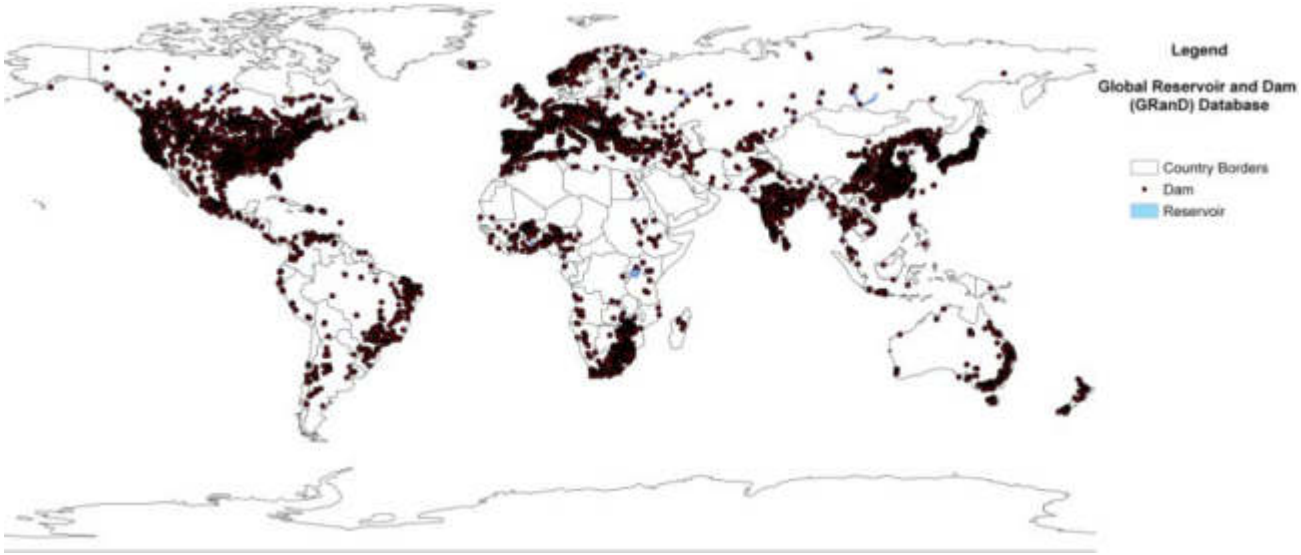


Рис. 6. Водохранилища из БД GRanD [13]

Выводы

Многочисленные исследования в различных регионах мира (преимущественно в Канаде, США и Бразилии), показали, что интенсивность эмиссии с водохранилищ может существенно различаться [8]. Это требует проведения дополнительных регулярных натурных исследований для количественной оценки эмиссии.

На территории России эмиссия с поверхности водохранилищ изучена очень слабо [11]. Несмотря на микробиологический процесс образования метана, величина эмиссии с поверхности водохранилища зависит от географических факторов. Имеющиеся данные позволяют ранжировать значимость географических факторов, влияющих на процесс эмиссии. Определяющим фактором является принадлежность к климатическому поясу (рост эмиссии с ростом температуры). Большой вклад вносит возраст водохранилища (с ростом температуры уменьшается возраст и период максимальной скорости разложения органического вещества). Меньший, но различимый вклад вносит глубина водохранилища (уменьшение величины эмиссии метана с ростом глубины).

Множество факторов, влияющих на эмиссию метана невозможно оценить в связи с недостаточным количеством данных, из чего следует необходимость дальнейших измерений и оценок, включая математическое моделирование процессов образования и эмиссии метана.

Для наиболее точной и полной оценки и параметризации эмиссии парниковых газов и метана в частности с водохранилищ необходимо поэтапно решить следующие задачи:

– разработать классификацию водохранилищ по интенсивности выбросов парниковых газов в зависимости от возраста водохранилищ, от района их расположения, климатической зоны, величины, проточности, термического и кислородного режима;

– разработать алгоритм расчета выбросов парниковых газов водохранилищами, поглощающей способности водохранилищ, расположенных в различных климатических зонах с учетом разработанной системы классификации водохранилищ;

– продолжить сбор экспериментальных данных из доступных источников (в том числе открытых) по эмиссии с различных водохранилищ, включающий сопоставление данных по единицам измерения, методам и факторам оценки (точки измерения, глубина измерения, методы определения концентрации парниковых газов во взвешенном состоянии, погрешность измерительной аппаратуры и др.);

– адаптировать одномерную озерную модель для долинных водохранилищ, верификация модели произвести по наиболее подробным доступным натурным данным;

– рассчитать характерные значения эмиссии для типичных неизученных водоемов, обобщить материалы.

Полевые и лабораторные работы выполнены при поддержке проекта РГО_а 17-05-41095, обобщение и анализ материалов выполнен при поддержке проекта РНФ № 14-17-00155.

Список литературы

1. Сезонные и пространственные изменения содержания метана в Можайском водохранилище в летний период / М. Г. Гречушникова, Д. Д. Бадюков, А. С. Саввичев, В. С. Казанцев // Метеорология и гидрология. 2017. № 11. С. 67–78.
2. *Ерина О. Н.* Режим растворенного кислорода в стратифицированных водохранилищах Москворецкой системы водоснабжения г. Москвы : дис. … канд. геогр. наук. М., 2015. 188 с.
3. *Зорькин Л. М.*, Суббота М. И., Стадник Е. В. Метан в нашей жизни. М. : Недра, 1986. 149 с.
4. Плотины и развитие: новая методическая основа для принятия решений. Отчет Всемирной комиссии по плотиннам. М. : Всемир. фонд дикой природы (WWF). 2009. 200 с.
5. Биогеохимический цикл метана в прибрежной зоне и литорали Кандалакшского залива Белого моря / А. С. Саввичев [и др.] // Микробиология. 2004. Т. 73, № 4. С. 540–552.
6. Метан в водных экосистемах / Ю. А. Федоров, Н. С. Тамбиева, Д. Н. Гарькуша, В. О. Хорошевская. Ростов н/Д. М. : Ростиздат, 2005. 329 с.
7. *Cole J. J.*, Caraco N. F. Atmospheric exchange of carbon dioxide in a low-wind oligotrophic lake measured by the addition of SF6 // Limnol. Oceanogr. 1998. Vol. 43. P. 647–656, doi:10.4319/lo.1998.43.4.0647.
8. Data from: Greenhouse gas emissions from reservoir water surfaces: a new global synthesis / B. R. Deemer, J. A. Harrison, S. Li, J. J. Beaulieu, T. DelSontro, N. Barros, J. F. Bezerra-Neto, S. M. Powers, M. A. dos Santos, J. A. Vonk // Dryad Digital Repository. 2016. URL: https://doi.org/10.5061/dryad.d2kv0.
9. Greenhouse gas emissions from boreal reservoirs in Manitoba and Quebec, Canada, measured with automated systems / M. Demarty [et al.] // Environmental Science & Technology. 2009. Vol. 43. P. 8908–8915.
10. *Dunfield P.*, Dumont R., Moore T. R. Methane production and consumption in temperate and subarctic peat soils: response to temperature and pH // Soil Biology and Biochemistry. 1993. 25 (3). P. 321–326.
11. Reservoir Greenhouse Gas Emissions at Russian HPP / M. P. Fedorov [et al.] // Power Technology and Engineering. 2015. Vol. 49, N 1. P. 33–39. doi: 10.1007/s10749-015-0569-3/.
12. *Giles J.* Methane quashes green credentials of hydropower // Nature. 2006. Vol. 444. P. 524–525.
13. Global Reservoir and Dam (GRanD) database: Technical documentation. URL: http://www.gwsp.org/fileadmin/downloads/GRanD_Technical_Documentation_v1_1.pdf.
14. *Goldenfun J. A.* GHG measurement guidelines for freshwater reservoirs // IHA: UK. 2010. P. 36–91.
15. Greenhouse gas emissions related to freshwater reservoirs: World Bank Report. 2010. January. URL: https://siteresources.worldbank.org/INTNTFPSI/Resources/GHGemissionsrelatedtofreshwaterreservoirs.pdf.
16. *Lehner B.*, Döll P. Development and validation of a global database of lakes, reservoirs and wetlands // J Hydrol. 2004. 296. P. 1–22.
17. Methane emissions from large dams as renewable energy resources: a developing nation perspective / I. Lima, F. Ramos, L. Bambace, R. Rosa // Mitigation Adaptation Strategy Global Change. 2008. N 13. P. 1381–1386.
18. Greenhaussse gas emissions from hydroelectric reservoirs in tropical regions / L. P. Rosa, M. A. Dos Santos, B. Matvienko, E. O. Dos Santos, E. Sikar // Climatic change. 2004. Vol. 66, N 1–2. P. 9–21.
19. *Roehm C.*, Tremblay A. Role of turbins in the carbon dioxide emissions from two boreal reservoirs, Quebec, Canada // Journal of Geophysical Reseach. 2006. Vol. 11.
20. Reservoir methane monitoring and mitigation / B. Sherman, P. Ford, D. Hunt, C. Drury // Little Nerangand Hinze Dam Case Study. Urban Water Security Research Alliance Technical Report. 2012. N 96. 76 p.
21. LAKE 2.0: a model for temperature, methane, carbon dioxide and oxygen dynamics in lakes / V. Stepanenko, I. Mammarella, A. Ojala, H. Miettinen, V. Lykosov, T. Vesala // Geosci. Model Dev. 9. P. 1977–2006. URL: https://doi.org/10.5194/gmd-9-1977-2016, 2016.
22. Reservoir surfaces as sources of greenhouse gases to the atmosphere: a global estimate / V. L. St Louis, C. A. Kelly, E. Duchemin, J. W. Rudd, D. M. Rosenberg // Bioscience. 2000. Vol. 50. P. 766–775.
23. Greenhouse Gas Emissions: Fluxes and Processes, Hydroelectric Reservoirs and Natural Environments. Environmental Science Series / A. Tremblay, L. Varfalvy, C. Roehm, M. Garneau (eds.). N. Y. : Springer, 2005. 732 p.
24. Gross Greenhouse Gas Emissions from Brazilian Hydro Reservoirs. In: Tremblay A., Varfalvy L., Roehm C., Garneau M. (eds) Greenhouse Gas Emissions / M. A. dos Santos, B. Matvienko, L. P. Rosa, E. Sikar, E. O. dos Santos // Fluxes and Processes. Environmental Science. Berlin : Heidelberg: Springer, 2005. Doi: 10.1007/978-3-540-26643-3_12.
25. UNESCO/IHA Greenhouse-Gas Measurement Guidelines for Fresh Water Reservoirs. UNESCO/IHA Research Project, 2010. URK: https://www.hydropower.org/ghg-measurement-guidelines.
26. Greenhouse Gas Emissions from Reservoirs. In: Tortajada C., Altinbilek D., Biswas A. (eds) Impacts of Large Dams: A Global Assessment / O. Varis, M. Kummu, S. Härkönen, J. T. Huttunen // Water Resources Development and Management. Berlin : Heidelberg: Springer, 2012.

УДК 556.5

Оценка пойменного регулирования на участке Верхней Оби

В. А. Жоров[1] (jorov52@mail.ru), О. В. Ловцкая[2] (lov_olga@inbox.ru),
И. С. Постнова[1] (irinapostnova69@gmail.com), С. Г. Яковченко[1]
(spartak.cet@gmail.com)

[1] Центр инженерных технологий, Барнаул
[2] Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул

Аннотация. Рассматриваются основные вопросы, возникающие при расчетах русловой и пойменной трансформации на крупных реках с обширной поймой на примере участка Верхней Оби.

Ключевые слова: русловая и пойменная трансформация, вероятностные модели.

Новосибирское водохранилище является самым крупным искусственным водоемом на юге Западной Сибири, созданным в 1957 г. на р. Обь в 20 км выше г. Новосибирска. Площадь его водного зеркала 1070 км^2, полный объем 8,8 км^3, полезный – 4,4 км^3. Наибольшая ширина водохранилища 22 км, длина 185 км, максимальная глубина 29 м, средняя 9 м. Существенная часть (около половины) водоема мелководна (с глубинами менее 5 м). Водохранилище аккумулирует в среднем небольшую часть объема годового притока воды р. Обь и осуществляет неглубокое сезонное регулирование стока.

При расчетах водного баланса Новосибирского водохранилища и притока в него основной приток учитывается в створе у г. Камень-на-Оби. Для приближенной оценки возможной приточности используют значения расходов в створе у г. Барнаула, поскольку на этом участке р. Обь принимает лишь один крупный приток – р. Чумыш, на котором производятся регулярные наблюдения за стоком (рис. 1).

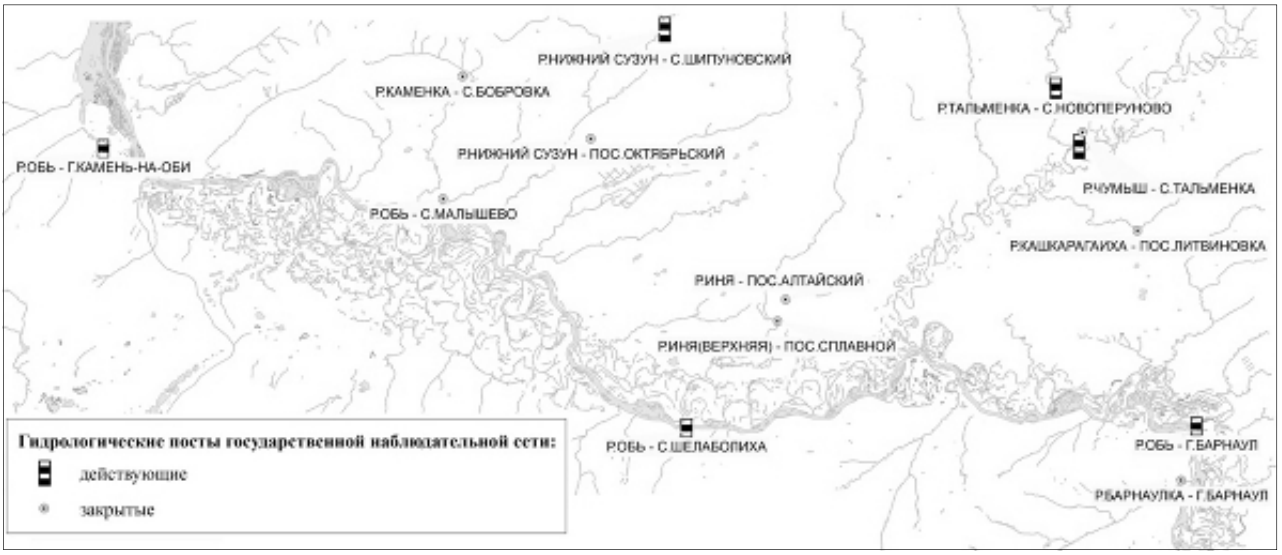


Рис. 1. Схема гидрологической изученности

На участке длиной 260 км от Барнаула до Камня-на-Оби простирается обширная пойма Оби шириной до 20 км, с глубиной затопления до 2,5 м, аккумулирующая значительную часть притока, поступающего через створ у г. Барнаула. Кроме того, часть притока на подъеме половодья аккумулируется в зоне переменного подпора, простирающейся почти на 90 км ниже до с. Ордынское.

Практически с момента создания водохранилища постоянно наблюдались систематические невязки стока на участках Барнаул-Новосибирск и Камень-Новосибирск, которые в разное время пытались объяснить то безвозвратными потерями за счет подземного оттока из ложа водохранилища, то потерями стока на пойме.

В 2012–2013 гг. в рамках государственного контракта с Верхне-Обским БВУ «Разработка программы расчета пропуска половодья через Новосибирское водохранилище и рекомендаций по учету влияния поймы реки Обь на участке от города Барнаул до города Камень-на-Оби на трансформацию притока в Новосибирское водохранилище для управления режимами работы Новосибирского гидроузла» была сделана оценка влияния поймы на трансформацию расходов половодья, проведены многовариантные расчеты составляющих водного баланса водохранилища, позволившие выявить существенные невязки баланса и проанализировать причины их появления [6]. Как оказалось, систематические невязки баланса объясняются некорректным (в сторону занижения) учетом стока в створе гидроузла.

В настоящей статье рассматриваются основные вопросы, возникающие при расчетах русловой и пойменной трансформации на крупных реках с обширной поймой.

Приближенная модель пойменного регулирования

Механизм влияния поймы на трансформацию паводковых расходов (пойменное регулирование) в наиболее общем виде можно представить следующим образом. При некотором уровне и отвечающем ему расходе воды во входном створе участка (Q^*) наблюдается выход воды на пойму. Существует некоторая пойменная емкость W_1, которая растет с увеличением расхода воды на участке:

$$W_1 = f_1(Q_c - Q^*),$$

где Q_c – средний расход воды на данном участке русла.

Вследствие замедленных скоростей течения на пойме, которые в общем случае растут с повышением уровня ее затопления, происходит временная аккумуляция объемов воды, поступивших на пойму и в грунты береговой зоны. При снижении уровней половодья эта вода возвращается в русло.

Часть воды, идущая на заполнение пойменной емкости W_1, испаряется, часть фильтруется и тратится на увлажнение почво-грунтов поймы. Чем меньше была их предшествующая увлажненность, тем больше будут потери стока на пойме.

Пойменное регулирование является частью процесса русловой и пойменной трансформации, который достаточно хорошо описывается приближенными вероятностными методами [1–4; 7]. Для протяженных участков речной сети, как показывает практика гидрологических расчетов, использование строгих методов, основанных на численном решении уравнений гидродинамики, достаточно проблематично.

Для оценки величины пойменной емкости была построены ЦМР поймы р. Оби на участке от г. Барнаула до г. Камень-на-Оби с использованием топографических карт масштаба 1:25 000.

В результате построения цифровой модели рельефа и водной поверхности по наблюденным уровням на 16.05.1937 г. (максимальным за период наблюдений) были получены следующие характеристики. Максимальная площадь затопления поймы составляет 2200 км^2. При глубине затопления в среднем 2,5 м (от уровня выхода воды на пойму до максимального) пойменная емкость может достигать 5,5 км^3 (при полезном объеме Новосибирского водохранилища 4,4 км^3).

Для более точного определения характера затопления исследуемая территория была разделена на 4 участка, длина каждого из которых не превышала 2-3 характерных ширин поймы, и рассчитаны кривые объемов и площадей.

Для расчета русловой и пойменной трансформации было предложено использовать модифицированную модель Калинина-Милюкова, с введением переменной от расхода скорости добегания.

$$\begin{aligned} Q_1(t+1) &= Q_1(t)\cdot C_1 + q_1(t+0{,}5)\cdot(1-C_1);\\ Q_2(t+1) &= Q_2(t)\cdot C_2 + q_2(t+0{,}5)\cdot(1-C_2);\\ Q(t+1) &= Q_1(t+1) + Q_2(t+1), \end{aligned} \qquad (1)$$

где Q_1 и q_1 – расходы основного притока в нижнем и верхнем створах участка, Q_2 и q_2 – расходы бокового притока, $C_1 = \exp(-\bar{v}/\Delta L) = \exp(-1/\tau_1)$, $C_2 = \exp(-\bar{v}/0{,}5\cdot\ \Delta L) = \exp(-1/\tau_2)$, $\bar{v}$, и τ_1 – соответственно средняя скорость добегания на участке длиной ΔL.

Система уравнений (1) позволяет трансформировать расходы основного и бокового притока к замыкающему створу участка. Затем расход в нижнем створе становится входным расходом для нижнего участка, и расчеты повторяются для всех участков по очереди, пока не достигается замыкающий створ бассейна. Для расчетов необходимо знать средние скорости добегания воды на участках, которые предложено [2] рассчитывать по формуле:

$$\bar{v} = d\cdot\ Q^{0,25}, \qquad (2)$$

где d – скоростной параметр. Структура формулы и показатель степени 0,25 совпадают с рекомендациями Р. А. Нежиховского [8].

При расчетах с переменной скоростью добегания необходимо учитывать условие равенства запаса воды $W = \tau_1 Q$ на «стыке» интервалов t и $t-1$. Это достигается введением поправки [2]: $k_v(t) = \tau_1(t-1)/\ \tau_1\ (t) = \bar{v}(t)/\bar{v}(t-1)$. С учетом этой поправки и (2), уравнения (1) перепишутся в виде:

$$\begin{aligned} Q_1(t+1) &= Q_1(t)\cdot C_1\cdot k_v(t) + q_1(t+0{,}5)\cdot(1-C_1);\\ Q_2(t+1) &= Q_2(t)\cdot C_2\cdot k_v(t) + q_2(t+0{,}5)\cdot(1-C_2);\\ Q(t+1) &= Q_1(t+1) + Q_2('t+1), \end{aligned} \qquad (3)$$

где $C_1(t) = exp(-d\cdot\ Q(t)^{0,25}/\Delta L)$, $C_2(t) = exp(-d\cdot\ Q(t)^{0,25}/0{,}5\cdot\ \Delta L)$.

Параметры модели определяются оптимизацией в процессе ее калибровки.

Пусть $W_1(H - H^*)$ – величина пойменной емкости, определенная по ЦМР (здесь H^* – уровень выхода воды на пойму). На рисунке 2 приведена зависимость $W_1(H)$ для поймы на исследуемом участке.

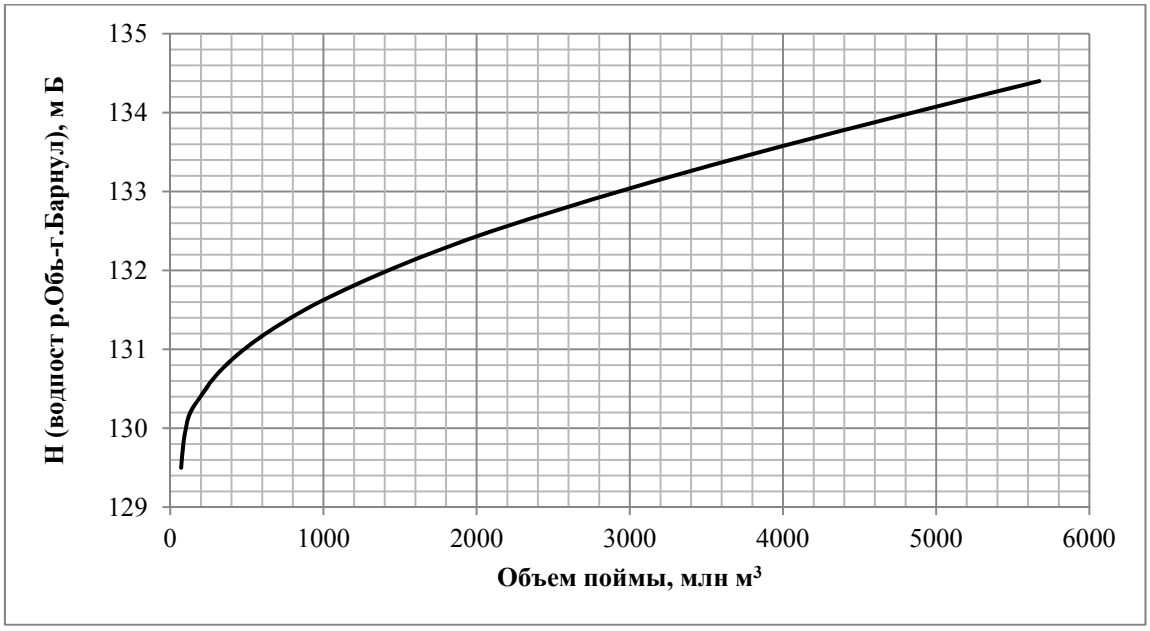


Рис. 2. Кривая объемов поймы р. Обь на участке от г. Барнаула до г. Камень-на-Оби

Зависимости вида $W(H)$, $Q(H)$, достаточно хорошо аппроксимируются многочленом второго порядка $Y = a\cdot X^2 + b\cdot X + c$, где a, b, c – эмпирические коэффициенты, определяются по натурным данным (топосъемка) и могут уточняться в процессе калибровки модели методами оптимизации.

Кривая объемов на рис. 2 может быть аппроксимирована следующим выражением:

$$W(H) = 236\cdot(\text{Н} - 130{,}2)^2 + 163\cdot(\text{Н} - 130{,}2) + 6, \qquad (4)$$

где 130,2 – минимальная отметка рельефа поймы по ЦМР.

При подъеме уровней воды и достижении ими H^*, вода начинает заполнять пойменную емкость W_1, и некоторое количество ее убирается из расходов основного притока. При спаде эта вода возвращается в русло (за минусом потерь стока на пойме).

Обозначим расходы воды на заполнение и опорожнение пойменной емкости как $R(t)$, где t – время в сутках. Очевидно, что

$$R(t) = W_1(t) - W_1(t-1). \quad (5)$$

С учетом расходов воды на заполнение и опорожнение пойменной емкости уравнения (3) запишутся в виде:

$$\begin{aligned} Q_1(t+1) &= Q_1(t)\cdot C_1\cdot k_v(t) + q_1(t+0{,}5)\cdot(1-C_1);\\ Q_2(t+1) &= Q_2(t)\cdot C_2\cdot k_v(t) + q_2(t+0{,}5)\cdot(1-C_2);\\ Q(t+1) &= Q_1(t+1) + Q_2(t+1) - R(t+1). \end{aligned} \quad (6)$$

Механизм учета потерь стока на пойме в первом приближении представим в следующем виде. Обозначим $H_к$ некоторый критический уровень, больший H^*. Предположим, далее, что на спаде половодья не вся вода возвращается в главное русло, а при снижении уровней ниже $H_к$ сток с поймы прекращается, т. е. если $H(t) \le H_к$, то $R(t) = 0$.

Если скорости течения воды на пойме отличны от нуля, то необходимо учитывать сток на пойме с учетом его трансформации.

Обозначим V_2 – скорость течения на пойме, а Q^* – некоторый расход воды во входном створе, при котором скорости течения на пойме становятся отличными от «0».

Тогда

$$V_2 = d_2\cdot(Q - Q^*)^{0,25}, \quad (7)$$

где d_2 – скоростной параметр для пойменного стока.

Для трансформированных расходов стока по пойме (Q_3):

$$Q_3(t+1) = Q_3(t)\cdot C_3\cdot k_v(t) + q_3(t+0{,}5)\cdot(1-C_3), \quad (8)$$

где $C_3(t) = exp(-d_2\cdot\ [Q(t) - Q^*])^{0,25}/0{,}5\cdot\ \Delta L)$.

С учетом (8) окончательное выражение для расходов воды в нижнем створе участка примет вид:

$$Q(t+1) = Q_1(t+1) + Q_2(t+1) + Q_3(t+1) - R(t+1). \quad (9)$$

Меняя параметры Q^* и d_2 в процессе калибровки модели, можно оценить величину стока по пойме.

Калибровка модели

Рассмотрим далее результаты калибровки модели для случаев прохождения реальных половодий на р. Оби.

В связи со значительными трудностями, сток на поймах крупных рек Сибири, как правило, не измеряется, что не позволяет оценить точность учета стока в целом для гидроствора. Однако для рассматриваемого участка р. Оби ситуация более благоприятная, поскольку как у г. Барнаула, так и у г. Камня-на-Оби, гидрометрические створы расположены в районах железнодорожных мостов, где пойменный сток практически полностью отсекается насыпями железных дорог, т. е. измеренные расходы являются более или менее достоверными.

Следует отметить, что створ у г. Камень-на-Оби находится в зоне переменного подпора Новосибирского водохранилища, что существенно снижает точность учета стока.

В качестве исходных данных использовались расходы и уровни воды за 1957, 1969 и 1973 гг. в створах р. Обь – г. Барнаул, р. Обь – г. Камень-на-Оби, р. Чумыш – с. Тальменка, р. Касмала – с. Рогозиха, р. Н. Сузун – с. Шипуновский, р. Иня – п. Алтайский. Из этих трёх лет наиболее многоводным является 1969 г., самым маловодным – 1957 г. Расчеты велись за период с февраля по август.

Оптимальное значение каждого параметра находилось из минимума функции качества (среднеквадратичное отклонение фактических ежедневных расходов в замыкающем створе у г. Камня-на-Оби от рассчитанных).

На первом этапе определялся скоростной параметр d для основного русла. С этой целью была построена функция качества по трём годам наблюдений. Минимальное значение функции качества соответствует значению скоростного параметра $d = 9$ (рис. 2).

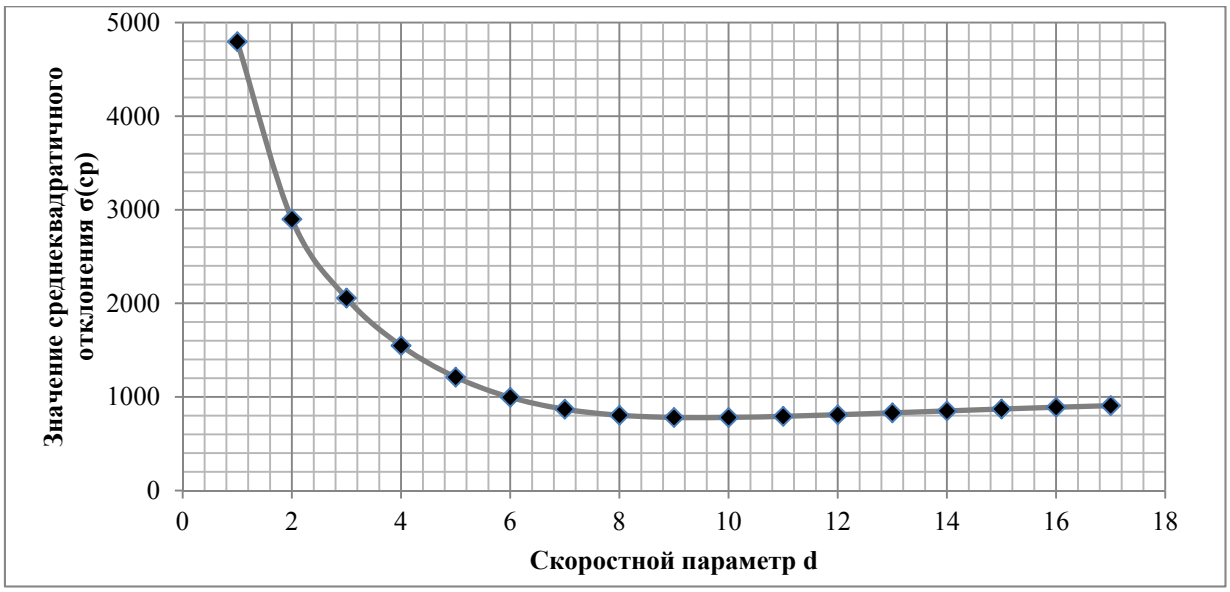


Рис. 3. Функция качества для скоростного параметра *d*

Кривая объемов пойменной емкости (рис. 2) построена по уровням у г. Барнаула. По данным наблюдений в створе поста вода выходит на пойму при уровне 132,89 м БС. Реальное начало затопления всей поймы на участке от г. Барнаула до г. Камня-на-Оби, конечно же, будет происходить при уровнях, несколько отличных от этого. В результате оптимизации уравнение кривой объёмов принимает следующий вид (при H^* = 132,5 м БС):

$$W(H) = 354\cdot(H - 132{,}5)^2 + 163\cdot(H - 132{,}5), \qquad (10)$$

При использовании (10) вместо (4) среднеквадратическая погрешность расчетов снижается с 696 до 491 м^3/с (на 29,5 %), что говорит о существенном влиянии пойменного регулирования на процесс трансформации паводочного стока на рассматриваемом участке р. Оби, а также о целесообразности уточнения кривой объемов поймы в процессе оптимизации параметров модели русловой трансформации.

Основные погрешности расчетов по модели связаны с игнорированием неоднозначности кривых объемов. Для более строгого их определения необходимы регулярные наблюдения за уровнями воды на границах участков, поскольку кривая объемов построена из условия линейного распределения уровней по длине, что существенно нарушается в периоды прохождения половодий.

Из (10) следует, что при максимальном наблюденном уровне в г. Барнауле 135,52 м БС, наибольшая возможная действующая (полезная) емкость поймы составит 3,7 км^3.

Попытки оценки потерь стока на пойме путем определения критического значения расхода воды $Q_{кр}$, ниже которого вода перестает возвращаться с поймы в основное русло, показали, что по сравнению со стоком в основном русле и расходами пойменного регулирования, эти величины неощутимо малы.

Это можно объяснить тем фактом, что площадь поймы на участке от г. Барнаула до г. Камня-на-Оби пренебрежимо мала, по сравнению с площадью, на которой формируется сток в створе у г. Барнаула. Действительно, при максимальном наполнении площадь поймы составляет около 2 000 км^2. Потери стока на пойме могут происходить за счет испарения и инфильтрации. Пусть суточное испарение равно 5 мм (на самом деле, большей частью оно будет компенсироваться осадками на площадь водного зеркала поймы). Тогда среднесуточный расход воды на испарение с поймы составит 116 м^3/с, при расходе воды в основном русле порядка 6 000 м^3/с. Пусть даже суммарные потери на испарение и инфильтрацию достигают 200 м^3/с (10 мм/сут), это не превысит 4 % руслового стока, что не улавливается инструментальными методами. Таким образом, так называемые «потери стока на пойме» для рассматриваемого участка на самом деле представляют собой пойменное регулирование, механизм которого достаточно хорошо описан представленной выше приближенной моделью.

Анализ годовых объемов стока в Барнауле и Камне-на-Оби за последние 35 лет с учетом бокового притока также показывает, что в нижнем створе наблюдается превышение годовых объемов стока в среднем на 1,4 км^3, а не потери стока.

В процессе работы была сделана попытка учесть влияние стока по пойме путем учета пойменной скорости по уравнению (7). Результаты расчетов показали, что локальных минимумов функции качества по скоростному параметру $d_{\text{пойм}}$ не наблюдается (рис. 4), а скорости движения воды по пойме стремятся к нулю, из чего следует, что влияние пойменного стока на величины расходов в замыкающем створе рассматриваемого участка минимально и незначительно.

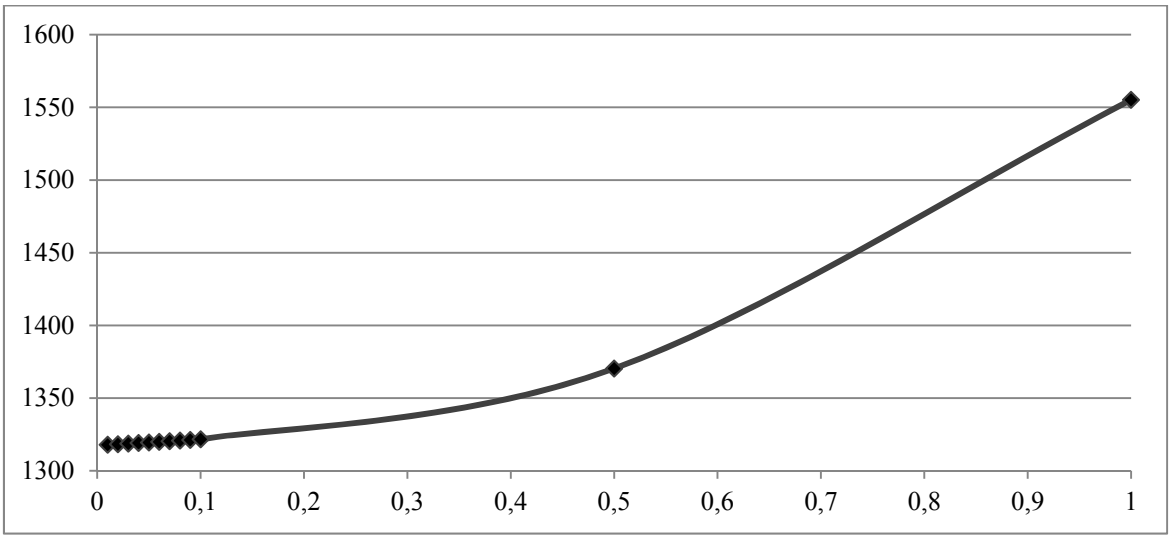


Рис. 4. Функция качества для скоростного параметра поймы $d_{\text{пойм}}$

Среднеквадратическая погрешность расчетов σ для трех расчетных лет (включая самый многоводный из наблюденных) составила 491 м^3/с, или 18 %.

Из многочисленных исследований (в том числе и авторов) известно существование устойчивых линейных зависимостей русловых емкостей от расходов воды. Нами была предпринята попытка упростить расчетную модель пойменного регулирования путем введения зависимостей $W(Q - Q^*)$ вместо $W(H - H^*)$ для каждого из четырех участков:

$$W_i = a_i \cdot (Q - Q^*). \qquad (11)$$

В качестве значения Q^* было взято значение расхода, соответствующее значению уровня выхода воды на пойму в г. Барнауле (132,5 м БС), равное 5190 м^3/с.

Среднеквадратичная погрешность расчетов составила 468,45 м^3/с (16,9 %), что на 0,8 % меньше, чем при использовании зависимостей $W(H - H^*)$.

На рисунке 5 показаны фактические и рассчитанные гидрографы стока в створе у г. Камень-на-Оби за многоводный 1969 г. Из этих материалов видно, что расходы пойменного регулирования (R) в отдельные моменты сопоставимы со стоком р. Оби, и их необходимо учитывать при расчетах русловой трансформации.

Выводы

Таким образом, результаты расчетов показали:

– существенное влияние пойменного регулирования на процесс русловой трансформации паводочного стока;

– отсутствие заметного стока по пойме, а также потерь стока на пойме, учет которых мог бы повысить точность краткосрочных прогнозов притока в Новосибирское водохранилище по разработанной модели;

– устойчивость параметров, определенных в процессе калибровки модели, при использовании данных за разные годы.

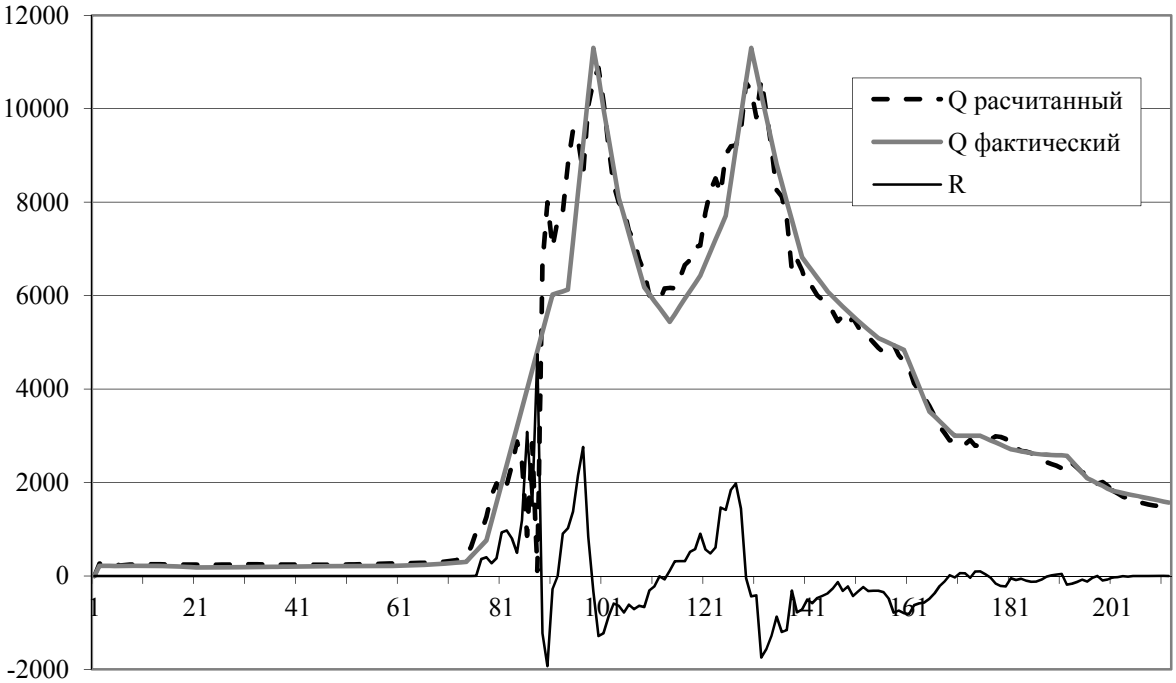


Рис. 5. Гидрографы стока в створе у г. Камень-на-Оби за многоводный 1969 г.

Оценка параметров пойменной емкости в первом приближении может быть осуществлена по топографическим картам масштаба 1:25 000 с дальнейшим их уточнением в процессе калибровки модели трансформации руслового и пойменного стока.

Производство топографических съемок поймы более крупных масштабов нецелесообразно. Микрорельеф поймы и уровни выхода воды на пойму для протяженных речных отрезков можно рассматривать как стохастическое поле, и определение его параметров с приемлемой точностью может быть осуществлено вероятностными методами.

Рассмотренный подход к расчетам трансформации стока с учетом пойменного регулирования может быть использован для приближенного краткосрочного прогнозирования основного притока в Новосибирское и другие водохранилища.

Список литературы

1. *Бураков Д. А.* Кривые добегания и расчет гидрографа весеннего половодья. Томск : Изд-во Том. гос. ун-та, 1978. 130 с.

2. *Бураков Д. А.*, Канивец С. А., Маркова Е. Э. Модели русловой трансформации для последовательного соединения емкостей // Тр. ЗапСибНИИ. 1991. Вып. 94.

3. *Жоров В. А.* Способ расчета приточности в водохранилища ГЭС (на примере Саяно-Шушенского водохранилища) // Гидрометеорологическое обеспечение народного хозяйства Сибири : тез. докл. Всесоюз. совещания). Новосибирск, 1983. С. 92–95.

4. *Жоров В. А.* Математическая модель трансформации бокового притока и ее использование для расчетов приточности в водохранилища сибирских ГЭС // Метеорология и гидрология. 1987. № 1. С. 90–97.

5. *Жоров В. А.* О некоторых причинах невязок стока в нижнем бьефе Красноярской ГЭС // Тр. ЗапСибНИИ. 1987. Вып. 81. С. 46–50.

6. Предварительная оценка причин невязок водного баланса Новосибирского водохранилища / В. А. Жоров, Т. А. Зырянова, О. В. Ловцкая, С. Г. Яковченко // Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии. В 4 т. Т. 4 : тр. III Всерос. науч. конф. с междунар. участием. Барнаул, 2017. С. 190–198.

7. *Жоров В. А.*, Яковченко С. Г. О некоторых вопросах оценки параметров моделей русловой трансформации // Экологический анализ региона (теория, методы, практика) : сб. науч. тр. ИВЭП СО РАН, 2000. С. 29–46.

8. *Нежиховский Р. А.* Русловая сеть бассейна и процесс формирования стока воды. Л., 1971.

УДК 556.04

Гидрометеорологические наблюдения на р. Майма (Горный Алтай) за 2016–2017 гг. с помощью автоматизированного комплекса ИМКЭС СО РАН

В. В. Зуев (vvzuev@imces.ru), С. А. Кураков (ksa@imces.ru),
В. А. Уйманова (skvaleri91@mail.ru)

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск

Аннотация: Дано описание автономного распределенного комплекса «Майма», установленного в Горном Алтае для дистанционного мониторинга погодно-климатического и гидрологического режима водосборного бассейна р. Майма, который расположен в нескольких точках по течению реки Майма, начиная от ее истоков и функционирует в бассейне реки Майма уже больше 2 лет. Информация со всего измерительного комплекса собирается дистанционно и поступает в реальном масштабе времени на сервер Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН. Каждая точка наблюдения имеет свой набор датчиков. Они контролируют основные метеорологические и некоторые гидрологические параметры. Также поступает информация о свойстве грунта для оценки его впитывающей способности. Данные регистрируются каждый час. Выбор места размещения точек был основан на территориальном различии в типах почв, грунте и растительности, а также их однородности. Был проведен анализ первых результатов, полученных с помощью комплекса «Майма» за вторую половину 2016 г. и весь 2017 г. Анализ первых результатов мониторинга бассейна реки Майма показал эффективность комплексного подхода при исследовании уровенного режима.

Ключевые слова: река Майма, Горный Алтай, уровень воды, дистанционный автономный комплекс, мониторинг.

Введение

Современная ситуация, касающаяся гидрометеорологической обстановки в Горном Алтае, характеризуется неполным и непостоянным количеством данных о погодно-климатических и гидрологических изменениях в бассейнах горных рек. Внезапные изменения погодных условий (ливни, сели и др.) могут привести к таким разрушительным бедствиям, как наводнения. Поэтому горные территории, требуют более пристального изучения гидрологического режима рек во взаимодействии с погодно-климатическими особенностями.

Алтайский край относится к числу наиболее подверженных риску наводнений регионов Сибири. Формирование высоких паводков и селей обычно связано с выпадением ливневых осадков, частота которых увеличивается с потеплением климата. На территорию Верхней Оби с 80-х гг. приходится более 30 случаев высоких паводков с зафиксированным ущербом. Наибольшее увеличение их суммарной продолжительности характерно для рек, формирующих сток в горах Алтая [3]. К числу таких рек относится Майма – правый приток Катуни.

За период с 1939–2014 гг. по данным гидрологических ежегодников наиболее сильный подъем воды на р. Майме наблюдался в 1945 г. – 406 см, в 1958 г. – 548 см, в 1961 г. – 402 см, и в 1969 г. – 426 см, при среднем уровне воды – 214 см. Последнее наводнение произошло в конце мая – начале июня 2014 г. Максимальный уровень воды наблюдался 30 мая и составлял 444 см. Ожидалось, что после мягкой и малоснежной зимы талые воды будут свободно впитываться в почву. Однако взаимодействие таяния снегов с аномально высоким дождевым паводком на территории Республики Алтай стало катастрофическим явлением по масштабам наводнения и величине ущерба. Вероятно, дополнительным фактором усиления паводка послужило промерзание грунта, препятствующее впитывание тающего снега, что было характерно для того периода [1].

К неблагоприятным изменениям гидрологического режима в связи с потеплением климата относятся и участившиеся в последние годы маловодия в период летней межени, ущерб от которых особенно возрос на предгорных участках рек территории Алтайского края. За последние 18 лет на реках юга Западной Сибири было 38 случаев зафиксированного ущерба от экстремально низкой межени [3]. Большинство периодов экстремальных малово-

дий приходится на последние годы и общая продолжительность неблагоприятной низкой межени в Республике Алтай с 2006 г. составляет 152 суток, а на реках Алтайского края за 2002–2008 гг. составила 735 суток, что является «рекордом» для субъектов РФ. Маловодия с зафиксированным убытком наблюдались на Бие, Чарыше, Ануе в их нижних течениях. Отсутствие случаев экстремальных маловодий на Катуни обязано регулирующему влиянию меженного и минимального стока ледниками, которое сохраняется, несмотря на сокращение их площади и запасов воды под влиянием современного потепления [3].

Изменения уровенного режима рек есть следствие совокупности погодно-климатических и гидрологических изменений на территории водосборного бассейна. Для их контроля в Институте мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (ИМКЭС СО РАН) создан автономный распределенный комплекс «Майма». Он установлен в нескольких точках по течению реки Майма, начиная от ее истоков. Информация со всего измерительного комплекса собирается дистанционно и поступает в реальном масштабе времени на сервер ИМКЭС СО РАН.

В настоящей статье анализируются первые результаты комплексного мониторинга погодно-климатического и гидрологического режимов водосборного бассейна р. Майма во второй половине 2016 г. и за весь 2017 г.

Общая характеристика исследуемой территории

Майма – река на севере Республики Алтай, правый приток Катуни. Протекает на территории одноимённого Майминского района. Длина реки – 60 км, площадь водосборного бассейна – 780 км²[6]. Река берёт своё начало на хребте Иолго рядом с безымянной вершиной (1144 м), к югу от села Урлуаспак (Урлу-Аспак) на юге Майминского района. Далее она проходит в северо-западном направлении через сёла Урлуаспак, Александровка, Бирюля, Кызыл-Озёк, Майма, а также через столицу региона – Горно-Алтайск. Здесь на левому берегу Маймы расположена гора Комсомольская (427 м). В черте города в реку впадает Улалушка, а в районе села Майма река впадает в Катунь (рис. 1, *а*).

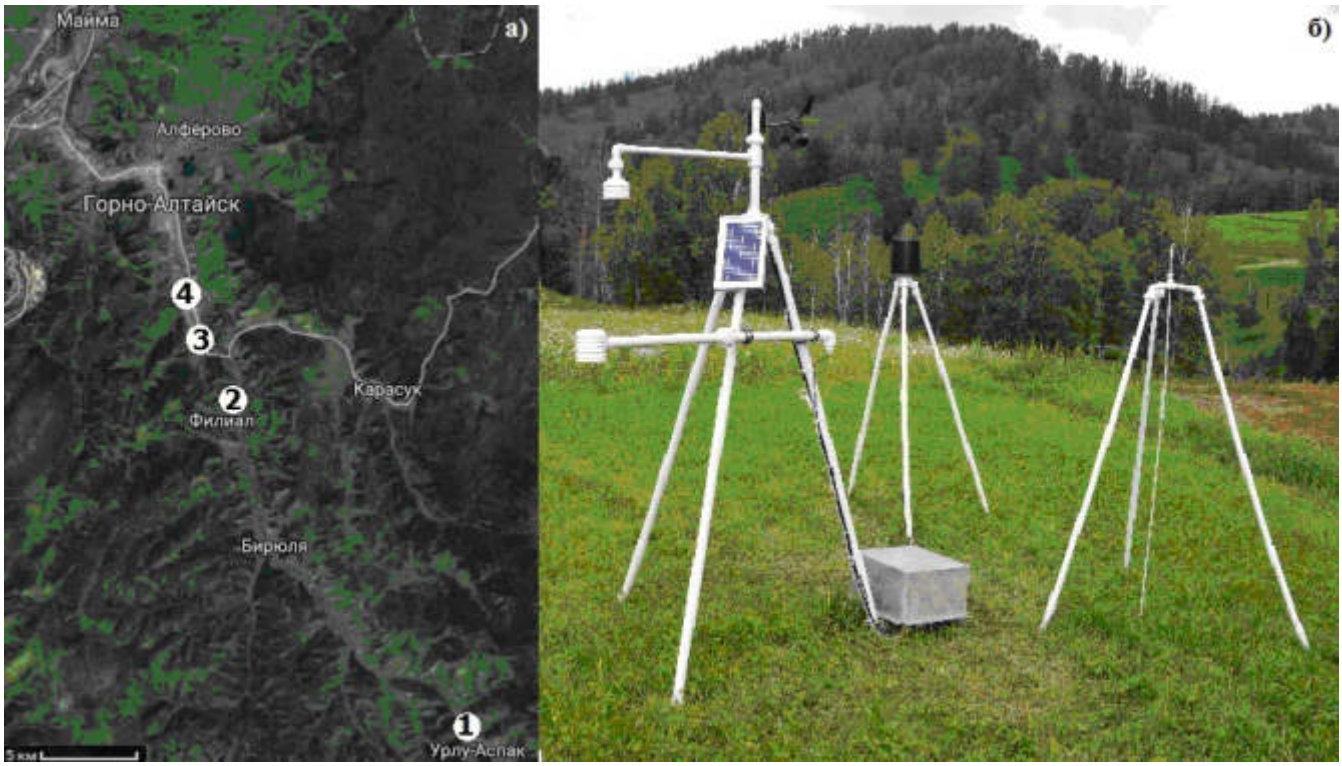


Рис. 1. *а*) схема бассейна р. Майма с расположенными точками дистанционного наблюдения;
б) расположение датчиков на примере точки наблюдения № 1

Бассейн р. Майма характеризуется дефицитом гидрометеорологической информации. Имеется замыкающий створ (гидро-пост в с. Майма) и одна длительно функционирующая метеостанция, также расположенная в низовьях бассейна (с. Кызыл-Озёк). По ее данным среднегодовые температура составляет +1,0°С, сумма осадков – 795 мм. Период со среднесуточной температурой ниже 0°С – 170 дней. Устойчивый снежный покров образуется в первую декаду ноября. Среднемноголетние высота снежного покрова – 68 см, период с устойчивым снежным покровом – 167 дней [5].

Бассейн р. Майма характеризуется относительным единством условий формирования стока с точки зрения геоморфологической и высотно-поясной организации. Здесь господствуют низкогорные ландшафты и низкогорный ярус рельефа, лесной высотный пояс. Поэтому бассейн р. Майма является перспективным модельным объектом для ландшафтно-гидрологических исследований в условиях дефицита гидрометеорологической информации, репрезентативным для всего Алтая.

В бассейне преобладают склоны теневых (С + СВ + СЗ) экспозиций, что обеспечивает меньшее испарение, более равномерный сток и менее выраженный паводок. По крутизне в бассейне р. Майма доминируют пологие и покатые склоны (4–20°), усиливая проявление экспозиционных различий, обеспечивая значительный дренаж территории и высокую степень добегания воды по склонам [2].

Методы и инструменты

Для успешного решения задач климатического и экологического мониторинга необходимо иметь сеть станций сбора характеристик окружающей среды, удовлетворяющих следующим требованиям: низкое энергопотребление, широкий набор интерфейсов подключения датчиков, широкий диапазон условий эксплуатации, дистанционно управляемый режим работы. Этим требованиям соответствуют различные модификации системы автономного мониторинга состояния окружающей среды, разработанного в ИМКЭС СО РАН [4]. Автономный комплекс «Майма» установлен и функционирует в бассейне реки Майма уже больше 2 лет (рис. 1, *б*).

Система наблюдения на р. Майма распределена в нескольких точках по местности (рис. 1, *а*). Каждая точка наблюдения (№ 1, 2 и 3) имеет свой набор датчиков (табл. 1), передающих данные дистанционно в реальном масштабе времени по мобильной связи. Данные регистрируются каждый час. Также имеется точка № 4 (рис. 1, *а*), по которой данные снимаются оператором на носитель. Выбор места размещения точек был основан на территориальном различии в типах почв, грунте и растительности, а также их однородности. Как видно из табл. 1, датчики контролируют как основные метеопараметры, атмосферное давление, жидкие осадки, температуру и влажность воздуха, так и гидрологические параметры, уровень воды, температура воды, высота снежного покрова и т. д. Важно получение информации о свойстве грунта для оценки его впитывающей способности.

Результаты и их обсуждение

Автономный комплекс «Майма» ИМКЭС СО РАН был установлен в бассейне реки Майма в августе 2015 г. В июле 2016 г. было проведено обновление системы. Данные для первых результатов наблюдения были взяты в период с 10.07.2016 г. по 31.12.2017 г. по точке № 2. В связи со сбоем программного обеспечения базы данных, имеется отсутствие данных с 17.12.2016–21.12.2016 г.

Скачки уровня воды в июле и августе 2016–2017 гг. (рис. 2) обусловлены выпадением жидких осадков или так называемыми паводками. Они могут многократно повторяться в различные сезоны года, характеризуясь интенсивным увеличением расходов и уровней воды. Например, после выпадения 24,4 мм жидких осадков 8 августа 2016 г. произошло повышение уровня воды с 143 см до 166 см 9 августа (рис. 2, область 1). Аналогичная ситуация повторяется и в июле 2017 г.: при выпадении 27,8 мм жидких осадков (рис. 2, область 3) наблюдается повышение уровня воды почти на 20 см.

Таблица 1

Получаемые данные с автономного комплекса «Майма» ИМКЭС СО РАН

Номер точки	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
Получаемые данные	1) Высота снежного покрова, мм; 2) атмосферное давление мм рт. ст.; 3) жидкие осадки, мм; 4) температура почвы на глубине до 1,1 м (15 точек с различным шагом измерения), °С; 5) влажность воздуха, 2 м, %; 6) температура воздуха, °С; 7) солнечная радиация, Вт/м2; 8) скорость ветра, м/с; 9) направление ветра, град	1) Высота снежного покрова, мм; 2) атмосферное давление мм рт. ст.; 3) уровень воды, мм; 4) жидкие осадки, мм; 5) температура почвы на глубине до 1,1 м (15 точек с различным шагом измерения), °С; 6) влажность воздуха, 2 м, %; 7) температура воздуха, °С; 8) температура воды, °С	1) Высота снежного покрова, мм; 2) атмосферное давление мм рт. ст.; 3) жидкие осадки, мм; 4) температура почвы на глубине до 1,1 м (15 точек с различным шагом измерения), °С; 5) влажность воздуха, 2 м, %; 6) температура воздуха, °С. 7) скорость ветра, м/с 8) направление ветра, град 9) температура грунта, 0,1 см, °С 10) влажность грунта, 0,1 см, %	1) Уровень воды, мм; 2) температура воды, °С

Также после выпадения 32,6 мм жидких осадков (рис. 2, область 2), в период половодья 2016 г., уровень воды достиг максимальной отметки в 220 см.

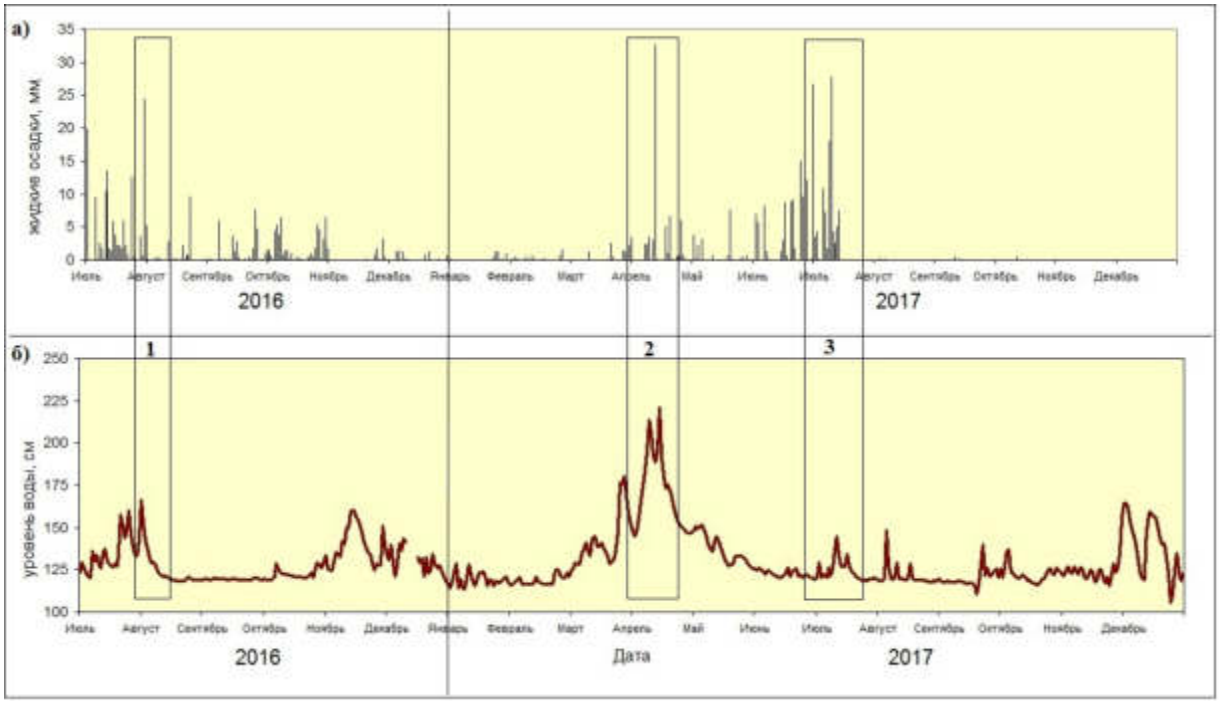


Рис. 2. Графики зависимостей по точке № 2: *а*) сумма осадков за сутки, мм;
б) среднесуточный уровень воды, см

В ноябре 2016 г. (рис. 3, область 1) уровень воды за 7 дней при стабильном падении температуры воздуха с –7,9 °С до –29,7 °С повысился на 35 см. Понижение температуры воздуха после 12 ноября 2016 г., вероятнее всего, и привело к скачку уровня воды в следствии образования затора или шуги. Существенную роль в процессе ледообразования играет скорость течения воды. Горные реки, как правило, отличаются большими уклонами и бурным течением. Большая скорость течения при значительных отрицательных температурах воздуха способствует охлаждению массы воды по всей ее глубине. При этом, если температура в водном потоке пони-

зится хотя бы на сотую долю градуса ниже нуля, в воде возникает внутриводный лед, который, всплывая на поверхность, образует рыхлые скопления, называемые шугой.

Ситуация повторяется и в ноябре 2017 г. (рис. 3, область 4). Уровень воды повышается почти на 40 см при значительном понижении температуры воздуха до –22,3 °С.

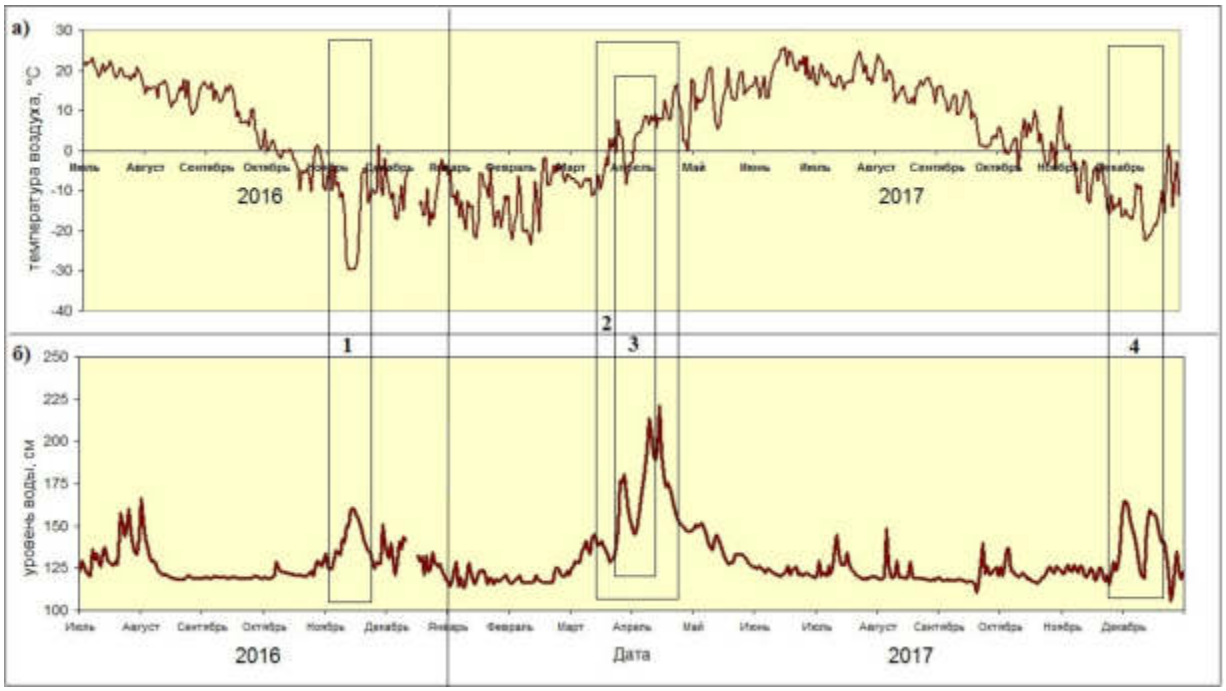


Рис. 3. Графики зависимостей по точке № 2: *а*) среднесуточная температура воздуха, С°, *б*) среднесуточный уровень воды, см

Следующее значительное повышение уровня воды (рис. 3, область 2) вызвано весенним половодьем. Обильное таяние снега и ледников после первой декады апреля сопровождалось жидкими осадками, как говорилось ранее, что повысило уровень воды до отметки в 220 см. Однако, понижение температуры воздуха до –8,3 °С в первой декаде апреля (рис. 3, область 3) замедлило весеннее снеготаяние и уровень воды с 180 см уменьшился до 144 см.

Заключение

Анализ первых результатов мониторинга бассейна реки Майма указывает на эффективность комплексного подхода при исследовании уровенного режима. Малая протяженность реки и малое количество притоков позволит нам создать простую модель для прогноза динамики уровенного режима. В перспективе мы хотим прийти к созданию современной информационно-измерительной системы для прогнозирования гидрологического поведения рек Горного Алтая, которая снабжала бы оперативными данными МЧС, административные структуры и население.

Список литературы

1. Влияние климата на гидрологические и гидрохимические процессы рек Горного Алтая / О. В. Климова [и др.] // Электронная конференция: Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития : сб. науч. тр. SWorld по материалам Междунар. науч.-практ. конф. Октябрь 2011 г.

2. Динамика весеннего подъема уровня бессточных озер (на примере озера Красиловское Алтайского края) / В. В. Зуев, Н. Е. Зуева, С. А. Кураков, И. А. Суторихин, Н. Ф. Харламова // География и природные ресурсы. 2016. № 4. С. 76–80.

4. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 15: Алтай и Западная Сибирь. Вып. 1: Горный Алтай и верхний Иртыш. Ч. 1 / ред. В. А. Семенова. Л. : Гидрометеорол. изд-во, 1969. 316 с.

5. *Модина Т. Д.*, Сухова М. Г. Климат и агролиматические ресурсы Алтая. Новосибирск, 2007. 177 с.

6. *Золотов Д. В.*, Лубенец Л. Ф., Черных Д. В. Ландшафтные факторы формирования стока в бассейне р. Майма (Северный и Северо-Восточный Алтай) // Мир науки, культуры, образования. 2012. № 2 (33). С. 360–369.

7. *Кураков С. А.* Система автономного мониторинга состояния окружающей среды // Датчики и системы. 2012. № 4. С. 29–32.

УДК 551.482.6:551.459(571.54)

Морфологические типы устьевых систем оз. Байкал

Е. А. Ильичёва (lenail3663@mail.ru), М. В. Павлов (maksimpavlov_v@mail.ru)
Институт географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, Иркутск

Аннотация. Проводится типизация морфодинамических типов устьевых систем притоков озера Байкал. Приведены данные о порядковом составе речных систем бассейна. Рассмотрены факторы экзоморфолитогенеза устьев, выделен современный этап их формирования. Представлена краткая характеристика некоторых морфодинамических типов устьевых систем.

Ключевые слова: Байкал, речные системы, устьевые системы, дельта, эстуарий, лагуна, лиман, конус выноса, экзоморфолитогенез.

Введение

Устьевая система сочетает взаимосвязанные в масштабе геологического времени и по ведущему рельефообразующему фактору, но различные по возрасту и литологии части единой природной устьевой геосистемы – субаэральную дельтовую равнину (активную и отмершие ее части) и субаквальную мелководную платформу (авандельту), где процессы формирования дельтовых фаций постепенно сменяются (с глубиной) озерным седиментогенезом [1]. Устьевые системы притоков Байкала представлены комплексом субаэральных и субаквальных аккумулятивных и эрозионных форм рельефа и слагающих их отложений, сформированных рекой и озером в пределах устья реки за время их взаимодействия. Основными факторами устьевых систем Байкала являются колебания уровня водоема, волновая активность и вдольбереговые течения и связанные с ними перемещения наносов и речной сток. Для Байкальского рифта важнейшим фактором формирования и переформирования устьевых систем выступает высокая сейсмичность. Сочетание и иерархия взаимодействующих факторов определяют морфодинамический тип устья и его эволюцию. Немаловажным условием развития морфологического типа устьевой системы мы считаем геометрию (приглубое или отмелое взморье) подводного склона, определяемую морфоструктурными элементами Байкальского рифта и толщей озерных, озерно-аллювиальных, делювиально-пролювиальных отложений и др., которыми они выполнены.

Основные результаты

На побережье Байкала насчитывается 470 устьев, из них 230 постоянных водотоков, 30 % составляют временные водотоки, около 20 % эпизодические пади и распадки, работающие только при экстремальном увлажнении (по материалам обработки снимков SRTM). Наиболее значительные реки (рр. Селенга, Баргузин, Верхняя Ангара и др.) протекают в долинах тектонического генезиса. Строение речных долин весьма разнообразно; чередование узких и сравнительно широких участков характерно для крупных рек, в горах и районах прорыва через хребты V-образные долины, нередко это ущелья и теснины; в межгорных котловинах долины принимают ящикообразную или трапецеидальную форму. Склоны долин чаще всего террасированы, часто с двухсторонней заболоченной поймой. Верхние течения многих рек имеют горный характер, русла их немеандрирующие. Русла рек, протекающих в межгорных впадинах, выполнены рыхлым осадочным материалом, на длинных широких участках меандрируют, разбиваются на рукава. Речная сеть бассейна оз. Байкала с учётом монгольской части бассейна насчитывает более 10 368 водотоков первого порядка (рис. 1). Наибольшая густота речной сети отмечается в северном Прибайкалье (0,2–0,32 км/км^2), на северо-западном склоне хр. Хамар-Дабан (0,24), в верхних частях бассейнов рек Джиды и Чикоя (0,2), в южных районах Прибайкалья и Западного Забайкалья коэффициент густоты составляет в среднем 0,14–0,18 км/км^2. Основная часть стока рек проходит в теплый период года. Сток зимней межени незначительный, и в годовом объеме в среднем не превышает 2–5 %. В холодный период года реки питаются исключительно подземными водами.

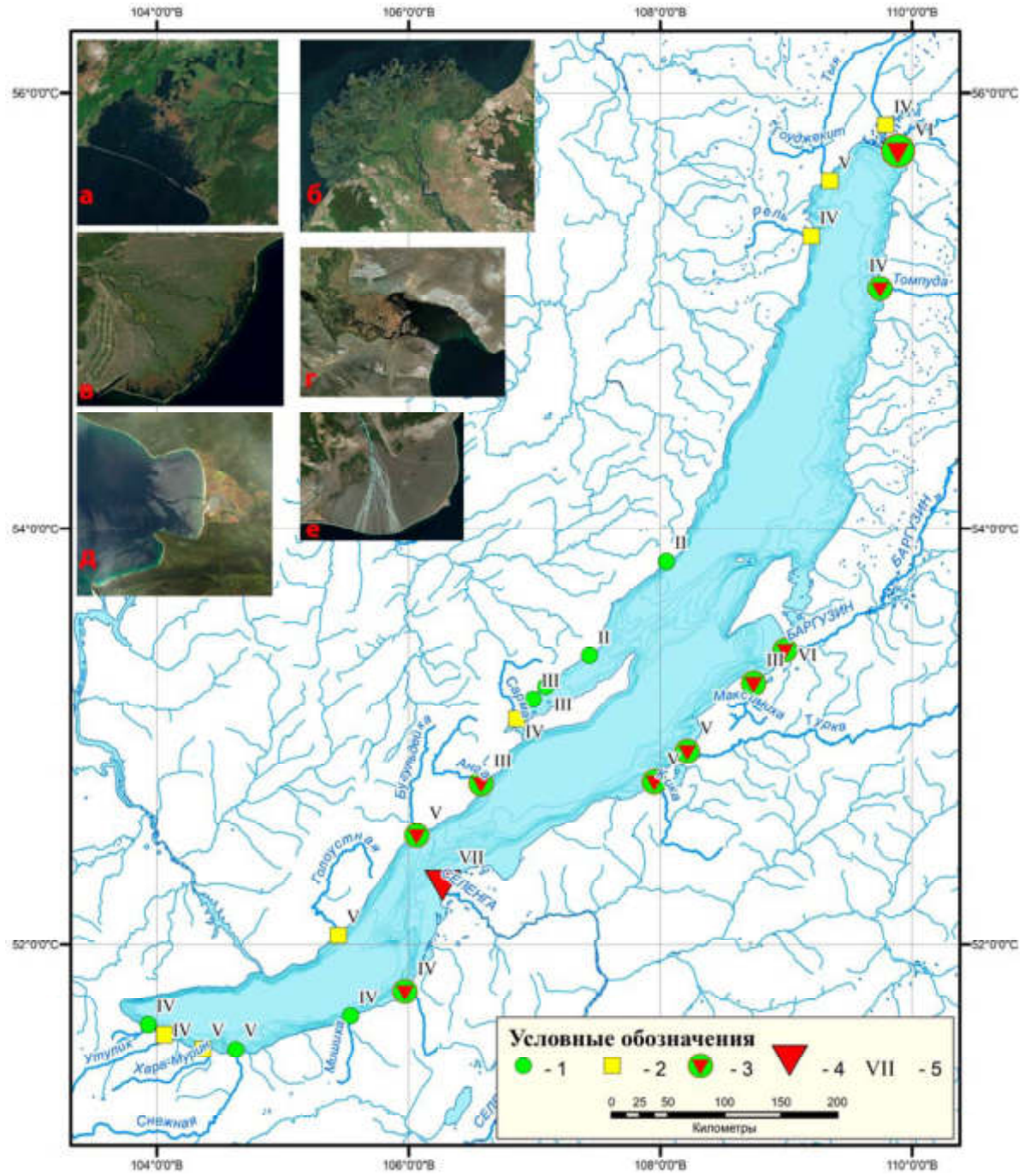


Рис. 1. Морфологические типы устьевых систем: *1* – малорукавные с русловым расширением или с аккумулятивным выступом; *2* – многорукавные с фитогенно-дельтовым берегом выдвижения (на конусе); *3* – эстуарно-дельтовые (дельты заполнения, лиманно-дельтовые, лагунно-дельтовые; *4* – дельты выдвижения лопастные на мелководном взморье; *5* – порядок речной системы по Хортону-Стралеру; *а* – лиманно-дельтовая устьевая система заполнения с блокирующей косой р. Верхней Ангары; *б* – многорукавная дугообразная окаймленная озерными барами дельта выдвижения р. Селенги; *в* – многорукавная устьевая система с фитогенно-дельтовым берегом выдвижения на селевом конусе р. Голоустная; *г*, *д* – эстуарно-дельтовые устьевые системы долинных заливов частичного выполнения р. Анги и р. Томпуды; е – малорукавная устьевая система с аккумулятивным выступом на селевом конусе со слепыми устьями р. Риты

Порядок речной системы – индикационный параметр, характеризующий ее водоносность (сток воды и наносов) в замыкающем звене системы – устьевой системе. Наивысший порядок в бассейне Байкала имеет самая древняя система р. Селенги, по различным исследованиям начало ее развития относят к олигоцену, а возраст устьевой системы (дельты) от 78 тыс. до 500 тыс. лет [3; 5].

Каждое устье является уникальной открытой геосистемой. В целом, устья рек западного берега озера Байкал прорезают ранее сформированные делювиально-пролювиальные или селевые конусы выноса, создавая разветвленную гидросеть, внешне схожую с системой дельтовых водотоков – псевдо-дельтовые устьевые системы. По мнению С. А. Макарова селевая активность отмечалась в раннем голоцене [6]. В Байкал впадают рукава простыми устьями, имеющими приустьевое расширение русла или с аллювиальный выступ. Более половины стока рек западного и южного побережья осуществляется через толщи конусов выноса [8]. В периоды высокой водности сток проходит в руслах и по поверхности конуса. Объемы собственно речных наносов недостаточны для создания аллювиально-дельтовых аккумулятивных форм. В случае закрытого устьевого взморья блокирующими косами или барами внешний край устьевой системы формирует биогенно-дельтовые берега, а при сильных вдольбереговых течениях и волновой активности в устьях возникают лагуны. Псевдодельтовые устьевые системы характерны для рек Голоустная, Бугульдейка, Сарма, Риты и др. за исключением эстуарно-дельтовой системы р. Анги. На южном побережье, также, как и на западном, развиты конусы выноса с устьями рек Снежная, Хара-Мурин, Солзан, Утулик и др.

Верхняя Ангара и Кичера на северной оконечности озера Байкал создают лиманно-дельтовую устьевую систему с дельтой заполнения на отмелом взморье (5–10 м). Гидрографическая сеть устьевой системы представлена рукавами рек Верхняя Ангара и Кичера, множеством дельтовых озер и осложнена наложенным конусом выноса р. Холодная. Приустьевой лиман (сор) заперт блокирующей косой – о. Ярки, образованной вдольбереговым перемещением наносов.

На восточном берегу Байкала в основном развиты различные модификации эстуарных и малорукавных устьевых систем, за исключением дельты р. Селенги. Устьевая система р. Селенги относится к открытому типу с устьевым взморьем и лопастной дельтой выдвижения. Дельта сформирована длительным взаимодействием системы «оз. Байкал – р. Селенга» и представляет собой уникальную аккумулятивную равнину с рядом специфических природных характеристик. В экосистеме дельты Селенги фильтруется водный поток, поступающий со всего бассейна. Речной сток составляет около половины притока в озеро. Распределение стока по пространству дельты неравномерно, а также резко различается по сезонам. Общее направление стока носит унаследованный характер. Дельта, заливы Провал и Черкалов Сор ограничены подводными и надводными барами и косами, которые в совокупности создают современную лиманно-дельтовую устьевую систему.

В данном исследовании мы рассматриваем период формирования побережий Байкала при искусственном регулировании уровня. К августу 1962 г. уровень достиг отметки «нормального подпорного горизонта» – 266 см над нулем графика [7; 9] и составил 453,27 м в не переуравненной Балтийской системе высот, что соответствует 453,82 м в Балтийской системе высот (БС), применяемой на топографических картах или 454,34 в Тихоокеанской системе. Позднее, к 1980 г., в результате регулирования уровень снизился на 1,2 м, а в период 1985–1995 гг. поднялся приблизительно на 1 м [4]. Далее происходят незначительные колебания в пределах 0,30 м, в целом отмечается постепенное снижение уровня. По реконструкциям, предложенным А. Н. Афанасьевым [2] и дополненным последующими исследованиями. Период с 1959 по 1972 г. представляет собой максимальную фазу третьего векового уровенного цикла, начавшегося в начале XX в. В этот период отмечались наивысшие уровни Байкала за последние 270 лет. Во многом этот подъем обусловлен техногенным вмешательством в естественный режим при строительстве и заполнении водохранилища Иркутской ГЭС. Маловодный период, продолжающийся с начала 2000-х гг., мог бы ознаменовать окончание третьего уровенного цикла Байкала по А. Н. Афанасьеву.

Уровень принимающего водоема представляет собой один из важнейших факторов морфогенеза побережий Байкала наряду с гидрологическими условиями и геолого-тектоническими проявлениями. Новый уровенный режим создал предпосылки для новейшего экзоморфолитогенеза устьевых систем притоков оз. Байкал, выражающийся в затоплении значительных площадей, переформировании берегов и гидрографической сети в устьях рек.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ № 17-29-05052-офи_м.

Список литературы

1. Морфодинамика устьевых систем крупных рек арктического побережья России : атлас. М. : Изд-во Моск. ун-та, 2016. 158 с.
2. *Афанасьев А. Н.* Водный баланс оз. Байкал // Тр. Байк. лимнол. станции / Исследования гидрологического режима Байкала. М. ; Л. : Изд-во АН СССР, 1960. Т. 18. С. 7–154.
3. *Зорин Л. В.* Формирование дельты Селенги и образование залива Провал // Учен. зап. МГУ. Сер. Геоморфол. 1956. Вып. 182. С. 193–196.
4. *Иванов В. В.*, Коротаев В. Н., Лабутина И. А. Морфология и динамика дельты р. Селенги // Вестн. МГУ. Сер. 5. География. 2007. № 4. С. 48–54.
5. *Лопатин Д. В.*, Томилов Б. В. Возраст Байкала / Вестн. СПбГУ. Сер. 7. 2004. Вып. 1. С. 58–67.
6. *Макаров С. А.* Сели Прибайкалья. Иркутск : Изд-во Ин-та географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, 2012. 111 с.
7. Динамика берегов озера Байкал при новом уровенном режиме / А. В. Пинегин, А. А. Рогозин, Ф. Н. Лещиков, Л. Я. Кулиш, А. А. Якимов. М. : Наука, 1976. 88 с.
8. *Писарский Б. И.* Закономерности формирования подземного стока в бассейне озера Байкал. Новосибирск : Наука, 1987. 157 с.
9. *Рогозин А. А.* Береговая зона Байкала и Хубсугула. Морфология, динамика и история развития. Новосибирск : Наука. Сиб. отд-ние, 1993. 168 с.

УДК 556.535 556.5.04

Некоторые ландшафтно-гидрологические свойства стока малых горных водотоков Байкальского региона

Н. В Кичигина. (nkichigna@mail.ru)

Институт географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, Иркутск

Аннотация. Приведены результаты исследования тонких механизмов формирования стока в малых речных бассейнах горных рек Байкальского региона. Использование современной измерительной базы позволило получить принципиально новые данные высокого временного разрешения (30 мин). На их основе оценены суточные и сезонные колебания уровня, температуры и минерализации воды в водотоках. Дана характеристика пространственно-временных изменений химического состава вод. Выделены генетические источники питания, дана их качественная и количественная оценка.

Ключевые слова: малый водосбор, речной сток, мониторинг, уровень, температура, минерализация воды, гидрохимический состав, ландшафт.

Введение

Работа посвящена обобщению результатов высоко детального гидролого-гидрохимического мониторинга характеристик стока на малых горных речных бассейнах Байкальского региона за период 2013–2016 гг. с использованием современного оборудования. Гидрологический режим и формирование стока территории характеризуются специфическими условиями, такими как горный характер рельефа и сейсмичность, определяющими высокую вероятность наводнений и схода селевых потоков. Основная доля годового стока проходит в теплый период. По режиму питания реки характеризуются весенне-летним половодьем и паводками, тесно примыкающими к половодью и систематически его превышающими. В гидрологическом отношении зона формирования стока таких рек изучена слабо. Изучение специфики формирования стока на малых речных бассейнах горной территории, форм взаимодействия генетических компонент стока, их качественные и количественные оценки представляют интерес для раскрытия особенностей формирования опасных гидрологических событий, таких как наводнения и сели.

Объекты исследования и оборудование

В качестве объектов детального гидролого-гидрохимического мониторинга выбраны руч. Икубур (приток р. Еловка) и руч. Кар № 2 – 2-й безымянный (левый) приток р. Кынгарга в Тункинской котловине, а также руч. Ланинский – правый приток р. Сарма (бассейн оз. Байкал). На всех водотоках установлены автоматические приборные комплексы РАП-Г-01 (ИМКЭС, г. Томск), которые непрерывно фиксируют колебания уровня, температуры и удельной электропроводности воды с частотой измерений 1 раз в 30 минут. Преимущества данных систем описано в [5].

В течение летних сезонов 2013–2016 гг. в разные фазы водного режима в створах постов отбирались пробы воды одновременно с измерением расходов воды, при этом на месте выполнялись измерения pH, электропроводности и температуры воды с помощью портативного многопараметрического прибора Hanna COMBO. Измерение атмосферных метеопараметров выполнялись с 3 -часовым интервалом с помощью автоматизированной метеостанции Vantage Pro 2 в пос. Аршан и АПИК (ИМКЭС, г. Томск) в пос. Сарма. Отбирались пробы природных вод различного генезиса – воды водотоков, почвенные, наледные, подземные и дождевые. Во всех пробах определялись содержания макро- и микроэлементов, растворенного органического углерода (Сорг). Химические анализы вод проводились общепринятыми методами в лицензированном химико-аналитическом центре Института географии им. В. Б. Сочавы СО РАН и в Лимнологическом институте СО РАН.

Рассмотрены особенности формирования гидрохимического состава и стока рек в Тункинской котловины, берущих начало с южных склонов Тункинских гольцов. Наиболее значительные из них р. Кынгарга, к западной стороне от нее – реки Бухайка, Бугутой, Толта, Хандагайка, к в восточной – ручьи Первая и Вторая Шахталайки, реки Артемьевка, Харимта и др. Эти водотоки осуществляют сток только в пределах горных склонов и постепенно теряют его при выходе в Тункинскую долину, фильтруясь в наносы. В многоводные годы, в паводковый период такие водотоки вытекают в предгорья селевыми потоками и паводками.

Рассмотрены основные водотоки в пределах Приморского хребта Малого моря: реки Сарма, Курма, ручьи Ланинский, Харгинский (Харга), Смородиновый (Шидинский), а также подземные источники Серебряный и Шидинский. Сток рек формируется в пределах Приморского хребта. Реки горного типа с большими уклонами и скоростями течения.

Особенности формирования стока рек Тункинской котловины

По результатам гидрохимических наблюдений в летний период 2016 г. воды рек Тункинской котловины относятся ко второму типу гидрокарбонатно-кальциевых вод по классификации О. А. Алекина. Несмотря на общность гидрохимического облика, реки весьма разнообразны по степени минерализации воды, которая изменяется от 92 до 294 mS/см, что объясняется различием геологического строения, ландшафтов (Тункинские гольцы, днище котловины) и почвенного покрова, количества и внутригодового распределения атмосферных осадков, а также в различной роли подземного питания. Осадки по территории распределены неравномерно как по площади, так и по сезонам года. Среднегодовая норма осадков изменяется от 350–400 мм в долине до 500–600 мм в горах, подчиняясь вертикальной зональности и орографическому плану рельефа [3].

Минерализация воды в реках Тункинской котловины существенно выше, чем в ручьях и временных водотоках за счет существенного вклада более минерализованных вод глубоких водоносных горизонтов и их питание. Воды атмосферных осадков очень ультрапресные, гидрокарбонатно-, хлоридно- и сульфатно-кальцивые.

Величины pH всех водотоков и подземных источников колеблются в нейтрально-щелочной области от 7,2 до 8,2. Величины pH атмосферных осадков – в нейтрально-кислой области и изменяются от 5,3 до 6,7. Большинство из определяемых микроэлементов в природных водах показали содержания менее пределов их обнаружения. В подземных водах, а также в более крупных водотоках со значительным вкладом подземного питания отмечается

повышенное содержание Al, Sr и Ba в ряде случаев превышающее ПДК для водных объектов рыбохозяйственного использования.

В исследовании тонких механизмов формирования стока интерес представляют взаимосвязи сезонных и суточных колебаний уровня, минерализации и температуры воды. Такие наблюдения проводятся в русле руч. Кар № 2 с июня 2016 г. с помощью автоматического комплекса РАП-Г-01. Минимальные величины минерализации отмечались на пике дождевых паводков (рис. 1) с постепенным увеличением по их окончанию. Во время дождевых паводков отмечалось резкое понижение среднесуточной температуры воды на 4–6 °С. Температура воды в ручье в целом следует за сезонным ходом температуры воздуха. Амплитуда сезонного хода температуры воды достигала 20 °С. Амплитуда суточного хода среднем составляет 7–10 °С.

По данным датчиков на руч. Икубур во время дождевых паводков также отмечается резкое понижение температуры воды до 1,8 °С. В долине ручья ежегодно формируется мощная наледь, которая визуально фиксируется в середине лета. Низкие значения температуры воды обусловлены ее интенсивным таянием во время смешанного тало-дождевого паводка. В целом же ход температуры воды в ручье соответствует суточному и сезонному ходу температуры воздуха.

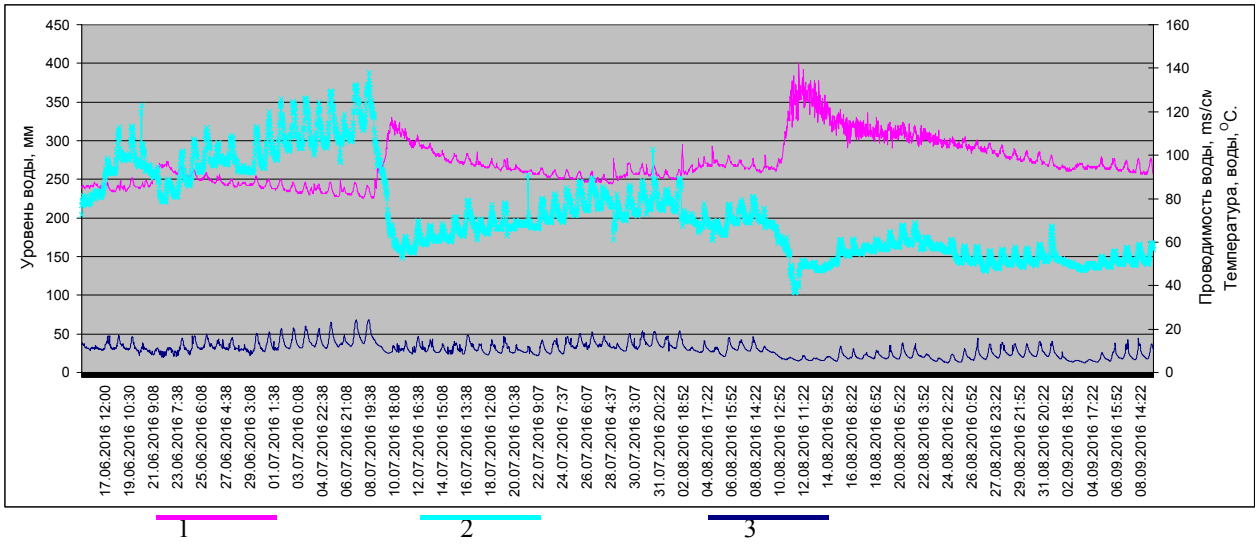


Рис. 1. Колебания уровня (*1*), минерализации (*2*) и температуры воды (*3*) в руч. Кар № 2 за летний период 2016 г.

Особенности формирования стока рек Приольхонья

По результатам гидрохимических наблюдений в течение летних периодов 2013–2015 гг. по ионному составу воды рек данной территории относятся к водам гидрокарбонатного класса, группе кальция, тип воды второй и третий. Природные воды мало минерализованы, сумма ионов в воде большинства опробованных рек изменяется от 40 мг/дм^3 до 128 мг/дм^3. Наледные воды ультрапресные гидрокарбонатно-кальциевые. Воды из подземных источников гидрокарбонатно-кальциевые, с минерализацией от 97 до 420 мг/л.

Отмечается повышенное содержание Fe и Al в болотных водах в верхней части водосборной воронки руч. Ланинский и в его истоке, превышающие ПДК для водных объектов питьевого водопользования. Эти элементы входят в состав гидрослюд и каолинита, которые доминируют среди глинистых минералов почвообразующих пород. Отмечается также повышенное содержание Ti, особенно в болотных водах и в стоячей воде под камнями на водосборе руч. Ланинский [4].

Зона формирования стока входит в горно-таежный и подтаежно-степной пояс, где светлохвойные лиственничные и сосновые леса соседствуют со степными участками. Распространены торфяно-криоземы и подзолистые почвы. Формирование химического состава речных вод происходит в основном среди слабо выщелачиваемых изверженных или мета-

морфических пород архея и протерозоя. Для данной территории характерно широкое распространение наледей в долинах рек, которые дают дополнительный вклад в питание ручья в теплый период.

Детальные наблюдения за колебаниями минерализации, уровня и температуры воды с помощью приборного комплекса на руч. Ланинский проводятся с июня 2013 г. (рис. 2). Минерализация в створе поста за летние периоды 2013–2016 гг. изменялась от 47 до 133 mS/см, с наименьшими значениями в конце мая – начале июня, плавным увеличением в течение летнего сезона, с кратковременными снижениями во время паводков. Максимальных значений минерализация достигает к осени. Температура воды отражает ход температуры воздуха, достигая максимума в 9–10 °С в первой половине августа, с кратковременным понижением по время паводков.

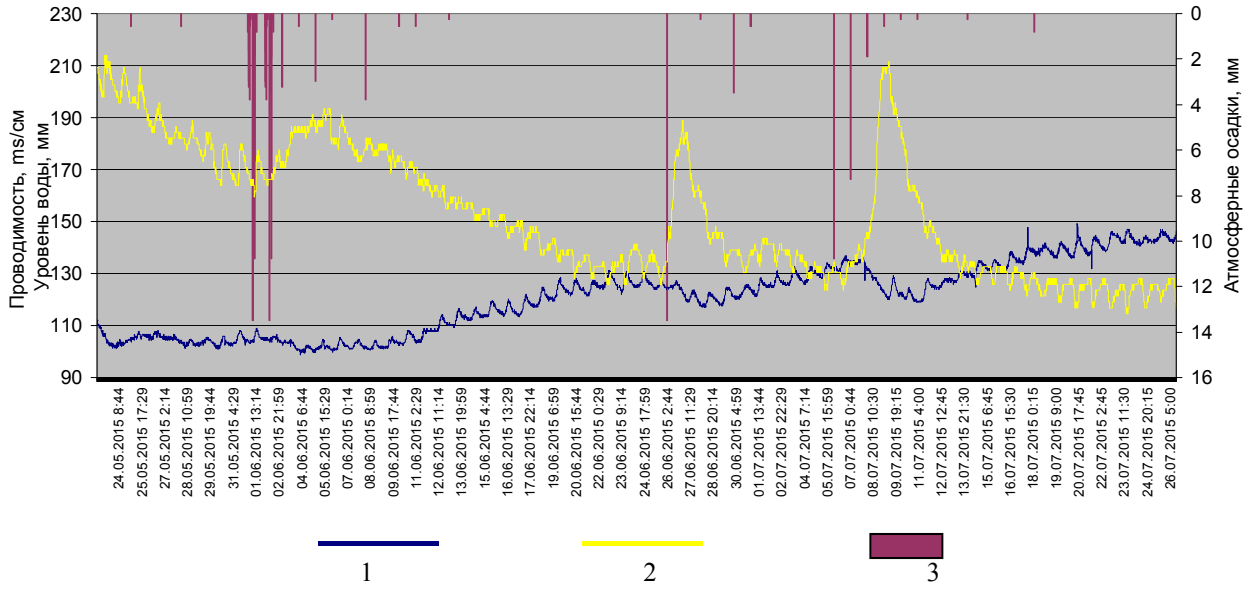


Рис. 2. Минерализация (*1*), уровень воды (*2*) и атмосферные осадки (*3*) в руч. Ланинский за период 23.05–26.07.2015 г.

В верхней части бассейна отмечается переход воды из гидрокарбонатного в сульфатный класс группу кальция второго типа. Пробы, отобранные с верхней части бассейна, тяготеют к источникам приповерхностного питания – дождевым и наледным водам, являясь, преимущественно, их смесью. То есть в верхней части водосбора влияние грунтовых вод на формирование речного стока менее существенно. Минерализация воды с наледи и болотных вод водосборной воронки руч. Ланинский составила 54 и 33 мг/дм^3 соответственно. Величины pH в нижней части ручья колеблются в нейтрально-щелочной области от 7,76 до 8,07, уменьшаясь после дождей, в верхней части бассейна величины pH в нейтрально-кислой области и изменяются от 6,15 до 7,09. По степени минерализации [2] воды ручья относятся ко 2 группе с низкой минерализацией, куда относятся горные притоки оз. Байкал, собирающие свои воды в непосредственной близости к Байкалу, в примыкающих к озеру горных хребтах. По характеру сезонных изменений общей минерализации притоков Байкала [1], воды ручья относятся ко второму типу режима притоков Байкала. Внутригодовая амплитуда изменений минерализации воды в створе поста не превышает 1,5–2,5. Это указывает на то, что в питании их летом преобладают воды поверхностного стока, а в зимний подледный период – воды верхних водоносных горизонтов, формирующихся в условиях слабой выщелачиваемых почвогрунтов и горных пород. В пределах водосбора чрезвычайно резко выражены различия в химическом составе природных вод. Отмечается увеличение минерализации от истока к устью. В верхней части бассейна значения минерализации вод ручья снижаются в 2–4 раза, в самых верховьях минерализация речных вод близка к таковой в мочажинах, почвенных прикопках и атмосферных осадках.

Несмотря на схожие черты формирования стока рек Тункинской котловины и Приольхонья – гидрокарбонатно-кальциевые воды горных рек 1–2-го порядка с преобладанием дождевых паводков, они имеют существенные различия в тонких механизмах формирования стока обусловленных различиями ландшафтной структуры территории, геологического и морфологического строения, почвенного покрова, атмосферных осадков, а также различной роли подземного питания.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, проект № 17-05-00400.

Список литературы

1. *Вотинцев К. К.*, Глазунов И. В., Толмачева А. П. Гидрохимия рек бассейна озера Байкал. М. : Изд-во Академии наук СССР, 1965. 495 с.
2. Гидрохимия // Проблемы Байкала / отв. ред. Г. И. Галазий, К. К. Вотинцев // Тр. АН СССР. Новосибирск : Сиб. отд-ние, 1978. Т. 16 (36). С. 124–144.
3. Катастрофические селевые потоки произошедшие в поселке Аршан Тункинского района Республики Бурятия 28 июня 2014 г. / С. А. Макаров, А. А. Черкашина, А. В. Бардаш, Н. Н. Воропай, Н. В Кичигина., Б. Ф. Мутин, О. П. Осипова, Н. Н. Ухова. Иркутск : Изд-во ИГ СО РАН им. В. Б. Сочавы, 2014. 111 с.
4. Водотоки в пределах научно-учебного полигона «Сарма» на побережье оз. Байкал как объекты экологически ориентированных видов туризма / Н. В. Кичигина, А. Д. Абалаков, В. В. Дроков, Д. И. Марышкин // Изв. ИГУ. Сер. Науки о Земле. 2015. Т. 14. С. 34–45.
5. *Кураков С. А.* Система автономного мониторинга состояния окружающей среды. // Датчики и системы. 2012. № 4 (155). С. 29–32 .

УДК 556.114.6(571.53)

Мониторинг состояния Богучанского водохранилища в 2012–2017 гг.

И. В. Кольцов [1,2] (ivan_kolcov@mail.ru), Г. Ю. Ямских[1] (yamskikh@mail.ru)

[1] Сибирский федеральный университет, Красноярск
[2] ФГУ «Енисейрегионводхоз», Красноярск

Аннотация. Проводится обзор существовавших и действующих сетей наблюдения за гидрологической и гидрохимической обстановкой на Богучанском водохранилище. Приведено описание развития сети гидрохимических мониторинговых наблюдений ФГУ «Енисейрегионводхоз» в 2012–2017 гг., а также основные результаты наблюдений за период проведения наблюдений.

Ключевые слова: гидрохимия, Богучанское водохранилище, мониторинг.

В результате строительства гидроэлектростанций на реке Ангара был сформирован каскад крупных водохранилищ. Последним нижним, построенным в каскаде является Богучанское водохранилище. В настоящем докладе проводится краткий обзор основных мониторинговых наблюдений на Богучанском водохранилище в период его существования. А также, более детально рассматриваются гидрохимические наблюдения, проводимые ФГУ «Енисейрегионводхоз» в 2012–2017 гг. и результаты, полученные в результате наблюдения.

Наполнение Богучанского водохранилища происходило с апреля 2012 г. по 16 июня 2015 г. За это время уровень воды в водохранилище повысился с отметки 142,4 м БС (около створа Богучанской ГЭС) до 208 м БС (Нормальный подпорный уровень).

В зоне затопления находится древесно-кустарниковая растительность в объеме до 9,5 млн м^3 [1], торфяные болота, территории, на которых располагались объекты промышленности и населенные пункты. Все это может оказывать значительное влияние на качество воды как в самом водохранилище, так и в нижнем течении р. Ангары.

Сейчас створ Богучанского гидроузла находится в 445 км от устья р. Ангары. Выше него длительно эксплуатируются в нормальном режиме водохранилища: Иркутское, Братское и Усть-Илимское. Подпор от Богучанского гидроузла при проектном НПУ 208 м распространяется до Усть-Илимского гидроузла;

Сток, поступающий в Богучанское водохранилище, зарегулирован в многолетнем режиме в оз. Байкал и Братском водохранилище, сезонном – в Усть-Илимском водохранилище.

Проектный полезный объем Богучанского водохранилища (между НПУ 208 м и УМО 207 м) составляет 2,3 км^3 и позволяет вести суточное регулирование мощности Богучанской ГЭС, а также сезонное регулирование стока боковой приточности между Усть-Илимским и Богучанским гидроузлами.

Морфометрические характеристики Богучанского водохранилища: длина, при НПУ – 375 км; ширина макс/средн. – 14 000–15 000 м/6200 м; глубина макс. – 70 м; площадь зеркала при НПУ – 2326 км^2; объем полный – 58,0 км^3; объем полезный – 2,3 км^3; протяженность береговой линии – 2430 км. Отметки уровней воды, м – нормальный подпорный уровень (НПУ) – 208 м БС; уровень мертвого объема (УМО) – 207 м БС; форсированный подпорный уровень (ФПУ) – 209,5 м БС. Богучанское водохранилище является водохранилищем сезонного регулирования;

Водные ресурсы Богучанского водохранилища используются в основном для: гидроэнергетики, водного транспорта, санитарных попусков в нижний бьеф гидроузла.

Берега Богучанского водохранилища в большинстве своем крутые.

Водохранилище глубокое, имеет ярко выраженный русловый характер с ограниченным мелководьем и многочисленными заливами, образовавшимися в устьях впадающих рек.

На этапе, предшествующем формированию водохранилища и в первые годы его существования, велись мониторинговые работы такими организациями как Среднесибирское УГМС, Иркутское УГМС, ФГБУН Институт геохимии им. А. П. Виноградова [2], ФГУ «Енисейрегионводхоз», ФГУ «Эксплуатации Богучанского водохранилища».

Начиная с 2011 г., одновременно с созданием на базе ФГУ «Енисейрегионводхоз» гидрохимической лаборатории, началось формирование ведомственной наблюдательной сети на Богучанском водохранилище с целью мониторинга качества воды и донных отложений. С 2012 г. начата систематическая работа по мониторингу согласно разработанным программам наблюдений.

Целью мониторинга является своевременное выявление и прогнозирование развития негативных процессов на водных объектах, влияющих на качество воды водных объектов и их состояние, разработка и реализация мер по предотвращению негативных последствий этих процессов; оценка эффективности осуществляемых мероприятий по охране водных объектов и информационное обеспечение управления в области использования и охраны водных объектов, в том числе в целях государственного контроля и надзора за использованием и охраной водных объектов.

При выборе мест наблюдения учитывались такие факторы как расположение притоков, источников загрязняющих веществ, а также необходимость определения общих гидрохимических закономерностей на водохранилище. Одним из требований к размещению пунктов наблюдения было отсутствие на участках действующих постов государственной сети наблюдений Росгидромета.

Согласно программе мониторинга состояния Богучанского водохранилища сотрудниками ФГУ «Енисейрегионводхоз» проводились наблюдения за состоянием дна, берегов и акватории водохранилища, а также качеством воды и донных отложений. В рамках наблюдения за качеством воды Богучанского водохранилища осуществлялся отбор проб воды и донных отложений для проведения количественного химического анализа. За весь период наблюдений отбор проб осуществлялся в 7 пунктах (9 створов) (рис. 1).

Наибольший объем данных накоплен в пунктах наблюдений на Межсубъектов створе на границе Иркутской области и Красноярского края (1), и створе в 2 км выше плотины Богучанской ГЭС (7). Отбор проб воды в этих пунктах наблюдений проводился в поперечных створах по всей ширине водохранилища (0,1; 0,5; 0,9 ширины) и на различных глубинах (от поверхностного до придонного слоя).

Менее объемные наблюдения проводились ниже бывших населенных пунктов Аксеново (2) и Кежма (3), в заливе реки Парта (4), выше и ниже населенных пунктов Недокура и Таежный (5.1, 5.2), выше и ниже устья Проспихинского залива (6.1, 6.2) (на берегу которого расположен г. Кодинск).

Отбор проб воды проводился три раза в год (в июне, августе и октябре).

При выполнении работ по ведению наблюдений за качеством воды водных объектов исполнители руководствовались следующими нормативными документами: ГОСТ 17.1.3.07-82 «Межгосударственный стандарт. Охрана природы. Гидросфера. Правила контроля качества воды водоемов и водотоков», РД 52.24.309-2011 «Организация и проведение режимных наблюдений за состоянием и загрязнением поверхностных вод суши».

Наблюдения за качеством воды проводились по 21–28 показателям согласно аккредитации гидрохимической лаборатории. В зависимости от полученных на первоначальном этапе результатов перечень наблюдаемых показателей корректировался. На данный момент, основными наблюдаемыми показателями являются: растворенный кислород, биологическое потребление кислорода за пять дней (БПК5), биологическое потребление кислорода за 20 дней (БПКполн), химическое потребление кислорода (ХПК), фенолы летучие, нефтепродукты, нитрит-ионы, нитрат-ионы, аммоний-ион, железо общее, медь, цинк, никель, марганец, хлориды, сульфаты, алюминий, взвешенные вещества, свинец, водородный показатель (pH), сухой остаток, фосфат-ион, температура.

Качество донных отложений определялось по 8–9 показателям, перечень которых также корректировался за период наблюдений. Сейчас в донных отложениях определяются следующие показатели: водородный показатель (pH), марганец, нефтепродукты, медь, цинк, никель, свинец, железо, кадмий.

Выявленные за период наблюдений превышения предельно допустимых значений показателей загрязненности воды, установленных для водоемов рыбохозяйственного значения (ПДК), в пробах воды приведены в (табл. 1).

При анализе полученных за период наблюдений данных установлено, что наиболее часто в пробах воды из Богучанского водохранилища встречаются превышения ПДК по меди, марганцу, цинку, БПК, ХПК. Превышения по этим показателям выявлялись во всех пунктах наблюдений. В некоторых случаях прослеживается пространственная динамика загрязнителей как в виде стратификации по горизонтам отбора проб, так и вдоль оси водохранилища. Это явление наиболее ярко наблюдалось в период наполнения водохранилища и, вероятно, может быть связано с повышением уровня воды в водохранилище и продвижении вверх по водохранилищу зоны подпора.

Эпизодически встречались загрязнения по нефтепродуктам, алюминию, фенолам летучим и ряду других показателей. При этом такие загрязнения выявлялись по всей протяженности исследуемого участка водохранилища. Максимальные выявленные значения превышений ПДК по годам приведены на (рис. 2).

В связи с отсутствием утвержденных нормативов ПДК для донных отложений были проанализированы концентрации загрязняющих веществ в отобранных пробах донных отложений. Проанализированные значения имеют большую дисперсию и на данное время не позволяют делать заключения о состоянии водоема.

Всего за 2012–2017 гг. на Богучанском водохранилище силами сотрудников ФГУ «Енисейрегионводхоз» выполнено 18 комплексных обследований, в ходе которых отобрано 704 проб воды и 15 проб донных отложений. Произведен количественный химический анализ отобранных проб по 17 235 показателям.

В последующие годы ФГУ «Енисейрегионводхоз» предполагает продолжение данных работ, что даст возможность изучить пространственную и временную динамику распространения загрязнителей в бассейне Богучанского водохранилища.

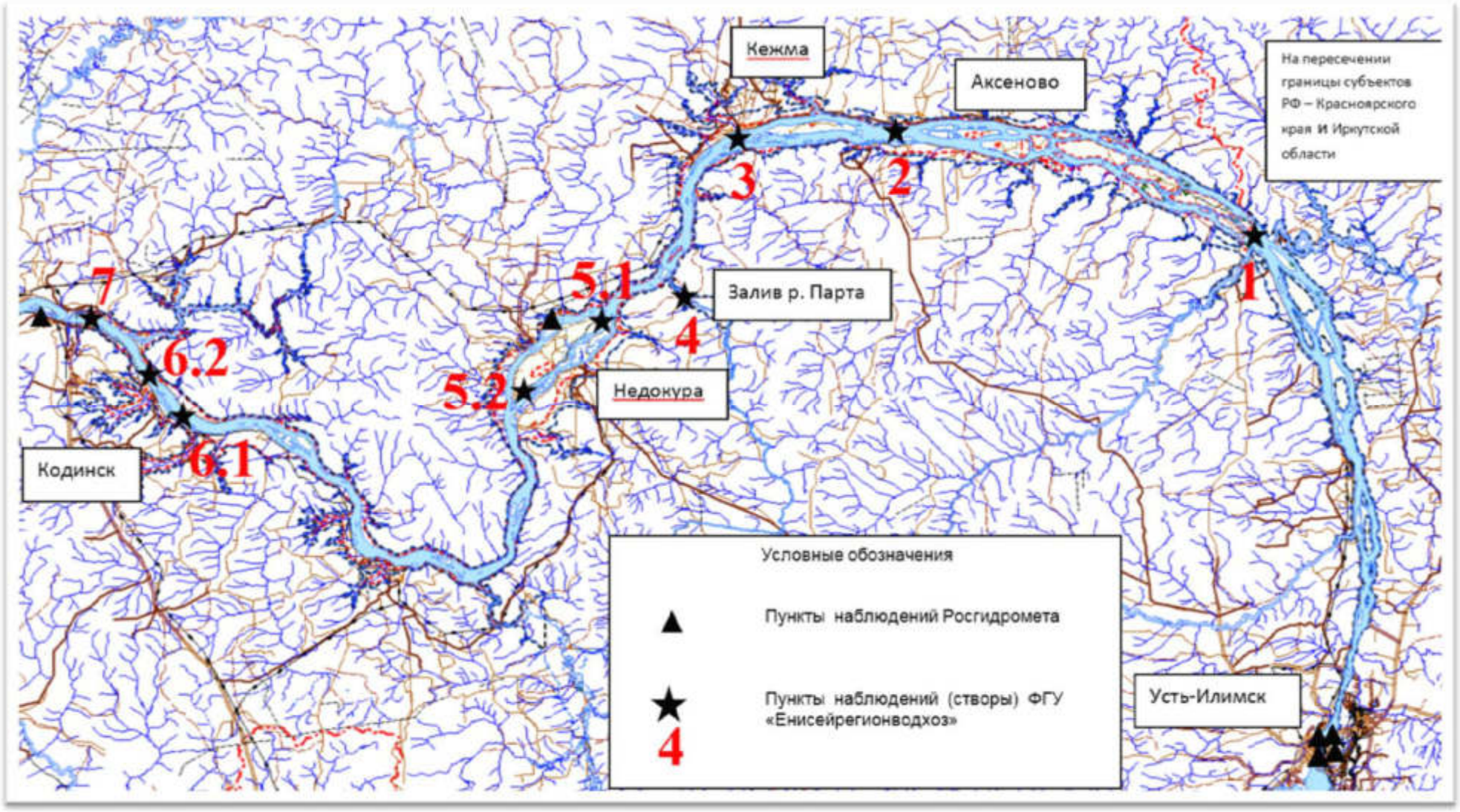


Рис. 1. Схема размещения пунктов наблюдения на Богучанском водохранилище

Таблица 1

Выявленные превышения ПДК загрязняющих веществ по годам наблюдения в водах Богучанского водохранилища

Наименование загрязняющих веществ и показателей	Величины превышений ПДК, 2012 г.	Величины превышений ПДК, 2013 г.		Величины превышений ПДК, 2014 г.		Величины превышений ПДК, 2015 г.		Величины превышений ПДК, 2016 г.		Величины превышений ПДК, 2017 г.	
	горизонт – поверхность	поверхность	горизонт – у дна	поверхность	горизонты – 0,5 глубины, у дна	поверхность	горизонты – 0,5 глубины, у дна	поверхность	горизонты – 0,5 глубины, у дна	поверхность	горизонты – 0,5 глубины, у дна
Аммоний-ион		1,1									
Алюминий	1,15	1,2–1,4	1,2–1,4								
БПК5		1,1		1,01–1,2		1,4	1,1–1,3				
БПК полн.		1,1–1,8	1,1–1,6	1,04–2,3	1,01–1,2	1,04–1,4	1,2–1,4	1,1–1,2	1,03–1,3	1,05	1,01–1,06
Медь	1,9	1,1–3,1	1,1–2,3	1,1–7,8	1,2–9,1	1,1–3,0	1,1–3,8	1,1–3,1	1,1–3,0	1,1–1,6	1,1–1,3
Марганец			1,4–3,6	1,1–7,3	1,1–2,2		1,2			1,1–1,8	1,3–6,3
Фенолы	1,1 – 1,8	1,4	1,1–1,4		1,5						
ХПК		1,1–2,3	1,1–1,9	1,03–1,7	1,02–1,7	1,01–2,2	1,01–1,8	1,1–1,2	1,3–1,4	1,12–1,3	1,01–1,16
Нефтепродукты		1,4	1,2		1,1		2,1				
Цинк	1,1		1,1–3,1	1,1–1,7	1,1–9,3	1,3	1,3–1,6				
Железо					1,3						

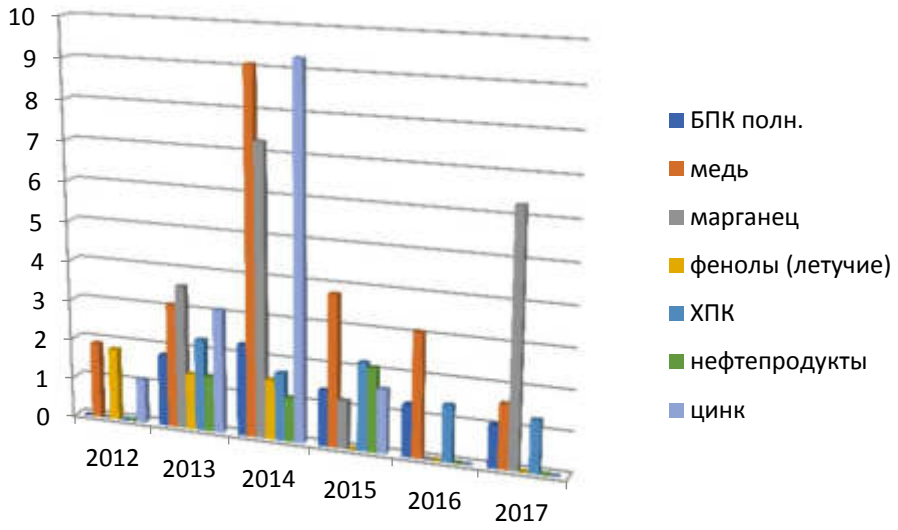


Рис. 2 Максимальные выявленные значения основных показателей загрязненности воды на Богучанском водохранилище, доли ПДК

В 2013–2014 гг. имело место значительное повышение выявленных значений превышений ПДК, так и количество выявленных превышений ПДК. Также, по годам достаточно сильно менялось соотношение количества проб воды и количества проб с выявленными превышениями ПДК (рис. 3). Наличие временной динамики на этом графике связано как с модификацией системы наблюдения, так и с определенными тенденциями изменения качества воды в пунктах наблюдения на которых велись постоянно.

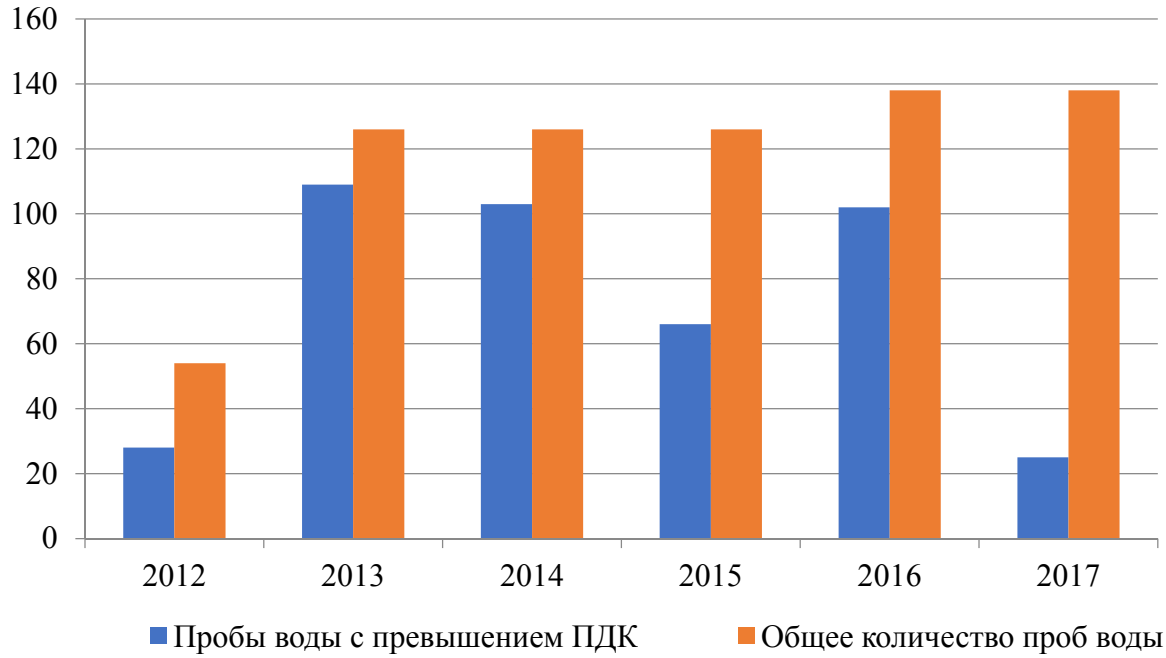


Рис. 3. Количество отобранных на Богучанском водохранилище проб воды и проб воды, в которых были выявлены превышения ПДК по исследуемым показателям

Список литературы

1. *Корпачев В. П.*, Пережилин А. И., Андрияс А. А. Прогноз всплывающей древесной массы, оставленной под затопление в ложе водохранилища Богучанской ГЭС // Лес. вестн. МГТУ им. Баумана, 2010. № 6-5.

2. Биогенные элементы и кислородный режим Богучанского водохранилища в период его заполнения / В. И. Полетаева, М. В. Пастухов, В. А. Бычинский, П. Г. Долгих // Проблемы региональной экологии. 2016. № 5-7.

УДК 543.054:543.544.5.068.7:54.064

Хроматографические методы определения содержания и установление источников поступления компонентов нефтепродуктов в донные отложения озера Байкал

В. Е. Котова[1,2] (Valentina.E.Kotova@gmail.com), Ю. А. Андреев[1,2] (y.andreev@gidrohim.com), М. С. Черновьянц[2] (chernov@sfedu.ru)

[1] Гидрохимический институт, Ростов-на-Дону
[2] Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

Аннотация. Исследованы 64 пробы донных отложений, отобранных в 2016 г. в трех районах Байкал, определены уровни содержания полициклических ароматических углеводородов (ПАУ). Интервал суммарных количеств для всех изученных образцов составил 17–910 нг/г сухого остатка. По отношениям индикаторных ПАУ установлена наиболее вероятная природа происхождения исследуемых соединений в донных отложениях. Анализ полученных результатов показал, что значительный вклад обусловлен пирогенным источником поступления ПАУ.

Ключевые слова: полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), высокоэффективная жидкостная хроматография (ВЭЖХ), донные отложения, озеро Байкал, загрязнение.

Введение

Полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) как компоненты нефтепродуктов являются объектом пристального внимания уже многие годы. Агентство по охране окружающей среды США (EPA) и ЕС включили 16 соединений в перечень особо опасных загрязняющих веществ, что объясняется их мутагенным и канцерогенным действием (табл. 1): нафталин (Naph), аценафтилен (Acn), аценафтен (Ace), флуорен (Fl), фенантрен (Phe), антрацен (An), флуорантен (Flu), пирен (Py), бензо[a]антрацен (B[a]A), хризен (Chry), бензо[b]флуорантен (B[b]F), бензо[k]флуорантен (B[k]F), бензо[a]пирен (B[a]P), дибензо[a,h]антрацен (DB[a,h]A), бензо[g,h,i]перилен (B[g,h,i]P), индено[1,2,3-cd]пирен (In[cd]P) [11].

Таблица 1

Данные о мутагенной и канцерогенной активности ПАУ

Мутагенность [17]		Вещество	Канцерогенность			
ТЭ 98	ТЭ 100		[13][1]	[15][1]	[16][2]	[19][2]
-	-	Naph	слабый К	н/д	н/д	2B
-	-	Acn	н/д	н/д	н/д	н/д
-	-	Ace	н/д	н/д	н/д	н/д
+	+	Fl	н/д	неадекватные Д	н/д	н/д
-	н/д	Phe	н/д	н/д	Т	н/д
-	-	An	сомнительный К	Д отсутствуют	н/д	н/д
+	+	Flu	н/д	Д отсутствуют	н/д	н/д
-	-	Py	н/д	Д отсутствуют	н/д	н/д
+	+	B[a]A	слабый К	достаточные Д	К	2A
+	+	Chry	сомнительный К	ограниченные Д	н/д	н/д
+	+	B[b]F	К	достаточные Д	К	2B
+	+	B[k]F	н/д	н/д	К	2B
+	+	B[a]P	сильный К	достаточные Д	К	2A
+	+	DB[a,h]A	сильный К	достаточные Д	К	2B
+	+	B[g,h,i]P	сомнительный К	неадекватные Д	н/д	н/д
+	+	In[cd]P	слабый К	достаточные Д	К	2B

ТЭ – тест Эймса; н/д – нет данных; К – канцероген; Д – доказательства; Т – токсичен для окружающей среды; 2A – весьма вероятно канцерогенный для человека; 2B – вероятно канцерогенный для человека; [1] – доказательства канцерогенности для животных;
[2] – канцерогенная активность по отношению к человеку.

ПАУ распространены повсеместно, поскольку источники их поступления многочисленны и по характеру воздействия классифицируются как природные (лесные пожары, извержения вулканов и другие термические геологические процессы) и антропогенные (сжигание бытовых отходов, отопление жилых помещений с использованием различных видов топлива, выхлопные газы транспортных средств, табачный дым). Другой подход – разделение источников на пирогенные (образование ПАУ при относительно высоких температурах (650–690 °С) и недостатке кислорода в пламени при сжигании углеводородов) и петрогенные (связано с использованием нефти и продуктов ее переработки). Попадая в водоемы, ПАУ, благодаря своим липофильным свойствам, сорбируются взвешенными частицами, оседают в виде донных отложений и накапливаются со временем. Это способствует включению ПАУ в пищевые цепи гидробионтов, а также может привести к вторичному загрязнению воды водоемов.

Так как полициклические ароматические углеводороды обладают канцерогенными свойствами, содержание некоторых из них в воде нормируют: 10 мкг/дм^3 для Naph и 5 нг/дм^3 для B[a]P в питьевой воде; 10 мкг/дм^3 для Naph и 10 нг/дм^3 для B[a]P в воде хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования и 4 мкг/дм^3 для Naph в воде рыбохозяйственного значения [12; 14]. Однако содержание ПАУ в донных отложениях российскими нормативными документами не регламентируется, но существует возможность оценки по зарубежным аналогам (табл. 2), а сравнить российские и зарубежные нормы для B[a]P и суммы нефтепродуктов можно только для почв (табл. 2).

Таблица 2

Допустимый уровень содержаний ПАУ для донных отложений и почв [18]

Вещество (нг/г)	Германия	США	Финляндия	Голландия	Россия
Почва					
B[a]P	2–12	0,7–100	2–15	-	0,02
Нефтепродукты	–	200–10 000	-	-	180–1000
Донные отложения					
$ПАУ_{сум}$	10–100	-	-	1–40	-

Целью данной работы является установление источника поступления компонентов нефтепродуктов в донные отложения озера Байкал при использовании разных способов оценки.

Объекты исследования

В качестве объекта исследования использовали 64 пробы донных отложений, отобранных при проведении комплексных работ по экологическому мониторингу в 2016 г., выполненных ФГБУ «Иркутское УГМС» при участии ФГБУ «Гидрохимический институт». Пробы отбирали в трех районах озера Байкал (рис. 1): район бывшего Байкальского целлюлозно-бумажного комбината (БЦБК), дельта реки Селенга и северная часть озера (зона влияния трассы БАМ).

Эксперимент

В работе применяли образцы веществ индивидуальных ПАУ производства Supelco с содержанием основного вещества не менее 98 % и алифатические углеводороды. Использовали растворители отечественного производства (гексан, ацетон, метиленхлорид), квалификации не ниже «химически чистый», после очистки двукратной перегонкой. Ацетонитрил производства «Криохром», сорт 0, и Lab-Scan для высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) применяли без дополнительной очистки. Навески реактивов и проб донных отложений отбирали с помощью весов специального (Sartorius B 210S) и высокого (Sartorius ВЛТ-150-П) классов точности с дискретностью отсчета 0,0001 г и 0,001 г соответственно.

Определение ПАУ проводили методом ВЭЖХ на жидкостном хроматографе Agilent Technologies 1260 Infinity со спектрофлуориметрическим детектором с аналитической колонкой ZORBAX Eclipse PAH, внутренним диаметром – 3,0 мм, длиной – 250 мм, размером зерна фазы – 5 мкм. Обработку хроматограмм выполняли при помощи программного обеспече-

ния Chemstation, количественные расчеты по хроматограммам проводили методом внешнего стандарта. Определение алифатических углеводородов газохроматографическим методом с масс-спектрометрическим детектированием (ГХ-МС) выполняли с помощью оборудования Agilent Technologies 6850/5975C с кварцевой капиллярной колонкой HP-5MS Agilent Technologies с неподвижной фазой – 5 %-дифенил-95 %-диметилполисилоксаном длиной 30 м, внутренним диаметром 0,25 мм и толщиной пленки фазы 0,25 мкм. Масс-спектрометрическое детектирование выполняли в режиме сканирования (SCAN) диапазона масс 30–450 а.е.м. Для расшифровки и идентификации масс-спектров использовали библиотеку NIST 2011.

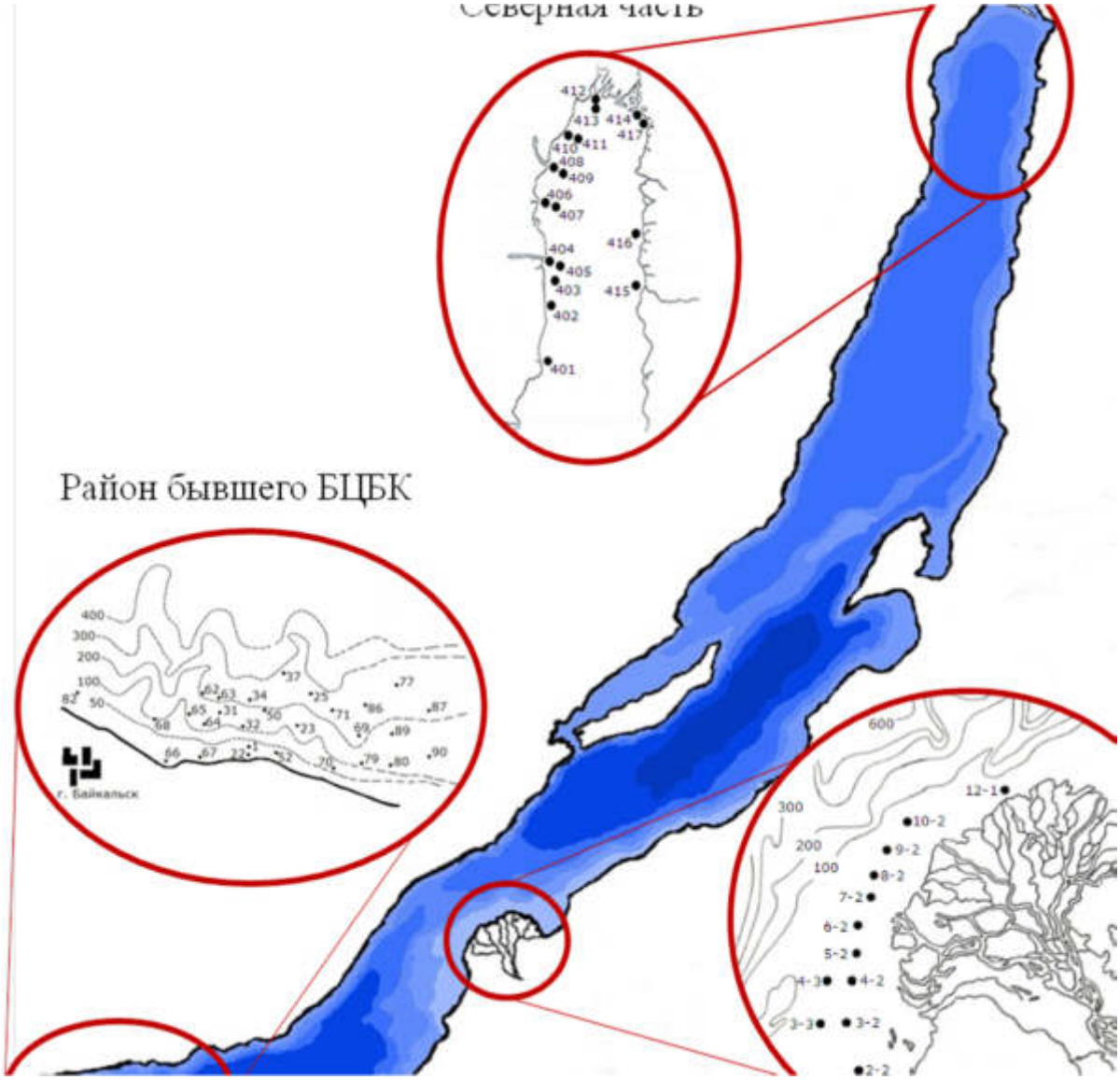


Рис. 1. Схема расположений точек отбора проб (оз. Байкал)

Схема подготовки проб донных отложений включала в себя несколько стадий: экстракционное извлечение смесью органических растворителей (ацетон, гексан, метиленхлорид, изооктан) с механическим перемешиванием, очистку экстрактов (после отделения взвешенных частиц фильтрованием) перераспределением через воду, предварительное концентрирование, выделение целевых фракций (ПАУ и алифатических углеводородов) методом колоночной хроматографии на силикагеле Davisil (элюирование гексаном и смесью гексан-метиленхлорид). Фракции, содержащие исследуемые группы веществ, анализировали методом ВЭЖХ и ГХ-МС соответственно [1; 7; 9].

Разработанный авторами способ определения ПАУ в донных отложениях позволил:

– регистрировать и измерять максимальный аналитический сигнал каждого из приведенных веществ методом высокоэффективной жидкостной хроматографии со спектрофлуориметрическим детектированием [2];

– выделять аналиты из матрицы твердого вещества путем трехкратной экстракции органическими растворителями с 70%-ной и более степенью извлечения [6];

– количественно элюировать и разделять фракции ПАУ и алифатических углеводородов в полученном экстракте методом колоночной хроматографии на силикагеле [5];

– измерять следовые количества полициклических ароматических углеводородов в пробах (пределы обнаружения по разработанной процедуре: от 0,1 нг/см^3 для антрацена до 3 нг/см^3 для фенантрена и нафталина) [8];

– уменьшить массу анализируемого образца до 1–2 г и применяемых реактивов, благодаря использованию эффективных методов разделения и выделения веществ, а также высоко чувствительного и селективного способа регистрации.

Результаты и их обсуждение

Некоторые вещества из группы ПАУ известны своей канцерогенностью. Для всех исследованных районов озера были рассчитаны суммарные концентрации потенциально канцерогенных ПАУ (далее – «канц ПАУ»), которые составили значения от 2 до 388 нг/г сухого остатка (с. о.).

$$\text{канц ПАУ} = \sum(\text{B[a]A} + \text{B[b]F} + \text{B[k]F} + \text{B[a]P} + \text{DB[ah]A} + \text{In[cd]P}). \quad (1)$$

Бензо[a]пирен – единственный из представителей группы ПАУ, для которого достаточно токсикологических данных для определения фактора канцерогенности. По остальным потенциально токсичным ПАУ рассчитывается относительная величина, выраженная как фактор токсической эквивалентности (далее – ФТЭ**)**. Согласно Агентству по охране окружающей среды США, для B[a]A, B[a]P, B[b]F, B[k]F, DB[a,h]A и In[cd]P значения ФТЭ составляют 0,1, 1, 0,1, 0,01, 1 и 0,1 соответственно [22]. Значения общей токсичности в бензо[a]пиреновом эквиваленте ($ОТ_{B[a]P}$**)** составили 0,2–49 нг/г с. о.

$$ОТ_{B[a]P} = \sum \text{ФТЭ} \cdot \text{канцПАУ} \quad (2)$$

Результаты изучения содержаний ПАУ в донных отложениях и значений общей токсичности для рассматриваемых районов озера представлены на рис. 2.

Наиболее загрязненным из трех изученных является район бывшего БЦБК, суммарные содержания ПАУ находятся в интервале значений 17–910 нг/г с. о., содержание B[a]P как наиболее канцерогенного представителя составляет 0,07–33 нг/г с. о.; интервалы суммарных содержаний ПАУ и B[a]P для донных отложений северной части озера – 20–379 нг/г с. о. и 0,07–9 нг/г с. о. соответственно; устье реки Селенга – наименее загрязненный район из трех рассмотренных имеет 25–232 нг/г с. о. для суммы ПАУ и 0,07–6 нг/г с. о. для B[a]P. Рассчитанные значения «канц ПАУ» и $ОТ_{B[a]P}$ получены максимальные для района бывшего БЦБК – 1,5–388 нг/г с. о. и 0,3–65 нг/г с. о. соответственно; для Селенгинского мелководья «канц ПАУ» находится в интервале значений 2,1–83 нг/г с. о. и $ОТ_{\mathbf{B[a]P}}$ – 0,2–13 нг/г с. о.; для северной части озера значения «канц ПАУ» и $ОТ_{B[a]P}$ составили 9,0–42 нг/г с. о. и 1,0–8 нг/г с. о. соответственно. Числом на рис. 2 над соответствующими колонками указана доля канцерогенных ПАУ в пробе от суммарного содержания. Таким образом, общая токсичность и сумма канцерогенных ПАУ не зависят от общей загрязненности района и могут меняться в широких пределах.

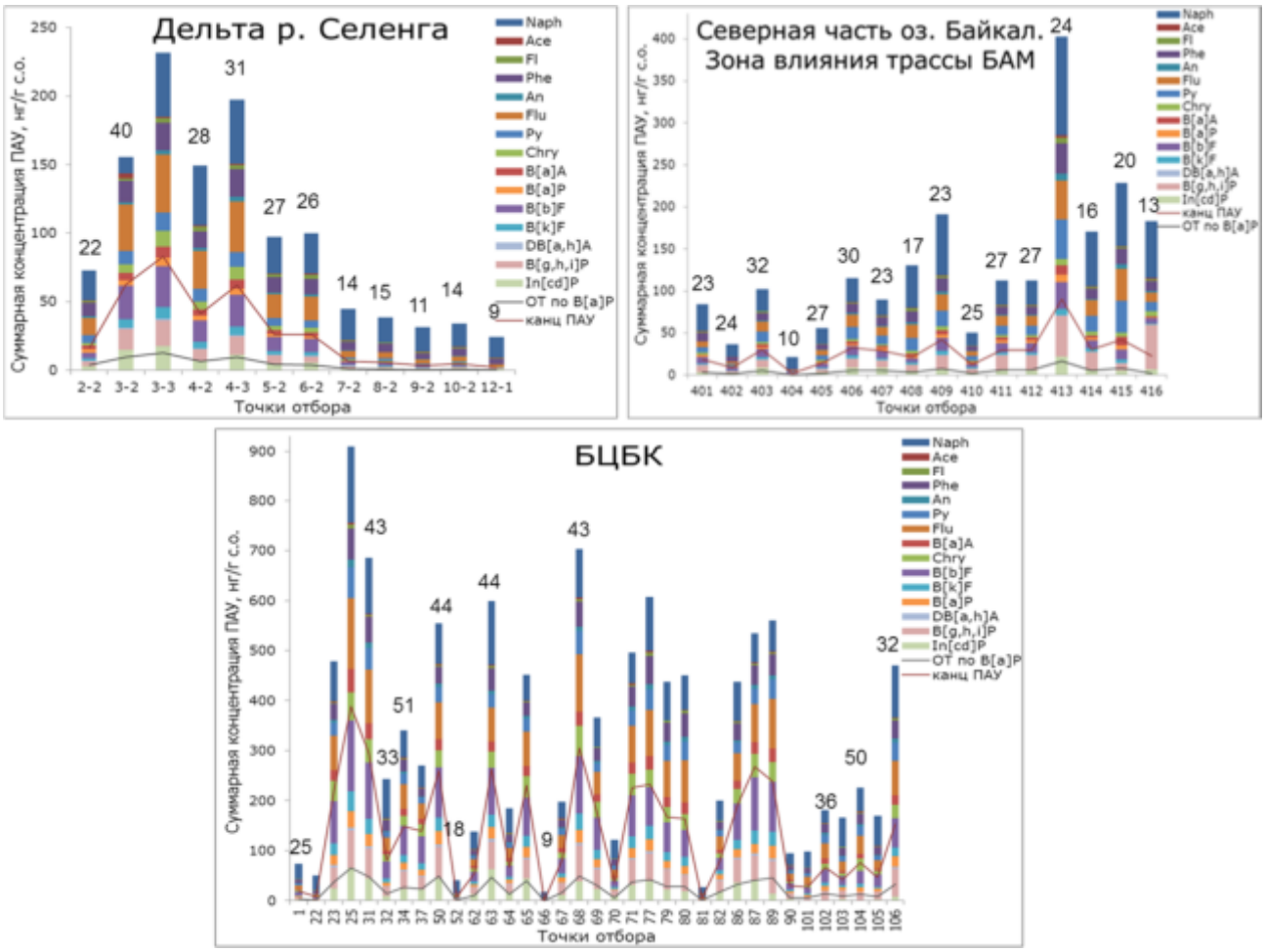


Рис. 2. Суммарные содержания ПАУ с учетом вклада индивидуальных соединений; сумма канцерогенных ПАУ и значения общей токсичности по B[a]P в донных отложениях разных районов озера Байкал

Классический способ дифференциации углеводородов между биогенными или нефтяными основан на ряде критериев, включая соотношения по алифатическим углеводородам – индекс нечетности CPI (carbon petroleum index) – или по маркерным изопреноидам (табл. 3) [10; 20].

Таблица 3

Критерии отнесения углеводородов к биогенным или нефтяным

Критерий	Биогенные	Нефтяные
$CPI = \frac{1}{2}\left(\frac{\sum C_{25-33}}{\sum C_{26-34}} + \frac{\sum C_{25-33}}{\sum C_{24-32}}\right)$	> 1	< 1
Пристан/Фитан (Pr/Ph)	> 1	< 1
Пентадекан/Гексадекан (C_{15}/C_{16})	> 1	< 1
Гептадекан/Пристан (C_{17}/Pr)	< 1	> 1

На рисунке 3 представлены наиболее типичные примеры хроматограмм экстрактов донных отложений, максимально отличающихся природой содержащихся в них углеводородов.

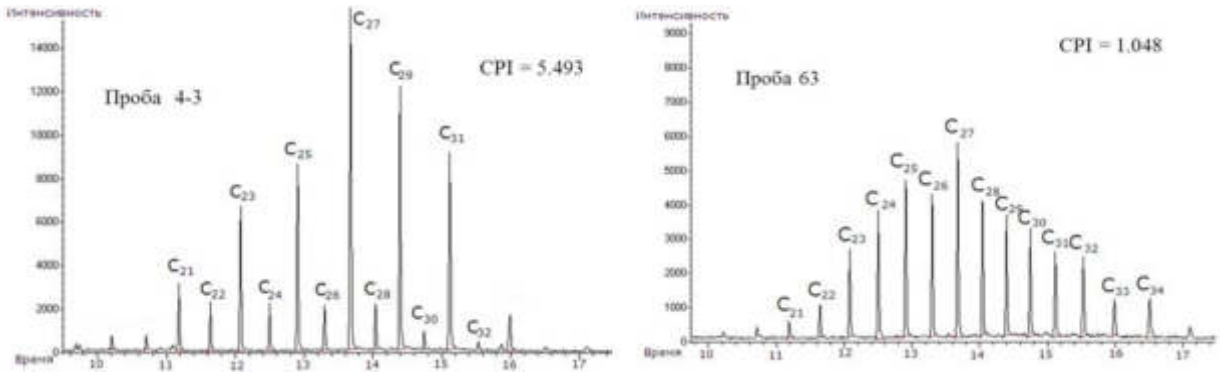


Рис. 3. Алифатические углеводороды в экстрактах проб донных отложений оз. Байкал

Проба 4-3 отобрана в районе Селенгинского мелководья, она характеризуется преобладающими количествами нечетных углеводородов по отношению к четным, индекс нечетности имеет значение больше единицы (CPI >> 1), что указывает на преимущественный вклад биогенных в общее количество углеводородов. Проба 63 отобрана в районе бывшего БЦБК, содержания четных и нечетных углеводородов приблизительно равны по интенсивности, индекс нечетности близок к единице (CPI ≈ 1), проба характеризуется большим количеством нефтяных углеводородов по сравнению с предыдущей.

Поскольку разработанный способ анализа донных отложений позволяет определять из одной пробы и ПАУ, и алифатические углеводороды, то имея результаты анализа обоих классов веществ (как представителей нефтепродуктов), становится возможным повысить информативность и проводить идентификацию также по фракции ПАУ, которая позволяет с большими вариантами градаций выявлять источник их происхождения, что однозначно важно при изучении хронического загрязнения донных отложений и водоемов.

Среди множества имеющихся вариантов для установления вероятных источников поступления ПАУ в донные отложения озера Байкал выбран способ оценивания по отношениям индикаторных соединений (в том числе суммарный индекс TI_{PAH} (total PAHs index), который рассчитывается по формуле (3) [22]), реперные значения которого представлены в таблице 4 [3; 4; 21–24].

Таблица 4

Характеристики источников поступления ПАУ

Отношение ПАУ	Петрогенный источник	Смешанный источник	Пирогенный источник	
			Горение нефтепродуктов	Горение древесины, угля, травы
An/(An+Phe)	< 0,1	-	> 0,1	
Flu/(Flu+Py)	< 0,4	-	0,4 ÷ 0,5	> 0,5
B[a]A/(B[a]A+Chry)	< 0,2	0,2–0,35	> 0,35	
In[cd]P/(In[cd]P+B[g,h,i]P)	< 0,2	-	0,2 ÷ 0,5	> 0,5
(Flu+Py)/(Chry+Phe)	< 0,5	-	> 0,5	
Flu/Py	< 0,4	-	> 0,4	
TI_{PAH}	< 4	-	> 4	

$$I_{PAH} = \frac{Flu}{\frac{Flu}{Flu + Py}} + \frac{An}{\frac{An}{An + Phe}} + \frac{B[a]A}{\frac{B[a]A}{B[a]A + Chry}} + \frac{In[cd]P}{\frac{In[cd]P}{In[cd]P + B[g,h,i]P}} \quad (3)$$

По предложенным критериям определяют значения и представляют в виде графиков взаимной зависимости (рис. 4).

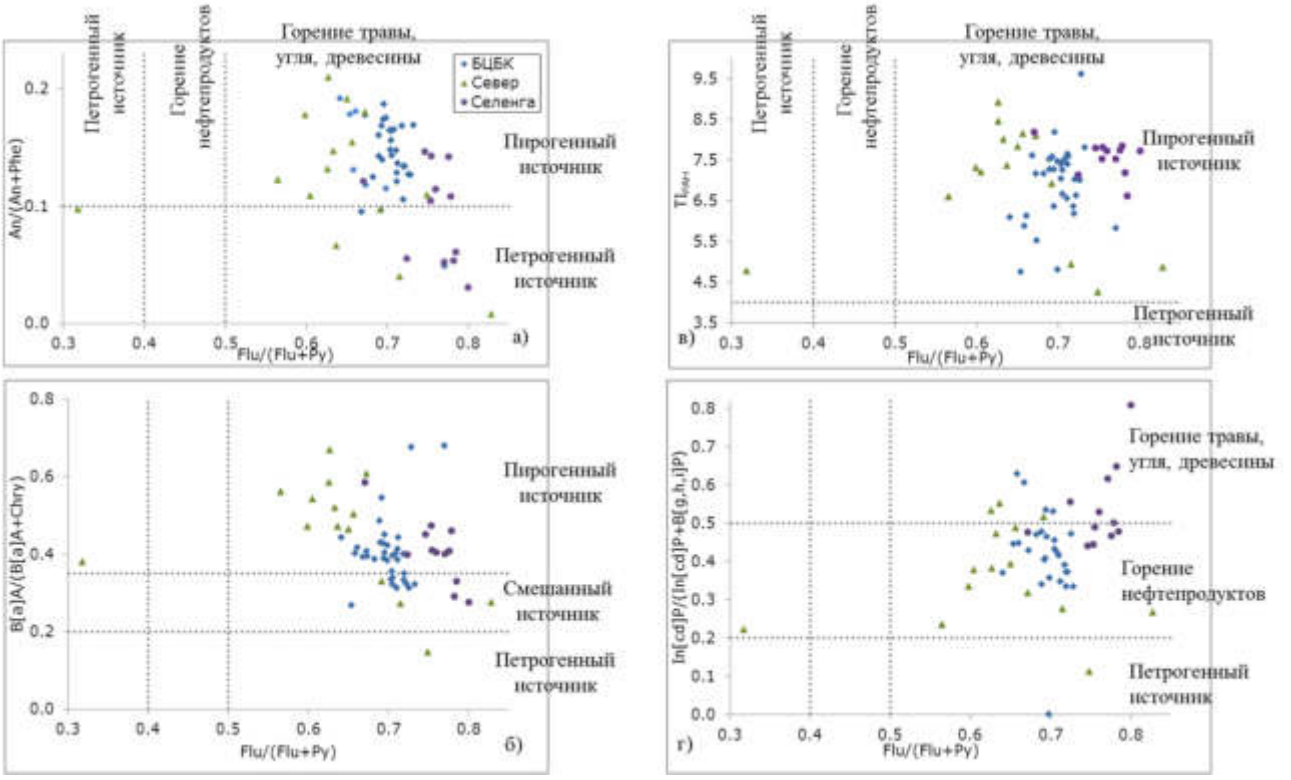


Рис. 4. Графики взаимной зависимости отношений индикаторных ПАУ

По отношению содержаний An/(An + Phe) установлено, что в 15 из 64 изученных проб донных отложений преобладают ПАУ петрогенного происхождения и в 48 образцах – пирогенного (рис. 4а, ось ординат); по отношению содержаний Flu/(Flu + Py) выявлено, что в 1 образце присутствуют петрогенные ПАУ и 63 образцах представлены ПАУ пирогенного источника поступления (ось абсцисс на всех рисунках); по отношению содержаний B[a]A /(B[a]A + Chry) (рис. 4, *б*, ось ординат) 1 из 64 точек находится в зоне пирогенного источника, 17 точек находятся в зоне смешанного источника и 46 – пирогенного; по отношению содержаний In[cd]P/(In[cd]P + B[g,h,i]P) (рис. 4, *г*, ось ординат) 9 проб из 64 имеют ПАУ петрогенного происхождения; 42 имеют источник продукты горения нефти; 13 точек – пирогенного происхождения; и по суммарному индексу TI_{PAH} (рис. 4, *в*, ось ординат) во всех образцах преобладают ПАУ пирогенного происхождения.

Результаты исследования донных отложений хроматографическими методами показали, что ПАУ присутствуют во всех изученных образцах проб трех районов оз. Байкал (2016 г.) в интервале суммарных содержаний от 17 до 910 нг/г сухого остатка и от 0,1 до 33 нг/г сухого остатка по бензо[a]пирену; суммарный показатель содержания канцерогенных ПАУ и общая токсичность в бензо[a]пиреновом эквиваленте составляют 1,5–388 нг/г сухого остатка и 0,2–65 нг/г сухого остатка соответственно. Проведенные исследования демонстрируют, что общая токсичность и сумма канцерогенных ПАУ не всегда зависит от общей загрязненности района и могут меняться в широких пределах. Использованный ряд критериев по отношениям индикаторных ПАУ указывает на накопление в донных отложениях подавляющего количества ПАУ преимущественно пирогенного происхождения, а не только нефтяного, как указывалось ранее многими авторами.

Список литературы

1. Заявка 2017106715 Российская Федерация, МПК G01N 30/94. Способ подготовки проб для определения алифатических и полициклических ароматических углеводородов в донных отложениях / В. Е. Котова, Ю. А. Андреев ; заявитель ФГБУ «Гидрохимический институт» ; пат. поверенный Сергеева Н. Н. – приоритет 28.02.2017. 17 с.

2. *Котова В. Е.*, Андреев Ю. А. Методы подготовки и анализа проб донных отложений при определении полициклических ароматических углеводородов // Современные проблемы гидрохимии и мониторинга качества поверхностных вод : материалы науч. конф. с междунар. участием (г. Ростов-на-Дону, 8–10 сент. 2015 г.). Ростов н/Д, 2015. Ч. 2. С. 33–37.

3. *Котова В. Е.*, Андреев Ю. А., Черновьянц М. С. Идентификация источников поступления полициклических ароматических углеводородов в донные отложения озера Байкал // Вода: химия и экология. 2017. № 4. С. 71–76.

4. *Котова В. Е.*, Андреев Ю. А., Черновьянц М. С. Метод ВЭЖХ в изучении содержания и источников поступления ПАУ в донные отложения озера Байкал // Третьего съезда аналитиков России : тез. докл. (г. Москва, 8–13 окт. 2017 г.). М. : ГЕОХИ РАН, 2017. С. 331.

5. *Котова В. Е.*, Андреев Ю. А., Черновьянц М. С. Определение компонентов нефтепродуктов в донных отложениях хроматографическими методами // Экоаналитика-2016 : тез. докл. X Всерос. конф. по анализу объектов окруж. Среды (г. Углич, 26 июня – 2 июля 2016 г.). Углич : Филигрань, 2016. С. 82.

6. *Котова В. Е.*, Андреев Ю. А., Черновьянц М. С. Определение нефтепродуктов хроматографическими методами в донных отложениях // Химия: достижения и перспективы : сб. науч. ст. I Регион. студ. науч.-практ. конф. Юж. федер. окр. (г. Ростов-на-Дону, 15–16 апр. 2016 г.). Ростов н/Д ; Таганрог : Изд-во Юж. федер. ун-та, 2016. С. 87–89.

7. *Котова В. Е.*, Андреев Ю. А., Черновьянц М. С. Сравнительное исследование способов пробоподготовки для ВЭЖХ определения приоритетных ПАУ в донных отложениях // Третий съезд аналитиков России : тез. докл. (г. Москва, 8–13 окт. 2017 г.). М. : ГЕОХИ РАН, 2017. С. 330.

8. *Котова В. Е.*, Андреев Ю. А., Черновьянц М. С. Хроматографические методы идентификации и определения компонентов нефтепродуктов в донных отложениях озера Байкал // Теория и практика хроматографии : тез. докл. Всерос. конф. с междунар. участием, посвящ. памяти проф. М. С. Вигдергауза (г. Самара, 24–30 мая 2015 г.). Самара : Порто-Принт, 2015. С. 52.

9. *Котова В. Е.*, Андреев Ю. А., Черновьянц М. С. Хроматографическое изучение компонентного состава нефтепродуктов в донных отложениях // Сорбционные и хроматографические процессы. 2016. Т. 16. № 6. С. 885–892.

10. *Никаноров А. М.*, Страдомская А. Г. Проблемы нефтяного загрязнения пресноводных экосистем. Ростов н/Д : НОК, 2008. 222 с.

11. *Ноллет Л. М.* Анализ воды : справочник : пер. с англ. 2-е изд. ; под ред. И. А. Васильевой, Е. Л. Пролетарской. СПб. : Профессия, 2012. 920 с.

12. Предельно-допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования : ГН 2.1.5.1315-03. Введ. 2003-15-06; ГН 2.1.5.2280-07 Дополнения и изменения № 1 к ГН 2.1.5.1315-03. Введ. 2007-15-12.

13. *Ровинский Ф. Я.*, Теплицкая Т. А., Алексеева Т. А. Фоновый мониторинг полициклических ароматических углеводородов. Л. : Гидрометиздат, 1988. 224 с.

14. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. «Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества» : СанПин 2.1.4.1074-01. Введ. 2002-01-01.

15. *Смола В. И.* ПАУ в окружающей среде: проблемы и решения. В 2 ч. Ч. 1. М. : Полиграф-сервис, 2013. 384 с.

16. Emergency Planning and Community Right-to-Know Act планирование действий в чрезвычайных ситуациях и право населения на информацию [Электронный ресурс]. URL: https://www.epa.gov/toxics-release-inventory-tri-program/toxicity-data-category-tri-listed-chemicals (дата обращения 15.01.2018).

17. IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Vol. 92. Some non-heterocyclic aromatic hydrocarbons and some related exposures. Lyon : International agency for research on cancer, 2010. 858 p.

18. Neue Niederlandische Liste. Altlasten Spektrum 3/95 [Электронный ресурс] // Законодат. база РФ. URL: http://zakonbase.ru/content/part/440713 (дата обращения: 17.01.2018).

19. Occupational Safety and Health Administration [Электронный ресурс] // Упр. по охране труда (Министерство труда США). URL: https://www.epa.gov/toxics-release-inventory-tri-program/tri-basis-osha-carcinogens (дата обращения 10.01.2018).

20. *Peters K. P.,* Walters C. C., Moldowan J. M. The biomarker guide. Vol. 2. Biomarkers and isotopes in petroleum exploration and Earth history. 2-nd ed. N. Y. : Cambridge University Press, 2005. 1156 p.

21. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and organochlorines (OCs) in bottom sediments of the Guba Pechenga, Barents Sea, Russia / V. M. Savinov, T. N. Savinova, G. G. Matishov, S. Dahleb, K. Næsc // The Science of the Total Environment. 2003. Vol. 306. P. 39–56.

22. Determination of 16 priority polycyclic aromatic hydrocarbons in bottom sediments of the Danube estuarine coast by GC/MS / K. K. Tsymbalyuk, Y. M. Den'ga, N. A. Berlinsky, V. P. Antonovich // Geo-Eco-Marina. 2011. N 17. P. 67–72.

23. *Vane C. H.*, Harrison I., Kim A. W. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and polychlorinated biphenyls (PCBs) in sediments from the Mersey Estuary, U. K. // Science of the Total Environment. 2007. N 374. P. 112–126.

24. PAHs in the Fraser River basin: a critical appraisal of PAH ratios as indicators of PAH source and composition / M. B. Yunker [et al.] // Organic Geochemistry. 2002. Vol. 33. P. 489–515.

УДК 556.06

Особенности формирования и прогнозирование характеристик весеннего половодья на реках Иркутской области

Н. А. Котова[1] (natalyakotova9292@mail.ru)
Н. А. Иванов[2] (nickolay272@mail.ru)

[1] ФГБУ «Иркутское УГМС», Иркутск
[2] ФГБУ «Иркутское УГМС», Шелехов

Аннотация. Описаны особенности формирования и прохождения весеннего половодья на реках Иркутской области. Представлены методы прогнозирование сроков вскрытия рек, максимальных уровней воды, бокового притока воды в Братское водохранилище. Приведены примеры гидрологических прогнозов.

Ключевые слова: половодье, вскрытие, максимальные уровни воды, методы прогнозирования.

ФГБУ «Иркутское УГМС» проводит мониторинг состояния рек в период прохождения весеннего половодья на основе информации, поступающей с гидрологической сети наблюдений. Она охватывает крупные реки Иркутской области – Ангара, Лена, Нижняя Тунгуска, а также их притоки – Иркут, Китой, Белая, Ока, Ия, Уда, Бирюса, Киренга, Витим, Непа.

В весенние месяцы в отдел гидрологических прогнозов поступает информация с 73 гидрологических постов, 13 из которых сезонные (табл. 1).

Таблица 1

Количество гидрологических постов на реках Иркутской области

Количество постов		
Бассейн р. Ангары	бассейн р. Лены	бассейн р. Нижняя Тунгуска
33	34	6

Половодье – это фаза водного режима реки, характеризующаяся наибольшей в году водностью, высоким и длительным подъемом уровня воды, обычно сопровождаемым выходом воды из русла на пойму. Вызывается главным источником питания реки: на равнинных реках – снеготаянием, на высокогорных – таянием снега и ледников [6].

Особенности вскрытия

Весеннее половодье на реках Иркутской области имеет различный характер.

На реках Иркут, Китой, Белая, Ока, Ия, Уда вскрытие и половодье проходит спокойно – без образования заторов и резких повышений уровня воды. Бассейны этих рек характеризуются резко континентальным климатом, малоснежной зимой и дождливым летом (в период ноябрь – апрель выпадет 5–20 % годовой суммы осадков). Согласно среднемноголетним данным вскрытие нижних участков левобережных притоков р. Ангара происходит преимущественно в третьей декаде апреля, а к началу мая происходит вскрытие всей реки.

Отличительной чертой рек Лена, Киренга, Витим, Нижняя Тунгуска, Бирюса является то, что русло ориентировано с юга на север, вследствие этого вскрытие сначала происходит в верхнем течении, а затем в нижнем. В большинстве случаев это способствует образованию мощных заторов льда, резкому повышению уровня воды, затоплению участков и населенных пунктов, расположенных в пойме реки. По многолетним данным наблюдений вскрытие рек Ленского бассейна и р. Нижняя Тунгуска происходит преимущественно в первой – второй декадах мая.

Особенности формирования максимальных уровней

Вследствие неравномерного распределения снежного покрова, различной экспозиции и крутизны склонов и других условий, в бассейнах рек Иркут, Китой, Белая, Ока, Ия, Уда сход снежного покрова происходит неравномерно – с предгорных участков снег сходит в

конце марта – начале апреля, с более высоких – в конце мая – первой половине июня. Этим объясняется отсутствие больших повышений уровня воды в период половодья [1].

На других реках Иркутской области процесс формирования и прохождение половодья проходит более сложно, каждая река обладает своими особенностями.

Основное значение для образования мощных заторов имеет характер весны. При резком переходе от зимы к весне и быстром нарастании тепла в начале весны происходит интенсивный приток талых вод в реке, в результате чего решающая роль в процессе вскрытия принадлежит механическому фактору. И чем дружнее весна и значительнее механическое воздействие, тем больше вероятность образования заторов.

На р. Бирюса половодье проходит несколькими волнами, которые обусловлены неравномерностью таяния снега на разных высотах и ходом температуры воздуха. Накануне вскрытия повышение уровня воды может достигать 200 см. Раньше всего взламывание льда происходит на перекатах, в результате чего образуются заторы льда, что приводит к еще большему повышению уровня воды. В среднем подъем уровня воды на р. Бирюса во время половодья составляет 200–300 см, но может достигать и 600 см [2].

На р. Лена формирование половодья так же происходит в сложных условиях, обусловленное климатическими факторами и влиянием подстилающей поверхности.

На территории бассейна в виде снега выпадает 15–30 % годового количества осадков, максимальные запасы воды в снеге отмечаются в северной части бассейна. По характеру формирования весеннего половодья участок реки Верхняя Лена, расположенный на территории нашей области, можно разделить на два участка:

- верхний – от п. Качуг до г. Усть-Кут;
- нижний – от г. Усть-Кут до г. Киренск.

Начинается половодье в начале третьей декады апреля и заканчивается во второй декаде июня, в зависимости от температурного режима и хода весны сроки могут сдвигаться. Проходит половодье несколькими волнами, первая волна формируется в верхнем участке и при ее прохождении происходит дальнейшее вскрытие реки вниз по течению [5].

С переходом к положительным температурам воздуха начинаются процессы снеготаяния и отмечаются небольшие подъемы уровня воды, после чего происходит вскрытие и дальнейший рост уровня воды. На любом участке реки при вскрытии возможно образование заторов льда, это происходит почти каждый год. Мощные заторы образуются с периодичностью 3–5 лет. При заторах на верхнем участке уровень воды может повышаться на 300–400 см, на нижнем до 600–700 см.

На р. Киренга в формировании половодья так же преобладающую роль играют снегозапасы на территории бассейна и приток тепла в период таяния.

Начинается половодье в конце апреля – начале мая. За несколько дней до вскрытия происходит резкий подъем уровня воды, часто достигающий в период ледохода наивысшего значения. Пик половодья наступает в середине мая, окончание в конце июня – в начале июля. Прохождение половодья часто сопровождается заторами льда, которые вызывают большие подъемы уровня воды: средняя высота волны изменяется от 100 до 250 см, может достигать 600 см при образовании мощных заторов [7].

Река Витим преобладающее питание получает от осадков, основное количество которых приходится на летние месяцы, за период октябрь – апрель выпадает лишь 13–15 % от годового количества.

Наиболее существенное увеличение стока наблюдается в мае, когда среднесуточная температура воздуха переходит через + 5 °С и таяние захватывает большие площади и стокоформирующие зоны. Вскрытие обычно сопровождается заторами и значительным повышением уровня воды – повышение заторных уровней может достигать 1000 см. После некоторого спада проходит вторая волна, когда происходит таяние на основных высотных зонах бассейна. Так же влияние на высоту волн половодья оказывают жидкие осадки, выпадающие в период прохождения половодья [3].

Прогноз характеристик весеннего половодья

Для прогноза сроков вскрытия ото льда на левобережных притоках р. Ангара и реках Ленского бассейна используются разработанные для каждой реки уравнения регрессии с конкретным набором предикторов:

- даты перехода среднесуточной температуры через ноль;
- толщина льда по состоянию на 20–31 марта;
- уровень воды;
- барический градиент за март;
- положение ПВФЗ.

Прогноз составляется 4–6 апреля.

Для долгосрочного прогноза максимальных уровней весеннего половодья используются:

1) прогностические зависимости методик, разработанных в отделе гидропрогнозов со снегозапасами и температурными характеристиками предшествующей и ожидаемой синоптической обстановки;

2) новый метод прогнозирования на основе математической модели с использованием большого набора предикторов индивидуальных для каждого участка реки, в том числе и для уровней заторного происхождения. Метод разработан в 2011–2015 гг. в СИБНИГМИ для рек Бирюсы и Лены.

Сложность при долгосрочном прогнозировании весеннего половодья – в отсутствии в настоящее время надежных методов долгосрочных прогнозов погоды, которые бы позволили определить дружность ожидаемой весны. Распределение во времени хода температуры воздуха и количества осадков в период снеготаяния, вынуждено принимается в среднем. Но по мере развития весеннего половодья при значительных отклонениях от нормы температуры воздуха и осадков долгосрочные прогнозы сроков вскрытия и максимальных уровней воды корректируются.

В связи с труднодоступностью ряда территорий Иркутской области отмечается недостаточная освещенность снегомерными пунктами наблюдений в горных и высокогорных частях бассейнов рек. Для уточнения карт максимальных снегозапасов специалистами периодически проводились дополнительные авиационные и автомобильные снегосъемки.

Итогом анализа и проведенных расчетов является выпуск гидрологического бюллетеня с прогнозом сроков вскрытия (табл. 2–4) и максимальных уровней весеннего половодья (табл. 5).

Таблица 2

Прогноз сроков вскрытия р. Лены и ее притоков в 2017 г.

№ п/п	Река – пункт	Ожидаемые сроки вскрытия в 2017 г.	Допустимая ошибка ± дней	Дата вскрытия в 2016 г.	Многолетние характеристики		
					ранняя	средняя	поздняя
1	Лена – Качуг	20.04	5	19.04	12.04	1.05	14.05
2	Лена-Жигалово	18.04	5	25.04	13.04	1.05	17.05
3	Лена – Усть-Кут	22.04	5	29.04	16.04	3.05	16.05
4	Лена – Киренск	26.04	5	05.05	20.04	8.05	23.05
5	Лена – Дарьина	27.04	5	07.05	22.04	9.05	21.05
6	Киренга – Казачинское	23.04	5	30.04	–	5.05	–
7	Киренга – Шорохово	24.04	5	02.05	19.04	6.05	19.05
8	Витим – Бодайбо	04.05	5	10.05	29.04	14.05	31.05

Таблица 3

Прогноз сроков вскрытия притоков р. Ангары в 2017 г.

№ п/п	Река – пункт	Ожидаемые сроки вскрытия в 2017г.	Допус- ти-мая ошибка ± дней	Дата вскрытия в 2016 г.	Многолетние характеристики		
					ранняя	средняя	поздняя
1	Иркут – Баклаши	18.04	5	17.04	11.04	26.04	6.05
2	Китой – Раздолье	21.04	5	21.04	16.04	30.04	8.05
3	Белая – Мишелевка	15.04	5	14.04	08.04	23.04	8.05
4	Ока – Ухтуй	18.04	5	20.04	11.04	24.04	8.05
5	Ока – Усть-Када	20.04	5	24.04	10.04	29.04	8.05
6	Ия – Тулун	15.04	5	19.04	5.04	21.04	8.05
7	Уда – Нижнеудинск	22.04	5	22.04	12.04	2.05	15.05
8	Бирюса – Бирюсинск	18.04	5	19.04	10.04	28.04	13.05
9	Бирюса – Шиткино	19.04	5	21.04	12.04	29.04	8.05

Таблица 4

Прогноз сроков вскрытия р. Нижняя Тунгуска в 2017 г.

№ п/п	Река – пункт	Ожидаемые сроки вскрытия в 2017г.	Допустимая ошибка ± дней	Дата вскрытия в 2016 г.	Многолетние характеристики		
					ранняя	средняя	поздняя
1	Н. Тунгуска – Подволошино	29.04	5	09.05	21.04	10.05	19.05
2	Н. Тунгуска – Преображенка	30.04	5	12.05	23.04	10.05	23.05
3	Н. Тунгуска – Ербогачен	04.05	5	17.05	24.04	15.05	25.05

Таблица 5

Прогноз максимальных уровней воды весеннего половодья на реках области в 2017 г.
(уровни приведены в см над нулем поста)

№ п/п	Река – пункт	Ожидаемый уровень весеннего половодья в 2017 г.	Максималь-ный уровень в 2016 г.	Уровень выхода воды на пойму в районе поста	Многолетние характеристики максимального уровня воды весеннего половодья			Ожидаемый уро-вень при заторах или выпадении дождя в 2017 г.
					высший	средний	низший	
1	Иркут – Баклаши	220–320	280	480	434	300	244	280–380
2	Китой – Китой	120–220	129	475	286	190	130	180–280
3	Белая – Мишелёвка	245–335	281	680	433	315	245	325–415
4	Ока – Ухтуй	210–310	253	470	383	250	147	270–370
5	Ия – Тулун	520–620	501	700	722	550	384	600–700
6	Уда – Нижнеудинск	150–250	181	320	278	170	82	250–350
7	Бирюса – Бирюсинск	270–370	285	380	496	340	201	350–450
8	Бирюса – Шиткино	460–560	468	570	677	520	363	550–650
9	Лена – Качуг	90–150	73	240	301	160	76	150–210
10	Лена – Жигалово	70–190	70	300	413	230	89	200–320
11	Лена – Усть-Кут	360–560	251	700	934	520	135	550–750
12	Лена – Киренск	335–465	337	570	794	480	278	485–615
13	Киренга – Казачинское	160–260	185	250	346	240	165	240–340
14	Витим – Бодайбо	540–760	575	1170	1232	680	362	790–1010

Методика прогноза бокового притока на апрель–июнь

Водность левобережных притоков р. Ангара в период весеннего половодья оказывает непосредственное влияние на изменение притока воды в Братское водохранилище в период апрель – июнь. Основное снеготаяние в бассейне Братского водохранилища начинается в апреле и заканчивается в июне. Талый сток составляет около 55 % стока половодья, подземный сток – примерно 10 %, дождевой 35 %. Основной сток половодья формируют р. Иркут, Китой, Белая, Ока, Ия, берущие начало в горах Восточного Саяна. Величина талого стока и распределение за период половодья зависит от запасов воды в снежном покрове и от притоков тепла за период снеготаяния. Абсолютную величину запасов воды в снежном покрове рассматриваемой территории определить невозможно из-за почти полного отсутствия наблюдений за снежным покровом в горах. Поэтому для определения прогноза выбраны наиболее репрезентативные. Используются данные максимальных снегозапасов по 7 пунктам. Также используется метод, основанный на зависимости бокового притока от суммы осадков за период октябрь – март по 5 пунктам, зависимость используется как дополнительная [4].

Наблюдавшиеся опасные явления за период 2000–2017 гг.

Заторообразование на реках Иркутской области наблюдается почти ежегодно, мощные заторы образуются реже, в зависимости от климатических условий зимы и весны. За последние 20 лет опасные явления, связанные с прохождением весеннего половодья, наблюдались четыре раза – в 2001, 2005, 2013 и 2015 гг.

В эти годы высокие уровни воды на реках Бирюса, Лена, Киренга, Нижняя Тунгуска были вызваны образованием мощных заторов льда, резким повышением температуры воздуха и сильными дождями, выпавшими на пике половодья. Все эти факторы в совокупности приводили к тому, что высота волны половодья достигала в среднем 200–600 см, а в 2001 г. и 600–800 см. Отметки уровня воды превышали критические на 80–230 см. Некоторые близлежащие населенные пункты были затоплены, нанесен значительный материальный ущерб.

Все эти случаи были предусмотрены прогнозом максимальных уровней весеннего половодья с заблаговременностью 1–1,5 месяца. При прохождении пиков половодья рассылались штормовые предупреждения и оповещения.

Вышеописанное еще раз доказывает важность и необходимость прогнозирования хода весеннего половодья, а также точность и своевременность этих прогнозов.

Каждый год в отделе гидрологических прогнозов проводится всесторонний анализ прошедшего половодья, для улучшения качества будущих прогнозов обновляются ряды наблюдений и зависимости, разрабатываются новые методы прогноза, учитывающие особенности рек Иркутской области и условия формирования весеннего половодья.

Список литературы

1. *Горбань К. Ф.* Методика краткосрочного прогноза времени вскрытия на реках Иркут, Китой, Белая. Иркутск : Иркут. упр. гидрометслужбы, 1963. 50 с.

2. *Горбань К. Ф.* Методика краткосрочного прогноза времени вскрытия рек Уда, Бирюса. Иркутск : Иркут. упр. гидрометслужбы, 1965. 103 с.

3. *Горбань К. Ф.* Методическая записка «Прогнозирование максимального уровня/расхода воды весеннего половодья на р. Витим у г. Бодайбо». Иркутск : Иркут. упр. гидрометслужбы, 1960. 59 с.

4. *Горбань К. Ф.* Уточнение методики долгосрочного прогноза бокового притока в водохранилище Братской ГЭС. Иркутск : Иркут. упр. гидрометслужбы, 1971. 89 с.

5. *Кусатов К. И.* Исследование элементов весеннего половодья рек Верхней Лены с целью их прогноза. Якутск : Якут. упр. гидрометслужбы, 1970. 56 с.

6. *Чеботарев А. И.* Гидрологический словарь, гидрометеорологические. Л. : Гидрометеорол. Изд-во, 1970. 305 с.

7. *Якимова Н. И.* Методика долгосрочного прогноза максимальных уровней воды половодья р. Киренга у с. Казачинское. Иркутск : Иркут. упр. гидрометслужбы, 1976. 64 с.

УДК [556.16+556.535+556.18]:627.16(470+571)

Климатические обусловленные и антропогенные изменения стока воды основных рек Российской Федерации в их низовьях и морских устьях

Д. В. Магрицкий (magdima@yandex.ru)[1]

[1] МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва

Аннотация. В последние 30–40 лет под влиянием крупномасштабных климатических изменений и хозяйственной деятельности (в случае с южными реками) водные ресурсы рек России, их распределение в течение года и, следовательно, величина и режим поступления речных вод в устья и моря испытали заметные, но разнонаправленные для разных побережий и объектов многолетние изменения. Увеличение годового стока доминирует у рек, впадающих в арктические моря (в среднем 5,8 %), Балтийское (5–8 %) и Черное (0,7 %) моря, а также для рек Волги, Терека и Сулака. У рек Азовского моря, р. Селенги, многих рек тихоокеанского побережья ситуация противоположная. Главная причина изменений климатическая, поскольку водохозяйственная деятельность практически не влияет на годовой сток арктических и дальневосточных рек, на реки Балтийского моря. Изменения годовых величин стока сопровождались в основном снижением максимальных расходов воды и, наоборот, увеличением водности летне-осеннего и особенно зимнего сезонов. Главным исключением стали р. Самур, степные реки Северного Кавказа, некоторые реки черноморского побережья и р. Амур. Ситуация с половодьем неоднозначная: в устьях практически всех зарегулированных рек его сток уменьшен. Естественное сокращение стока отмечено на замыкающих створах рек Камчатки и Селенги.

Ключевые слова: Россия, реки, замыкающий створ, сток воды, водохозяйственная деятельность, климатические изменения.

Речной сток – важное звено гидрологического цикла, участник экзогенных процессов, один из главных факторов, оказывающих влияние на природные условия морских побережий, устьевые и морские гидрологические процессы, а в полярных и приполярных широтах – на местный и даже региональный климат. Сами крупные реки и их притоки – важные транспортные артерии страны, главные источники водоснабжения и гидроэлектроэнергии, зона рекреации, среда обитания множества водных организмов. Главным образом, во второй половине XX в. сток многих рек России и его годовой режим подверглись значительным антропогенным преобразованиям. В последние 30–40 лет на них оказывают мощное влияние крупномасштабные изменения климата. Суммирование двух источников воздействия привело к значимым и порой необратимым изменениям гидрологических условий в низовьях и в морских устьях основных рек РФ. Понять масштаб этих изменений и их гидрологических последствий помогают данные стационарных гидрологических наблюдений на замыкающих створах основных рек, тем более что сток таких рек доминирует в общем поступлении речных вод в моря с территории РФ. Например, сток больших российских рек (с $F > 50$ тыс. км^2) в Каспийское и Азовское моря, охваченных стационарными наблюдениями, формирует практически ~94 % суммарного притока речных вод, в арктические моря России – около 84 %.

Методы и материалы исследований

Чтобы установить и количественно оценить характер этих изменений, автором была подготовлена база данных по среднемесячным и характерным расходам воды для 89 средних по размеру (но важных) и больших рек РФ в их *замыкающих створах* (ЗС) – постах, учитывающих сток воды, ближе всего расположенных к приемному водоему (морю), но вне зоны приливных и сгонно-нагонных колебаний уровня. Единый рассматриваемый период наблюдений был выбран в границах 1936–2015 гг. Для постов, имеющих пропуски в наблюдениях или со сроками начала/окончания функционирования позже 1936 г. / раньше 2015 г., отсутствующие Q восстановлены по надежным зависимостям с расходами воды на реках- или постах-аналогах при соблюдении стандартных требований: $R \geq 0{,}7$–$0{,}8$, $R/\sigma_R \geq 2$, $k/\sigma_k \geq 2$, изложенных в СП 33–101–2003. Сезонный водный сток рассчитан в границах гидрологических сезонов – естественных для конкретной реки и поста, гидрологического района и типа водного режима. Сравниваемые многолетние периоды разделяет 1975 г. Такое решение принято

по двум причинам. Главная – подтверждаемый данными метеонаблюдений, в том числе в России, рост приземной температуры воздуха со второй половины 1970-х гг. и принятое в отечественной и международной климатологической практике деление периода наблюдений на два подпериода с «переломным годом» в середине 1970-х гг. [5]. Вторая, не основная, – ввод в строй многих крупных гидротехнических сооружений, главным образом гидроузлов водохранилищ, в 1970-х гг. Это Краснодарский, Саяно-Шушенский и Усть-Илимский, Вилюйский, Зейский и Чиркейский гидроузлы. Для тех рек, в бассейнах которых начало крупномасштабных водохозяйственных мероприятий датируется раньше – обычно 1950-ми гг., – первый подпериод делился 1955-м г. еще на два. Статистическую значимость изменений характера многолетних колебаний подтверждалась (или нет) результатами проверки рядов на соответствие таким статистическим гипотезам (при 5%-ном уровне), как однородность/стационарность – с использованием критериев Фишера (*F-test*), Стьюдента (*t-test*) и Манна-Уитни (*U-test*) применительно к коррелированным во времени и асимметричным рядам гидрологических характеристик; наличие тренда, как за весь период, так и после 1975 г. – при помощи критерия Спирмена (*Spearmen RCC* – r_s). Для понимания причин изменений стока воды в низовьях и морских устьях рек России привлечены результаты ранних работ автора в отношении воздействий водохозяйственных мероприятий на сток рек, впадающих в Каспийское и Азовское моря, арктические моря России, результаты исследований других специалистов, а также материалы ежегодно издаваемого (с 1982 г.) справочника [8] и открытых отчетов СКИОВО (http://www.dpbvu.ru, http://skiovo.enbvu.ru, http://nobwu.ru, http://www.amurbvu.ru и др.). Исследования выполнены за счет гранта РНФ № 14-17-00155, а в отношении антропогенного изменения стока и режима главных арктических рек – за счет гранта РНФ № 14-37-00038.

Особенности и закономерности изменений годового стока воды

Согласно полученным оценкам, поступление речных вод в морские устья испытывает заметные, но разнонаправленные для разных побережий и объектов многолетние изменения. В последние 40 лет увеличение годового стока доминирует у рек, впадающих в арктические моря (в среднем 5,8 % по данным для всех замыкающих створов и в сравнении с 1936–1975 гг.; в диапазоне от 0,5 до 20 % и больше), Балтийское море (в среднем 5–8 %), а также для Волги (11 %), со значительной долею водосбора в средней части ЕЧС, рр. Терека (~4 %) и Сулака (0,2 %), стекающих с северного и восточного склонов Кавказа (рис. 1, *а*). У рек, впадающих в Азовское море (–5...–10 %), ряда рек, относящихся к бассейнам Черного моря, морей Тихого океана ситуация противоположная.

В арктическом секторе максимальных значений относительная величина повышения годового стока достигает у рек северного склона ЕЧС и Якутии (рис. 1а). Причем для второго региона этот рост продолжился в течение всего второго (современного) подпериода – тренды не только положительные, но и статистически значимые: Анабар – 8,6, Оленек – 6,3, Лена – 6,1, Яна и Индигирка – 5–6, Алазея – 17, Колыма – 7,4 %/10 лет. В устья рек Обского севера приток речных вод сократился, но однозначно это утверждать нельзя ввиду низкого качества исходных данных по рекам Надым, Пур и Таз. Наоборот, уменьшение стока Мезени – факт удивительный (с учетом характера тенденций у соседних рек), но подтвержденный вполне надежными данными непрерывных наблюдений на посту Малонисогорская. Водосбор Мезени, как и рек Надым, Пур и Таз, равнинный, сильно заболоченный и залесеный. Но реки Надым, Пур и Таз, кроме того, расположены в зоне распространения ММП. Уменьшение речного стока, возможно, наблюдается и на водосборе Чукотского моря. Но надежных данных подтвердить это предположение нет!

Положительный тренд в многолетнем ходе годового стока арктических рек существует, главным образом, за счет увеличения среднегодовых Q со второй пол. 1980-х гг., у рек крайнего северо-восточного сектора – с середины и второй половины 1990-х гг., на северо-западе – с конца 1970-х гг. (рис. 2). В последние несколько лет на замыкающих створах арктических рек к западу от р. Лены наблюдается противоположная тенденция – стабилизация или даже снижение среднегодовых Q.

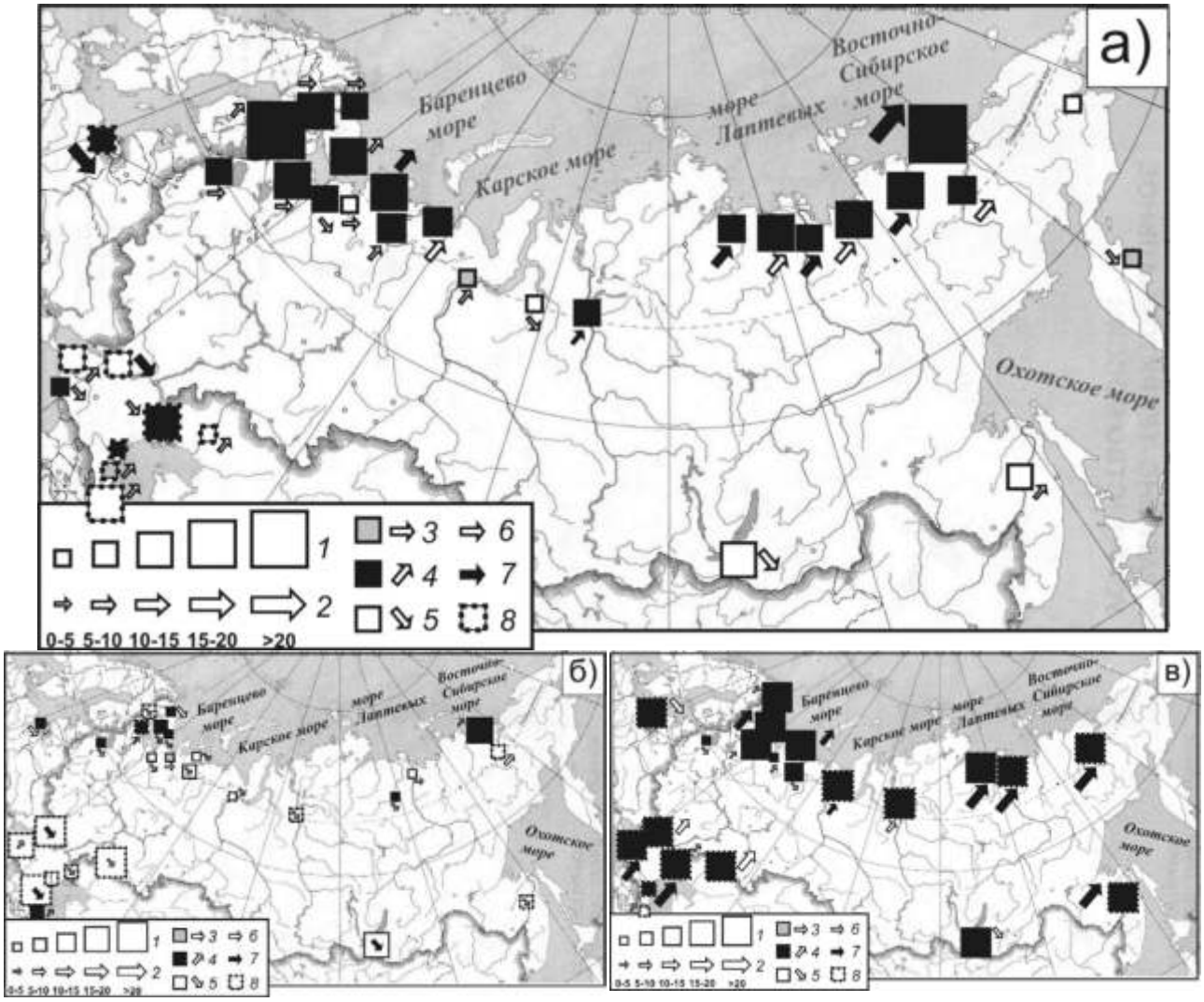


Рис. 1. Тенденции изменения среднегодовых (*а*), максимальных годовых (*б*) и минимальных годовых (*в*) расходов воды на верхних границах устьев основных рек России. *Условные обозначения*: *1* – относительная величина превышения стока в 1976–2015 гг. в сравнении с величиной за 1936–1975 гг. (%); *2* – величина линейного тренда за 1976–2015 гг. (в % величины за 1936–1975 гг. и за 10 лет); *3* – изменения незначительные (– 1 % > *x* < 1 %); *4* – увеличение, 5 – уменьшение; *6* – тренд статистически незначим; *7* – тренд статистически значим; *8* – влияние водохозяйственной деятельности на многолетние изменения характеристики стока. По Черному морю оценки по годовому стоку даются для суммарного притока с побережья Краснодарского Причерноморья

Увеличение годового стока в устьях некоторых основных рек, впадающих в Балтийское, Черное и Каспийское моря неустойчивое, в основном с убывающим трендом в течение всего или второй пол. второго подпериода (рис. 2). Катастрофическая ситуация с водообеспечением складывается в бассейнах рек Кума, Кубань и Дон, степных рек Сев. Кавказа, р. Селенги (рис. 1, *а*, 2). У рек черноморского побережья Кавказа ситуация неоднозначная. С одной стороны есть реки с явным сокращением водных ресурсов (реки Вулан; Псезуапсе: – 3,5, Зап. Дагомыс: –6,7; Сочи: –4,8 % и др.), есть реки с фиксируемым увеличением годового стока (р. Туапсе – 6, р. Шахе – 1,06; р. Хоста – 7,8; р. Мзымта – 3,5 % и др.). В целом, увеличение притока речных вод с побережья Краснодарского Причерноморья составило около 0,7 %.

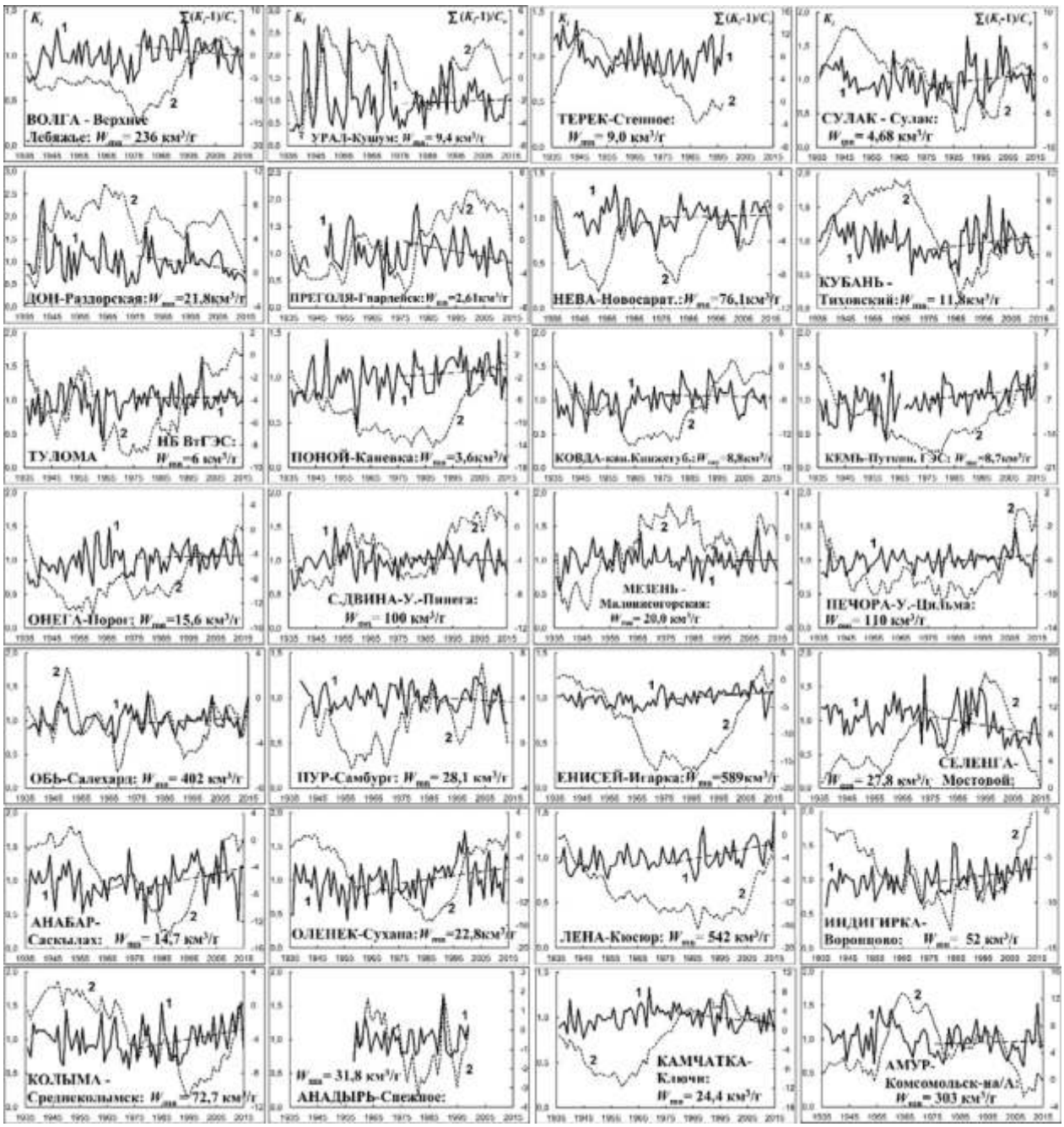


Рис. 2. Изменение годового стока рек за период 1936–2015 гг. *1* – кривая модульных коэффициентов годового стока; *2* – нормированная разностно-интегральная кривая (НРИК) годовых объемов стока воды

Помимо тенденций в многолетнем ходе годового стока, исследован также вопрос цикличности, синфазности и скоррелированности колебаний. Хорошо видно (по НРИК), что многолетние колебания годового стока рек отличает нечеткая цикличность и чередование периодов разной продолжительности и водности (рис. 2). Четкие и не очень продолжительные циклы содержат многолетние колебания годового стока рек Урал, Сулак, Дон, Нева, Сев. Двина, Обь, Селенга, Анабар, Оленек, Анадырь, Амур и др. Продолжительность циклов в среднем 20–25 лет (±5 лет). Выделяются также 3–6, 10 и >30-летние циклы, например у рр. Волга, Мезень, Лена, Камчатка и др. Синфазность (хронологическое совпадение периодов одинаковой водности) в колебаниях стока присуща рекам Дон и Урал, Преголя и Нева, Волга и Сев. Двина, Онега и Сев. Двина, рекам Обского севера, рекам Енисей, Хатанга, Анабар и Оленек, рекам Яна, Индигирка и Колыма. Асинфазность отмечена у рек Сев. Двина и Обь, у рек Мезень и Енисей. Любопытно, что например у близко расположенных рек Туапсе и Зап. Дагомыс колебания стока асинхронны.

Особенности и закономерности современных изменений водного режима рек

Изменения годового стока – лишь отражение трансформации водного режима рек, в целом, и водности гидрологических сезонов, характерных расходов воды, в отдельности. Изменения годовых величин стока сопровождались в основном снижением максимальных расходов воды ($Q_{макс}$) (рис. 1, *б*) и, наоборот, увеличением минимальных за год расходов (рис. 1, *в*). Больше всего $Q_{макс}$ уменьшились в устьях зарегулированных южных рек (р. Урал: –47,7, р. Волга: –7,1, р. Сулак (пост Миатлы): –40, р. Кубань: –19,3, р. Дон: –56,2 %), р. Селенги (–18,4 %). У других рек снижение $Q_{макс}$ хотя и не такое огромное, но тренд в течение второго подпериода убывающий. То есть половодье становится более низким, в какой-то мере более распластанным. Исключением являются реки Лена (+0,8 %/10 лет), Алазея (+2,7 %/10 лет), Колыма (+6,3 %/10 лет), реки Черноморского побережья Кавказа. Детальный анализ изменений максимального стока рек Причерноморья и его последствий дан в работе [19]. Противоположные изменения имеет (за редким исключением) минимальный годовой сток. У зарегулированных рек существенное увеличение $Q_{мин}$ поддерживается как естественными причинами, так и за счет внутригодового перераспределения стока. Мало того, в течение второго подпериода $Q_{мин}$ продолжают у большинства рек расти.

У арктических рек севера ЕЧС, за исключением р. Мезени, и Республики Саха (Якутия), за исключением р. Колымы, увеличение годового стока обеспечено повышением водности во все гидрологические сезоны (рис. 3, 4). Объем стока весенне-летнего половодья вырос в среднем на 1,5–7,5 %. Меньше всего этот показатель у р. Мезени (1 %), больше всего – у небольших незарегулированных рек Кольского п-ова и Карелии (15–20 %). У Оби и Енисея, зарегулированных водохранилищами, снижение стока отмечено за весь период открытого русла, у р. Колымы – лишь в половодье. Диапазон изменений стока в летне-осенний период шире – от 4 % у р. Лены до 40 % у рек Яна и Индигирка. Почти у всех арктических рек динамика зимнего стока существенно положительная. Заметное повышение водности зимней межени отмечено у рек Кольского п-ова и Карелии (до 20–30 % и даже больше), Онеги, Сев. Двины, Печоры, Оби, рек Обского Севера и западной части водосбора моря Лаптевых, но особенно – у рек Енисея, Лены и Колымы (68, 47 и 174 % соответственно), как следствие сезонного регулирования стока этих рек и их крупных притоков водохранилищами [3; 4; 11–13]. Схожая ситуация на зарегулированных реках Кольского п-ова и Карелии.

У остальных рек России закономерности изменений сезонного стока зависят от того – зарегулирована река, или ее главные притоки, крупными водохранилищами, или нет [1; 3; 4; 7; 14; 16; 20 и др.]. Для южных рек, таких как Самур, Сулак, Терек, Кума, Урал, Кубань и Дон, реки Восточного Приазовья, дополнительный фактор – масштабное водопотребление, в том числе в форме межбассейновой переброски стока, с наибольшей величиной в вегетационный сезон года [2; 7; 9; 14–16; 18 и др.]. Тем не менее хорошо видно, что зимний сток почти у всех рек вырос; у зарегулированных водохранилищами рек – в том числе за счет межсезонного искусственного перераспределения (до нескольких десятков % и даже >100 %) (рис. 3, 4). Причем для таких рек как Преголя, реки Краснодарского Причерноморья зимний период – это не межень. Да и характер изменений зимних расходов воды у черноморских рек неодинаковый. Сток весенне-летнего половодья незначительно увеличился у рек, впадающих в Балтийское море, причем на меньшую величину с продвижением на запад. В низовьях и устьях рек водосбора морей Тихого океана увеличения водности половодья не обнаружено. У зарегулированных рек сток искусственно уменьшен вследствие изъятий на заполнение водохранилищ. Летне-осенний сток в большинстве случаев, как у зарегулированных рек, так и с естественным водным режимом, вырос. Главным исключением выступают р. Самур, степные реки Сев. Кавказа, некоторые реки черноморского побережья, особенно в августе, и р. Амур. У последней – это период летне-осеннего половодья, формируемого муссонными дождями, и соответственно активного наполнения водохранилищ.

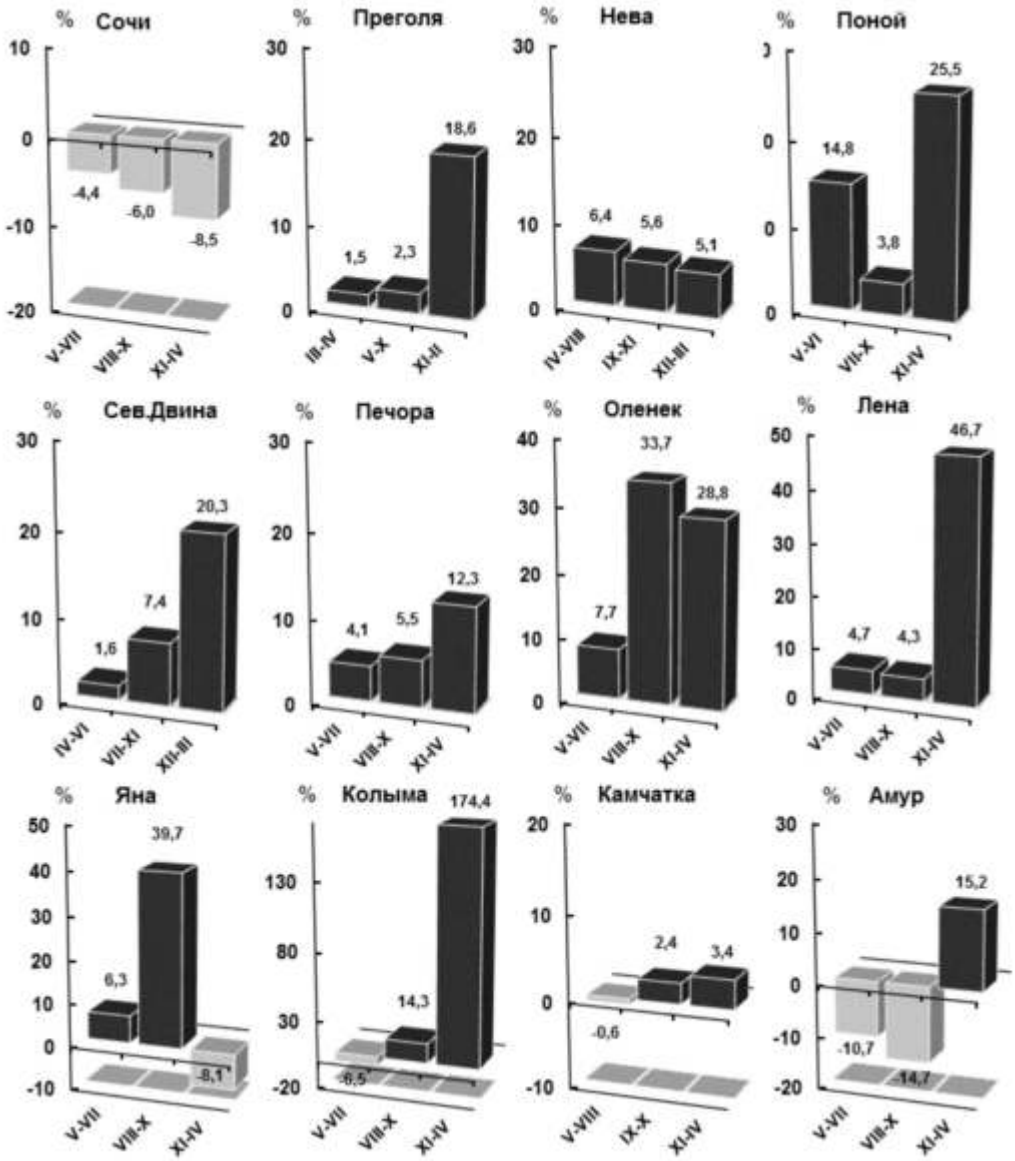


Рис. 3. Изменения величины сезонного стока рек России в 1976–2015 гг. относительно величины стока в 1936–1975 гг. (по данным для замыкающих створов). По оси *X* отложены гидрологические сезоны с указанием входящих в них месяцев. Для рр. Преголя, Нева и Яна оценки получены по неполным данным

Особенности и величина техногенных воздействий на водные ресурсы и режим рек в их устьях

Антропогенные изменения величины и годового режима стока больших рек связаны, главным образом, с освоением гидроэнергетических ресурсов этих рек, их главных притоков, а также с безвозвратным изъятием речных вод (на нужды предприятий, населенных пунктов, с/х и др.) и связанных с реками озерных и подземных вод [1–4; 7–9; 14–16; 18 и др.]. Масштабы и состав этих воздействий, их значимость заметно различаются у южных рек и всех остальных рассматриваемых рек.

1. Водопотребление на водосборах арктических рек почти не влияет на их водные ресурсы в нижнем течении и устьях, их многолетний ход. Многие реки по-прежнему им практически не охвачены. В 2004–2013 гг., т. е. в условиях уже относительно установившихся масштабов водохозяйственной деятельности и после существенного спада в 1990-х гг., из арктических рек на территории России изымалось около 20,6 км^3/год (по материалам [8] и СКИОВО): из рек Мурманской обл. – 1,8 км^3/год, в бассейнах Сев. Двины, Печоры, Оби, Енисея и Лены – соответственно 0,7, 0,4, 13,8 (без учета значительного водозабора на территории Казахстана и Китая), 3 и 0,3 км^3/год. Объемы отведения сточных вод в реки сопоставимы с объемами их изъятия (14,8 км^3/год). Тем не менее, на юге Обь-Иртышского бассейна

(особенно в Казахстане и Китае), в его уральской части, в Норильском промышленном районе, Карелии и на Кольском п-ове хозяйственное использование стока воды близко к максимальным значениям, соответствующим возникновению дефицита пресных и чистых вод. Необходимо отметить, что к настоящему времени объемы водопотребления в бассейнах рек Обского севера существенно выросли в связи с наращиванием добычи нефти и газа, и, наоборот, резко снизились в ряде горнодобывающих районов Якутии, Магаданской обл. и Чукотского АО. Наибольших значений потребление воды и отведение сточных вод достигло во второй пол. 1970-х и в 1980-е гг., что объясняется возросшими хозяйственными потребностями в период экстенсивного развития экономики. В бассейнах Сев. Двины, Оби и Енисея в эти годы изымалось 1,2, 15,7 (без учета данных по Китаю) и 5,12 км^3/год, т. е. немного больше, чем сейчас, или 1,2; 3,9 и 0,9 % нормы их стока на замыкающих створах (рис. 2); из рек Мурманской обл. – 2,3 км^3/год (4,4 %).

2.

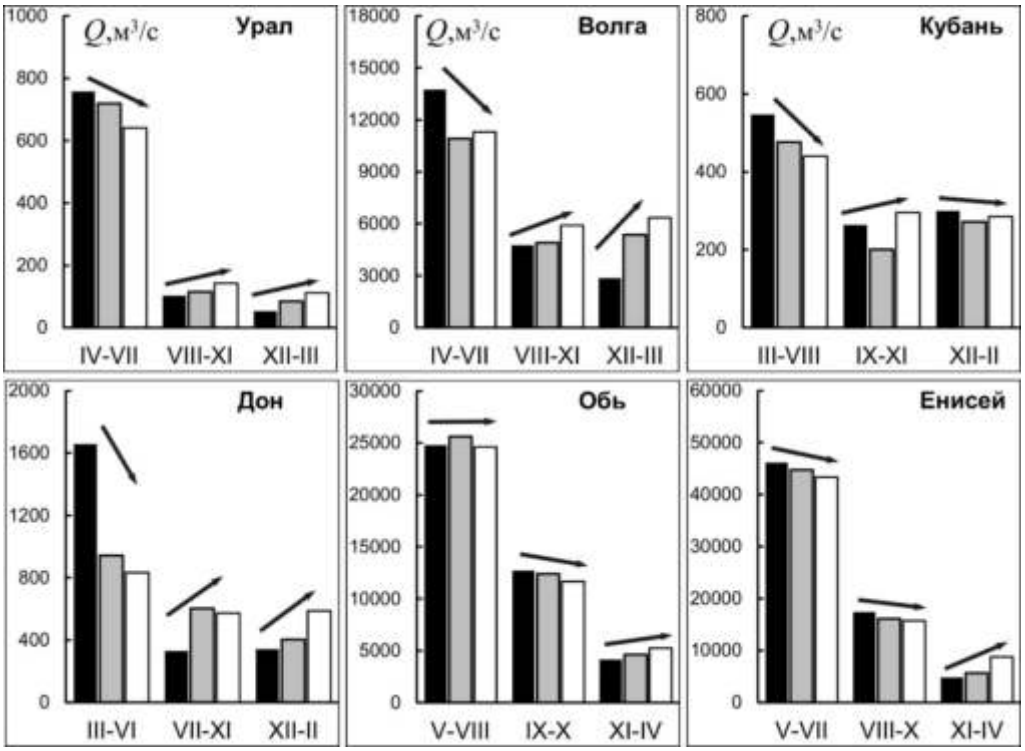


Рис. 4. Величины средних за гидрологические сезоны расходов воды зарегулированных рек в 1936–1955 (черный столбик), 1956–1975 (серый) и 1976–2015 гг. (белый) с указанием входящих в гидрологические сезоны месяцев и тенденции изменений сезонного стока

Второй источник антропогенного воздействия на величину, многолетний ход годового и сезонного стока арктических рек – водохранилища. В настоящее время крупные гидроузлы действуют на многих реках Кольского п-ова и Карелии. В Сибири и на Дальнем Востоке, в пределах арктического водосбора, размещено до 17 крупных гидротехнических сооружений и около 300 меньшего размера. Влияние таких водохранилищ можно разделить на разовое (при их первичном заполнении и водонасыщении почвогрунтов) и ежегодное: межгодовое и сезонное регулирование стока, потери на испарение и др. Больше всего единовременные потери стока у Енисея – почти 50 % водных ресурсов реки [6; 11]. В результате, статистически значимое уменьшение стока пришлось на 1960–1970-е гг. и, особенно, год активного заполнения Братского вдхр. (1964 г.). С ноября 2012 г. функционирует Богучанский гидроузел, заполнение водохранилища которого сопровождалось снижением стока Енисея, начиная с 2012 г., на фоне маловодья в бассейне Селенги [10]. Испарение воды с водохранилищ максимально у рек, имеющих каскады крупных водохранилищ (Енисей и Ангара), на территориях с большой концентрацией водоемов (Карелия и Кольский п-ов), а также в случае их сосредоточения в аридных районах бассейна (Обь и Иртыш). Всего может испаряться

~27,5 км^3 воды в год [6; 8; 11]; однако, дополнительные потери на испарение меньше – 16–75 % общего испарения [6]. Поэтому испарение с водохранилищ никак не влияет на водные ресурсы арктических рек. Многолетнее регулирование стока способно изменять водные ресурсы рек конкретного года, но почти не нарушает норму стока, изменяя лишь его дисперсию; оно слабо заметно в низовьях рек. Предельная величина многолетнего регулирования стока ограничивается полезным объемом водохранилища, но обычно для сибирских арктических рек не превышает 50–60 % этого объема. Наоборот, внутригодовое регулирование существенно преобразует сезонные водные ресурсы арктических рек и прослеживается на расстоянии в сотни километров; может достигать, хотя и в трансформированном виде, устьев Оби, Енисея, Колымы и даже Лены (рис. 3, 4) [11–13]. Дальше всего распространяются изменения стока и режима зимней межени. На Кольском п-ове и в Карелии водохранилища буквально примыкают к морскому побережью и максимально воздействуют на гидрологический режим устьевых областей зарегулированных рек.

2. Бассейны всех основных рек, впадающих в Каспийское море, – территории многовековой и интенсивной хозяйственной деятельности, которая, начиная с середины XX в., заметно влияет на водный режим и сток. Особенно следует выделить сооружение водохранилищ и регулирование ими стока рек, изъятие водозаборными системами речных вод на хозяйственные нужды и межбассейновую переброску, сброс сточных вод, искусственное перераспределение стока в речных дельтах, преобразование поверхности бассейнов и устьев рек [2–4; 8; 9; 16; 18 и др.]. Пик строительства крупных водохранилищ пришелся на 1950–1970-е гг. В настоящее время они есть на всех главных реках, за исключением Терека и Самура. Сезонное регулирование стока водохранилищами изменило, во-первых, водный режим низовьев и устьев Волги, Сулака и в меньшей мере Урала, сделав распределение водного стока в течение года более равномерным. Во-вторых, водохранилища влияют на водные ресурсы каспийских рек. Единовременные и ежегодные потери стока максимальны у Волги, зарегулированной Волжско-Камским каскадом крупных водохранилищ – соответственно около 120 км^3 и 3,5–4 км^3/год [6]. Они постоянно увеличиваются у Сулака и Урала из-за продолжающегося создания водохранилищ и прудов. Частично эти потери компенсируются уменьшением естественных потерь стока в нижних бьефах гидроузлов вследствие сокращения площади заливания поймы и затрат на испарение [17; 18]. Такая полная компенсация наблюдается в низовьях рр. Урал и Сулак. Многолетнее регулирование стока южных рек водохранилищами «сглаживает» многолетний ход среднегодовых расходов воды и снижает их межгодовую изменчивость. Например, уменьшение годовых величин стока в низовьях Волги достигало во втором подпериоде 30 км^3 (в 1990 г.), а увеличение 23 км^3 (в 2005 г.).

Изъятие речных и подземных вод – вторая составляющая мощного антропогенного воздействия на сток и режим каспийских рек. Забор воды в бассейнах рек постоянно увеличивался вплоть до второй пол. 1970-х – начала 1980-х гг. Далее, до 1991 г., несмотря на устойчивый рост промышленного и сельскохозяйственного производства, ежегодный забор воды оставался относительно стабильным. В эти годы активно реализовывались мероприятия по введению мощностей оборотного водоснабжения, борьбе с потерями воды в оросительной сети и на орошаемых землях, внедрению водосберегающих технологий. Часть изъятой воды возвращалась обратно в речную сеть и подземные водоносные горизонты, но худшего качества, порой совсем без очистки. В бассейне Урала антропогенное безвозвратное уменьшение стока (вместе с потерями на испарение с водохранилищ) достигало 2,44 км^3/год (или 24 % его естественных водных ресурсов), в бассейнах Волги – 16,7 (6,6 %), Терека – 6,78 (74 %) [2; 8; 9; 16; 18 и др.]. В Дагестане забираемая из рек Сулак и Самур вода направлялась не только на удовлетворение нужд промышленности, коммунального хозяйства (например, гг. Махачкалы и Баку), орошения и сельскохозяйственного водоснабжения, но и на обводнение небольших рек, пересыхающих летом–осенью. В 1990-х и начале 2000-х гг. объемы забираемой воды стали снижаться. В настоящее время хозяйственная деятельность уменьшает сток Урала на 1,43 км^3/год, в бассейне Волги на 6,2 км^3/год, Терека – приблизительно на 4,9 км^3/год, Сулака и Самура – ориентировочно на 1,2 км^3/год. Также на сток вли-

яют серьезные преобразования поверхности речных водосборов. Тем не менее, климатические факторы изменчивости стока воды доминируют, кроме устья р. Самура, где сложилась катастрофическая ситуация. В результате неконтролируемого забора воды в створе Самурского гидроузла в течение нескольких месяцев вегетационного сезона почти каждого года сток в устье реки практически отсутствовал [2].

3. Режим и величина стока рек Дона и Кубани в их нижнем течении и устьях изменились после осуществления ряда крупных водохозяйственных мероприятий в их бассейнах [1; 3; 7; 15; 18]. Это строительство Цимлянского (1952 г.) и Краснодарского (1973 г.) гидроузлов с водохранилищами, в бассейне Дона – каналов Волго-Донской, Донской магистральный и «Северский Донец – Донбасс», судоходных гидроузлов; в бассейне Кубани – это эксплуатация каналов межбассейновой переброски стока Невинномысского и Большого Ставропольского, обширных оросительных рисовых систем, в том числе в самом устье; во всех бассейнах – многочисленных водозаборных сооружений для водоснабжения предприятий и населенных пунктов, др. В 1980-х гг. они уменьшали сток Дона и Кубани примерно на 7,5 и 3,9 км^3/год, или 28 % их естественных водных ресурсов, в настоящее время – на 4 и 3,6 км^3/год. Тем не менее, несмотря на существенную роль хозяйственной деятельности, определяющими факторами внутривековой и многолетней изменчивости стока воды по-прежнему остаются климатические. Они объясняют значимое увеличение водного стока Кубани с конца 1980-х гг. и современное многолетнее маловодье на реке Дон. Чего нельзя сказать о внутригодовом режиме водного стока. Он полностью изменен гидротехническими сооружениями [1; 7].

4. На сток и водный режим р. Преголя воздействие оказывают водопотребление, в том числе в разные каналы (и наоборот), и регулирование стока небольшими, но многочисленными водохранилищами и прудами; рек Немана и Нарвы – водопотребление и регулирование стока крупными водохранилищами, рек Луги и Невы – только водопотребление. В настоящее время объемы общего водозабора в бассейне р. Невы близки к 1 км^3/год, а антропогенное уменьшение стока – 0,6–0,7 км^3/год [8]. В бассейне Амура на сток и водный режим реки в низовьях и устье оказывает влияние регулирующая деятельность Зейского (с 1975 г.) и Бурейского (с 2003 г.) водохранилищ, водопотребление, на порядок большей величиной на территории Китая. На территории России современный общий водозабор (на нужды предприятий, населенных пунктов, с/х) не превышает в бассейне Амура 1 км^3/год. Бóльшая часть забранной воды сбрасывается обратно, поэтому это воздействие статистически незначимо. Для остальных главных рек морей Тихого океана водопотребление нарастает в горнодобывающих районах Магаданской области и Чукотского АО, но безвозвратные потери для таких предприятий ничтожно малы. Оно достигает максимальных значений на Сахалине и в Приморском крае, где в отдельные годы может возникать даже дефицит. В целом, можно утверждать, как и в отношении арктических рек, рек Балтийского моря, водохозяйственные мероприятия почти никак не влияют на многолетний ход годового стока рек тихоокеанского побережья, но способны нарушать естественный водный режим зарегулированных рек.

Список литературы

1. Водохранилища и их влияние на устья рек / Н. И. Алексеевский, Д. Н. Айбулатов, Д. В. Магрицкий, В. Н. Михайлов // География, общество, окружающая среда. М. : Городец, 2004. Т. 6. С. 375–413.

2. *Алексеевский Н. И.*, Магрицкий Д. В. Сток воды и наносов средних и малых рек Каспийского региона // Устья рек Каспийского региона: история формирования, современные гидролого-морфологические процессы и опасные гидрологические явления. М. : Геос, 2013. С. 99–108.

3. Вода России. Речные бассейны. Екатеринбург : Аква-Пресс, 2000. 536 с.

4. Водные ресурсы России и их использование. СПб. : ГГИ, 2008. 598 с.

5. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М. : Росгидромет, 2014. 1017 с.

6. *Вуглинский В. С.* Водные ресурсы и водный баланс крупных водохранилищ СССР. Л. : Гидрометеоиздат, 1991. 223 с.

7. Гидрология дельты и устьевого взморья Кубани / под ред. В. Н. Михайлова, Д. В. Магрицкого, А. А. Иванова. М. : ГЕОС, 2010. 728 с.

8. Государственный водный кадастр. Ресурсы поверхностных и подземных вод, их использование и качество. Ежегодное издание. Л. ; СПб., 1982–2014.

9. *Демин А. П.* Использование водных ресурсов России: современное состояние и перспективные оценки : автореф. дис. … д-ра геогр. наук. М., 2011. 51 с.

10. *Колтерман П. К.*, Магрицкий Д. В., Фролова Н. Л. Климатически обусловленные и антропогенные изменения режима стока воды крупных арктических рек России / Водные и экологические проблемы, преобразование экосистем в условиях глобального изменения климата : материалы конф. Хабаровск, 2016. С. 45–49.

11. *Магрицкий Д. В.* Антропогенные воздействия на сток рек, впадающих в моря Российской Арктики // Вод. ресурсы. 2008. Т. 35, № 1. С. 3–16.

12. *Магрицкий Д. В.* Естественные и антропогенные изменения гидрологического режима низовьев и устьев рек Восточной Сибири : автореф. дис. … канд. геогр. наук. М. : МГУ, 2001. 25 с.

13. *Магрицкий Д. В.* Факторы и закономерности многолетних изменений стока воды, взвешенных наносов и теплоты Нижней Лены и Вилюя // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. 2015. № 6. С. 85–95.

14. *Магрицкий Д. В.*, Кенжебаева А. Ж. Закономерности, характеристики и причины изменчивости годового и сезонного стока воды рек в бассейне р. Урал // Наука. Техника. Технология : политехн. вестн. 2017. № 3. С. 39–61.

15. *Магрицкий Д. В.*, Иванов А. А. Оценка влияния водохозяйственных мероприятий на режим стока Нижней Кубани // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. 2003. № 5. С. 46–54.

16. *Магрицкий Д. В.*, Полонский В. Ф. Сток воды и наносов основных рек, впадающих в Каспийское море // Устья рек Каспийского региона: история формирования, современные гидролого-морфологические процессы и опасные гидрологические явления. М. : Геос, 2013. С. 72–99.

17. *Пряхина Г. В.* Оценка влияния крупных водохранилищ на сток рек в нижнем бьефе : автореф. дис. … канд. геогр. наук. СПб., 2003. 22 с.

18. *Шикломанов И. А.* Антропогенные изменения водности рек. Л. : Гидрометиздат, 1979. 302 с.

19. Causes and systematics of inundations of the Krasnodar territory on the Russian Black Sea coast / N. I. Alexeevsky, D. V. Magritsky, K. P. Koltermann, I. N. Krylenko, P. A. Toropov // Natural Hazards and Earth System Science. 2016. N 16. P. 1289–1308.

20. The Response of River Mouths to Large_Scale Variations in Sea Level and River Runoff: Case Study of Rivers Flowing into the Caspian Sea / V. N. Mikhailov, D. V. Magritsky, V. I. Kravtsova, M. V. Mikhailova, M. V. Isupova // Water Resources. 2012. Vol. 39, N 1. P. 11–43.

УДК 556.5

Проблемы и перспективы развития службы гидрологических прогнозов на примере Иркутского УГМС

М. О. Матвеев [1,2] (moto-moto3@mail.ru), О. А. Бархатова[2] (barhat@geogr.isu.ru)

[1] ФГБУ «Иркутское УГМС», Иркутск

[2] Иркутский государственный университет, Иркутск

Аннотация. Дана краткая характеристика организации службы гидрологических прогнозов в РФ и Иркутском УГМС. Обозначена значимость гидрологических прогнозов. Рассмотрены перспективы и проблемы выпуска гидрологических прогнозов на примере Иркутского УГМС.

Ключевые слова: гидрологические прогнозы, оперативная деятельность, Иркутское УГМС, эффективность, оправдываемость.

Введение

Человек широко использует реки и озера для получения электроэнергии, для транспорта, искусственного орошения посевов, промышленного и бытового водоснабжения, рыбного хозяйства. Возникла и развилась специальная отрасль инженерного искусства – гидротехника. Накопленные знания о круговороте и превращениях воды в природе, о закономерностях существования рек, озер, морей и океанов, о питании их атмосферными осадками и подземными водами в различных условиях климата, рельефа, растительного и почвенного покрова систематизировались и оформились в особую науку – гидрологию. Как всякая другая наука, гидрология призвана решать ряд практических задач, возникающих в процессе развития и хозяйственной деятельности общества.

Хотя сама по себе проблема заблаговременного предсказания явлений природы, в том числе и явлений на реках, с давних пор привлекала ученых, однако возможность ее научного решения появилась только в сравнительно недавнее время, с тех пор как гидрология из науки

описательной, какой она была на первом этапе своего развития, стала превращаться в науку, способную не только объяснить, но и численно выразить то или другое явление [1].

Сложность гидрологических явлений и трудность постановки точных и детальных наблюдений на обширных пространствах естественных водосборов являются главной причиной того, что гидрология как наука оформилась сравнительно недавно и не располагает пока еще возможностью рассчитывать эти явления с большой точностью. Это наложило свой отпечаток и на современное понимание термина «гидрологический прогноз», и на практические приемы прогнозов. Гидрологический прогноз отнюдь не является точным предвычислением и непременно содержит в себе элемент научно обоснованной вероятности. Тем не менее, современная гидрология может уже с определенной заблаговременностью предвидеть, каким будет половодье на реках в будущую весну, когда произойдет вскрытие или замерзание рек, и ряд других явлений. И хотя точность многих гидрологических прогнозов еще не очень высока, значение этих достижений гидрологии трудно переоценить.

Организация службы гидрологических прогнозов и информации

Гидрометцентр России является ведущим научно-исследовательским и оперативно-методическим учреждением Росгидромета в области гидрометеорологических прогнозов.

История Гидрометцентра России тесно связана с развитием гидрометеорологической науки в стране. В соответствии с Постановлением правительства о создании единой гидрометеорологической службы 1 января 1930 г. было организовано Центральное бюро погоды, преобразованное в 1936 г. в Центральный институт погоды (с 1943 г. – Центральный институт прогнозов) [2]. В 1965 г. Центральный институт прогнозов и Объединенный вычислительный центр Академии наук и Главного управления гидрометслужбы были объединены в одно учреждение – Гидрометеорологический научно-исследовательский центр СССР, с 1992 г. – Гидрометцентр России. Важным событием, во многом определившим судьбу научных исследований в Гидрометцентре России, было присвоение ему постановлением Правительства Российской Федерации № 1167 от 14 октября 1994 г. статуса Государственного научного центра Российской Федерации (ГНЦ РФ) [3]. В январе 2007 г. по решению Правительства Российской Федерации этот статус был сохранен.

Территория России характеризуется большим разнообразием климатических и погодных условий. От них в той или иной степени зависят практически все отрасли экономики. Опасные гидрометеорологические явления, такие как ураганы, шквалы, смерчи, град, цунами, пыльные бури, засухи, ливни, сели, наводнения, внезапные понижения температуры воздуха, снегопады, снежные лавины и другие, влекут за собой человеческие жертвы и наносят значительный материальный ущерб. интенсификация производства и усложнение его производственной инфраструктуры, применение более сложных технологических процессов, освоение новых труднодоступных территорий и т. п. не только не ослабляет, а напротив, приводит к усилению влияния метеорологических факторов на хозяйственную деятельность. Увеличение числа жителей в населенных пунктах и городах, рост населения в прибрежных и подверженных наводнениям районах или других особо уязвимых для опасных явлений зонах приводит к тому, что все большее количество людей подвергается риску воздействий опасных природных явлений. Анализ данных о предотвращенном ущербе для основных отраслей экономики России показывает, что за счет своевременного прогнозирования и использования гидрометеорологической информации в среднем удается уменьшить экономические потери на 40 %. Наиболее подвержены действию погодных факторов сельское хозяйство (59 % от суммарного по экономике ущерба), энергетика, транспорт, строительство и коммунальные услуги (7–9 % от суммарного по экономике ущерба).

В соответствии с Уставом ФГБУ «Гидрометцентр России» осуществляет оперативное информационное обеспечение исполнительных органов государственной власти и основных отраслей экономики, включая транспортный, топливно-энергетический, сельскохозяйственный и оборонный комплексы, а также гидрометеорологическое обеспечение в кризисных ситуациях, связанных с техногенными авариями и стихийными явлениями. Экономический

эффект от использования гидрометеорологических прогнозов многократно превышает затраты на их производство.

В Гидрометцентре России имеются основные компоненты высоких технологий такие как [4]:

– иерархия сложных математических моделей атмосферы, океана и верхнего слоя почвы;

– информационная среда, включающая огромные объемы разнообразных гидрометеорологических данных, поступающих со всего земного шара в режиме реального времени;

– современная система телекоммуникаций и высокопроизводительный вычислительный комплекс.

Работа службы гидрологических прогнозов организована по административно-территориальному принципу. Вся территория страны разделена на отдельные районы, обслуживаемые территориальными управлениями по гидрометеорологии, мониторингу и охране окружающей среды (УГМС). В этих управлениях имеется бюро погоды, в состав которого входит отдел (сектор, группа) гидрологических прогнозов, осуществляющий выпуск оперативных гидрологических прогнозов по водным объектам данной территории.

При крупных гидротехнических стройках и в ряде областных центров создаются гидрометеорологические бюро (ГМБ). В ГМБ есть гидрологические группы, обслуживающие местные заинтересованные организации сведениями о состоянии водных объектов и получаемыми из бюро погоды прогнозами и предупреждениями об опасных явлениях на реках. Некоторые гидрометбюро сами выпускают краткосрочные прогнозы и предупреждения, необходимые заинтересованным структурам. В методическом отношении они подчинены соответствующему бюро погоды.

Гидрометеорологические обсерватории на крупных водохранилищах выполняют такие же функции, что и ГМБ. Правительственные органы, министерства и ведомства получают информацию о текущем режиме водных объектов из Гидрометцентра России.

Краткосрочные гидрологические прогнозы составляются в основном местными оперативными органами, а долгосрочные по основным водным объектам – совместно УГМС и ГМЦ России.

Перспективы службы прогнозов

Основным направлением оперативной деятельности является разработка и выпуск гидрологических прогнозов различной заблаговременности для основных рек и крупных водохранилищ России. Кроме того, ведется постоянная работа по созданию программных комплексов для оперативного прогнозирования развития гидрологической ситуации на водных объектах страны, визуализации текущей гидрометеорологической информации и обеспечения основных потребителей информационно-прогностической продукцией в области оперативной гидрологии. Подготавливаются доклады и справки с информацией о сложившихся и ожидаемых гидрологических условиях по различным бассейнам рек России.

Составление гидрологических прогнозов высокой точности и заблаговременности невозможно без постоянного обновления существующих и разработки новых методик прогнозирования. Это выполняется в рамках научно-исследовательских работ.

Эффективность гидрологических прогнозов за последние десятилетия росла за счет совершенствования методов прогнозирования, появления новых видов прогнозов. Сюда же можно отнести и систематические корректировки долгосрочных прогнозов, позволяющие уменьшить возможный ущерб от неоправдавшихся прогнозов.

Экономический эффект от использования прогнозов наиболее полно проанализирован только для прогнозов притока воды в водохранилища. Оправдываемость прогнозов притока воды в водохранилище за месяц, квартал и половодье на крупных ГЭС за многолетний период составила 80 – 85 %. Рассматривались водохранилища на Европейской территории России, в Сибири, Средней Азии и на Кавказе. Ошибки прогнозирования в 80 % случаев были менее 20 % фактического значения притока. Ошибки климатического прогноза более чем в два раза превышали ошибки методического прогноза [3].

Прогнозы притока воды к гидроэлектростанциям способствуют дополнительной выработке электроэнергии и более правильному планированию ее выработки. Дополнительная выработка электроэнергии Рыбинской ГЭС за 11 маловодных лет составила 340 млн кВт•ч, что равно 4 % всей выработки электроэнергии за эти годы. Для Вилюйской ГЭС дополнительная выработка за счет прогнозов при годовой выработке электроэнергии в 2,3 млрд кВт•ч равна 7 %, или 160 млн кВт•ч) [5].

Увеличение на 1 месяц заблаговременности прогноза весеннее-летнего половодья для Мингечаурского водохранилища повышает в среднем на 25 % выработку электроэнергии. Значительный экономический эффект от использования гидрологических прогнозов отмечается в ряде других отраслей (транспорт, водное и сельское хозяйство и т. д.). К сожалению, в настоящее время нет возможности даже приближенно оценить этот эффект. За последние годы почти полностью исключены случаи внеплановых зимовок речных судов из-за не оправдавшихся прогнозов замерзания рек. Прогнозы ледовых явлений на реках позволяют продлить навигацию на Волге и Каме, Волго-Балтийском водном пути в среднем на 10–15 сут. осенью и 15–20 сут. весной. За это время дополнительно перевозится около 4 млн т грузов. Многолетний опыт свидетельствует об эффективности заблаговременных предупреждений о затоплениях и наводнениях городов и населенных пунктов, расположенных по берегам рек.

Организация службы гидрологических прогнозов в Иркутской области

Иркутское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Иркутское УГМС) входит в состав территориального управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Росгидромета и выполняет ряд следующих наблюдений и обобщений:

– метеорологические;
– гидрологические;
– агрометеорологические;
– наблюдения за загрязнениями окружающей среды;
– климатические.

Обработкой и анализом гидрологических данных занимается отдел гидрологических прогнозов. Основными задачами отдела гидрологических прогнозов являются [6]:

– своевременное и качественное обеспечение органов власти, отраслей экономики, населения информацией о фактическом и прогнозируемом состоянии водных объектов на территории Иркутской области;

– обеспечение работы в области составления гидрологических прогнозов по бассейнам рек Ангара и Лена, водохранилищам и оз. Байкал;

– составление и доведение штормовых предупреждений об опасных и неблагоприятных природных явлениях на водных объектах Иркутской области.

Основными функциями отдела гидрологических прогнозов являются:

– изучение и прогнозирование гидрометеорологического режима водных объектов Иркутской области;

– составление гидрологических прогнозов различной заблаговременности по водным объектам Иркутской области и оз. Байкал:

в период открытого русла производятся краткосрочные прогнозы:

а) уровней воды на левобережных притоках р. Ангара и реках Ленского бассейна с заблаговременностью 1-2-3 дня;

б) минимальных уровней (ежедекадные) воды на р. Лена;

долгосрочные прогнозы:

а) притока (ежемесячно) воды в оз. Байкал и Братское водохранилище

б) вскрытия и очищения оз. Байкал, Братского и Усть-Илимского водохранилищ

в) вскрытия рек

г) максимальных уровней воды в период весеннего половодья

д) появления льда на реках области

е) ледостава на оз. Байкал и водохранилищах

ж) минимальных месячных уровней воды на р. Лена

– составление штормовых предупреждений об опасных и неблагоприятных гидрологических явлениях;

– составление и расчет суточного водного баланса на оз. Байкал и Братском водохранилище, месячного и годового водного баланса;

– своевременное доведение выпускаемой продукции до органов власти всех уровней, органов реагирования (МЧС и др.);

– круглосуточный контроль гидрологической обстановки на водных объектах' и круглосуточное предоставление фактической информации и прогностической продукции органам реагирования в периоды возникновения неблагоприятных и опасных гидрологических явлений;

– обеспечение оперативной информацией аварийноспасательных и восстановительных работ в районах стихийных бедствий, аварий и катастроф;

– подготовка и передача в сетевые оперативнопроизводственные организации информационнопрогностических материалов в соответствии с утвержденными Росгидрометом расписаниями и объемами;

– участие в подготовке плана Информационной работы Иркутского УГМС;

– участие в испытании и внедрении новых и усовершенствованных методов гидрологических прогнозов;

– изучение и уточнение условий возникновения и развития, районов распространения опасных гидрологических явлений на территории Иркутской области;

– выполнение работ по специализированному гидрологическому обеспечению потребителей в соответствии с заключенными договорами, соглашениями;

– подготовка перспективных, годовых и месячных планов, отчетов Иркутского ГМЦ, проектов государственного задания.

Основные виды работы отдела:

ежедневная

– приём информации с гидрологических постов посредством службы АСПД (автоматическая система передачи данных), которая присылается закодированная информация, через программу Митра, а также напрямую через телефон;

– обработка поступившей информации с постов (расшифровка данных производится с помощью кода КН-15, а также КН-24 (снегомерная съёмка);

– передача гидрологической информации потребителям (Гидрологический бюллетень);

эпизодическая

– составление и оценка применимости и эффективности краткосрочных и долгосрочных прогнозов водного и ледового режима.

– В 2019 г. отделу гидрологических прогнозов Иркутского Гидрометцентра исполнится 85 лет [7].

Отдел был организован в 1934 г. и назывался сектором гидрологических прогнозов, в штате было 2 человека, сеть гидрологической информации состояла из 10 гидрологических постов, составлялись прогнозы дат установления ледостава и вскрытия рек Ангары, Иркута, Китоя, Белой. Информация передавалась в советские, партийные органы, речное пароходство, лесное и коммунальное хозяйство.

В 1941 г. Иркутское управление гидрометслужбы, наряду с другими управлениями, было передано в Военное ведомство. В 1942 г. на базе сектора гидропрогнозов было организовано Лено-Ангарское бюро гидрологических прогнозов с передачей прогнозов из соседних управлений (Читинского и Якутского), штат 9 человек. С 1942 по 1946 г. новое название отдела – Второе отделение Иркутского управления гидрометслужбы Забайкальского военного округа. Количество прогнозов по сравнению с 1941 г. увеличилось вдвое.

За гидрологическое обслуживание во время Великой Отечественной войны Президиумом Верховного Совета работники отдела были награждены медалями «За победу над Германией» и «За доблестный труд».

В 1946 г. отдел переименован в сектор речных и морских прогнозов. Сеть информационных станций и постов с каждым годом увеличивается.

С 1950 г. началась эпоха строительства ГЭС: вначале Иркутской, затем Братской, Мамаканской и Усть-Илимской, появилось четыре новых водных объекта – искусственно созданные водохранилища. Объемы работ значительно расширились и по видам, и по количеству прогнозов. За этот период было разработано более 30 новых методик прогнозирования. Информация поступала со 105 информационных гидрологических постов Иркутской области и 35 постов соседних территорий.

В 1974 г. началось оперативное гидрологическое обслуживание трассы БАМ, в связи с чем отдел приступил к составлению прогнозов по рекам Лене и Киренге, в этот период было разработано 5 новых методик прогнозов.

В настоящее время оперативная информация поступает со 111 гидрологических постов и станций, расположенных на территории области и 40 постов соседних территорий. Данные с наблюдательной сети постов поступают по срочным каналам связи с использованием электронной почты, мобильной связи, радиостанций, телефонов, телеграфа.

В работе используется современное техническое оснащение, автоматизированное рабочее место гидропрогнозиста.

В отделе составляются все виды гидрологических прогнозов, долгосрочные водные и ледовые прогнозы имеют оправдываемость 86–95 %, краткосрочные прогнозы уровней воды, предупреждения и оповещения о наводнениях имеют оправдываемость 94–100 %.

Фактической и ожидаемой гидрологической информацией обеспечиваются органы власти, МЧС, отрасли и объекты экономики, население области через средства массовой информации.

По-прежнему, основными обслуживаемыми отраслями являются энергетика, водохозяйственные организации, речной транспорт, железная дорога, автодорожные службы, коммунальное хозяйство, сельское хозяйство.

К заседаниям по регулированию режимов работы ГЭС предоставляются прогнозы и уточнения прогнозов притока воды в оз. Байкал, водохранилища, рекомендации по режиму работы ГЭС.

К заседаниям Комиссий по чрезвычайным ситуациям при администрации области предоставляются доклады о сложившихся и ожидаемых гидрометеорологических условиях весеннего половодья и дождевых паводков [7].

Проблемы и пути решения в организации гидрологических прогнозов Иркутского УГМС

Служба гидрологических прогнозов ФГБУ «Иркутское УГМС» на современном этапе нуждается в модернизации, не смотря на то, что в арсенале уже имеются высокопроизводительные вычислительные комплексы.

В настоящее время большинство используемых методик и прогнозных зависимостей датируются 60–80-ми гг. прошлого столетия. Для повышения точности прогнозов необходимо учитывать современные данные и подходы.

Стоит учесть состояние компьютерной сети в УГМС, в ряде случаев персональные компьютеры маломощные, не позволяющие работать с современным программным обеспечением. Так, например, **технологически система прогнозов должна функционировать с использованием:**

а) геоинформационной системы «ГИС-Метео», компонента «Гидрология»;

б) автоматизированных рабочих мест «АРМ-гидролог-прогнозист».

ГИС-метео (компонента «Гидрология») позволяет выполнять диагноз сложившихся гидрометеорологических условий на реках России и оценивать возможное развитие гидрологических процессов на ближайшие сутки.

АРМ-гидролог-прогнозист – позволяет на основе оперативных данных гидрометеорологических наблюдений выполнять в автоматизированном режиме полный анализ сложив-

шейся ситуации на реках, озерах и водохранилищах России с представлением данных анализа в виде таблиц, графиков, гидрографов.

По запросу может автоматически формироваться набор входных данных в гидрологические модели. Система автоматически формирует и поддерживает оперативные базы данных, формирует архивы. ГИС-метео (компонента «Гидрология») и АРМ-гидролог-прогнозист используют и поддерживают общие базы данных. Производиться автоматический анализ степени опасности стояния уровней воды.

Важнейшей проблемой УГМС на сегодняшний день можно назвать и то, что большое количество информации находится на бумажных носителях, что в свою очередь значительно снижает скорость обработки данных.

Основным путем решения проблем является перенос всей информации на электронные носители, создание серверов для ее хранения и обновление существующей компьютерной сети.

В настоящее время руководство Иркутского УГМС пытается решить особо остро стоящие вопросы по модернизации и усовершенствованию службы

В условиях дефицита финансирования изыскивается возможность закупки более современного оборудования. Проводится перенос имеющихся данных в электронный вид, но этот процесс, в связи со своей трудоемкости достаточно медленный.

Уточнение и модернизация «устаревших» методов и методик позволит в дальнейшем повысить качество и точность прогностической информации и открыть возможность внедрения специализированных программ.

Список литературы

1. *Попов Е. Г.* Гидрологические прогнозы. Л. : Гидрометеоиздат, 1979. 32 с.

2. *Аполлов Б. А.*, Калинин Г. П., Комаров В. Д. Курс гидрологических прогнозов. Л. : Гидрометеоиздат, 1974. 419 с.

3. *Георгиевский Ю. М.*, Шаночкин С. В. Гидрологические прогнозы. СПб. : Изд-во РГГМУ, 2007. 436 с.

4. Гидрометцентр России [Электронный ресурс] // Гидрометцентр России: О погоде – из первых рук: сайт. URL: http://www.meteoinfo.ru (дата обращения: 11.01.2018).

5. *Елисеев Г. В.* Система гидрологического прогнозирования Росгидромета // Материалы Регионального семинара по применению ИКТ для уменьшения рисков, связанных с катастрофами и устойчивого экономического развития : мультимед. презентация.

6. ФГБУ Иркутское УГМС [Электронный ресурс] // ФГБУ Иркутское УГМС: Прогноз погоды: сайт. URL: http://www.irmeteo.ru (дата обращения: 11.01.2018).

7. Наставление по службе прогнозов. Разд. 3. Служба гидрологических прогнозов. Ч. 1: Прогнозы режима вод суши. Л. : Гидрометеоиздат, 1962. 192 с.

УДК 502.53-504.06(712.2.025)

Проблемы содержания водоохранных зон рек

Е. В. Потапова (e.v.potapova.isu@mail.ru)

Иркутский государственный университет, Иркутск

Аннотация. Водоохранная зона и прибрежная защитная полоса водного объекта, относится к озеленённым территориям специального назначения. Их преимущественная функция не только выполнение рекреационных услуг, но регулирование и качество вод поверхностного стока с окружающей территории. Выполнение этих задач возможно лишь при сохранении определённой, частично регламентируемой структуры. Водоохранная зона и защитная прибрежная полоса, должны быть озеленены. Полевые обследования этих территорий (более 10 водных объектов РФ) указывают на несоблюдение водного законодательства и правил содержания.

Ключевые слова: водные объекты, населённые пункты, прибрежные защитные полосы, природоохранные мероприятия, озеленение.

В настоящее время в Мире остро стоит вопрос ухудшения состояния водных ресурсов, вследствие интенсивного антропогенного воздействия. Во многих районах Земли имеются большие трудности в обеспеченности водой надлежащего санитарного качества. Это происходит по причине истощения и загрязнения водных ресурсов, а также вследствие нерационального использования земель водного фонда.

В крупных городах изменения функциональных зон происходят очень быстро – ведется интенсивное строительство, как жилых комплексов и автомагистралей, так и крупных промышленных и торговых объектов, в связи с чем под эксплуатацию вводится все большее число территорий. Из-за различной рыночной стоимости и эксплуатационной ценности городских земель, застраивать периферию становится невыгодно, поэтому под эксплуатацию вводятся свободные земельные участки центра. Не смотря на установленные законодательством ограничения, строительство ведется и в границах водоохранных зон, что отрицательно сказывается на санитарно-гигиеническом состоянии водных объектов. Строительство, размещение промышленности, прокладка автодорог вдоль рек нарушают прибрежные территории, в связи с чем увеличивается загрязнение водных объектов, так как одним из основных причин загрязнения является поверхностный смыв с территории.

Застройка не единственная проблема прибрежных территорий. Из-за недостатка организованных рекреационных зон внутри города, населением широко практикуется стихийный, «дикий» отдых. С такой целью используют и берега рек, как следствие – рекреационная нагрузка на эти территории бывает чрезмерна. Из-за частых наездов автомобилей наблюдается изреживание травянистой и повреждение древесно-кустарниковой растительности. Пребывание людей на берегах рек ведет к образованию несанкционированных мест складирования мусора вблизи водоемов и т. д.

Геоэкологическое состояние водоемов и водотоков зависит во многом от совершения той или иной хозяйственной деятельности не только на акваториях, но и непосредственно на территориях, примыкающих к ним. Водоохранные зоны являются одним из видов защитных экологических зон, создаваемых для предотвращения и предупреждения вредного воздействия хозяйственной и иной деятельности на водные объекты [1]. Важнейшая роль прибрежных территорий состоит в регулировании качества поверхностных вод. Установление водоохранных зон также направлено на предотвращение загрязнения, засорения, заиления и истощения водных объектов, а также сохранения среды обитания объектов животного и растительного мира водоемов.

Водоохранная зона – это территория, которая примыкает к береговой линии (границе) водного объекта и на которой устанавливается специальный режим осуществления хозяйственной и иной деятельности в целях предотвращения загрязнения и истощения вод, а также сохранения среды обитания водных биологических ресурсов и других объектов животного и растительного мира [2].

Водное законодательство состоит из Водного кодекса, других федеральных законов и принимаемых в соответствии с ними законов субъектов Российской Федерации. Нормы, регулирующие водные отношения по использованию и охране водных объектов и содержащиеся в других федеральных законах, законах субъектов Российской Федерации, должны соответствовать Водному кодексу.

Водное законодательство Российской Федерации и соответствующие ему нормативные правовые акты основываются на следующих принципах:

1. Регулирование водных отношений осуществляется исходя из представления о водном объекте как о важнейшей составной части окружающей природной среды, местообитания объектов животного и растительного мира, водных биологических ресурсов, природном ресурсе, используемом человеком для личных и бытовых нужд, осуществления хозяйственной и иной деятельности, и одновременно как об объекте права собственности и иных прав. Это и определяет значимость водных объектов в качестве основы жизни и деятельности человека.

2. Использование водных объектов может осуществляться одним или несколькими водопользователями – комплексное использование водных объектов.

3. Водные объекты могут использоваться для одной или нескольких целей.

4. Использование водных объектов не должно оказывать негативное воздействие на окружающую среду, как следствие – приоритет охраны водных объектов перед их использованием.

5. Приоритетным использованием водных объектов являются цели питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения, перед иными целями их использования. Предоставление водных объектов в пользование для иных целей допускается только при наличии достаточных водных ресурсов местности, региона.

6. Использование водных объектов в местах традиционного проживания коренных малочисленных народов Севера, Сибири и Дальнего Востока Российской Федерации приоритетно для осуществления традиционного природопользования.

7. Решения о предоставлении водных объектов в пользование и договоры водопользования должны быть доступны любому лицу, за исключением информации, отнесенной законодательством Российской Федерации к категории ограниченного доступа.

8. Граждане, общественные объединения имеют право принимать участие в подготовке решений, реализация которых может оказать воздействие на водные объекты при их использовании и охране. Органы государственной власти, органы местного самоуправления, субъекты хозяйственной и иной деятельности обязаны обеспечить возможность такого участия в порядке и в формах, которые установлены законодательством Российской Федерации.

9. Обязательны равные возможности физических лиц, юридических лиц к приобретению права пользования водными объектами, к приобретению в собственность водных объектов, за исключением случаев, предусмотренных водным законодательством.

10. Пользование водными объектами осуществляется за плату, за исключением случаев, установленных законодательством Российской Федерации.

11. При определении платы за пользование водными объектами учитываются расходы водопользователей на мероприятия по охране водных объектов, как экономическое стимулирование охраны водных объектов.

12. Регулирование водных отношений должно осуществляться в границах бассейновых округов в зависимости от особенностей режима водных объектов, их физико-географических, морфометрических и других особенностей; исходя из взаимосвязи водных объектов и гидротехнических сооружений, образующих водохозяйственную систему.

13. Управление, ограничение или запрет использования, сохранение особо охраняемых водных объектов которых устанавливается федеральными законами.

Правительство РФ ещё в 23 ноября 1996 г. утвердило «Положение о водоохранных зонах водных объектов и их прибрежных защитных полосах», действующее на всей территории РФ. Государственный контроль над соблюдением режима использования и охраны природных ресурсов и иной хозяйственной деятельности в водоохранных зонах осуществляется Росприроднадзором и органами исполнительной власти субъектов РФ.

В границах водоохранных зон запрещаются некоторые виды деятельности, за исключением некоторых случаев и при условии соблюдения требований законодательства в области охраны окружающей среды и настоящего Кодекса:

- Размещение кладбищ, скотомогильников, объектов размещения отходов, химических, взрывчатых, токсичных, отравляющих и ядовитых веществ, пунктов захоронения радиоактивных отходов. автозаправочных станций, складов горюче-смазочных материалов, станций технического обслуживания, используемых для технического осмотра и ремонта транспортных средств, осуществление мойки транспортных средств.
- Сброс и использование сточных, в том числе дренажных, вод в целях регулирования плодородия почв.
- Размещение специализированных хранилищ и применение пестицидов и агрохимикатов, осуществление авиационных мер по борьбе с вредными организмами.
- Движение и стоянка транспортных средств.
- Разведка и добыча общераспространенных полезных ископаемых.

За нарушение специального режима осуществления хозяйственной и иной деятельности на прибрежной защитной полосе водного объекта, водоохранной зоны водного объекта ч. 1 ст. 8.42 Кодекса Российской Федерации об административных правонарушениях предусмотрена административная ответственность. Санкция указанной статьи за нарушение режима водоохранной зоны предусматривает наложение административного штрафа на граждан в размере от трех тысяч до четырех тысяч пятисот рублей; на должностных лиц – от восьми тысяч до двенадцати тысяч рублей; на юридических лиц – от двухсот тысяч до четырехсот тысяч рублей [3].

Согласно ч. 4 ст. 65 Водного кодекса РФ, базового документа, определяющего границы и порядок содержания водоохранных зон, ширина последних для рек или ручьев устанавливается в зависимости от их протяженности от истока до устья:

1) до 10 км – в размере 50 м;
2) от 10 до 50 км – в размере 100 м;
3) от 50 км и более – в размере 200 м.

Проектирование водоохранных зон и прибрежных защитных полос осуществляется на основе нормативно-методических документов, утверждаемых Министерством природных ресурсов России по согласованию со специально уполномоченными государственными органами в области охраны окружающей природной среды. Заказчиками по проектированию водоохранных зон и прибрежных защитных полос выступают бассейновые и другие территориальные органы управления использованием и охраной водного фонда Министерства природных ресурсов РФ, а в отношении водохранилищ, предоставленных в обособленное пользование, – водопользователи. Проекты водоохранных зон утверждаются органами исполнительной власти субъектов РФ по представлению бассейновых и других территориальных органов управления по использованию и охране водного фонда. После установления водоохраной зоны и прибрежной полосы, сведения об их границах, в том числе, картографические материалы в течение одного месяца должны быть направлены в Федеральное агентство водных ресурсов для занесения в Государственный водный реестр.

В установленном порядке проекты водоохранных зон проходят согласование и экологическую экспертизу. Общие требования проведения экологической экспертизы проектных материалов определены ст. 35–38 закона № 7-ФЗ «Об охране окружающей природной среды».

Ширина водоохранных зон изученных водных объектов в границах соответствующих населённых пунктов представлена в табл. 1.

В границах водоохранных зон устанавливаются прибрежные защитные полосы, на территориях которых вводятся дополнительные ограничения хозяйственной и иной деятельности. Ширина прибрежной защитной полосы устанавливается в зависимости от уклона берега водного объекта и составляет тридцать метров для обратного или нулевого уклона, сорок метров для уклона до трех градусов и пятьдесят метров для уклона три и более градуса. Водоохранная зона и защитная прибрежная полоса, должны быть озеленены [4].

Таблица 1

Ширина водоохранных зон анализируемых водных объектов

Название объекта	Населённый пункт	Протяженность реки, км	Ширина водоохранной зоны, м
Ангара	Иркутск	1779	200
Иркут	Иркутск	488	200
Ушаковка	Иркутск	77	200
Кая	Иркутск	33	100
Москва	Москва	473	200
Обь	Новосибирск	3650	200
Волга	Нижний Новгород	3531	200
Клязьма	Владимир	686	200
Рпень	Владимир	44	100
Большая Нева	Санкт-Петербург	74	200

Береговые полосы общего пользования входят в границы водоохранных зон и прибрежных защитных полос. Под береговой полосой общего пользования понимается часть земли шириной 20 м, примыкающая непосредственно к морю, которая предназначена для общего использования. Иными словами, любая территория, находящаяся на расстоянии 20 м от воды, является местом общего пользования. Береговые полосы могут беспрепятственно использоваться любым лицом для передвижения и пребывания около них, в том числе для рыбалки и причаливания плавучих средств. Приватизация земельных участков в пределах береговой полосы или иное ограничение свободного доступа к ним запрещается.

Для выявления структуры и состояния, преимущественно прибрежных защитных полос в составе водоохранных зон обследовано 10 рек в границах 6 городов России. Общая протяженность исследованной территории объектов составляет 282 км. Площадь территории – 41 км^2.

Были использованы методы полевых исследований, по авторской методике [5] 2010–2016 гг. Для некоторых общих сведений по водотокам, уточнение длин выделенных участков использованы данные дистанционного зондирования Земли.

В соответствии с авторской методикой в структуре прибрежных полос выделялись следующие категории участков:

1) с искусственным покрытием (более 70 %) – участки заасфальтированные, забетонированные, оформленные камнем, засыпанные обломочным, строительным материалом и т. д.;

2) заболоченный – различной степени заболоченности участки, со специфичной растительностью, прохождение по которым из-за переувлажнения затруднено;

3) недоступный (за ограждением) – находящиеся за ограждением и недоступные для детального обследования участки;

4) оголённый – участки, на которых древесно-кустарниковая растительность отсутствует, а травянистая составляет менее 10 %;

5) растительная группировка, которая могла быть представлена древесными, кустарниковыми, травянистыми и разной доли их смешения растительными сообществами.

В границах г. Иркутска исследованы водоохранные зоны четырех рек, таких как Ангара, Иркут, Ушаковка и Кая. Основным компонентом организации прибрежной территории являются растительные группировки (они составляют 67 %), но из них только 33 % с развитой древесно-кустарниковой растительностью. Отдельно по рекам наибольший процент участков с искусственным покрытием (16 %) наблюдается на берегах р. Ангары, а недоступные участки преобладают вдоль р. Каи (34 %). К основным нарушениям положений Водного кодекса РФ, выявленным в ходе работы, относятся:

1) застройка (в том числе участками частного сектора);
2) размещение автомобильных стоянок;
3) размещение промышленных предприятий;
4) размещение бытовых и производственных отходов.

Для проверки наличия подобных нарушений в других городах по данным дистанционного зондирования Земли были исследованы структура и состояние водоохранных зон шести рек России в пределах городских территорий. Для трех из шести рек (Волга, Нева и Москва) основным компонентом организации прибрежной территории являются участки с искусственным покрытием. Растительные группировки преобладают в структуре водоохранных зон рек Обь, Клязьма и Рпень. Недоступные и оголенные участки присутствуют в различной степени на всех объектах.

В результате исследования были выявлены и подтверждены нарушения режима водоохранных зон рек, схожие с отмеченными при исследовании рек г. Иркутска. К основным из них относятся:

1) возведение ограждений на примыкающих к водным объектам территориях;
2) размещение промышленных предприятий;
3) размещение автомобильных стоянок, в том числе не имеющих твердое покрытие;
4) размещение автозаправочных станций.

Исследование динамики состояния водоохранных зон в период с 2010 по 2017 г. показало, что с течением времени из-за интенсивного строительства эксплуатации подвергается все больше естественных озелененных участков водоохранных зон, предназначенных для защиты водных объектов от загрязнения и обмеления. Наблюдается сокращение доли растительных группировок, в том числе с развитой древесно-кустарниковой растительностью. Увеличивается доля оголенных участков в структуре водоохранных зон рек Иркут и Ушаковка и доля недоступных участков в структуре водоохранной зоны р. Каи. Наряду с этим происходит рост числа участков с искусственным покрытием в структуре водоохранных зон рек Ушаковка и Кая.

Уничтожение озелененных участков вдоль рек и замена их на искусственные объекты может привести к серьезным последствиям, вплоть до понижения уровня воды в реке и пересыхания русла, и соответственно уничтожения среды обитания для гидробионтов. Чтобы этого избежать, необходимо уже сейчас провести пересмотр водного законодательства в России, касающегося водоохранных зон, а именно методики выделения их границ и определения разрешенного режима использования. Ширина водоохранной зоны должна зависеть не только от протяженности реки или площади озера, но и от физико-географических, гидрологических, почвенно-ландшафтных и др. условий, а ограничения режима хозяйственной деятельности должны распространяться и на строительство в границах этих территорий.

Несмотря на то, что в городах и других поселениях при наличии ливневой канализации и набережной, допускается границу прибрежных защитных полос совмещать с парапетом набережной, ни в одном обследованных населённых пунктов, как и большинстве других городов России, ливневая канализация отсутствует или не выведена в систему канализации.

В последние годы, в связи с глобальной экологизацией мировых отраслей хозяйства, появляется необходимость не только в ликвидации последствий загрязнения водных объектов, но и в организации программ по их защите и предотвращению возможных негативных воздействий со стороны человека. Контроль и мониторинг динамики их структуры и состояния необходимы для принятия обоснованных решений по содержанию и сохранению этих объектов.

Список литературы

1. *Большаков А. Г.* Принципы организации прибрежных территорий как экологического каркаса города // Изв. Иркут. гос. ун-та. Сер. Биология. Экология. 2011. Т. 4, № 2. С. 3–11.

2. Водный кодекс Российской Федерации : федер. закон от 3 июня 2006 г. № 74-ФЗ // КонсультантПлюс [Электронный ресурс] : справочная правовая система.

3. Кодекс Российской Федерации об административных правонарушениях : от 30 дек. 2001 г. № 195-ФЗ // КонсультантПлюс [Электронный ресурс] : справочная правовая система.

4. *Злотина Л. В.*, Беркович К. М. О влиянии прибрежной растительности на русловые процессы // География и природные ресурсы. 2012. № 1. С. 31–37.

5. *Потапова Е. В.* Методология анализа состояния озеленённых территорий населённых пунктов : монография. Иркутск : Изд-во ИРНИТУ, 2016. 160 с.

УДК 504.054

Элементы биогеохимического мониторинга озера Байкал: накопление ПАУ в обрастаниях в мелководной части побережья, в районе бывшего БЦБК

С. А. Резников (s.reznikov@gidrohim.com), О. В. Якунина,
А. А. Матвеев, Р. А.Аджиев

Гидрохимический институт, Ростов-на-Дону

Аннотация. Впервые в системе мониторинга на озере Байкал приведены результаты содержаний полициклических ароматических углеводородов в обрастаниях в мелководной части побережья озера Байкал выполненных в 2014 и 2015 гг. Представлена возможность использования макрофитов в качестве тест-объекта при оценке уровня антропогенного воздействия на конкретный участок озера.

Ключевые слова: оз. Байкал, полициклические ароматические углеводороды, макрофиты, обрастания, улотрекс, полигон, бывший БЦБК.

Введение. Проблема изучения накопления полициклических ароматических углеводородов в биоценозе озера Байкал является важнейшим элементом в биогеохимическом мониторинге на озере Байкал вследствие того, что контроль над антропогенным воздействием на природную среду озера через состояние гидробионтов является по своей сути конечным звеном влияния загрязняющих веществ на экосистему озера, а также является главным выводом по всей цепочке комплексных экологических проблем байкальского региона.

Однако биогеохимические наблюдения на оз. Байкал значительно менее представлены в комплексном мониторинге озера, чем геохимические, гидрохимические и гидробиологические и др. показатели качественного состояния природной среды озера. Ранее этой проблеме была просвещена работа по накоплению полиаренов ПАУ в донных биоценозах на авандельте р. Селенга [1].

Известно, что мелководные водоросли имея значительно большую поверхность на единицу биомассы, чем, например, макрозообентос, как следствие, усиливают абсорбцию загрязняющих веществ последними из водной толщи озера. СОЗ поступающие со стороны береговой зоны в конкретный участок озер значительно больше приносят загрязняющих веществ (еще не разбавленных озерной водой) в эти места озера. В дальнейшем происходит естественное прилипание этих веществ к ветвям водорослей и к накоплению СОЗ в талломах водной особи [2]. О значительных потоках поступления органических веществ, их накоплении и преобразовании в донных отложениях в оз. Байкал подробно представлено в монографии [3].

Методика проведения работ. В данной статье основное внимание уделено впервые полученным данным по накоплению полициклических ароматических углеводородов в макрофитах в сравнении с аналогичными исследованиями по накоплению полиаренов макрозообентосе и донных отложениях находящихся в системе наблюдений Росгидромета на озере (в данном работе – только в районе бывшего БЦБК).

Водная фауна, отмечаемая в прибрежной мелководной зоне озера Байкал, характеризуется малым количеством видов и относительно малым объемом биомассы последних, однако, в настоящее время ориентировочно с начала XXI в. среди макрофитов доминирующим видом и широко распространенным сейчас видом в биотопе полигона стала нитчатая водоросль - улотрекс, которая стала образовывать поля из тины зеленого цвета на разнозернистом гравийно-галечном субстрате озера [4].

Для биогеохимических исследований биообразцов макрофитов (обрастаниях) использовался относительно устойчивый полигон в прибрежной мелководной зоне бывшего БЦБК на глубинах до 0,5 м в 1,5 км от западной границы бывшего комбината. Всего в 2014–2015 гг. было отобрано 7 биопроб.

Для химико-аналитических работ отбирались обрастания - улотрекс с гравийно-галечного субстрата. Потом биопроба сушилась, далее использовался для дальнейшей осушки теосульфат натрия. Вес навески достигал 4–5 г сухого вещества.

Разделение компонентов проводилось методом высокоэффективной жидкостной хроматографии на хроматографе «LC-20 Prominence (Shimadzu) с колонками «Envirosep" PP» в режиме градиентного элюирования. Границы относительной суммарной погрешности (для доверительной вероятности Р-0,95) составляют 25 % во всем диапазоне измерений. Интервалы определения массовой концентрации ПАУ составляют от 0,02 до 1000 мкг/кг для разных соединений [1].

Результаты и их обсуждение. Отсутствие данных подобных исследований и понимая важность их для проблем мониторинга природной среды озера в сентябре 2014 г. было проведено изучение содержания суммы ПАУ, канцерогенных аренов (5,6) и бенз(а)пирена (БП) в двух образцах макрофитов (обрастаниях) ведущих прикрепленный образ жизни в прибрежной мелководной зоне бывшего БЦБК на глубинах до 0,5 м в 1,5 км от западной границы бывшего комбината. Доминирующим видом макрофитов в биотопе полигона, как отмечалось ранее, сейчас является нитчатая водоросль улотрекс.

В 2015 г. было отобрано 5 биопроб в пределах мелководной прибрежной территории относительно в том же участка полигона в районе бывшего комбината. В компонентном составе ПАУ в макрозообентосе обнаружены тот же набор полиаренов, что и в донных отложениях и макрозообентосе. Среднее содержание суммы ПАУ составляет 19,1 нг/г с. в (сухого вещества), размах величин 10,3–41,0 нг/г с. в. Среди идентифицированных полиаренов в макрофитах в более высоких концентрациях (выше средней величины для всех аренов, в нг/г с. в.) отмечаются: фенантрен-3,7, флуорантен-3,1, пирен-1,6, хризен-2,0, бенз(е)пирен-1,3, бенз(b) флуорантен-2,0 нг/г с. о. Их содержание от суммы ПАУ составляет 72,0 %. Суммарное содержание канцерогенных аренов было в следующем диапазоне от 3,7 до 25,7нг/ г с. в. среднее 9,2 нг/г с. в., концентрация БП соответственно от 0,2 до 2,3 нг/г с. в., среднее 0,8 нг/г с. в. (табл. 1).

Таблица 1

Содержание ПАУ в обрастаниях на мелководье в районе бывшего БЦБК, в нг/г с. в.
(числитель – диапазон содержаний, знаменатель – среднее значение)

Полиарены	Сентябрь 2014 г.	Сентябрь 2015 г.
Сумма ПАУ	23,2–28,5 25,8	10,3–41,0 19,1
БП	0,5–1,2 0,8	0,2–2,3 0,8
Канцерогены	6,6–12,2 9,4	3,7–25,4 9,2
Кол-во проб	2	5

В 2014 г. содержание ПАУв двух биопробах макрофитов отобранных также на мелководье (относительно на тех же станциях) было более высоким (в нг/ г с. в.): сумма ПАУ 23,2 нг/ г с. в. и 28,5 нг/г с. в. В компонентном составе в более высоких содержаниях обнаружены следующие арены в нг/г с. в.: фенантрен-7,1, флуорантен-4,0, пирен-1,9 хризен-1,6, бенз(b) флуорантен-1,7, коронен-1,8 нг/г с. в. Их содержание от суммы ПАУ составляет 70,1 %. Содержание канцерогенных аренов: 6,6 нг/г с. в. и 12,2 нг/г с. в.; бенз(а)пирена 0,5 нг/г с. в. и 1,2 нг/г с. в. (табл. 1).

Сравнительно узкий интервал содержания ПАУ-бензпирен-канцерогены в макрофитах за время двух определений на полигоне в 2014 и в 2015 гг. можно относительно считать за их фоновое содержание.

Биосинтез ПАУ в растительных тканях водорослей весьма незначителен от сотых долей до единиц нг/г с. в. Более значительное содержание полиаренов в водорослях указывает на их экзогенное поступление [6].

Проведенные биогеохимические наблюдения на озере свидетельствуют, что мелководные макрофиты относительно больше аккумулируют ПАУ, канцерогенные полиарены, бен-

запирен, чем более глубоководный макрозообентос, последнее связано, как с прилипанием загрязняющих веществ к стеблям и листьям водных растений, а также за счет непосредственной фильтрации из водной толщи озера и дальнейшему накоплению их в слоевище водорослей (табл. 2).

Загрязняющие вещества – ПАУ непосредственно поступающие со стороны береговой зоны в конкретный мелководный участок озера, фактически только частично подвергались разбавляющему эффекту за счет гидродинамического (волнового) воздействия в литоральной зоне озера. Большое место в концентрировании полиаренов макрофитами происходит за счет непосредственной фильтрации последних из водной толщи озера.

Таблица 2

Среднее содержание полиаренов: ПАУ, БП и канцерогенные арены в макрозообентосе (МЗБ) и донных отложениях (ДО) в нг/г. с. о. в 2015 г. (в 2014 г. не определялись)

Полигон	Сумма ПАУ МЗБ/ДО	Канцерогены МЗБ/ДО	БП МЗБ/ДО
Бывший БЦБК	13,6/131,6	7,5/79,6	0,4/8,2

При сравнении двух химико-аналитических определений содержания ПАУ в макрофитах в 2014 и в 2015 гг. видно, что повышенные содержания последних в 2014 г. могут быть вызваны рядом объективных обстоятельств. Главное, состоит в следующем – все макрофиты (обрастания) в прибрежной зоне озера по своей сути являются однолетними растениями, поэтому каждый год они могут по-разному накапливать загрязняющие вещества, исходя из существующих источников поступления загрязняющих веществ, так и конкретного места поступления этих веществ в прибрежную часть озера.

Аналогичные исследования были также выполнены в 2017 г. на полигонах в районе бывшего БЦБК и в зоне влияния трассы БАМ на севере озера.

Выводы: По данным [7] уровень концентрирования канцерогенного бенз(а)пирена различными видами растений пресноводных водоемов одного и того водоема в промышленном районе практически одинаков. Поэтому макрофиты в данном случае улотрекс, можно в определенной мере считать достаточно удобным тест-объектом при оценке загрязнения прибрежных водорослей полиаренами. Все макрофиты в литоральной зоне озера являются однолетними растениями, поэтому каждый год они могут по-разному накапливать загрязняющие вещества, тем самым указывая на различный уровень антропогенного воздействия на конкретном участке озера.

Список литературы

1. *Резников С. А.*, Аджиев Р.А. Стойкие органические загрязнители в донных отложениях на авандельте р. Селенга // Вода: химия и экология, 2015. № 9. С. 41.

2. Элементы биогеохимического мониторинга оз. Байкал-накопление ПАУ в донных биоценозах озера / С. А. Резников, О. В. Якунина, А. А. Матвеев, Н. Н. Лукьянова, И. В. Богуш, Р. А. Аджиев // Метеорология и Гидрология. – В печати

3. *Афонина Т. Е.* Потоки органических веществ в оз. Байкал, процессы их накопления и преобразования в донных осадках. Иркутск : Издательство ИрГСХА, 2012. 287 с.

4. *Якунина О. В.* Гидробиологические сообщества // О состоянии озера Байкал и мерах по его охране в 2011 г. : гос. докл. М., 2012. 416 с.

5.*Дейниченко Н. В.* Роль полициклических ароматических углеводородов в экологии водных объектов Азовского бассейна : автореф. дис. … канд. хим. наук. Краснодар, 2000. С. 21.

6. *Ровинский Ф. Я.*, Теплицкая Т. А., Алексеева Т. А. Фоновый мониторинг полициклических ароматических углеводородов. Л. : Гидрометеоиздат, 1988.

7. О распределении канцерогенных углеводородов в пресноводных водоемах / А. П. Ильницкий, Ж. Л. Лембик, Л. Г. Соленова, Л. М. Шабад // Канцерогенные вещества в окружающей среде : тр. расширен. пленума комитета по канцерогенным веществам (ноябрь 1977 г., Обнинск). М. : Гидрометеоиздат, 1979. С. 48–53.

УДК 551.482.6:551.459(571.54)

Распределение стока взвешенных наносов в дельте реки Селенги

А. П. Рогачёв (arogachov25@gmail.com), Е. А. Ильичёва (lenail3663@mail.ru)
Иркутский государственный университет, Иркутск

Аннотация. Представленная работа посвящена анализу распределения стока взвешенных наносов в дельте реки Селенги в период с 2005–2016 гг. Результаты основаны на полевых измерениях и их последующей обработке. Основной целью было визуализировать распределение стока взвешенных наносов в дельте реки Селенги и попытаться выявить связи стока наносов с характерными периодами водности и различными эрозионно-аккумулятивными процессами, имеющими место в протоках дельты.

Ключевые слова: Манзурская свита; дельта реки Селенги; взвешенные наносы; влекомые наносы; эрозионно-аккумулятивные процессы; расход взвешенных наносов; мутность воды; распределение стока наносов.

Байкал является уникальным озером нашей планеты. Это одно из наиболее древних и глубоких водоемов нашей планеты, хранилище более 20 % всех поверхностных пресных вод суши. Существует две гипотезы формирования Байкальской котловины: активного и пассивного рифтогенеза. Основным доказательством активного рифтогенеза Байкальской рифтовой зоны является наличие мощного восходящего потока разогретого мантийного вещества под горными системами Прибайкалья и Северной Монголии и его растекание в юго-восточном направлении. Пассивная концепция рифтогенеза строится на взаимодействии Евразийской и Индостанской континентальных литосферных плит, а также субдукции Тихоокеанской плиты под Евразийскую.

В настоящее время все большее количество специалистов приходит к выводу, что процессы байкальского рифтогенеза не могут быть объяснены с использованием только одного из механизмов. Согласившись с тем, что БРЗ формировалась под влиянием как активного, так и пассивного механизмов, теперь вся тяжесть споров перемещается в плоскость определения ведущей роли и временной последовательности активных и пассивных механизмов.

Одним из путей разрешения поставленной проблемы являются исследования дельты р. Селенги. Множественные геологические исследования (бурения и разрезы) по периметру байкальской котловины показали, что речная сеть на территории водосборного бассейна появилась ещё задолго до появления самого разлома. Самым крупным индикатором наличия древней речной сети является манзурская свита – комплекс отложений, впервые обнаруженный в западном Прибайкалье (долина реки Манзурки, она же Унгура), объединяющий аллювий древней речной системы с современными аллювиальными отложениями реки Лены (мощность отложений, вышедших на поверхность, составляет только 150 м, в глубину ещё на 650–800 м). Точно такие же отложения (по возрасту, литолого-химическому составу, строению и мощности) обнаружены под четвертичными отложениями дельты Селенги.

Из этого следует, что речная сеть существовала ещё до появления Байкальской впадины. Но, встаёт вопрос, откуда она взялась, как появилась речная сеть? Исследования самой дельты может дать ответ на этот вопрос.

Основной целью работы является изучение пространственно-временного распределения стока взвешенных наносов в дельте реки Селенги.

Рельеф и геологическое строение

Район дельты р. Селенги расположен в Восточном Прибайкалье и представлен горными хребтами и межгорными впадинами. К ним относятся хребты: Хамар-Дабан, Морской, Улан-Бургасы, где расположена долина р. Селенги и Кударинская равнина, в пределах которых происходит современная сельскохозяйственная деятельность. Склоны отрогов хребта Хамар-Дабан имеют различную крутизну, местами они плавно переходят в широкие межгорные понижения [3].

Прибрежно-дельтовая равнина представлена Усть-Селенгинской тектонической впадиной. На ее территории расположены два крупнейших в Прибайкалье массива заболочен-

ных территорий: Посольский и Селенгинский дельтовый. Долина р. Селенги имеет высоту более 450 м над у. м., сильно изрезана узкими протоками, старицами и ложбинами. В дельте р. Селенги имеется несколько характерно выраженных террас: пойменная (0,25–1 м), первая (Кабанская) (от 2 м до 4–5 м), вторая (Кударинская) (10–12 м, редко до 18 м) – расположена по левобережью в виде отдельных остатков и третья терраса (от 8–12 до 20 м) представлена остатками невысоких холмов и грив.

Дельта р. Селенги сложена мощной толщей рыхлых отложений четвертичного периода: Q_1 – Манзурская свита (аллювиальные, аллювиально-дельтовые-озёрные отложения общей мощностью до 920 м), Q_2+_3 – аллювиальные отложения (галечник, гравий, пески и супеси в меньшей степени, общей мощностью до 30 м), Q_4 - современные отложения (аллювиальные, аллювиально-болотно-озёрные, озёрные, эоловые, элювиальные и делювиальные общей мощностью до 15 м). Алювиальные отложения русла реки представлены в основном галечниками и гравелистыми песками, поймы – песками, супесями, илами и суглинками [7].

Климат

Территория района по агроклиматическому районированию относится к Байкало-Становой горно-таежной климатической области Байкальской озерно-котловинной агроклиматической провинции, Усть-Селенгинскому дельтовому равнинно-болотному округу, который охватывает побережье Байкала от северной оконечности залива Провал до устья р. Мантурихи, долину р. Селенги до с. Татаурово. Среднегодовая температура воздуха по многолетним данным составляет минус 0,8 °С, что обусловлено не только низкими температурами зимних месяцев, но и их продолжительностью. Среднегодовая сумма осадков не превышает – 440 мм; большая их часть выпадает во второй половине лета и носит ливневый характер, что вызывает на склонах водную эрозию. Динамика насыщения влагой по многолетним наблюдениям следующая: в мае – засушливо, в июне – полузасушливо и умеренно влажно, максимум осадков выпадает в июле – августе [1].

Гидрологический режим

Река Селенга – одна из крупнейших рек, впадающих в озеро Байкал. Общая площадь бассейна реки 447 060 км^2, что составляет 83,4 % водосбора озера. На долю р. Селенги приходится 52,5 % стока воды и около 60 % стока наносов всех притоков Байкала [2].

При впадении в оз. Байкал Селенга образует обширную дельтовую, или приустьевую область современной площадью около 1800 км^2. В приустьевой области суши можно выделить два района: собственно, дельту (или нижнюю дельту) – территорию треугольной формы с многочисленными протоками р. Селенги, с «вершиной» у д. Жилино, и остальную территорию – придельтовый район [8].

В многоводный весенне-летний сезон почти вся дельта затапливается как в результате подъема уровня Байкала, так и водами Селенги.

Входным створом в дельту р. Селенги, на котором ведутся многолетние наблюдения за стоком воды и наносов, следует считать гидрологический створ рзд. Мостовой (127 км от устья), где река протекает единым руслом в коренных породах. Ширина реки в этом створе – 366 м, средняя глубина – 3,3 м, средняя скорость течения - 1,86 м/с. Средний многолетний сток воды составляет 29 км^3, средний многолетний расход воды – 919 м^3/с. Средний многолетний сток наносов (среднее значение притока наносов в дельту) – 2,7 млн т в средний годовой расход наносов 66 кг/с, мутность – 72 г/м^3. Устьевая станция Кабанск в настоящее время фактически закрыта, хотя режимные наблюдения в этом створе важны для изучения гидрологического режима устьевой области р. Селенги.

По характеру водного режима реки бассейна Селенги в пределах рассматриваемого района относятся к типу рек с половодьем и паводками. Основная часть стока проходит в теплый период года. Сток зимней межени незначителен и, как правило, не превышает 2–5 % от годового объема. Основным источником питания рек бассейна являются осадки теплого периода и сток талых вод [4; 6].

Формирование наносов в дельте р. Селенги

Основной особенностью формирования наносов в дельте р. Селенги (как и в любых других дельтах) является структура и характер дельтовых отложений: дельта образуется в области интенсивного накопления наносов, выносимых рекой к своему устью. Согласно Р. С. Чалову и Н. И. Алесеевскому [2], из общего количества литогенного материала, перемещаемого водными потоками, большая его часть не попадает в приёмные бассейны, формируя дельтовые равнины, дельты, устьевые бары и другие аккумулятивные формы. По данным В. Н. Коротаева [6], в их пределах остаётся от 25 % до 50 % стока взвешенных наносов и практически все донные влекомые наносы. Остальная часть стока взвешенных наносов выносится в заливы (эстуарии, лагуны, лиманы) или непосредственно в открытое море.

Распределение стока наносов в дельте р. Селенги в июле 2016 г.

Для того чтобы рассчитать сток наносов необходима информация о гидравлико-морфометрических параметрах русла (скорости течения и глубины на вертикалях, расстояние вертикалей от уреза) и мутности воды (концентрация взвешенных частиц). Все эти параметры в каждой протоке реки были измерены и для расчёта мутности отобраны образцы воды для их дальнейшей фильтрации и расчёта мутности. По полученным данным производились расчёты искомых величин: расход воды Q и расход наносов R. По результатам русловой съёмки построены поперечные профили рек и проток (рис. 1):

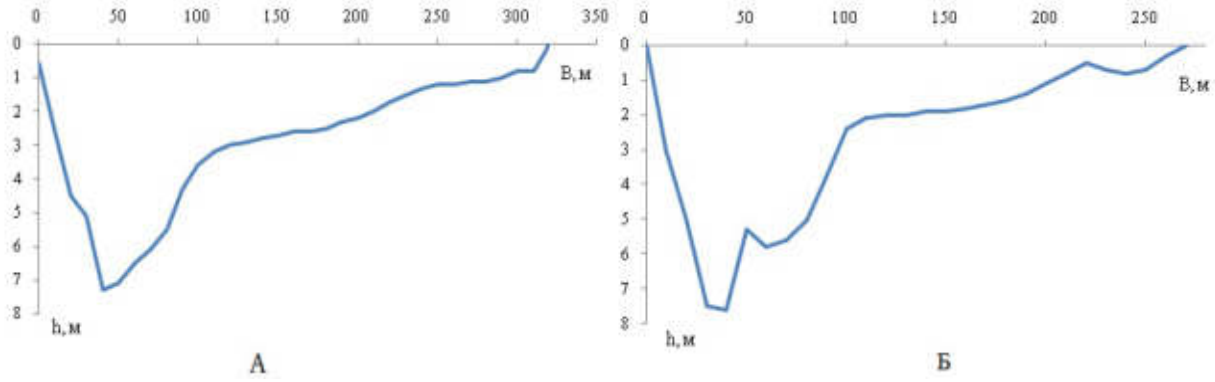


Рис. 1. Поперечный профиль гидроствора «Вершина дельты», 29.07.2016 г. при уровне воды 460,32 м БС (*А*) и Поперечный профиль гидроствора «Вершина дельты», 29.07.2015 г. при уровне воды 458,89 м БС (*Б*)

Сравнивая профили поперечных сечений за разные годы, мы можем оценить баланс эрозионно-аккумулятивных процессов: произошёл ли размыв русла на данном участке или произошла аккумуляция.

Уровень воды в 2016 г., по сравнению с уровнем воды в 2015 г., выше почти на полтора метра. Можно увидеть, что ширина русла реки значительно увеличилась (с 270 м до 319 м), что подтверждает значительное повышение уровня воды. На участке реки (примерно 50 м от левого уреза) имел место размыв дна, что привело к накоплению материала на участке: это подтверждается тем, что при более высоком уровне воды в 2016 г. глубина на этом участке меньше, чем в 2015 г. (с учётом разницы уровней воды в рассматриваемые периоды).

После расчёта, подобным образом, параметров для остальных проток дельты, получаем представление о распределении искомых характеристик по протокам дельты (табл. 1).

Чтобы сделать окончательный вывод о распределении стока наносов и выявить знак эрозионно-аккумулятивного процесса, необходимо рассчитать невязку:

$R_{ВД}$ = 154 кг/с = 100 % $\qquad\qquad$ $\sum R_{ПР}$ = 130 кг/с = X %.

Расход взвешенных наносов на вершине дельты $R_{ВД}$ принимаем за 100 %, необходимо найти сумму расходов взвешенных наносов по всем протокам $R_{ПР}$ в процентах, относительно $R_{ВД}$:

$$X = \frac{\sum R_{ПР}}{R_{ВД}} * 100\ \% = \frac{154}{130} * 100\ \% = 84{,}7\ \% \quad (1)$$

$\sum R_{ПР}$ =84,7 % от $R_{ВД}$, следовательно, невязка составляет 15,3 %, что позволяет определить преобладающий процесс: в июле 2016 г. в дельте реки Селенги аккумуляция наносов преобладала над процессами русловой и береговой эрозии, в дельте происходило накопление материала.

Таблица 1

Расходы воды и взвешенных наносов и мутность в рукавах дельты р. Селенги, 2016 г.

Створ	Q, м³/с	C, кг/м³	R, кг/с
Вершина дельты	1125	0,14	154
Среднеустье	29,5	0,09	0,26
Галутай	31,5	0,09	2,93
Колпинная	30,5	0,07	2,24
Лобановская	33,5	0,11	3,76
Дологан	32,5	0,20	6,44
Манзар	34,5	0,11	3,73
Казанова	298	0,10	30,1
Харауз	36,5	0,10	3,79
Шаманка	37,5	0,10	3,57
Левобережная	333	0,11	35,5

На рис. 2 можно увидеть и наглядно сравнить распределения полученных параметров.

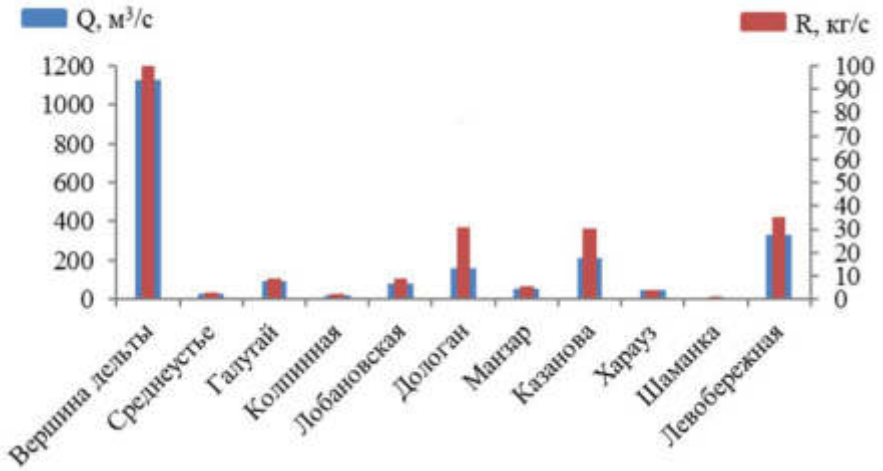


Рис. 2. Диаграмма распределения расходов воды и взвешенных наносов в рукавах дельты р. Селенги, 2016 г. (по данным табл. 1)

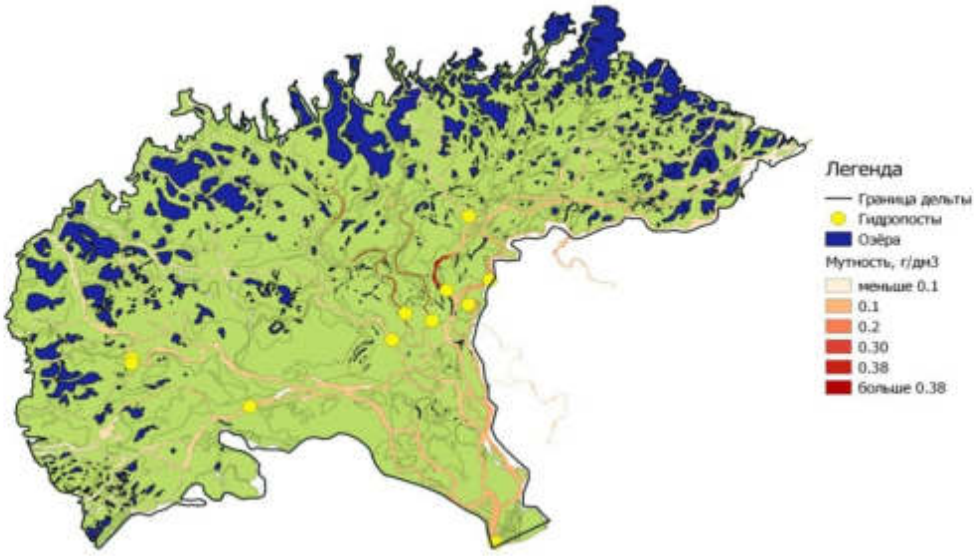


Рис. 3. Карта-схема распределения мутности воды в дельте Селенги в июле 2016 г.

Чтобы увидеть пространственное распространение эрозионно-аккумулятивных процессов, были построены картосхемы по имеющейся информации о мутности воды в годы съемок.

Подобной обработке подвергался материал полевых исследований за каждый год и сводился в общую таблицу (табл. 2).

Таблица 2

Расходы воды и взвешенных наносов и мутность в рукавах дельты р. Селенги

Пост / Год		2005	2006	2007	2011	2012	2013	2014	2015	2016
1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*	*10*	*11*
Вершина дельты	*Q*, м3/с	596	1820	882	1442	2717	1482	1166	706	1125
	C, кг/м3	0,09	0,09	0,04	0,02	0,08	0,04	0,04	0,09	0,14
	R, кг/с	52,4	168	33,0	23,9	222	60,6	48,9	66,9	154
Среднеустье	*Q*, м3/с	20,9	70,2	65,3	60,5	55,6	39,5	10,0	15,7	29,5
	C, кг/м3	0,37	0,16	0,15	0,14	0,12	0,05	0,02	0,08	0,09
	R, кг/с	7,73	11,2	11,2	11,2	6,88	1,88	0,23	1,32	2,59
Галутай	*Q*, м3/с	110	212	110	81	192	146	162	101	95,9
	C, кг/м3	0,14	0,14	0,04	0,08	0,08	0,03	0,03	0,08	0,09
	R, кг/с	15,6	29,8	4,62	6,46	15,5	4,97	4,46	7,86	8,93
Колпинная	*Q*, м3/с	10,9	56,0	50,8	45,5	40,3	19,1	4,00	10,1	20,0
	C, кг/м3	0,06	0,14	0,11	0,09	0,07	0,03	0,04	0,06	0,07
	R, кг/с	0,63	7,58	5,77	4,19	2,83	0,60	0,17	0,61	2,24
Лобановская	*Q*, м3/с	154	339	86	101	188	105	82,0	83,9	79,9
	C, кг/м3	0,14	0,12	0,03	0,08	0,12	0,06	0,04	0,01	0,11
	R, кг/с	21,7	39,3	2,44	7,63	21,66	6,34	3,53	0,72	8,96
Дологан	*Q*, м3/с	228	516	262	196	467	262	253	137	157
	C, кг/м3	0,17	0,04	0,04	0,07	0,09	0,08	0,04	0,03	0,20
	R, кг/с	38,6	20,1	10,6	13,7	43,0	21,7	10,1	4,79	31,1

Пост / Год	*Q*, м3/с	94,0	214	66,6	77,7	148,0	48,1	86,0	19,9	53,7
1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*	*10*	*11*
Манзар	*C*, кг/м3	0,09	0,12	0,05	0,09	0,07	0,03	0,04	0,03	0,11
	R, кг/с	8,73	26,3	3,26	6,75	11,0	1,51	3,19	0,60	5,80
Казанова*	*Q*, м3/с								58,5	212
	C, кг/м3								0,10	0,10
	R, кг/с								5,85	21,2
Харауз	*Q*, м3/с	110	209	103	52	111	128	72,0	36,9	44,9
	C, кг/м3	0,47	0,11	0,03	0,06	0,10	0,06	0,04	0,02	0,10
	R, кг/с	51,6	22,2	3,39	3,12	11,3	7,09	2,70	0,89	3,79
Шаманка	*Q*, м3/с	31,6	42,2	18,7	9,40	23,2	47,6	9,00	6,87	10,8
	C, кг/м3	0,35	0,95	0,05	0,06	0,11	0,05	0,03	0,01	0,10
	R, кг/с	11,1	39,9	0,88	0,58	2,54	2,25	0,23	0,09	1,03
Левобережная	*Q*, м3/с	156	166	187	35	240	437	443	195	333
	C, кг/м3	0,11	0,07	0,04	0,73	0,01	0,06	0,04	0,05	0,11
	R, кг/с	16,4	11,5	6,84	25,3	1,90	26,2	18,9	9,9	35,5

- – Наблюдения на створе Казанова проводятся с 2015 г.

Распределение стока воды, взвешенных наносов и мутности по протокам дельты за период исследований с 2005–2016 гг.

По всем имеющимся данным, для каждого года (табл. 2) построены картосхемы распределения мутности воды и диаграммы распределения расхода воды и расхода взвешенных наносов по протокам дельты. На рисунке 4 представлено ситуация 2015 г.

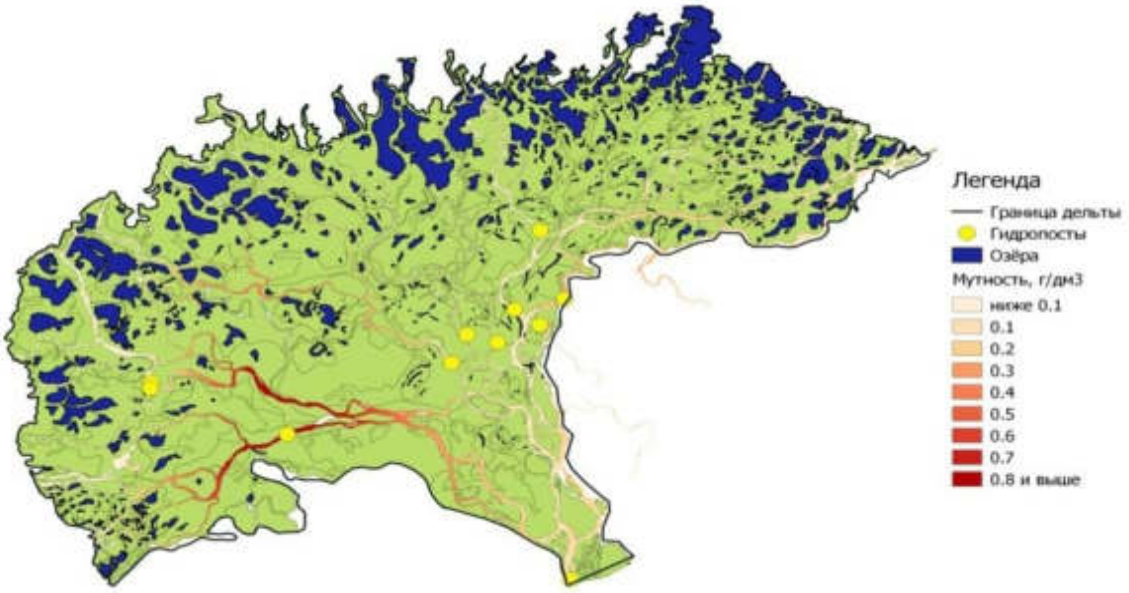


Рис. 4. Картосхема распределения мутности воды в дельте Селенги в июле 2015 г.

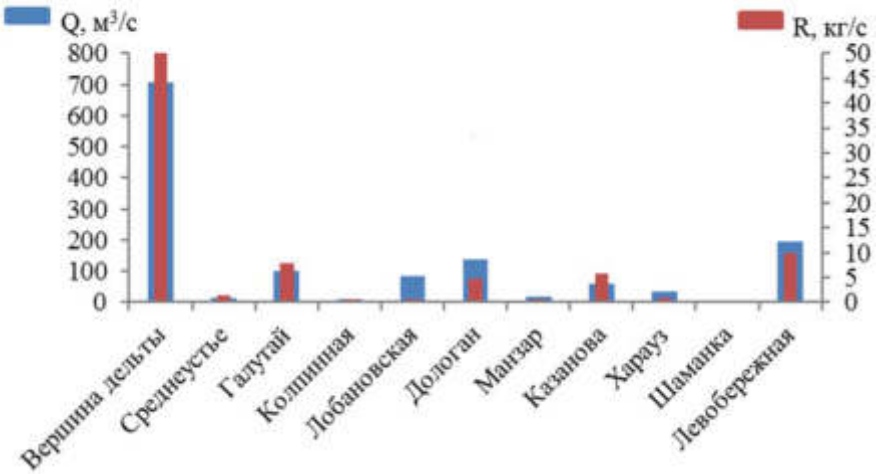


Рис. 5. Диаграмма распределения расходов воды и взвешенных наносов по протокам дельты в июле 2015 г.

Сопоставляя информацию, полученную с карт, с информацией о характере донных отложений проток дельты, была построена карта руслоформирующих наносов (рис. 6).

Зона I характеризуется гравийно-галечным составом наносов с гравелистым и грубозернистоым песком. Встречаются средне- и хорошо окатанные гальки и редко валуны. В вершине дельты и по протоке Левобережная можно встретить эрратические глыбы, переносимые потоком из размываемых им берегоукрепительных насыпных дамб. Скорости потока здесь максимальные и достигают 1–2 м/с. От вершины дельты зона простирается вниз по течению на 15–16 км в Лобановском и Селенгинском секторах. В Среднеустьевском секторе гравийно-галечные отложения встречаются на гидростворах протоки Среднеустье и Колпинная и 1,5–2 км ниже.

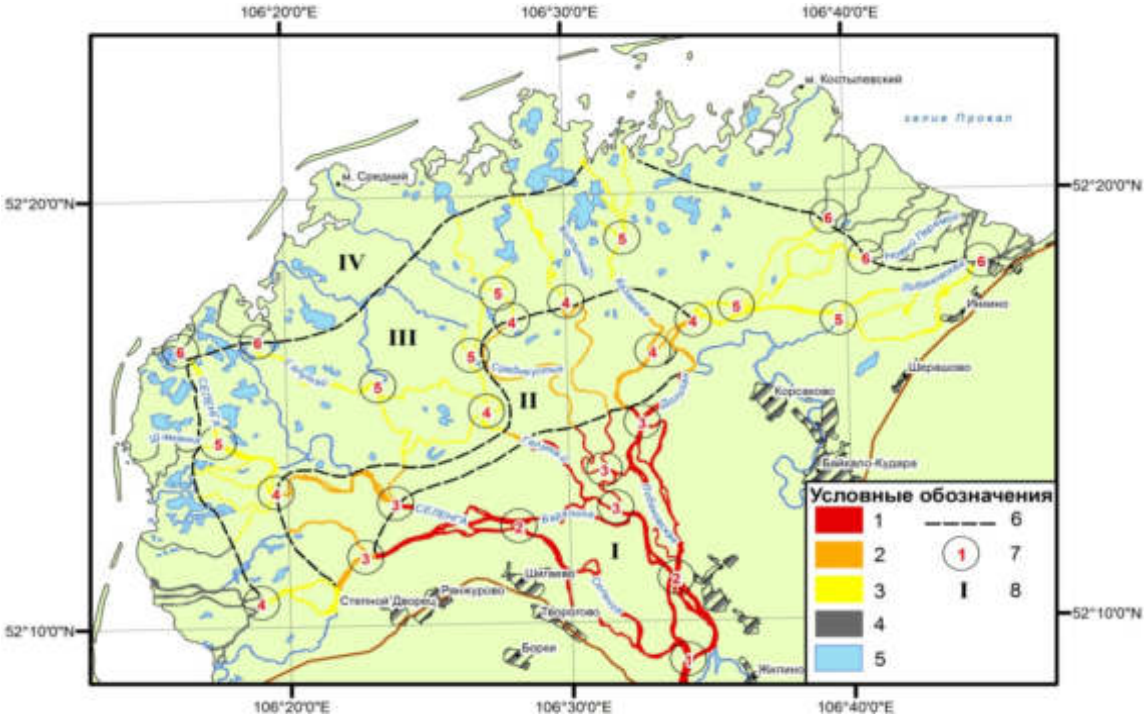


Рис. 6. Карта руслоформирующих наносов дельты реки Селенги [5]

Типы руслоформирующих наносов: *1* – гравийно-галечные до песка гравелистого; *2* – пески крупнозернистые до среднезернистых; *3* – пески мелкозернистые; *4* – пески алевритовые с органическими остатками, ил; *5* – участки проток, неохваченные съемкой; *6* – границы зон распространения руслового аллювия различных типов; *7* – порядок узлов бифуркации; *8* – номер зоны распространения руслового аллювия.

Зона II представлена песком крупнозернистым и среднезернистым, часто в пробах встречаются единичные мелкие гальки и гравий. Зону можно назвать переходной и ее нижняя граница фиксируется по исчезновению гравийной фации, а скорость потока здесь редко превышает 1 м/с.

В руслах проток III и IV зон преобладает песок мелкозернистый. К озерному краю дельты донные осадки представлены песками алевритовыми с органическим остатками, формируются илы. Скорости потока низкие: 0,3 м/с и менее. По протокам перемещаются илы и пылеватые осадки. В многочисленных сорах наблюдается подпор водами Байкала, случаются нагоны. Появление илов в периферийной части дельты происходит за счет выпадения взвеси и накопления биомассы растений. За пределы дельты выносятся самые мелкие фракции [5].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ № 17-29-05052-офи_м.

Список литературы

1. Экологический атлас бассейна озера Байкал / А. Д. Абалаков [и др.]. Иркутск, 2015.145 с.
2. *Алексеевский Н. И.*, Чалов Р. С. Движение наносов и русловые процессы. М., 1997. 166 с.
3. *Беркин Н. С.*, Макаров А. А., Русинек О. Т. Байкаловедение. Иркутск : Изд-во ИГУ, 2009. С. 36–38.
4. *Давыдов Л. К.* Гидрология рек СССР. Л. : Изд-во ЛУ, 1955. Ч. 2. С. 420–422.
5. *Ильичёва Е. А.*, Павлов М. В. Оценка и прогноз трансграничного перемещения вредных (загрязняющих) веществ системе река Селенга – озеро Байкал. М. : Изд-во МГУ, 2016. 79 с.
6. *Коротаев В. Н.* Геоморфология речных дельт. М. : Изд-во МГУ, 1983. 224 с.
7. *Кульчицкий А. С.*, Лосницкий В. И. Геологическая карта СССР – Геологическое строение территории листа N-48-XXXV. М. : Недра, 1965. С. 53–55.
8. Ресурсы поверхностных вод. Т. 16: Ангаро-Енисейский район. Вып. 3: Бассейн оз. Байкал (Забайкалье). Л. : Гидрометеоиздат, 1973. С. 9–12.

УДК 556.31

Мониторинг состояния природных вод и водных объектов в Республике Алтай

В. В. Ролдугин[1] (vladimir.roldugin@mail.ru), В. Е. Кац[1], Н. А. Кочеева[2] (nina_kocheewa@mail.ru), Т. В. Больбух[2] (mamachkat.b@gmail.com), А. К. Баташурова[2] (bigalieva.93@mail.ru)

[1] Алтай-Геомониторинг, с. Майма
[2] Горно-Алтайский госуниверситет, Горно-Алтайск

Аннотация. На основе данных многолетнего мониторинга был проведено сопоставление состава основных ионов природных вод разных источников. Приводятся усреднённые данные за период наблюдения, по каждой группе источников. Рассмотрены данные о составе и строении отложений межгорных котловин. На основании этого и состава подземных вод котловин делается заключение о приоритетном использовании в снабжении населения питьевой водой различных типов источников.

Ключевые слова: горная страна, Алтай, котловины, подземные воды, основные ионы.

Введение

Республика Алтай, расположенная в центре Евразии, характеризуется неравномерностью пространственного распределения поверхностных вод и существенными запасами подземных вод [6]. Оживление экономической деятельности на территории РА вызывает рост потребления чистой воды. В начале 2000-х гг. отмечен рост потребления подземных вод [6]. С 2013 по 2016 г. потребление подземных вод в РА колеблется от 7,5 до 9,6 млн м^3 [7, с. 121], из которых от 3,3 до 3,6 млн м^3 расходуется на питьевые нужды. Увеличение объемов отбора подземных вод чаще всего приводит к снижению их качества [3, с. 48]. Определение понятия «качество воды» в наиболее общем виде приводится в [4, с. 45; 8, с. 95]. В [6; 7] приводятся сведения об особенностях водопотребления в административных районах, о соотношении потребления поверхностных и подземных вод, а также о главных причинах неполного учёта объёмов потребления природных вод. Главной, по мнению авторов этого раздела [7, с. 9–17] является «уход от налога за водопользование» [7, с. 11].

В настоящее время возрастает значение состояния водных объектов в связи с ростом чрезвычайных ситуаций различного генезиса. В этом аспекте важно исследование защищённости источников воды от загрязнения, а также равномерность источников водоснабжения в случае наступления чрезвычайной ситуации.

Чрезвычайная ситуация – это процесс возникновения в течение короткого периода времени экстремальных условий для человека, преодоление которых требует высокого персонального порога (уровня) физической, физиологической, психической, моральной адаптации [13, с. 23].

Проблемами резервирования источников водоснабжения на случай ЧС заняты многие регионы [18]. Рассматривается эта проблема и на законодательном уровне [19]. Например, в ходе заседания Государственной думы 20 марта 2014 г. в п. 3.2. записано рассмотрение вопроса «О подготовке предложений о порядке резервирования имеющихся скважин и колодцев для добычи подземных вод, а также создании новых резервных скважин и водозаборов на случаи стихийных бедствий и других чрезвычайных ситуаций для организации защищенного питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения».

В этой связи цель работы состояла в том, чтобы рассмотреть связь состава подземных и поверхностных вод. Авторы решали задачи: изучение химического состава поверхностных и подземных вод, выявление связи между ними.

Материалы и методы

Информационной базой работы послужили результаты экспедиционных наблюдений 2000–2006 гг. и результаты мониторинговых исследований (с 1992 по 2006 г.), проводимых на базе аккредитованной Республиканской химико-экологической лаборатории (РНИХЭЛ)

(аттестат аккредитации РОСС RU 0001.510063) Горно-Алтайского госуниверситета по заданию Управления Природных ресурсов Министерства Природы РФ по Республике Алтай [10]. В настоящее время число пунктов наблюдения превышает 30 штук. Определялись основные показатели: pH, Eh, общая жёсткость, содержание основных ионов (Ca^{++}, Mg^{++}, K^{+}, Na^{+}, HCO_3^{-}, SO_4^{--}, Cl^{-} и др.). Источниками информации о подземных водах послужили более 50 источников: скважины, родники и колодцы, в которых определялись те же показатели. В сумме было рассмотрено 800 показателей по всей территории Республики Алтай. В ходе эпизодических исследований изучался химический состав снежного покрова и дождевой воды в ближайших окрестностях г. Горно-Алтайска.

Для анализа воды применялись следующие методы. Фотоколориметрический метод анализа, основанный на количественном определении веществ на основании измерений интенсивности окраски или светопоглощения окрашенных соединений в видимой области спектра в соответствии с оптическим законом Бугера – Ламберта – Беера. Минимальная ошибка измерения возможна при использовании значений оптических плотностей в пределах 0,3–0,7. Фотоколориметрические методы, в которых измеряется светопоглощение окрашенных растворов, используют сравнительно несложную аппаратуру и при этом обеспечивают достаточную точность измерений (±1–2 % отн.).

Титриметрический анализ (титрование) – метод количественного/массового анализа, который часто используется в аналитической химии, основанный на измерении объёма раствора реактива точно известной концентрации, расходуемого для реакции с определяемым веществом. Титрование – процесс определения титра исследуемого вещества.

Обсуждение результатов

Республика Алтай полностью расположена в пределах российской части горной системы Алтай (Горный Алтай). В рельефе республики присутствуют высокие хребты, узкие и глубокие речные долины. Широкие межгорные котловины приурочены к участкам расширения речных долин [2; 10].

Гидрографическая сеть республики насчитывает более 20 тыс. водотоков с протяженностью более 60 тысяч километров и около 7 тыс. озер общей площадью более 700 км^2. Наиболее крупные реки – Катунь и Бия, которые, сливаясь, образуют реку Обь. Климат в Республике Алтай умеренно-континентальный, с относительно коротким жарким летом (июнь-август) и продолжительной (ноябрь-март) холодной, местами с очень морозной, зимой [2; 15].



Рис. 1. Экологическое состояние бассейнов рек [1, с. 103]

Опробование поверхностных вод проводилось в различные сезоны года и по всей территории Горного Алтая. Наиболее удаленные и труднодоступные пункты опробования находятся в Юго-Восточном Алтае (плоскогорье Укок), на р. Ташанта (Чуйская котловина) и в Восточном Алтае в среднем течении р. Чулышман [17].

В идеале вода не должна содержать никаких примесей, оказывающих негативное воздействие на здоровье человека. В то же время природные воды должны содержать достаточное количество микроэлементов, участвующих в обменных процессах живых организмов. Однако поверхностные воды часто характеризуются низкими значениями отдельных компонентов и общей минерализации и по ряду показателей не достигают категории высокого качества.

На основании собранных данных проведено сопоставление состава природных вод различных источников (табл. 1).

Таблица 1

Средние значения некоторых показателей химического состава природных вод Республики Алтай (мг/л)

	pH	CO_2	Ж. общ.	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^{+}+Na^{+}	HCO_3^{-}	SO_4^{2-}	Cl^{-}	∑ U
Реки	7,6	22,9	2,6	30,5	12,9	11,7	150,9	18,22	6,8	230,9
Родники	7,7	18,2	3,78	34,8	24,9	26,7	231,4	30,59	14,97	363,3
Скважины	7,7	28,9	4,1	35,1	28,7	21,4	252,99	18,29	15,7	372,2

В целом прослеживается тенденция роста содержания главных ионов от поверхностных вод к водам, вскрытым скважинами (см. табл. 1), т. е. подземным водам. Родники занимают промежуточное положение. Такая тенденция прослеживается не по всем показателям, но отмечается в большинстве случаев. Это даёт основание считать подземные воды более пригодными для водоснабжения населения.

Республика находится в пределах Алтае-Саянской гидрогеологической складчатой области, и сосредоточены в корово-блоково-жильных телах. Они локализуются в водоносных зонах, комплексах, развитых преимущественно в верхней трещиноватой зоне гидрогеологических стратотипов широкого возрастного диапазона (от триасового до протерозойского возраста). Определенный объем подземных вод сосредоточен в блоково-пластовых, пластовых водах артезианских бассейнов межгорных впадин и в водоносных комплексах и горизонтах четвертичных отложений разного генезиса [9, с 181; 14, с. 137].

Высокая степень расчлененности рельефа обуславливает близкое к поверхности залегание месторождений полезных ископаемых. В совокупности с геолого-металлогеническими особенностями территории (сложная тектоника и широкий спектр типов рудопроявлений, а также зоны повышенной естественной радиоактивности) это формирует повышенное содержание в некоторых источниках железа, марганца, свинца, ртути, урана и других микроэлементов.

Считается, что подземные воды, как источник водоснабжения, имеют ряд преимуществ по сравнению с поверхностными водами. Прежде всего, подземные воды более надежно защищены от загрязнения и, как правило, обладают лучшим качеством, меньше подвержены сезонным колебаниям, не требуют дорогостоящих мероприятий по водоочистке. Рост загрязнения поверхностных вод промышленными, сельскохозяйственными и коммунальными стоками во многих странах мира привел к значительному росту использования подземных вод для питьевого водоснабжения. На сегодняшний день около 1/3 мирового населения обеспечиваются водой из подземных источников [16, с. 36].

Для территории исследования участками с хорошей изоляцией подземных вод можно считать межгорные котловины, в которых сформирован чехол рыхлых отложений большой мощности (рис. 2). Большая часть этого чехла сложена существенно глинистыми отложениями, которые теоретически должны снижать риск попадания загрязняющих веществ с поверхности, т. е. защищать от влияния антропогенной деятельности. Эту мысль достаточно хорошо иллюстрируют разрезы, приведённые в [5].



Рис. 2. Литолого-стратиграфическая колонка скв. № 110, [по: 12, с. 130; 5, с. 1129]

Проведённые исследования позволяют получить информацию о строении и физических свойствах пород, слагающих полный разрез впадины [5]. Это весьма важно для нашего исследования, так как позволяет судить о степени защищённости водоносных горизонтов.

Рисунок 2 хорошо иллюстрирует состав отложений Чуйской котловины и мощность. Водоносные горизонты имеют разную глубину и приуроченность к литологическим и возрастным комплексам [11]. Комплекс имеющихся данных о строении Чуйской котловины, составе пород, слагающих рыхлый чехол и складчатое основание позволяет делать заключение о хорошем уровне защищённости подземных вод Чуйского бассейна.

Статья публикуется в рамках научно-исследовательского проекта госзадания Минобрнауки РФ «Хозяйственная и социальная адаптация человека к природно-климатическим условиям Алтайских гор во второй половине голоцена» (№ 33.1971.2017/ПЧ), при поддержке фонда РФФИ, проект № 16-45-040266 р_а.

Список литературы

1. Изучение экологического состояния бассейнов рек Республики Алтай / Р. А. Аванесян, О. В. Журавлева, Н. А. Кочеева, В. А. Семенов, М. Г. Сухова // Апробация. 2014. № 1. С. 99–105.
2. Алтайский край : атлас. В 2 т. Т. 1. М. ; Барнаул, 1978. С. 14–15.
3. Экологическая гидрогеология : учебник / А. П. Белоусов, И. К. Гавич, А. Б. Лисенков, Е. В. Попов. М. : Академкнига, 2006. 397 с.
4. Ведение наблюдений на пунктах наблюдательной сети ЭГП и подземных вод на территории субъекта СФО (Республика Алтай). Майма, 2016. С. 51.
5. Геоэлектрические исследования отложений Чуйской котловины (Горный Алтай) / Е. В. Деев, Н. Н. Неведрова, И. Д. Зольников, Г. Г. Русанов, П. В. Пономарев // Геология и геофизика. 2012. Т. 53, № 1. С. 120–139.
6. Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Республики Алтай в 2013 г. Горно-Алтайск, 2014. 122 с.
7. Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Республики Алтай в 2016 г. Горно-Алтайск, 2017. 127 с.
8. *Занин А. А.*, Белоуова Н. В. Гидрохимический словарь. Л. : Гидрометеоиздат, 1998. 238 с.
9. *Кац В. Е.*, Молоков В. Ю. Водные ресурсы Республики Алтай и их рациональное использование // Проблемы геологии, планетологии, геоэкологии и рационального природопользования : сб. тез. и ст. Всерос. конф. (г. Новочеркасск, 26–28 окт. 2011 г.). Новочеркасск : ЛИК, 2011. С. 179–182.
10. *Кочеева Н. А.*, Больбух Т. В., Авдюшкина Е. И. Пространственная и сезонная изменчивость минерализации речных вод Горного Алтая // Изв. РГО. 2007. Т. 139, вып. 6. С. 57–64.
11. *Кочеева Н. А.*, Драчев С. С. Химический состав подземных вод Чуйского артезианского бассейна и его структурно-фациальные особенности // Вестн. РУДН. Сер. Экология и безопасность жизнедеятельности. 2009. № 4. С. 43–49.
12. *Масленников С. А.* Гидрогеологические условия района Чуйской и Курайской степей (юго-восточная часть Горного Алтая) // Отчет Тархатинской гидрогеологической партии за 1966–1970 гг. Новокузнецк, 1970. 170 с.
13. *Минаков Е. П.*, Чичкова Е. Ф. Мониторинг чрезвычайных ситуаций с использованием дистанционного зондирования Земли // Изв. вузов. Приборостроение. 2009. Т. 52, № 4. С. 23–27.
14. Природные воды Республики Алтай – один из главных поставщиков экосистемных услуг / В. В. Ролдугин [и др.] // Алтай – Россия: через века в будущее : материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, посвящ. 260-летию добровольного вхождения алтайского народа в состав Российского государства и 25-летию образования Республики Алтай. (9–12 июня 2016 г.). Горно-Алтайск : РИО ГАГУ, 2016. Т. 2. С. 134–138.
15. *Сухова М. Г.* Биоклиматические условия жизнедеятельности человека в Алтае-Саянской горной стране. Томск : Изд-во Том. ун-та, 2009. 260 с.
16. Экологические проблемы отработанных химических источников тока / Н. П. Тарасова, В. В. Горбунова, С. А. Иванова, В. А. Зайцев // Безопасность в техносфере. 2011. № 4. С. 34–39.
17. Mineralization of river waters in gorny Altai and its spatial and seasonal variability / Ye. I. Avdyushkina, T. V. Bolbukh, N. A. Kocheeva, O. V. Juravleva, N. A. Yurkova // ИнтерКарто/ИнтерГИС 22. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий в условиях глобальных изменений климата : материалы Междунар. науч. конф. М. : Науч. библ., 2016. Т. 1. С. 355–362.
18. http://www.scienceforum.ru/2013/pdf/7911.pdf.
19. http://www.o8ode.ru/article/onew/Legal-protection-and-use-of-groundwater.

УДК 556.535

ГИС-анализ ландшафтно-гидрологического подобия речных бассейнов

О. А. Серова (OlgaSerova1995@gmail.com), Л. А. Тимофеева (tilarisa@gmail.com), Н. А. Решин (reshinn@yandex.ru)

Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург

Аннотация. Недостаточность данных много лет является основным сдерживающим фактором развития прикладной гидрологии. С внедрением новых технических средств, стало возможно получать и анализировать данные на качественно новом уровне, успешно реализовывать научные идеи, разработка которых традиционными методами была крайне трудоёмкой и неэффективной. К таким идеям можно отнести ландшафтно-гидрологический подход, предложенный в 1930-х гг. В статье представлены результаты исследования, выполненного в рамках данного подхода с использованием цифровой модели рельефа (ЦМР) SRTM и ArcGIS на кафедре гидрологии суши РГГМУ. Исследовано 90 водосборов, расположенных в юго-восточной части бассейна Балтийского моря. Был разработан и опробован алгоритм выделения ладшафтно- и гидрологически однородных групп водосборов. Для кластерного анализа использовались гидрографические характеристики, доступные как в справочных источниках, так и полученные с помощью ArcGIS. Выделены три группы водосборов. Результаты кластеризации интерпретированы и проверены с помощью дискриминантного анализа. Рассмотрена возможность использования гистограмм распределения площадей высотных зон водосборов в качестве средства оценки их ландшафтного подобия. Сформулированы основы методики, которая после необходимого усовершенствования может быть применена для оценки нормы стока с водосборов неизученных малых и средних рек.

Ключевые слова: водосбор, ландшафт, гидрологическая аналогия, цифровая модель рельефа, ArcGIS, кластеризация, сток, морфометрический анализ.

Введение

Аналогия, в широком смысле, это «сходство в каком-нибудь отношении между явлениями, предметами, понятиями» [7].

Аналогии широко применяются как метод познания и обучения, позволяющий двигаться от известного к неизвестному. История развития науки и техники показывает, что аналогия послужила основой для многих научных и технических открытий.

Умозаключение по аналогии выполняет особую роль в общественно-исторических науках, приобретая нередко значение единственно возможного метода исследования. Не располагая достаточным фактическим материалом, историк нередко объясняет малоизвестные факты, события и обстановку путем их уподобления ранее исследованным событиям и фактам из жизни других народов при наличии сходства в уровне развития экономики, культуры, политической организации общества.

Подобно представителям различных отраслей науки, гидрологи, в случае дефицита данных и информации, также обращаются к методу аналогии. Гидрологическая аналогия (метод гидрологической аналогии) – метод приближенной оценки гидрологических характеристик неизученного или слабоизученного водного объекта с помощью данных наблюдений на ином водном объекте со схожими природными условиями [13]. В России более 2,5 млн рек, а регулярные наблюдения проводятся чуть более чем на 3000 гидрологических постах. Следовательно, большинство рек являются неизученными, что привело к широкому распространению метод гидрологической аналогии в гидрологических расчетах.

Под рекой-аналогом понимают реку, обеспеченную данными гидрологических наблюдений и находящуюся в схожих условиях формирования стока с рекой, для которой выполняется расчёт. Для выбора аналога существует ряд рекомендаций, изложенных в СП 33-101-2003 «Определение основных расчетных гидрологических характеристик» [11]:

– однотипность стока реки-аналога и исследуемой реки;

– географическая близость расположения водосборов;

– однородность условий формирования стока, сходство климатических условий, однотипность почв (грунтов) и гидрогеологических условий, близкую степень озёрности, залесённости, заболоченности и распаханности водосборов;

– средние высоты водосборов не должны существенно отличаться, для горных и полугорных районов следует учитывать экспозицию склона и гипсометрию;

– отсутствие факторов, существенно искажающих естественный речной сток (регулирование стока, сбросы воды, изъятие стока на орошение и другие нужды).

Часто результаты расчётов по методу аналогии оказываются ошибочными, так как при недостаточном опыте работы с той или иной территорией подобрать подходящий аналог согласно таким условиям достаточно сложно. По сути, необходимо одновременно, располагая достаточно скудной и не всегда надежной информацией, учесть множество элементов физико-географической среды, для которой характерны зональный и внутризональный типы пространственной изменчивости, определённым образом отражённые в характеристиках гидрологического режима водотоков, расположенных на рассматриваемой территории [5].

Территория, однородная по своему происхождению, истории развития и неделимая по зональным и азональным признакам называется ландшафт [4]. Высказывание известного гидролога П. С. Кузина о том, что «реки являются продуктом развития географического ландшафта», отражает подлинную связь между реками и окружающей средой.

Основоположник ландшафтно-гидрологического метода В. Г. Глушков видел его назначение в установлении причинных связей гидрологических явлений и процессов с географическим ландшафтом и сформулировал его сущность так: «ландшафтно-гидрологический метод устанавливает причинную связь всех вод данного района (за исключением чужих, пришлых) с географическим ландшафтом в целом, включая сюда, кроме климата, геологию, геоморфологию, почвы и растительность, и на основе этой связи устанавливает характеристики свойств самих вод, в то время как географический метод есть установление взаимодействия и связи друг с другом отдельных элементов ландшафта» [1].Таким образом, предметом исследования становятся не только водные объекты, но и их водосборные бассейны. Связь с ландшафтом водосбора является одной из основных особенностей малой реки (площадь водосбора до 2000 км^2).

Для определённого ландшафта характерна некоторая совокупность факторов, под воздействием которых выпадающие на водосбор осадки трансформируются определённым образом. Можно предположить, что подобные ландшафты обладают подобной стокоформирующей способностью. Это предположение помогло обосновать методологию выполненного исследования, цель которого – сформировать группы водосборов, подобных по ландшафтно-гидрологическим признакам.

Объекты и территория исследования

В работе исследовались бассейны малых и средних рек, расположенные на территории северо-восточной Эстонии (р. Кяэпа, р. Вяйке-Эмайыги и др.), восточной Латвии (р. Балда, р. Резекне и др.), северной Беларуси (р. Березовка и др.), Псковской (р. Великая, р. Ловать), Ленинградской (р. Саба и др.) и Тверской (р. Кунья и др.) областей. Все реки берут начало на Восточно-Европейской равнине и принадлежат бассейну Балтийского моря. Выбор территории обусловлен её относительной климатической и геологической однородностью. Для неё характерен достаточно расчленённый рельеф с чередованием холмисто-грядовых пространств, значительная залесённость с преобладанием смешанных лесов, обилие озёр, расположенных в ложбинах и котловинах среди холмов и возвышенностей ледникового происхождения, и малых и средних рек. Средняя высота над уровнем моря – 160 м.

Рельеф преимущественно равнинно-холмистый. Выделяются три типа рельефа: моренные равнины, зандровые равнины и озёрно-ледниковые равнины. Здесь встречаются моренные холмы, озы, камы, котловины, ложбины. Моренные холмы имеют округлую, овальную и лопастную форму, пологие склоны, высоту от 4 до 40 м и в поперечнике до 200–400 м. Холмистые моренные равнины широко распространены на Лужской, Судомской возвышенностях и в южной части, где проходит хорошо выраженный пояс краевых образований валдайского ледника. К югу от Великолукско-Себежского краевого пояса располагаются зандровые равнины. Зандровые равнины имеют обычно плоско-волнистый рельеф и сложены с поверхности разнозернистыми песками. Эти пески отлагались водами, оттекавшими от

края ледника. На территории Псковской и Приильменской низин широко развиты озёрно-ледниковые равнины. Озёрно-ледниковые равнины имеют обычно плоскую или слегка волнистую поверхность, сложены тонкозернистыми и мелкозернистыми песками, суглинками и глинами.

Было исследовано 90 водосборов, расположенных в юго-восточной части бассейна Балтийского моря с площадями от 40 до 20 000 км^2. Выделение групп ландшафтно подобных водосборов – кластеризация – выполнена с учетом следующих характеристик: амплитуда изменения высот поверхности водосбора, средняя высота водосбора, коэффициент озёрности, заболоченности и залесённости.

Массив гидрологических и гидрографических характеристик исследуемых водосборов сформирован с помощью справочников «Ресурсы поверхностных вод СССР» и «Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши» [6; 9; 10]. К сожалению, отсутствуют данные о некоторых характеристиках, кроме того, не следует пренебрегать предварительной проверкой имеющихся данных, ввиду возможных ошибок, о наличии которых сообщается в научной литературе [2].

Методы и инструменты исследования

В ходе работы применялись цифровая модель рельефа (ЦМР) Shuttle Radar Topography Mission SRTM, программы ArcGIS ArcMap 10.0 и STATISTICA.

Цифровая модель рельефа SRTM. ЦМР – это растровое представление непрерывной поверхности, точность которого определяется, в первую очередь, пространственным разрешением (расстояние между точками образца), а также типом данных (целочисленные или с плавающей точкой) и фактической выборкой поверхности при создании оригинальной [15].

Радарная топографическая съёмка SRTM большей части поверхности земного шара, за исключением океанов и самых северных (>60°) и южных широт (>54°). Для получения более точных результатов исследования использовалась ЦМР разрешением в 1 угловую секунду.

В настоящее время любая географическая информация, в том числе и цифровая, может обрабатываться с применением геоинформационных систем (ГИС).

ArcGIS ArcMap 10.0. ArcGIS позволяет построить единую систему управления ресурсами, объединяющую в себе пространственные и другие данные из различных источников, в том числе данные мониторинга, полевых измерений, спутниковую информацию и др.

Используя растр высоты или ЦМР в качестве входных данных, возможно автоматически определить дренажную систему и выявить её характеристики. Таким образом, с помощью группы инструментов «Hydrology», «Spatial Analyst» и «Data Management» была построена сеть водотоков и водоразделы на ЦМР (рис. 1).

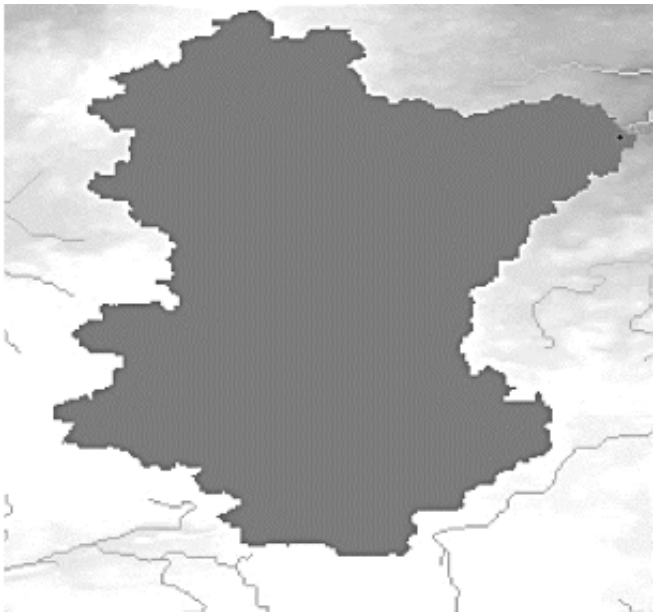


Рис. 1. Пример выделенного водосбора

После построения водораздельных линий всех 90 выбранных водосборов пришлось отказаться от дальнейшей обработки 34 водосборов, так как относительная ошибка определения их площадей (по сравнению с данными из справочной литературы) составляла более 30 %. Для оставшихся 56 водосборов были построены гистограммы распределения площадей высотных зон. Построение водосборов и указанных гистограмм выполнялось практически автоматически в результате реализации алгоритма, написанного на языке Python (разработан Абрамовым Д. в 2017 г.).

Кластерный и дискриминантный анализ

В предварительной кластеризации участвовали 44 водосбора. Анализ проводился в программе Statistica.

В ходе обработки цифровой модели рельефа при построении гистограмм площадей высотных зон были получены такие параметры, как средняя высота водосбора, амплитуда изменения высоты, коэффициент асимметрии гистограмм площадей распределения высотных зон и удельная амплитуда (отношение амплитуды изменения высоты на водосборе к его площади). Коэффициенты озёрности, заболоченности и залесённости взяты из «Основных гидрологических характеристик». Значимыми параметрами (для которых вероятность ошибки была меньше 5 %) оказались средняя высота водосбора, амплитуда изменения высот, коэффициенты озёрности, заболоченности и залесённости. Средние значения этих параметров для каждого из трёх выделенных кластеров приведены в табл. 1.

Анализ в программе Statistica позволил получить классификационные функции для каждого кластера.

Они выглядят следующим образом (пример для первого кластера):

$$\textbf{Кластер 1} = -60{,}9303 + 0{,}5385*\textbf{средняя высота} + 0{,}0297*\textbf{амплитуда} - 1{,}0395*\textbf{озёрность} + 0{,}1023*\textbf{заболоченность} + 0{,}2414*\textbf{залесённость} \quad (1)$$

Каждый из 12 контрольных водосборов был отнесён к кластеру с максимальным значением классификационной функции. Затем выполнялась кластеризация объединённой выборки, содержащей 56 водосборов (44 использованных ранее и 12 контрольных). Состав ранее сформированных кластеров не изменился, а 11 из 12 сформированных гипотез подтвердились.

Анализ результатов

При кластерной обработке были достаточно хорошо идентифицированы водосборы возвышенностей и низменностей (табл. 1). В целом результаты можно интерпретировать следующим образом:

– в третьем кластере водосборы низменные, со значительной заболоченностью и залесённостью;

– водосборы второго кластера имеют значительную среднюю высоту, амплитуду, залесённость и незначительную озёрность;

– водосборы первого кластера, при близкой ко второму кластеру средней высоте, имеют высокую озёрность, но несущественную залесённость.

Таблица 1

Средние значения характеристик водосборов

Кластер	Средняя высота, м	Амплитуда, м	Озёрность, %	Заболоченность, %	Залесённость, %	Модуль стока, л/(с*км²)
1	191	112	7	5	19	5,53
2	200	186	3	3	44	7,97
3	114	116	2	10	49	6,44

В распределении водосборов отдельных кластеров прослеживается ожидаемая широтная зональность (рис. 2). Водосборы одного и того же кластера могут находиться достаточно далеко друг от друга. Разнообразие кластерной принадлежности в центральной части территории исследования можно объяснить тем, что здесь наблюдается смена ландшафта с бореально атлантического на бореально умеренно-континентальный, согласно ландшафтной карте СССР 1980 (Е. С. Гудилин).

Показано, что относящиеся к разным кластерам реки с одинаковой площадью водосбора (например, 500 км^2) имеют различный средний расход воды (табл. 2), а неучёт ландшафтного деления дает несколько другой результат с ошибкой до 10 %.

Таблица 2

Оценка среднегодового расхода воды для площади водосбора 500 км^2 для различных кластеров

Кластер	Расход (м³/с) при F = 500 км²
1	3,15
2	3,85
3	3,35
Без учета кластеризации	3,50

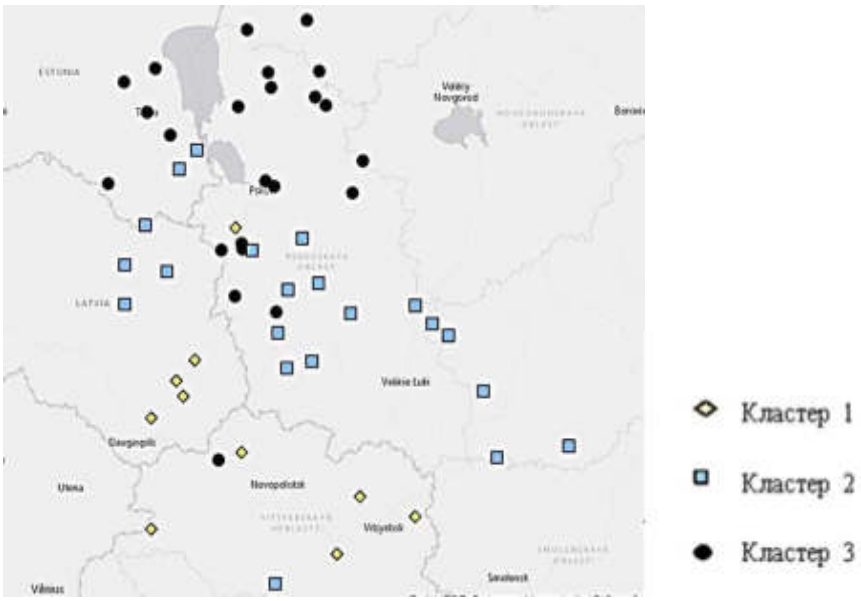


Рис. 2. Распределение водосборов по территории

Заметное различие в значениях среднемноголетних модулей стока для каждого кластера можно объяснить следующим образом. Водосборы первого кластера расположены преимущественно в южной части территории и модуль стока с них наименьший, что может быть обусловлено низкой естественной зарегулированностью стока, незначительной озёрностью и тем, что район сложен песчано-волунистыми грунтами, за счет чего высока инфильтрация. Кроме того, здесь самая значительная всхолмленность (удельная амплитуда изменения высоты водосбора), следовательно, высока вероятность наличия местных понижений, аккумулирующих осадки, которые испаряются, уменьшая сток. Реки второго кластера имеют максимальный модуль стока, что вполне логично: большие средние высоты – большее количество осадков. Также более крупные реки этого кластера полнее дренируют подземные воды. Реки третьего кластера, даже небольшие, также хорошо дренируют подземные воды, так как на низменностях они расположены ближе к поверхности.

Морфометрический анализ

Высота рельефа какой-либо территории во многих работах характеризуется лишь тремя отметками: средней, максимальной и минимальной. Но еще Лаппаран, А. А. Тилло и Коссина описывали рельеф всей совокупностью отметок, составляя таблицы распределения высоты и гипсографические кривые континентов. Первую попытку найти математическое выражение таких кривых, применив для этого кривые Пирсона, сделал А. С. Чеботарев. Функцию высоты важно знать не только для континентов или отдельных стран, но и для сравнительно небольших участков. С. А. Николаев констатирует близость эмпирического распределения высоты четырех участков площадью по 900 км^2 к нормальному распределению и считает это общим «законом вертикального расчленения рельефа Стралер установил нормальный закон распределения для углов наклона рельефа. Что же касается высоты рельефа, то Стралер исследует её связь с площадью речного бассейна в виде сложной гипсометрической функции. Гхош и Пандей в согласии со Стралером распределение высоты рельефа характеризуют эмпирическими формулами, не прибегая к средствам математической статистики. Таннер обращает внимание на то, что кроме нормального распределения высоты часто встречается и анормальное, отвечающее некоторым типам кривых Пирсона [14].

Морфометрический анализ в настоящее время приобретает большое значение не только в геоморфологии, интерес к форме изучаемых объектов можно наблюдать во многих науках и прежде всего – в науках о Земле. Такой повышенный интерес к форме, по-видимому, объясняется тем, что внешний вид любого природного объекта и его сущность связаны между собой [12].

Демонстрация распределения площадей бассейна в высотных интервалах (в виде графиков и диаграмм) – классический метод отображения морфометрических характеристик речного бассейна. Гипсометрическая кривая и гистограммы позволяют выявлять закономерности строения поверхности, в том числе такое свойство, как ярусность рельефа [8].

В статье Шарапова И. П. «Функции распределения высоты рельефа» [14] показывается разнообразие видов распределения высоты рельефа, являющееся следствием многообразия условий рельефообразования (исследовались участки размером 40×40 км). Автор делает следующие выводы:

– правоасимметричное распределение преобладает на равнинах с моренными валами и в низкогорных районах;

– левоасимметричное мономодальное распределение доминирует там, где эрозионные процессы протекают особенно энергично, например, в сильно размытых нагорьях, на овражистых равнинах, на закарстованных плоскогорьях;

– бимодальное, тримодальное и вообще полимодальное распределение характеризует ступенчатый рельеф или свидетельствует о сочетании разных типов рельефа.

– антимодальное (с второстепенной вершиной) распределение свойственно равнинам, на которых стоят террасированные столовые горы с вершинами, расположенными на общем уровне [14].

Выполнить анализ полученных гистограмм оказалось непросто. В первую очередь было рассмотрено общее соответствие полученных гистограмм ранее приведённым положениям. У большинства гистограмм наблюдается правая асимметрия, что, в принципе, ожидаемо для Прибалтийского региона. Существующее предположение об изменении асимметрии гистограмм с увеличением площади территории подтверждается на примере р. Великая: асимметрия смещается вправо при увеличении водосбора, от верховья к низовью реки (рис. 3).

В кластер могут входить водосборы с разной площадью и распределением площадей высотных зон. Принимая во внимание то, что закон распределения высотных зон изменяется с изменением рассматриваемой площади, из каждого кластера были рассмотрены пары водосборов с близкими площадями (рис. 4–6). В первом кластере наблюдается некоторая схожесть распределения площадей высотных зон близких по размеру водосборов. В двух других кластерах наблюдается иная ситуация; асимметрия распределений может быть различной.

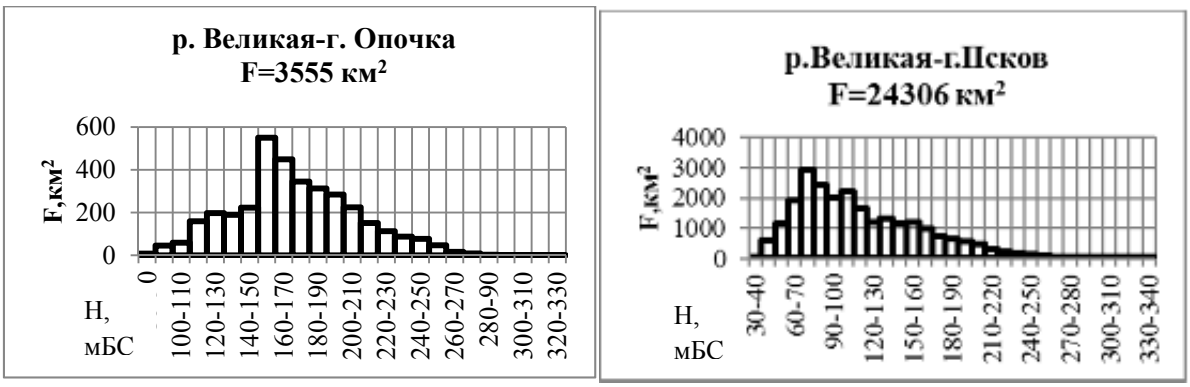


Рис. 3. Гистограммы распределения площадей высотных зон
для верховья и низовья р. Великой

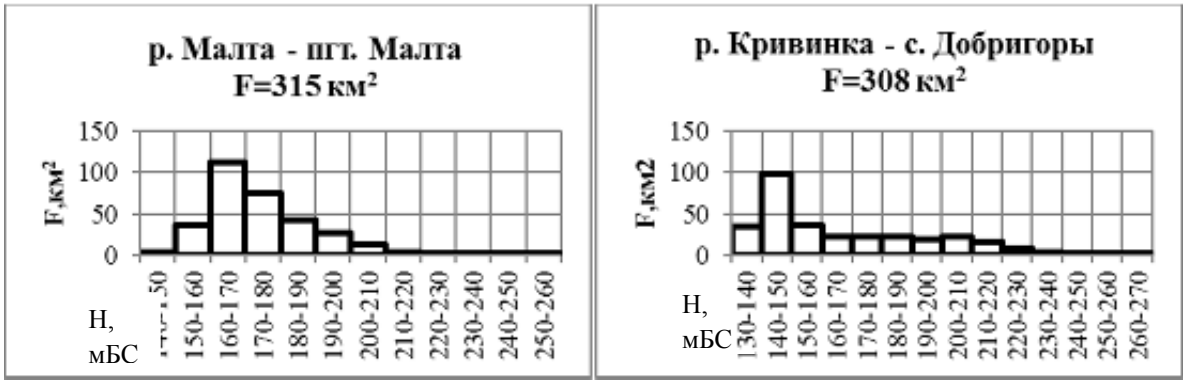


Рис. 4. Гистограммы распределения площадей высотных зон водосборов, кластер I

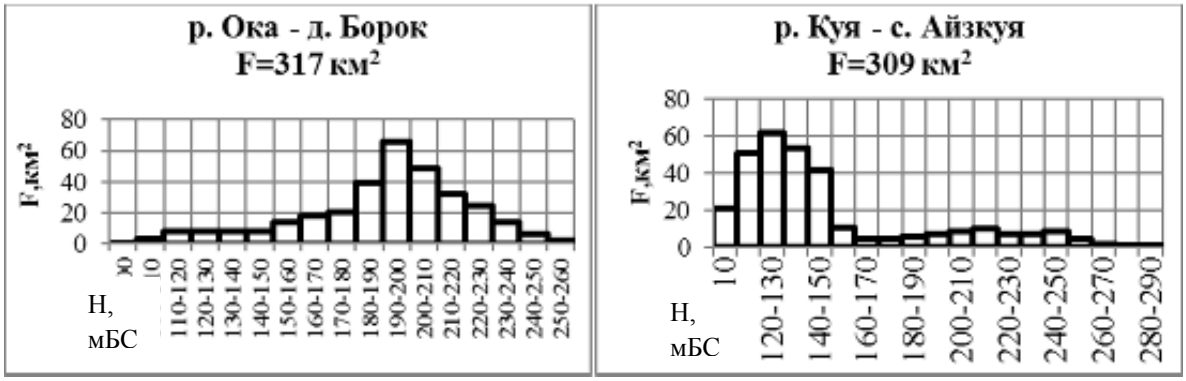


Рис. 5. Гистограммы распределения площадей высотных зон водосборов кластер II

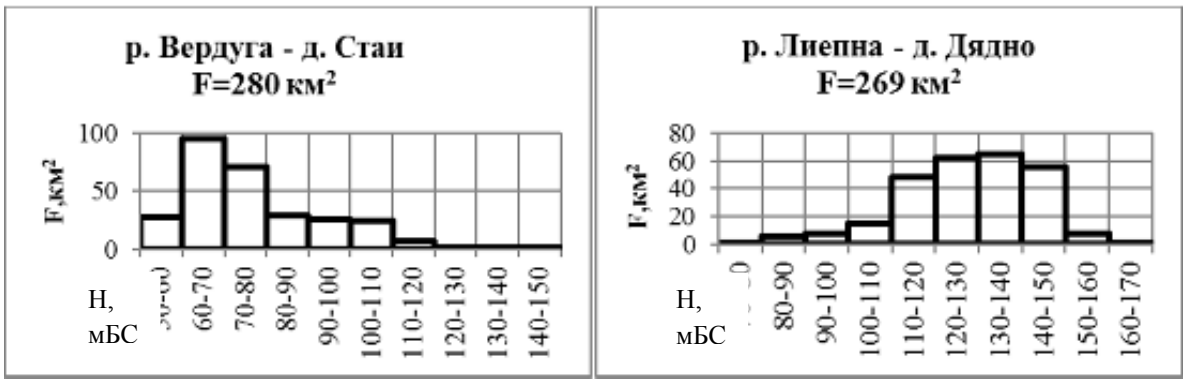


Рис. 6. Гистограммы распределения площадей высотных зон водосборов, кластер III

Для дальнейшей работы с гистограммами следует подобрать соответствующие математические функции, но сначала необходимо более тщательно выполнить кластеризацию, а затем и морфометрический анализ.

Заключение

В результате проделанной работы были сформированы основы методики определения рек-аналогов. С помощью современных средств, с учётом ряда характеристик подстилающей поверхности выделены достаточно однородные группы ландшафтно и гидрологически подобных водосборов. Безусловно, предложенный подход одновременного учёта нескольких ландшафтных параметров является более обоснованным, чем последовательный выбор отдельных параметров, который при использовании метода гидрологической аналогии носит довольно субъективный характер и зависит от опыта работы специалиста. Показано, что среднегодовой сток с водосборов существенно зависит от их ландшафтной принадлежности, недоучёт которой может привести к ошибочной оценке стока неизученных рек. Сделана попытка расширить ряд характеристик, рекомендуемых к учёту при выборе рек-аналогов, включением в него гистограммы распределения площадей высотных зон водосбора.

В ходе исследования стало очевидно, что современные ландшафтно-гидрологические исследования переросли рамки какого-то одного направления географической науки и могут быть успешно реализованы только при интердисциплинарном подходе. Именно такой подход может позволить достичь лучшего понимания механизма и степени влияния физико-географических факторов на режим и величину речного стока, без которого невозможно правильное применение метода гидрологической аналогии при его расчетах, усовершенствование существующих и разработка новых методов расчета гидрологических характеристик при отсутствии данных наблюдений [3].

Список литературы

1. Бачурин Г. В. Гидрологические исследования ландшафтов. Новосибирск : Наука, Сиб. отд., 1986. 200 с.

2. Виноградов А. Ю., Догановский Д. А. Состояние гидрометрических наблюдений на малых реках // Учен. зап. РГГМУ. 2016. № 44. С. 14–22.

3. Владимиров А. М. Гидрологические расчеты. Л. : Гидрометеоиздат, 1990. 366 с.

4. Колобовский Е. Ю. Ландшафтоведение. М. : Академия, 2006. 480 с.

5. Кузин П. С. Классификация рек и гидрологическое районирование СССР. Л. : Гидрометеоиздат, 1960. 456 с.

6. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Т. 1. Вып. 5: Бассейны рек Балтийского моря, Онежского и Ладожского озер. Л. : Гидрометеоиздат, 1986. 689 с.

7. Ожегов С. И., Шведова Н. Ю. Толковый словарь русского языка: 80 000 слов и фразеологических выражений / Рос. акад. наук ; Ин-т рус. яз. им. В. В. Виноградова. 4-е изд., доп. М. : Азбуковник, 1999. 944 с.

8. Погорелов А. В. Рельеф бассейна р. Кубани: морфологический анализ. М. : ГЕОС, 2009. 220 с.

9. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 4. Вып. 1: Прибалтийский район. Л. : Гидрометеоиздат, 1973. 552 с.

10. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 2: Карелия и Северо-Запад. Л. : Гидрометеоиздат, 1966. 528 с.

11. Определение основных расчетных гидрологических характеристик : свод правил по проектированию и строительству СП 33-101-2003. М. : Госстрой России, 2003. 70 с.

12. Симонов Ю. Г. Морфометрический анализ рельефа : учеб. / МГУ им. М. В. Ломоносова. М. ; Смоленск : Изд-во Смолен. гуманит. ун-та, 1998. 270 с.

13. Чеботарев А. И. Гидрологический словарь. Издание второе переработанное и дополненное. Л. : Гидрометеорол. изд-во, 1970. 308 с.

14. Шарапов И. П. Функции распределения высоты рельефа // Рельеф Земли и математика. М. : Мысль, 1967. С. 71–79.

15. ArcGIS Resources: Что такое цифровые модели рельефа [Электронный ресурс]. URL: resources.arcgis.com/ru/help/main/10.1/index.html#//009z0000005n000000/.

УДК 556.552

Гидрометеорологический мониторинг и достоверность расчетов элементов водного баланса оз. Байкал

В. Н. Синюкович (sin@lin.irk.ru), М. С. Чернышов (chernishov@lin.irk.ru)

Лимнологический институт СО РАН, Иркутск

Аннотация. Освещены краткие сведения о состоянии гидрометеорологических наблюдений в бассейне оз. Байкал, на которых базируются расчеты водного баланса озера. Отмечена неудовлетворительная точность определения отдельных составляющих прихода-расхода воды в озере, являющаяся причиной положительной невязки баланса.

Ключевые слова: баланс, наблюдения, осадки, приток, сток, испарение, невязка.

Введение

Достоверность оценок различных внутриводоемных процессов определяется точностью расчета составляющих прихода-расхода воды в водных объектах. Показателем преобладания поступления или расходования воды за определенный период служат изменения объема (ΔW), или уровня озера. Опыт исследований водного баланса Байкала позволяет представить соответствующее расчетное выражение в следующем виде:

$$\Delta W = X + У_р + У_п + К - У_а - E, \quad (1)$$

где X – атмосферные осадки на поверхность озера; $У_р$ и $У_п$ – соответственно приток речных и подземных вод; $К$ – конденсация водяного пара на поверхности озера; $У_а$ – поверхностный сток из озера через р. Ангару; E – испарение.

Впервые водный баланс озера был составлен за 1928–1929 гидрологический год Г. Ю. Верещагиным и в связи с ограниченным фактическим материалом был весьма приближенными. Последующие исследования Б. С. Цейтлина, А. Н. Афанасьева, З. А. Викулиной и др. основывались уже на значительно большем объеме гидрометеорологических данных и были более детальными и достоверными, что позволяло перейти к определению ежемесячных значений приходно-расходных статей. Официальные помесячные водные балансы озера составляются Иркутским управлением Гидрометслужбы СССР (Росгидромет) после строительства Иркутской ГЭС (с 1956 г.). В постзарегулированный период баланс Байкала изучался Н. Н. Янтер, А. Н. Афанасьевым, Т. П. Гронской и Т. Э. Литовой и др., рассматривавшими его для естественных и зарегулированных условий раздельно. При этом большинство исследователей отмечали недостаточную изученность отдельных воднобалансовых составляющих, что наглядно демонстрирует величина невязки баланса, в отдельные годы достигающая 6,9 км^3 [11].

Определение отдельных статей баланса

Рассмотрим особенности определения каждого из слагаемых уравнения (1).

Аккумуляция, или изменение объема воды за расчетное время, определяется разницей среднего уровня водоема и площадью его водной поверхности, которая для Байкала принимается постоянной и составляет 31,5 тыс. км^2. Следовательно, надежность расчетов аккумуляции озера связана, прежде всего, с точностью оценки изменений его уровня.

Первые регулярные инструментальные наблюдения за уровнем Байкала относятся к 1888 г. (пос. Лиственичное), а в 1897 г. на озере уже действуют девять пунктов водомерных наблюдений Иркутской Геофизической обсерватории.

На сегодняшний день в ведении Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет) на Байкале находится 17 постов, осуществляющих регулярные (преимущественно два раза в сутки) измерения уровня. Достаточно надежными признаны данные наблюдений с 1898 г. по водомерному посту у ст. Байкал КБЖД. Средний уровень озера рассчитывается по наблюдениям восьми наиболее репрезентативных постов с точностью до 1 см и, таким образом, изменение объема воды в озере может быть определено с точностью до 0,315 км^3.

В последние годы Лимнологическим институтом СО РАН на Байкале внедряются системы регистрации уровня, основанные на использовании датчиков гидростатического давления, позволяющих производить измерения с точностью до 0,1 мм, но в силу регулярно существующей «негоризонтальности» акватории и малого числа измерительных станций эти данные в практике расчетов среднего уровня озера пока не используются.

Следует отметить, что при расчете аккумуляции на Байкале не учитываются потери воды в ледовом покрове, осевшем на берегах в течение зимы. Правда, в силу непродолжительного ледоставного периода (в среднем 4 месяца) и сравнительно низкой (не более 0,6 м) сработки уровня озера за это время, данный вид потерь не может существенно повлиять на точность балансовых расчетов. То же можно сказать и об аккумуляции в подземных водах (береговое регулирование) при изменении уровня озера, которая также не учитывается вследствие своей малозначимости.

Осадки на поверхность озера рассчитываются по результатам фактических наблюдений на береговых и островных метеостанциях. В середине XX в. в котловине Байкала насчитывалось 38 пунктов наблюдений за осадками [2]. Среди береговых станций наиболее продолжительные непрерывные наблюдения имеются в г. Бабушкин (с 1896 г), а среди островных – в пос. Хужир (с 1947 г.). В ходе совершенствования системы измерения осадков (замена дождемера осадкомером, введение с 1966 г. поправок на смачивание) полученные за разные периоды данные по осадкам нуждаются в корректировке. С учетом того, что выпадение осадков на акваторию озера, защищенную горными хребтами, может существенно отличаться от показаний береговых станций, последние также пересчитываются с использованием эмпирических соотношений.

Для подсчета осадков на акваторию озера используется система изогиет, или районные зависимости первых трех векторов разложения их полей, учитывающие условия циркуляции воздуха над Байкалом и орографические особенности расположения пунктов наблюдений. Принимая во внимание среднее значение годовых осадков для Байкала около 390 мм [11; 14] и ошибку их определения по площади для региона Сибири не менее ±7,5 % [1] можно говорить о реальной точности определения годовых значений этого элемента баланса порядка 30 мм, или 0,9 км^3 в пересчете на слой воды по всей площади озера.

Речной приток является основной (до 90 %) компонентой приходной части водного баланса Байкала и на две трети обеспечивается за счет стока трех основных рек – Селенги, Верхней Ангары и Баргузина [11; 12]. Регулярные измерения стока на этих реках начались в 1930-х гг. В последние 30 лет имело место сокращение числа пунктов учета стока и снижение уровня их технического оснащения. Общая площадь, с которой учитывается речной сток, составляет порядка 93 % от водосборной территории Байкала. С неизученной части бассейна приток определяется расчетным путем с использованием метода аналогии, локальных зависимостей от физико-географических факторов, разложения полей стока на естественные ортогональные составляющие и др.

Невысокая доля неизученной площади позволяет надеяться, что точность расчета притока поверхностных вод в озеро соответствует точности оценки стока рек, освещенных гидрометрическими наблюдениями и по стандарту [9] находится на уровне 6–10 %. Тогда, при значениях годового притока близких к средним, погрешность их расчетов может достигать 6 км^3. При этом, если способы измерений и расчетов остаются неизменными, ошибка становится систематической и мало искажает относительный характер колебаний.

Подземный приток в озеро в связи со слабой изученностью ранее определялся по величине невязки баланса. В последующем он в основном принимается по данным [10] в среднем равным 1,64 км^3/год, из которых 1,52 км^3/год приходится на подрусловой сток. Последнее обстоятельство не позволяет напрямую включать полученную оценку подземного стока в уравнение (1), так как подрусловой сток приведен к береговой линии озера, а замыкающие гидрометрические створы на притоках отнесены от нее за пределы предгорных равнин, сложенных рыхлыми отложениями, способствующими переводу поверхностного стока на подземную (подрусловую) составляющую. По этой причине в [3] подземный приток в озеро не вычленяется из общего речного, или материкового притока.

И в настоящее время подземный приток нередко принимается равным невязке баланса, что относится и к подземному оттоку воды из озера, который также не учитывается из-за отсутствия каких-либо определенных результатов в этом направлении.

Конденсация водяного пара на поверхности Байкала имеет место в период со времени вскрытия озера до выравнивания температуры поверхности воды и поверхности суши (август). В отсутствие возможностей исследовать этот процесс на натурных водных объектах, для количественных оценок конденсации используются те же эмпирические зависимости, что и при расчете испарения. Применяемая для Байкала схема расчетов Росгидромета включает (с обратным знаком) конденсацию в испарение. Роль этой составляющей в водном балансе озера крайне невелика и в связи с недостаточной изученностью на практике она часто не учитывается. Вместе с этим, некоторыми авторами предлагалось учитывать почвенную конденсацию паров воды, играющую в некоторых районах бассейна Байкала заметную роль в балансе подземных вод. По нашему мнению, данная составляющая не может рассматриваться как самостоятельное слагаемое выражения (1), так как в конечном итоге она опосредована в приходной части баланса через поверхностный и подземный приток.

Сток из озера – основная расходная часть водного баланса Байкала, осуществляется через р. Ангару, гидрометрические измерения в истоке которой ведутся с 1899 г. После заполнения Иркутского водохранилища сток из озера до 1964 г. учитывается по гидроствору у с. Никола, а с 1965 г. – на Иркутской ГЭС. То обстоятельство, что сток здесь не измеряется, а рассчитывается по количеству выработанной энергии, объясняет сомнения некоторых специалистов [7; 14] в объективности выполняемого пересчета и опасения о возможном занижении стока. Впрочем, некоторое снижение стока после зарегулирования существует по объективным причинам и связано с затратами воды на наполнение полезного объема Байкала (и Иркутского водохранилища) и фильтрационными потерями на гидроузле.

Что касается точности учета стока через Иркутскую ГЭС, то если ее принять по аналогии с притоком, тогда в годовых масштабах времени она должна составлять порядка 6 км^3/год, хотя по некоторым данным [5; 8] сток из Иркутского водохранилища измеряется надежнее притока в Байкал.

Испарение с акватории озера рассчитывается по данным наблюдений за температурой воды и воздуха, влажностью воздуха и скоростью ветра. Наблюдения береговых метеостанций для этих задач малопригодны, так как значения метеопараметров для них сильно различаются с таковыми на акватории водоема, а установка испарителей непосредственно в озере неэффективна из-за большого волнения. В основном расчеты производятся по эмпирическим формулам, разным для периода ледостава и открытой воды. С 1966 г. испарение с водной поверхности Байкала рассчитывается преимущественно по формулам ГГИ и В. А. Рымши–Р. В. Донченко, которые дают более высокие значения в сравнении с применяемой до этого времени формулой Б. Д. Зайкова. В связи с этим, при анализе испарения за многолетний период необходима корректировка данных.

Расчеты испарения для Байкала методами теплового баланса и турбулентной диффузии [4; 13] в основном дают более значительные объемы испарения, с разницей до 2 км^3/год Указанная погрешность, очевидно, и может служить мерой точности расчетов этой составляющей водного баланса для годовых интервалов времени, что согласуется с оценками точности расчетов месячных значений испарения по наземным испарителям в 15–20 % [6].

Обсуждение результатов

Представленная выше характеристика исходных гидрометеорологических данных и специфики их использования для расчетов водного баланса оз. Байкал позволяет видеть, что первые представления о характере прихода-расхода воды в озере стали возможны с конца XIX в. после организации водомерных наблюдений. По мере совершенствования гидрометеорологического мониторинга появляются объективные условия для количественных оценок воднобалансовых составляющих Байкала, которые реализуются только к середине XX в., после получения данных по учету стока основных притоков озера. Расширение гидрометеорологических исследований в бассейне озера в этот период было связано с подготовкой реа-

лизации планов гидроэнегетического строительства на р. Ангаре и необходимостью более детального исследования водных ресурсов озера, как головного водохранилища каскада Ангарских ГЭС. В результате, появляются наиболее полные оценки водного баланса оз. Байкал, а с 1956 г. в систему государственного учета водных ресурсов СССР вводится составление ежемесячных данных по приходу–расходу воды в озере.

Основными составляющими водного баланса Байкала являются приток и сток, на долю которых приходится до 90 % объема, участвующего в круговороте воды в озере, поэтому от точности их определения будет зависеть и точность сведения полного водного баланса. В его приходной части ошибка расчетов годового притока, как было видно выше, составляет около 6 км^3, а осадков – 0,9 км^3, или в сумме 6,9 км^3. Близкие масштабы погрешности учета характерны и для расходной части баланса – порядка 8,2 км^3 (6 км^3 для стока и 2,2 км^3 для испарения). Отсюда следует, что невязка сведения бюджета воды в озере вполне может составлять 10–15 км^3 в год, или порядка 25 % от годового водооборота. В реальности, этот показатель должен быть значительно ниже, так как ошибки учета притока и стока зависят от водности конкретных лет, а кроме того, они большей частью имеют один и тот же знак и при сведении баланса компенсируют друг друга. Очевидно, по этим причинам максимум невязки за 1956–2015 гг., составляющий 6,89 км^3/год, фактически совпадает с ошибкой расчетов притока и стока. В целом из динамики величины невязки баланса (рис. 1) видно, что ее повышенные значения приходятся на более многоводные годы, хотя абсолютный максимум был отмечен в средний по водности 1980 г.

За многолетний период заметно явное преобладание приходных статей баланса над расходными – в 45 годах из 60 невязка была положительной, при этом отрицательные ее значения по абсолютной величине в основном уступали положительным. На этом основании можно заключить, что определение годовых водных балансов оз. Байкал выполняется с систематической положительной ошибкой. За 1956–2015 гг. профицит баланса составляет 1,56 км^3/год, или 93,5 км^3 за весь период.

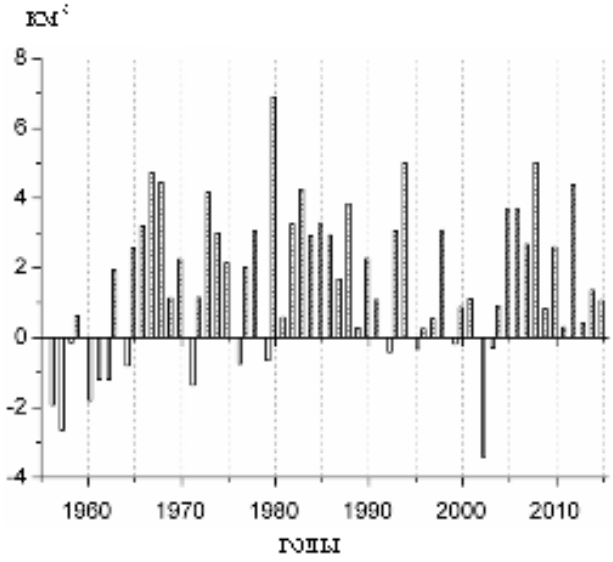


Рис. 1. Динамика годовых значений невязки водного баланса

Постоянное увеличение объема гидрометеорологической информации за счет накопления исходных данных, совершенствование методов наблюдений и расчетных схем способствовали росту надежности определения отдельных составляющих водного баланса Байкала. Однако, судить об этом по изменению величины невязки крайне проблематично, так как большинство исследователей прихода-расхода воды в озере сознательно от нее избавлялись, включая в одно из слагаемых выражения (1). Тем не менее, можно говорить о повышении достоверности расчетов баланса, как минимум, с 1966 г. за счет более полного учета осадков

и более надежного расчета испарения. Более высокие значения этих элементов после введения этих изменений объясняют и рост общего объема кругооборота воды в Байкале.

Внутри года наибольшие значения невязки наблюдаются в июне-сентябре (рис. 2), т. е. в периоды наиболее интенсивного притока и оттока вод.

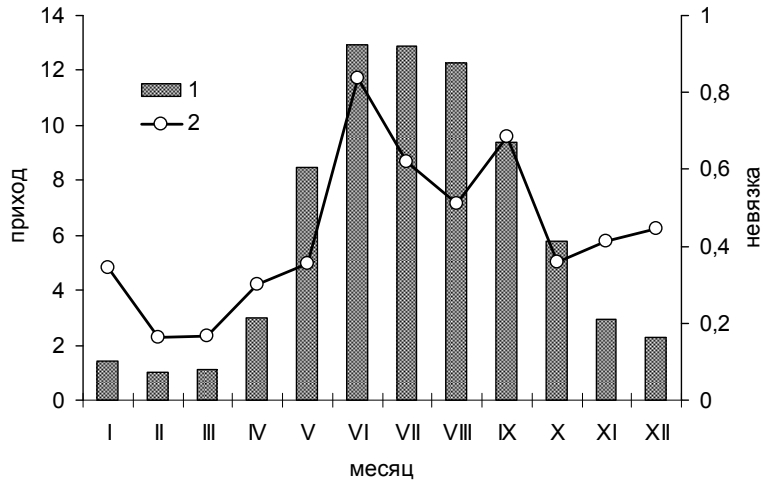


Рис. 2. Внутригодовое распределение прихода воды в озеро (*1*) и невязки водного баланса (*2*), км^3

В феврале и марте они минимальны в соответствии с самыми низкими объемами, участвующими в кругообороте воды в озере и в среднем, составляют около 0,2 км^3. С учетом этих значений, очевидно, можно полагать, что предельно возможная точность расчетов водного баланса Байкала для месячных интервалов времени составляет 0,1 км^3, до которых и должны округляться получаемые результаты. Для годовых оценок этот предел, естественно, выше и не должен быть меньше объема воды в сантиметровом слое призмы полезной емкости озера (0,3 км^3), соответствующему точности измерения уровня.

В период с октября по январь величина невязки возрастает вследствие сезонного роста испарения, точность расчета которого остается самой низкой из всех составляющих водного баланса Байкала. Месячный максимум невязки (2,58 км^3) имел место в июне 1977 г. Наибольшее отрицательное значение невязки (2,33 км^3) также наблюдалось в июне.

Заключение

Достоверность оценок составляющих водного баланса Байкала повышалась с ростом гидрометеорологической изученности территории и накопления данных наблюдений. Вместе с тем, в результате изменений климата и антропогенного воздействия (регулирование стока) наблюдается некоторая трансформация механизмов формирования отдельных приходно-расходных составляющих баланса, затрудняющая их определение и искажающая результаты расчетов. Стало заметным увеличение ежегодного кругооборота воды, вызванное не только колебаниями климата, но и изменениями техники расчета отдельных статей, обусловившими, в частности, более высокие значения осадков и испарения. Произошло существенное внутригодовое перераспределение стока воды из озера, заключающееся в его выравнивании и смещении максимальных расходов воды на зимние месяцы, увеличился зимний меженный приток и др.

Вследствие всех этих нюансов современный водный баланс озера характеризуется систематическим преобладанием его приходной части над расходной (суммарное превышение за 1956–2015 гг. составляет почти 100 км^3). Наличие положительной невязки препятствует включению в приходную часть баланса подземного притока в озеро и требует, в первую очередь, проведения натурной тарировки стока воды через Иркутский гидроузел. Стандарты расчетов тепло- и влагооборота в байкальской котловине также нуждаются в совершенствовании, поскольку разработаны для равнинных водоемов европейской части России.

Список литературы

1. Андреянов В. Г., Бабкин В. И., Бочков А. П. Теория и методы расчета водного баланса речных бассейнов // Влагооборот в природе и его роль в формировании ресурсов пресных вод. М. : Стройиздат, 1973. С. 139–148.

2. Афанасьев А. Н. Водный баланс оз. Байкал // Исследования гидрологического режима Байкала. М. ; Л. : Изд. АН СССР, 1960. С. 155–241.

3. Афанасьев А. Н. Водные ресурсы и водный баланс бассейна оз. Байкал. Новосибирск : Наука, 1976. 238 с.

4. Верболов В. И., Сокольников В. М., Шимараев М. Н. Гидрометеорологический режим и тепловой баланс озера Байкал. М. ; Л. : Наука, 1965. 373 с.

5. Водные ресурсы России и их использование / под ред. И. А. Шикломанова. СПб. : ГГИ, 2008. 600 с.

6. Вуглинский В. С., Албул И. П. Методика расчета испарения с водной поверхности по данным наземного испарителя ГГИ-3000 // Вестн. СПбГУ. 2016. Сер. 7, вып. 3. С. 118–128.

7. Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР. Иркутское водохранилище. Л. : Гидрометеоиздат, 1980. 140 с.

8. Гронская Т. П., Литова Т. Э. Краткая характеристика водного баланса озера Байкал за период 1962–1988 гг. // Мониторинг состояния озера Байкал. Л. : Гидрометеоиздат, 1991. С. 153–158.

9. Методические указания МИ 1759-87. Расходы воды на реках и каналах. Госстандарт СССР. М. : Изд-во стандартов, 1987. 25 с.

10. Писарский Б. И. Региональные закономерности формирования подземного стока в Прибайкалье (вторая половина XX в.) // Водные ресурсы Байкальского региона: Проблемы формирования и использования на рубеже тысячелетий. Иркутск, 1998. Т. 1. С. 42–43.

11. Синюкович В. Н. Водный баланс озера Байкал в условиях зарегулированного режима // Водное хозяйство России. 2011. № 1. С. 12–22.

12. Особенности современных изменений притока воды в озеро Байкал / В. Н. Синюкович, Л. Н. Сизова, М. Н. Шимараев, Н. Н. Курбатова // География и природные ресурсы. 2013. № 4. С. 57–63.

13. Шимараев М. Н. Тепловой режим глубоких озер (на примере оз. Байкал) // Тр. V Всесоюз. гидрол. съезда. Л. : Гидрометеоиздат, 1990. Т. 8. С. 294–307.

14. Янтер Н. Н. Водный баланс оз. Байкал в период зарегулированного режима // Тр. V Всесоюз. гидрол. съезда. Л. : Гидрометеоиздат, 1990. Т. 8. С. 161–169.

УДК 556.161; 556.51(571.5)

Изменчивость климатических факторов формирования стока рек водосборного бассейна оз. Байкал

Е. Н. Сутырина (ensut78@gmail.com)

Иркутский государственный университет» Иркутск

Аннотация. Целью данной работы является исследование изменчивости климатических факторов формирования стока рек в пределах всего водосборного бассейна оз. Байкал, а также в пределах частных бассейнов его наиболее крупных притоков – рек Селенги, Верхняя Ангара и Баргузин.

Ключевые слова: озеро Байкал, река Селенга, река Верхняя Ангара, река Баргузин, водосборный бассейн, данные реанализа NCEP/NCAR**.**

Озеро Байкал расположено в Байкальской рифтовой зоне в южной части Восточной Сибири и является одним из крупнейших озёр в мире с площадью поверхности 31 722 км^2 и объемом 23 615 км^3 [3]. Оз. Байкал имеет трансграничной водосборный бассейн с площадью около 571 000 км^2, который расположен на территории России (около 48 %) и на монгольской территории (около 52 %). В озеро Байкал впадает порядка 544 притоков, из которых три наиболее крупных – это реки Селенга, Верхняя Ангара и Баргузин, которые в среднем за год приносят в озеро около 42 км^3 воды, что составляет около 70 % от всего притока в водоём. Суммарная площадь бассейнов указанных рек занимает 85 % от общей водосборной территории оз. Байкал.

Целью данной работы является исследование изменчивости климатических факторов формирования стока рек в пределах всего водосборного бассейна оз. Байкал, а также в пределах частных бассейнов рек Селенга, Верхняя Ангара и Баргузин.

Сток представляет собой сложный многофакторным природный процесс, обусловленный влиянием комплекса физико-географических факторов и хозяйственной деятельности. Основными факторами формирования стока являются климатические. Климат воздействует на сток не только непосредственно, но и через другие природные факторы: почву, растительность, рельеф [1].

Для изучения многолетней изменчивости климатических факторов в рамках данного исследования привлекались данные из архива глобальной базы реанализа NCEP/NCAR (The National Centers for Environmental Prediction/The National Center for Atmospheric Research). Данные реанализа находятся в открытом доступе на сайте ESRL (The Earth System Research Laboratory) [2] в формате NetCDF (Network Common Data Form). В ходе исследования в качестве исходных материалов использовались наборы данных за 1948–2015 гг. о среднемесячных значениях приповерхностной температуры воздуха с шагом регулярной широтно-долготной сетки 2,5° и данные о среднемесячной интенсивности осадков с шагом регулярной сетки в 1,0°. Данные о среднемесячной интенсивности осадков для дальнейшего анализа пересчитывались в сумму осадков за месяц. Осреднение приводилось по данным в узлах регулярной сетки, расположенным на территории водосборного бассейна оз. Байкал, а также бассейнов рек Селенги, Верхняя Ангара и Баргузин.

Весь исследуемый период поделён на три отдельных периода: с 1948 по 1970 г., с 1971 по 1992 г. и с 1993 по 2015 г., так чтобы каждый из них включал 22-23-летний цикл солнечной активности и их сопоставление было более репрезентативным. Кроме того, такое деление на периоды оправдано сменой примерно с 1970 г. тенденции изменения средних значений температуры воздуха в пределах всего изучаемого бассейна оз. Байкал и частных бассейнов его наиболее крупных притоков (рис. 1), что позволяет отдельно рассматривать более ранний период (с 1948 по 1970 г.) для которого характерен отрицательный тренд температуры, имеющий значения для рассматриваемых бассейнов от –0,4 до –0,6 °С/10 лет, и два более поздних периода (с 1971 по 1992 г. и с 1993 по 2015 г.) – с положительным трендом температуры воздуха от 0,3 до 0,4 °С/10 лет.

Рисунок 1 кроме этого демонстрирует многолетнюю изменчивость полученных по данным реанализа NCEP/NCAR сумм осадков за год, усреднённых по территории водосбора оз. Байкал и частных водосборов р. Селенги, р. Баргузин и р. Верхней Ангары. Из рисунка 1 видно, что многолетняя изменения средних по водосборным территориям сумм осадков в целом показывают однонаправленную тенденцию к уменьшению годовых сумм осадков: снижение на 8,7 мм за десятилетие – в переделах всего водосбора озера, уменьшение на 10,6 мм за десятилетие – в пределах бассейна р. Селенги, а также снижение годовых сумм на 7,1 и 7,0 мм за десятилетие – в пределах водосборных бассейнов р. Баргузин и р. Верхней Ангары соответственно.

Среднемноголетняя сумма осадков за год, усредненная по водосбору оз. Байкал, по данным NCEP/NCAR составила 388, 370 и 348 мм за периоды с 1948 по 1970 г., с 1971 по 1992 г. и с 1993 по 2015 г. соответственно. Что свидетельствуют об уменьшении средней по водосбору годовой суммы осадков за период с 1992 по 2015 г. на 10 % по сравнению с данной величиной за период с 1948 по 1970 г.

Величина годовой суммы осадков, усредненная по бассейну р. Селенги, составила 376, 359 и 327 мм за периоды с 1948 по 1970 г., с 1971 по 1992 г. и с 1993 по 2015 г. соответственно. Что показывает сокращение средней по водосбору годовой суммы осадков за 1993–2015 гг. на 13 % по сравнению с 1948–1970 гг.

Менее заметные изменения произошли в пределах водосборов р. Баргузин и Верхней Ангары. Среднемноголетние суммы осадков, усредненные по бассейну р. Баргузин, составили 382, 371 и 355 мм за периоды с 1948 по 1970 г., с 1971 по 1992 г. и с 1993 по 2015 г. соответственно. Для бассейна р. Верхней Ангары годовые суммы осадков за соответствующие периоды равнялись 420, 416 и 398 мм.

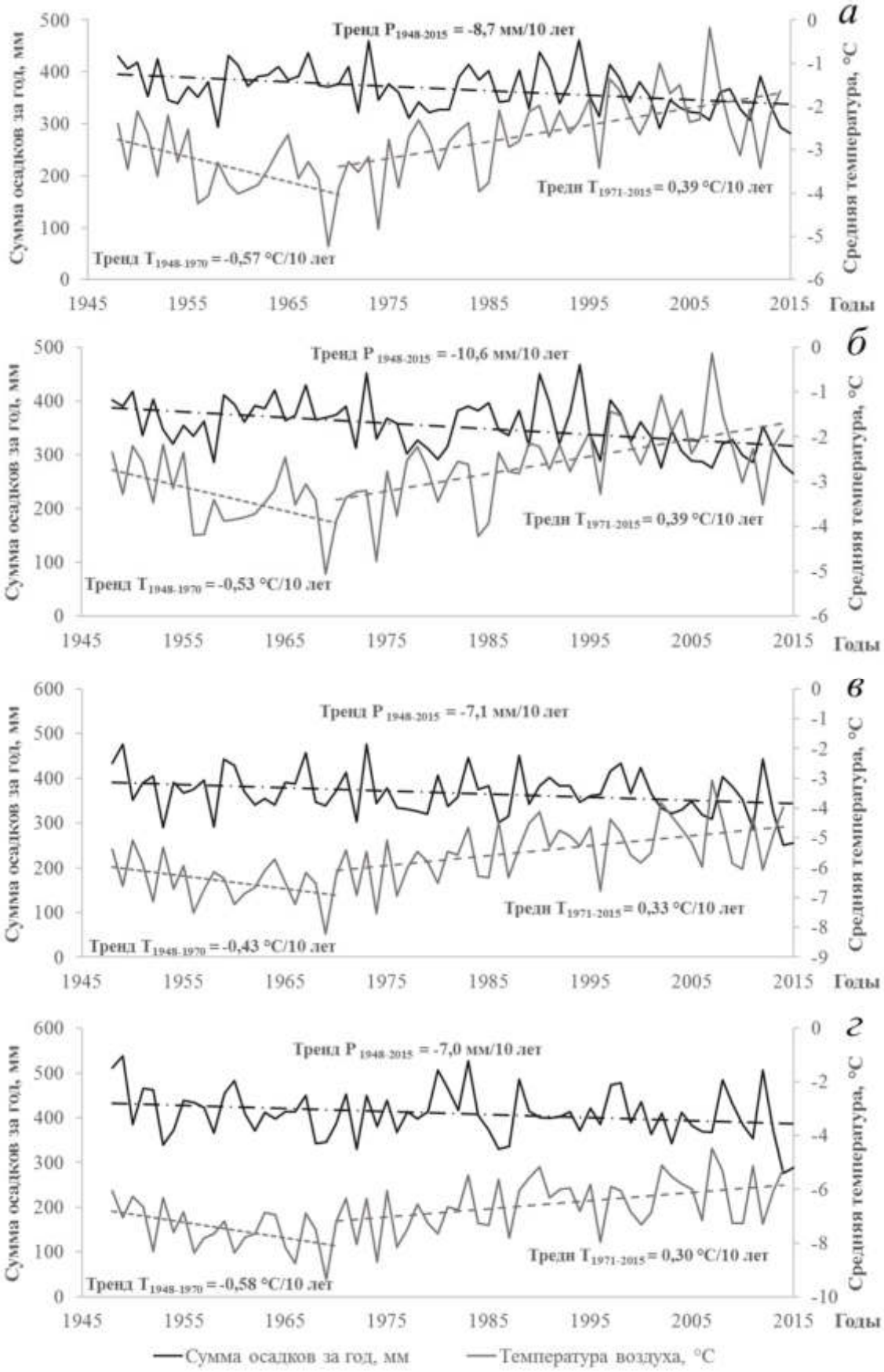


Рис. 1. Многолетняя изменчивость сумм осадков за год и среднегодовых значений температуры воздуха, усреднённых по территории водосбора оз. Байкал (*а*) и частных водосборов р. Селенги (*б*), р. Баргузин (*в*) и р. Верхней Ангары (*г*) по данным реанализа NCEP/NCAR

Для каждого из указанных периодов по данным реанализа NCEP/NCAR был проанализирован внутригодовой ход средних за многолетний период месячных сумм осадков, усреднённых по водосборному бассейну оз. Байкал и частным бассейнам притоков (рис. 2).

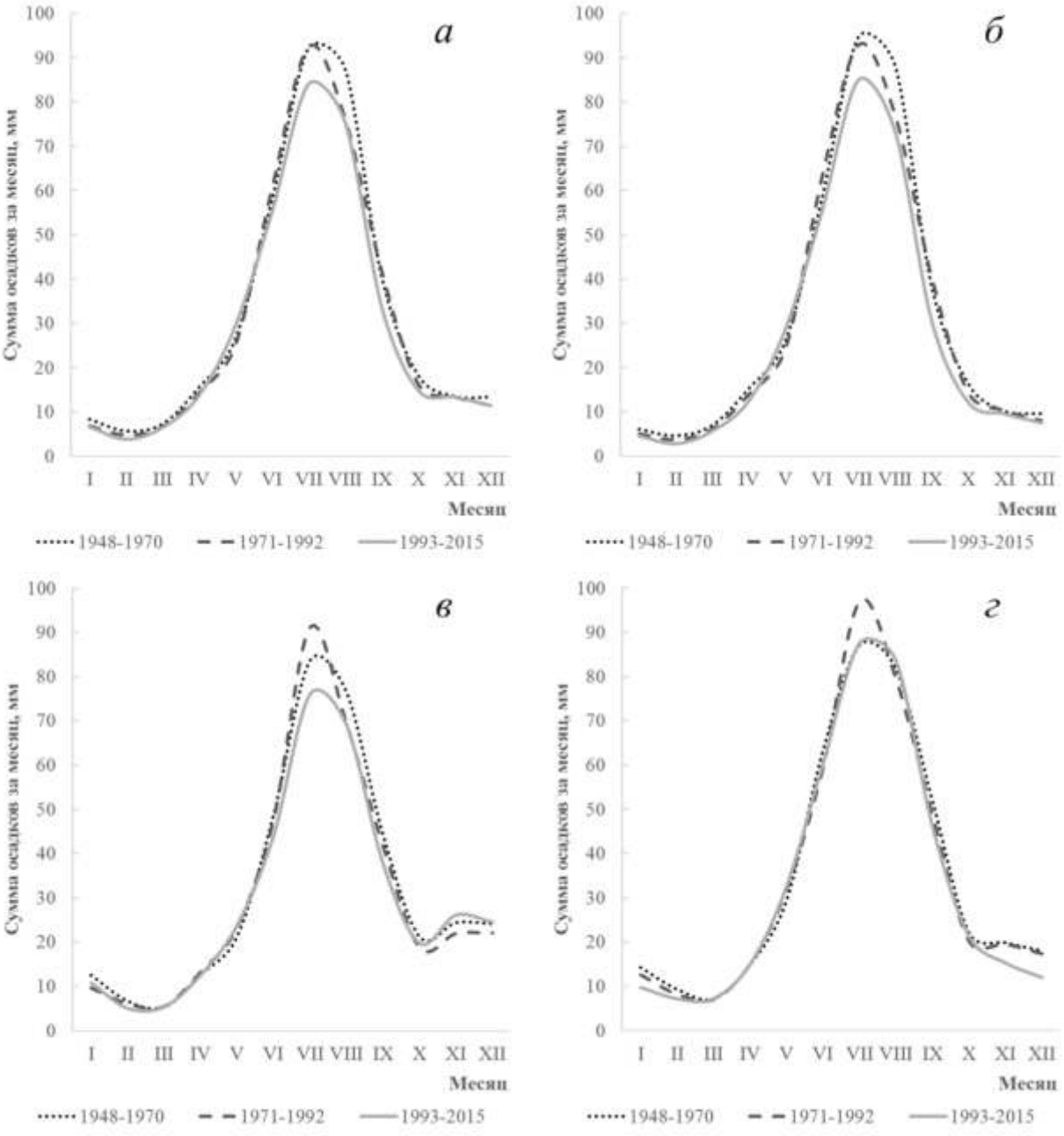


Рис. 2. Ход средних за многолетний период сумм осадков за месяц, усреднённых по территории водосбора оз. Байкал (*а*) и частных водосборов р. Селенги (*б*), р. Баргузин (*в*) и р. Верхней Ангары (*г*) по данным реанализа NCEP/NCAR

По рисунку 2 видно, что в пределах всего бассейна оз. Байкал происходит планомерное снижение сумм осадков за месяц от более ранних периодов к более поздним практически во все месяцы года. Наиболее значимые изменения, выражающиеся в снижении среднемноголетних сумм осадков за месяц, наблюдается в июле, августе и сентябре, снижение средних сумм осадков за месяц за многолетний период 1993–2015 гг. по сравнению с периодом 1948–1970 гг. составило 8,2, 12,0 и 6,8 мм соответственно. Еще более драматичная картина наблюдается на наиболее крупном притоке Байкала – р. Селенге: наблюдается сокращение величины средних сумм осадков за месяц в 1993–2015 гг. по сравнению с 1948–1970 гг., наиболее проявляющееся в снижении месячных сумм осадков также в июле, августе и сентябре на 9,8, 14,8 и 7,7 мм соответственно.

Несколько иначе ситуация выглядит для условий бассейнов рек Верхняя Ангара и Баргузин. На р. Баргузин в период с 1971 по 1992 г. сначала в отдельные месяцы произошло повышение месячных сумм осадков (например, в июле на 7,5 мм), в другие месяцы произошло снижение (например, в августе на 7,1 мм, а также в осенне-зимние месяцы) по сравнению с периодом с 1948 по 1970 г., в целом, за год средняя сумма осадков понизилась. В следующий период в 1993–2015 гг. произошло сокращение сумм осадков по сравнению с 1948–1970 гг. уже почти во все месяцы (кроме несущественного повышения в ноябре), наиболее выраженное опять же в снижение средних месячных сумм осадков в июле, августе и сентябре на 7,8, 7,4 и 6,6 мм по сравнению с первым периодом соответственно.

На р. Верхней Ангаре изменения количества осадков наименее заметно в 1993–2015 гг. по сравнению с 1993–2015 гг. и проявляются в снижении сумм осадков в зимние месяцы.

Различия в изменении осадков за многолетний период в различных частях бассейна оз. Байкал объясняется действием различных совокупностей циркуляционных факторов в его пределах ввиду существенных размеров исследуемой водосборной территории. Однако, в целом, во всех его частях наблюдается сокращение количества осадков за исследуемый период.

Также по данным реанализа NCEP/NCAR для каждого из указанных выше периодов для бассейна оз. Байкал и частных бассейнов притоков был проанализирован ход средней по бассейну приземной температуры воздуха (рис. 3). Из рисунка 3 видно, что за период с 1948 по 2015 г. произошёл существенный рост средней температуры практически во все месяцы года в пределах исследуемых бассейнов. Более, чем на 2 °С средняя приземная температура воздуха повысилась в бассейне р. Баргузин – в феврале-апреле, ноябре и декабре; в бассейне Верхней Ангары – в феврале и апреле; в бассейне Селенги – в апреле и ноябре и, наконец в пределах всего водосбора озера – феврале, апреле и ноябре. В целом среднегодовая температура воздуха за многолетний период с 1948–1970 гг. по 1993–2015 гг. выросла на 1,5 °С в пределах водосбора Баргузина и на 1,3 °С в пределах бассейнов рек Селенга и Верхняя Ангара, а также всего бассейна озера.

При этом известно, что вместе с ростом температуры должно происходить и увеличение зависящей от неё величины испаряемости, т. е. потенциально возможного, не лимитируемого запасами воды испарения в данной местности.

Таким образом, в работе выявлено сокращение приходной, ассоциированной с осадками, части баланса и увеличение расходной части водного баланса изучаемого водосбора озера Байкал, что о. При этом ввиду существенных размеров бассейна оз. Байкал и действия различных циркуляционных факторов в его пределах, в частных бассейнах наблюдаются несколько различные изменения климатических факторов, но в целом

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 17-29-05045.

Список литературы

1. Комлев А. М. Закономерности формирования и методы расчетов речного стока. Пермь : Изд-во Перм. ун-та, 2002. 157 с.

2. The Earth System Research Laboratory [Electronic resource]. URL: https://www.esrl.noaa.gov/.

3. Cyclonic circulation and upwelling in Lake Baikal / E. Troitskaya [et al.] // Aquatic Sciences. 2015. Vol. 77, Issue 2. P. 171–182. DOI: 10.1007/s00027-014-0361-8.

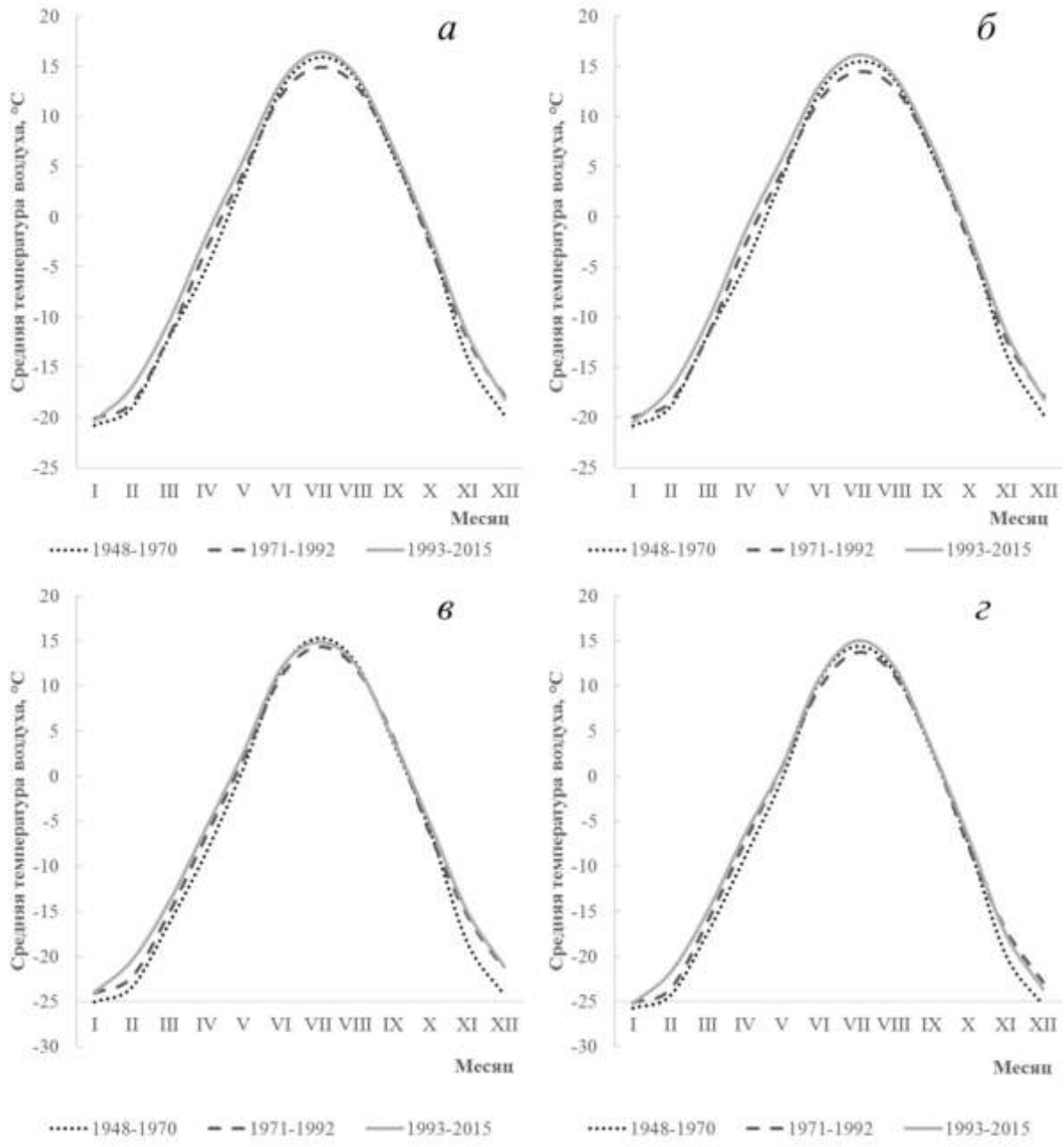


Рис. 3. Ход средних за многолетний период сумм осадков за месяц, усреднённых по территории водосбора оз. Байкал (*а*) и частных водосборов р. Селенги (*б*), р. Баргузин (*в*) и р. Верхней Ангары (*г*) по данным реанализа NCEP/NCAR

УДК 543.34:543.062:543.48:543.554.6

Фториды в природных, питьевых водах и атмосферных осадках г. Ростов-на-Дону и Ростовской области

Н. С.Тамбиева[1], О. А. Михайленко[1] (o.mikhayllenko@gmail.com),
В. Е. Котова[1,2] (Valentina.E.Kotova@gmail.com)

[1] ФГБУ «Гидрохимический институт», Ростов-на-Дону
[2] Южный федеральный университет», Ростов-на-Дону

Аннотация. Определено содержание фторидов в поверхностных (р. Дон, р. Темерник), питьевых водах, подземных источниках (ключи, колодцы), а также в атмосферных осадках (дождь, снег) в большинстве районов г. Ростова-на-Дону. В пробах поверхностных вод концентрация фторидов ниже предельно допустимых, однако выявлена некоторая тенденция увеличения их содержания. Концентрация фторидов в пробах дождя, отобранных одновременно в различных районах города, варьируется от 0,031 до 0,102 мг/дм^3; в пробах снега (талой воде) от 0,021 до 0,067 мг/дм^3. Более высокие содержания фторидов в атмосферных осадках выявлены в промышленных районах города.

Ключевые слова: фториды, поверхностные, грунтовые, питьевые воды, атмосферные осадки, р. Дон, фотометрия, потенциометрия.

Введение

Необходимость изучения соединений фтора как загрязняющих веществ определяется прежде всего их химической и биологической активностью. Фтор взаимодействует практически со всеми элементами, образуя фтористые соединения: от легкорастворимых до нерастворимых. В организм человека до 70 % фтора поступает с питьевой водой. При низких концентрациях фторидов в водах (< 0,1–0,2 мг/дм^3) возникает кариес зубов, замедляется рост костей, волос, зубов, ногтей [1–2]. Избыток фторидов в питьевой воде оказывает негативное воздействие на многие системы организма человека, прежде всего, костную и центральную нервную систему. Большие концентрации фторидов могут вызвать тяжелые заболевания: онкологию; нарушение работы почек, фосфорно-кальциевого обмена. У домашних животных (овец, коров, лошадей и др.) превышение концентрации фтора приводит к истощению, анемии, хромоте, понижению продуктивности. Избыточное количество фтора в растениях, почве, воде и воздухе из-за высокой токсичности и стабильности его соединений представляет опасность необратимого нарушения экологического равновесия [2–3].

Содержание фторидов подлежит контролю и нормируется в природных водах. Предельно-допустимая концентрация (ПДК) для водных объектов рыбохозяйственного назначения составляет 0,75 мг/дм^3, для водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового назначения от 0,75 до 1,2 мг/дм^3 в зависимости от региона [4].

Ростов-на-Дону – крупный индустриальный центр с населением более миллиона жителей и площадью 358 км^2, выделяют 8 административных районов города: Ворошиловский, Железнодорожный, Кировский, Ленинский, Октябрьский, Первомайский, Пролетарский и Советский. Ростов расположен на правом берегу реки Дон в 30 км от Азовского моря. Город относится к зоне повышенного потенциального загрязнения атмосферы, в частности, фторидом водорода (HF). Повышенный уровень загрязнения воздуха HF (1,6–2,0 ПДК) наблюдали в промышленных районах города в 2014–2016 гг. [5]. Основной вклад в выбросы HF в атмосферу вносят предприятия топливно-энергетического комплекса (ТЭЦ, котельные).

Источниками загрязнения водных объектов фтором являются сточные и ливневые воды комбайнового («Ростсельмаш») и литейного заводов, предприятия строительной индустрии (деревообрабатывающие предприятия, кирпичные заводы, заводы керамических плит), а также сами строительные объекты. Совместно с пылью твердые фториды могут попадать в атмосферу и перемещаться на большие расстояния.

Река Дон – основной источник водоснабжения г. Ростова-на-Дону. Единственный водозабор расположен в восточной части города (Александровка, Пролетарский район). Для Нижнего Дона характерно низкое качество воды в связи с хронической антропогенной

нагрузкой. Основные загрязняющими веществами, превышающими ПДК во много раз, являются нефтепродукты, нитритный азот, легкоокисляемые вещества, медь [6]. Ситуацию усугубляет высокий уровень износа водопроводных сетей в результате транспортируемая вода может загрязняться вторично. Наиболее остро стоит проблема с доставкой воды в Западный район (Советский и Железнодорожный районы) Ростова, поскольку из восточной части города вода проходит десятки километров.

Цель настоящей работы – выявить концентрацию фторидов в источнике водоснабжения (р. Дон), в водопроводных водах различных районах города, а также в водах, которые являются действующими или потенциальными источниками водоснабжения.

Объекты исследования

Река Дон – одна из крупнейших рек европейской территории России. Исток Дона расположен в северной части Среднерусской возвышенности, устье – в Таганрогском заливе. Водный режим Дона типичен для рек степной зоны: высокая доля снегового питания (до 70 %) при сравнительно слабом грунтовом и дождевом питании. Длина р. Дон – 1870 км, протяженность реки в Ростове около 20 км. Этот участок – Нижний Дон – подвергается значительному хроническому антропогенному воздействию, и складывается устойчивый дефицит ресурсов города в области хозяйственно-бытового водоснабжения, который усугубляется мощным техногенным влиянием промышленного и сельскохозяйственного производства, вызывающим и загрязнение, и истощение поверхностных вод [6].

Пробы воды р. Дон отбирались в течение 2015–2018 гг. в районе речного порта и водозабора.

Река Темерник – правый приток реки Дон – равнинная река длиной 33 км, из них 18 км расположены на территории г. Ростова-на-Дону. Продолжительное время р. Темерник была приемником неочищенных сточных вод старых очистных сооружений и на отдельных участках представляла собой подобие сточной канавы. В настоящее время городские власти занимаются реабилитацией реки: сооружены дамбы на питающих Темерник ручьях, периодически дно реки очищали и углубляли, для улучшения аэрации низовья реки покрыли бетоном, но этого оказалось недостаточно для спасения реки.

В октябре 2017 г. обучающимися кафедры геоэкологии и прикладной геохимии Института наук о Земле ЮФУ для оценки экотоксичности вод р. Темерник [7] были отобраны пробы воды в наиболее экологически напряженных участках реки, которые были любезно предоставлены нам.

На рисунке 1 представлена схема г. Ростова-на-Дону с указанием мест отбора проб водопроводной воды, дождя, снега, а также образцов из р. Темерник и р. Дон.

С конца XX в. в г. Ростове наблюдается высокий уровень грунтовых вод. Общая площадь подземных вод, залегающих на глубине от 2 до 20 м, превышает 500 га. Для изучения содержания фторидов подземных вод были исследованы воды 6 колодцев, а также 3 источников, находящихся на территории города, и скважина на севере Ростовской обл.

В связи с дефицитом качественной водопроводной воды с 90-х гг. в Ростове зародился рынок коммерческой бутилированной воды, появились источники, альтернативные донской воде и обеспечивающие питьевой водой г. Ростов-на-Дону. Питьевая вода «Элитная» добывается из артезианской скважины глубиной 240 м в пос. Матвеев-Курган; «Аксинья» – из 85-метровой скважины (г. Ростов-на-Дону), из которой с помощью дополнительного оборудования и добавок витаминов производят воду «Иверская».

Определение фторидов проводили в пробах бутилированной питьевой воды, произведенной в Ростове-на-Дону, а также других регионах.

Методы определения

Содержание фторидов в отобранных пробах определяли фотометрическим методом [8] с лантан-ализаринкомплексоном в присутствии ацетона и потенциометрическим методом с ионселективным электродом [9]. Фотометрический метод основан на образовании окрашенного в сиреневый цвет тройного комплекса ализаринкомплексона, лантана и фторида.

Интенсивность окраски увеличивается в присутствии ацетона. Пределы обнаружения фторидов фотометрическим и потенциометрическим методами составляют 0,006 мг/дм^3 и 0,1 мг/дм^3 соответственно. Диапазон измерения массовой концентрации для фотометрического способа – 0,020–2,00 мг/дм^3, для потенциометрического – 0,19–190 мг/дм^3. Чувствительность определения фотометрическим методом по сравнению с потенциометрическим выше почти на порядок. Фотометрический метод использовался для определения малых концентраций в пробах атмосферных осадков и бутилированных вод.

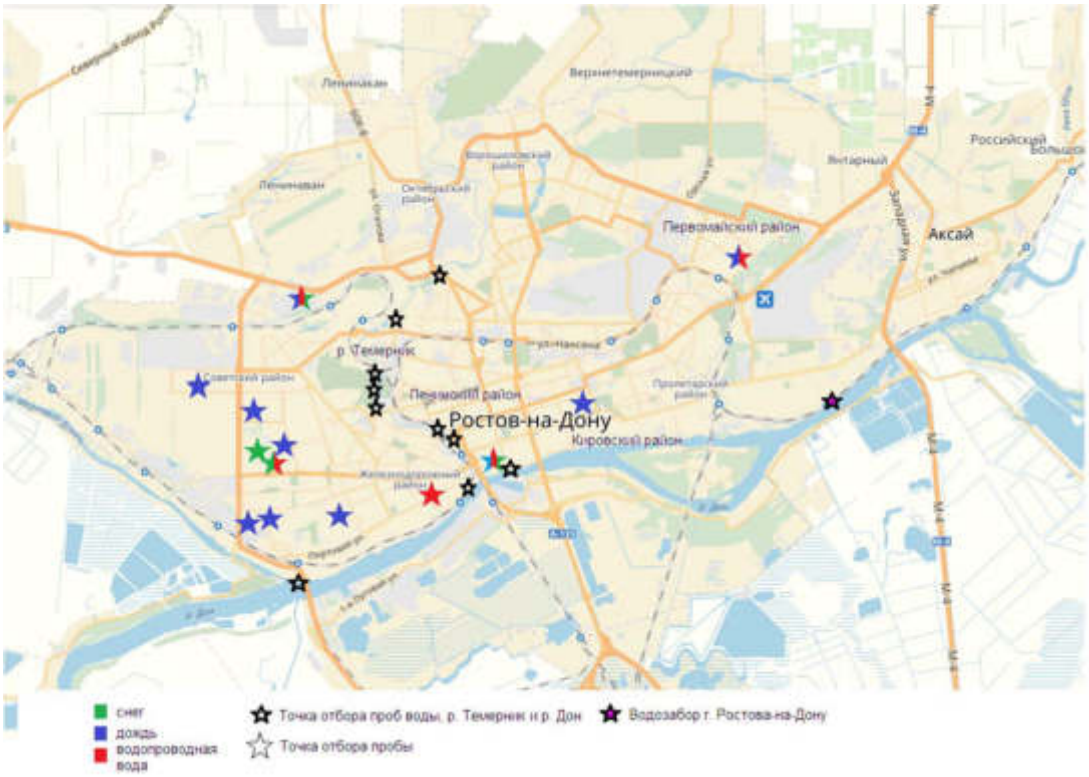


Рис. 1. Карта г. Ростова-на-Дону и схема расположения точек отбора проб

Результаты и обсуждения

Концентрации фторидов в пробах воды р. Дон, а также в пробах водопроводной воды, отобранной в Советском районе г. Ростова-на-Дону (как самого удаленного от водозабора района) представлены в табл. 1.

Таблица 1

Концентрация фторидов в пробах воды р. Дон и пробах водопроводной воды Советского района

Место отбора, р. Дон	Дата отбора	Концентрация фторидов, р. Дон, мг/дм^3	Примечание	Концентрация фторидов, водопроводная вода, мг/дм^3
Район речного порта	24.06.1950	0,300	[10]	-
	6.10.2015	0,292	-	-
	12.11.2015	0,299	-	-
	17.05.2016	0,315	-	0,312
	9.06.2016	0,321	-	0,324
	27.07.2016	0,320	-	0,293
	15.12.2016	0,309	по берегу лед	0,308
	18.01.2017	0,329	-	0,334
	18.07.2017	0,336	-	0,318
	27.12.2017	0,333	-	0,318
	01.02.2018	0,370	после сильного дождя	0,368
Водозабор (Александровка)	20.07.2017	0,320	-	-
	31.01.2018	0,353	по берегу лед	-

«-» – данные отсутствуют

Первые данные о содержании фторидов в р. Дон (г. Ростов-на-Дону) были получены в Гидрохимическом институте еще в 1950 г. колориметрическим методом [10]. С тех пор, особенно на фоне общего антропогенного загрязнения реки, концентрация фторидов претерпела незначительные изменения: среднее содержание в 2015–2017 гг. составило 0,319 мг/дм^3. Если наблюдать средние концентрации фторидов по годам: 0,296 мг/дм^3 в 2015 г.; 0,316 мг/дм^3 в 2016 г.; 0,333 мг/дм^3 в 2017 г и 0,370 мг/дм^3 в 2018 г. – то можно проследить тенденцию некоторого увеличения концентраций фтора в реке. Самая высокая концентрация (0,370 мг/дм^3) определена 1.02.2018 и может быть связана с резким потеплением и обильным дождем, в результате которого полностью растаял 7-дневный снег. Концентрация фторидов в пробе, отобранной у водозабора в этот же день, немного ниже, чем в месте отбора у речного порта (0,353 мг/дм^3).

Одновременно с анализом проб р. Дон определяли концентрацию фторидов в водопроводной воде Советского района. Как видно из табл. 1, концентрации и в пробах р. Дон и в водопроводной воде очень близки и ниже значений ПДК.

Данные по определению фторидов в воде р. Темерник представлены в табл. 2.

Установлено, что концентрации фторидов на выбранных участках реки достаточно близки и изменялись в пределах 0,440–0,483 мг/дм^3, но не превышали ПДК даже для рыбохозяйственных объектов. Самая высокая концентрация на территории Ботанического сада – 0,483 мг/дм^3, средняя концентрация – 0,474 мг/дм^3. Среднее значение содержание фторидов в пробах воды р. Темерник составило 0,466 мг/дм^3, что значительно выше средних значений в пробах р. Дон (0,319 мг/дм^3). Темерник впадает в Дон много ниже водозабора и не оказывает на него влияния. Анализ донской воды в 500 м ниже устья р. Темерник показал увеличение концентрации фтора в воде до 0,369 мг/дм^3.

Таблица 2

Концентрация фторидов и значение pH в пробах воды р. Темерник

Место отбора	Концентрация фторидов, мг/дм^3	pH
ул. Шеболдаева, мост	0,440	7,57
Район зоопарка	0,479	7,50
Ботанический сад, мост	0,470	7,70
Ботанический сад, напротив «склада» донных отложений	0,468	7,60
Ботанический сад, напротив главного корпуса	0,483	6,89
Пригородный ж/д вокзал, перед мостом	0,458	7,03
Пригородный ж/д вокзал, после моста	0,462	6,94
р. Дон, 500 м ниже устья р. Темерник	0,369	7,58

В таблице 3 представлены концентрации фторидов в водопроводной воде различных районов г. Ростова-на-Дону и городов Ростовской области, в подземных водах города, а также в разных видах питьевой воды.

Таблица 3

Фториды в питьевых водах г. Ростова-на-Дону и Ростовской области

Водопроводная вода, декабрь 2016 г.		Другие виды питьевой воды	
Место отбора	Концентрация фторидов, мг/дм^3	Место отбора	Концентрация фторидов, мг/дм^3
Советский район, пр. Стачки, 198	0,320	Источники: Сурб-Хач Ботанический сад Ростовский санаторий	 0,357 0,499 0,474
Ленинский район, пер. Халтуринский, 4	0,331		
Октябрьский район, ул. Таганрогская, 132	0,347	Колодцы	0,218–0,608
Железнодорожный район, ул. Загорская, 23	0,309	Скважина, х. Богданов	0,100
Первомайский район,	0,346	Бутилированная вода,	

ул. Кемеровская, 145		Ростовская обл.: «Аксинья» «Элитная» «Иверская»	 0,321 0,105 0,020
г. Каменск-Шахтинский, ул. Заводская, 18	0,356	Бутилированная вода: «Горячий ключ» «Горная вершина» «Кавказ»	 0,024 0,055 0,025
г. Аксай, ул. Платова, 83	0,383		
г. Новочеркасск, ул. Московская, 61	0,352		

Среди районов г. Ростова-на-Дону более высокие концентрации фтора найдены в водопроводной воде Первомайского (0,346 мг/дм^3) и Октябрьского (0,347 мг/дм^3) районов. Несколько выше содержание фторидов среди изученных проб из разных городов Ростовской обл. определено в водопроводной воде г. Аксай (0,383 мг/дм^3), близкие концентрации фтора (0,356 и 0,352 мг/дм^3) в г. Каменске-Шахтинском и г. Новочеркасске соответственно. По показателю фтора [1–2] водопроводная вода всех городов, приведенных в таблице 3, не только пригодна для питья, но и полезна (предотвращает кариес).

Содержание фтора в исследованных пробах подземных вод колеблется от 0,100 мг/дм^3 (скважина в х. Богданов, Ростовская обл.) до 0,608 мг/дм^3 (колодец, г. Ростов-на-Дону). Концентрация фторидов в скважине х. Богданова довольно низкая, постоянное употребление этой воды может вызвать дефицит фтора в организме. Источник в Ботаническом саду находится недалеко от р. Темерник, которая может оказывать влияние на источник, так как содержание фтора в нем (0,499 мг/дм^3) близко по значению содержанию фтора в водах р. Темерник. Схожая ситуация наблюдается и в случае источника Сурб-Хач.

Анализ проб бутилированной воды, произведенной в Ростове и Ростовской обл., показал, что для постоянного употребления пригодна вода «Аксинья» (0,321 мг/дм^3), а в остальных изученных образцах содержание фтора ниже рекомендуемого (<–,1–0,2 мг/дм^3). При пропускании воды через фильтр «Аквафор 5» изменение концентрации фтора не выявлено: 0,370 мг/дм^3 в водопроводной воде, 0,362 мг/дм^3 в той же воде после фильтра.

В таблице 4 представлены концентрации фторидов в атмосферных осадках в виде снега и дождя, отобранных в разных районах г. Ростова-на-Дону.

Таблица 4

Концентрация фторидов и значение pH в атмосферных осадках г. Ростова-на-Дону

Дождь				Снег		
Место отбора	pH	Концентрация фторидов, мг/дм^3		pH	Концентрация фторидов, мг/дм^3	
		19.12.2017	25.12.2017		17.01.2018	25.01.2018
Советский район						
ул. Каширская, 6	7,31	0,036	-	-	-	-
ул. Каширская, ГП310	7,21	0,031	-	-	-	-
ул. Зорге, 7	7,10	0,040	-	-	-	-
ул. Стрелковой дивизии, 27	6,98	0,031	-	-	-	-
ул. Мильчакова, 7	-	-	-	7,03	0,029	-
пр. Стачки, 198	-	-	-	7,10	0,026	0,020
ТЭЦ-2	-	-	-	7,70	-	0,067
Ленинский район						
пер. Халтуринский, 4	6,82	0,038	0,039	7,05	0,021	-
Первомайский район						
ул. Кемеровская, 145	6,57	-	0,050	-	-	-
Кировский район						
ул. Большая Садовая, 182	5,79	0,033	-	-	-	-
Октябрьский район						
ул. Таганрогская, 132	8,43	0,101	0,102	7,56	0,061	0,047
Микрорайон Левенцовский						
ул. Доватора, 257	6,97	0,032	-	-	-	-

Пробы дождя отбирали в один день в нескольких районах города. Содержание фторидов в пробах колеблется в небольших пределах: от 0,031 до 0,102 мг/дм^3. Самые высокие концентрации определены в Первомайском промышленном районе (0,050 мг/дм^3) и в Октябрьском районе (0,102 мг/дм^3), где ведется строительство. Такое же значение (0,102 мг/дм^3) было зафиксировано в дождевой воде Октябрьского района и через несколько дней, а затем и высокий результат в снеге (0,061 мг/дм^3). Дождевая вода Октябрьского района характеризуется высоким значением pH (8,43). Диапазон содержаний фторидов в снеге (талой воде) составил от 0,020 (Советский, Ленинский районы) до 0,067 мг/дм^3 (ТЭЦ-2, Советский район).

Результаты исследования воды р. Дон в г. Ростове-на-Дону показали, что, несмотря на серьезное загрязнение ее другими компонентами, концентрация фторидов находится ниже уровня ПДК и не представляет угрозы здоровью. Концентрации фторидов в водопроводной воде во всех районах города (несмотря на износ водопроводных сетей) достаточно близки между собой, изменяются в пределах 0,308–0,347 мг/дм^3. Определение фторидов в питьевых водах, альтернативных водопроводной воде, что для постоянного употребления применима бутилированная вода «Аксинья», поскольку имеет оптимальное (не низкое) содержание фтора для организма. Возможно применение фильтров на основе активированного угля для водопроводной воды, поскольку фтор на них не сорбируется. Анализ проб дождя и снега показал загрязнение атмосферы фторидами, особенно в Октябрьском районе (строительство), в районах ТЭЦ-2 и «Ростсельмаша». Озабоченность вызывает повышенный уровень и рост загрязнения атмосферы города фторидами [5], что подтверждается анализом атмосферных осадков.

Список литературы

1. Савенко В. С., Зезин Д. Ю., Савенко А. В. Фтор в поверхностных и грунтовых водах бассейна среднего течения р. Клязьмы // Вод. ресурсы. 2014. Т. 41. С. 544–552.
2. Перельман А. И. Геохимия ландшафта. М. : Географгиз, 1961. 496 с.
3. Гапонюк Э. И. Гидрометеорология. Степень и экологические последствия фторидного загрязнения. Сер. Контроль загрязнения природной среды, обзорная информация. Обнинск, 1983. 55 с.
4. ГН 2.1.5.1315-03. Предельно-допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования : в ред. доп. и изм. № 1, утв. Постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 28.09.2007 № 75, Постановления Главного государственного санитарного врача РФ от 28.09.2007 № 77; изм. № 2, утв. Постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 16.09.2013 № 49, Постановлений Главного государственного санитарного врача РФ от 30.08.2016 № 147, от 13.07.2017 № 97. Зарегистрировано в Минюсте России 19 мая 2003 г. № 4550.
5. О состоянии окружающей среды и природных ресурсов Ростовской области в 2012–2016 гг. : экол. вестн. Дона. Ростов-на-Дону, 2013–2017 гг. [Электронный ресурс]. URL: http://xn--d1ahaoghbejbc5k.xn--p1ai/state-of-the-environment/ekologicheskiy-vestnik/ (дата обращения 5.02.2018).
6. Водная экосистема нижнего Дона: многолетние изменения качества воды / под ред. А. М. Никанорова, Т. А. Хоружей, Л. И. Мининой. СПб. : Гидрометеоиздат, 2006. 307 с.
7. Экотоксичность вод урбанизированного участка реки Темерник по набору биотестов в современный период / М. Н. Тарадайко, В. В. Нефедова, А. Ю. Запорожцева, Е. Н. Бакаева / Проблемы социально-экономической географии и природопользования : сб. тр. Всерос. науч. конф. (Ростов-на-Дону, 1 дек. 2017 г.). Ростов н/Д ; Таганрог : Изд-во Юж. федер. ун-та, 2017. С. 281–285.
8. РД 52.24.533-2017. Массовая концентрация фторидов в водах. Методика измерений фотометрическим методом с лантан-ализаринкомплексоном в присутствии ацетона. Ростов н/Д, 2017. 23 с.
9. РД 52.24.360-2008. Массовая концентрация в водах: методика выполнения измерений потенциометрическим методом с ионселективным электродом. Ростов н/Д, 2008. 22 с.
10. Зенин А. А., Коновалов Г. С. К содержанию мышьяка, бора, брома и фтора в воде р. Кубань и Дона // Гидрохим. материалы. 1953. Т. 20. С. 18–21.

УДК 556.025

Состояние гидрометеорологической сети в Арктической зоне Российской Федерации

Р. А. Терехова

Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург

Аннотация. Рассмотрены вопросы организации научно-методического руководства в Арктическом и Антарктическом научно-исследовательском институте Росгидромета (ААНИИ) гидрометеорологическими наблюдениями и подготовкой изданий Водного кадастра сетевыми и методическими подразделениями Мурманского, Северо-Западного, Северного, Обь-Иртышского, Среднесибирского, Якутского и Чукотского УГМС в Арктической зоне Российской Федерации.

Ключевые слова: гидрометеорологическая сеть, Арктическая зона, методическое руководство, качество наблюдений, издания Водного кадастра.

В соответствии с Указом Президента РФ от 02.05.2014 № 296 (ред. от 27.06.2017) «О сухопутных территориях Арктической зоны Российской Федерации» [7] к Арктической зоне Российской Федерации (АЗРФ) отнесены территории:

Мурманской области (зона ответственности Мурманского УГМС).

Муниципальных образований «Беломорский муниципальный район», «Лоухский муниципальный район» и «Кемский муниципальный район» Республики Карелия (зона ответственности Северо-Западного УГМС).

Муниципальных образований «Город Архангельск», «Мезенский муниципальный район», «Новая Земля», «Город Новодвинск», «Онежский муниципальный район», «Приморский муниципальный район», «Северодвинск» Архангельской области (зона ответственности Северного УГМС).

Муниципального образования городского округа «Воркута» Республика Коми (зона ответственности Северного УГМС).

Ненецкого автономного округа (зона ответственности Северного УГМС).

Ямало-Ненецкого автономного округа (зона ответственности Обь-Иртышского УГМС).

Городского округа города Норильска, Таймырского Долгано-Ненецкого муниципального района, Туруханского района Красноярского края (зона ответственности Среднесибирского УГМС).

Аллаиховского улуса, Анабарского национального (Долгано-Эвенкийского) улуса, Булунского улуса, Нижнеколымского района, Усть-Янского улуса Республики Саха (зона ответственности Якутского УГМС).

Чукотского автономного округа (зона ответственности Чукотского УГМС).

Земли и острова, расположенные в Северном Ледовитом океане, указанные в Постановлении Президиума Центрального Исполнительного Комитета СССР от 15 апреля 1926 г. «Об объявлении территорией Союза ССР земель и островов, расположенных в Северном Ледовитом океане» и других актах СССР (зона ответственности УГМС по территориальной принадлежности островов и земель, расположенных в Северном Ледовитом океане).

Схема территории Арктической зоны Российской Федерации приведена на рис. 1.

Состояние гидрометеорологической сети в Арктической зоне РФ

В результате неоднократных реорганизаций сетевые и методические подразделения Арктической зоны РФ переданы в Северное (г. Архангельск), Обь-Иртышское (г. Омск), Среднесибирское (г. Красноярск), и Якутское УГМС (г. Якутск). Распределение финансирования в этих УГМС происходит в ущерб арктической сети. За истекший период с 1985 г. гидрометеорологическая сеть сокращена в среднем на 50 %, в том числе и реперная. Закрытие и консервация пунктов наблюдений часто проводились без согласования с Росгидрометом, ААНИИ и другими НИУ. В настоящее время значительная часть действующей сети длительное время законсервирована или фактически не работает, но формально считается не закрытой. Возобновление наблюдений на этой сети УГМС не планируется, поскольку она в

основном является труднодоступной и для восстановления и содержания требуются значительные средства. Руководство УГМС неоднократно обращалось в ААНИИ с просьбой дать согласие на ее закрытие.

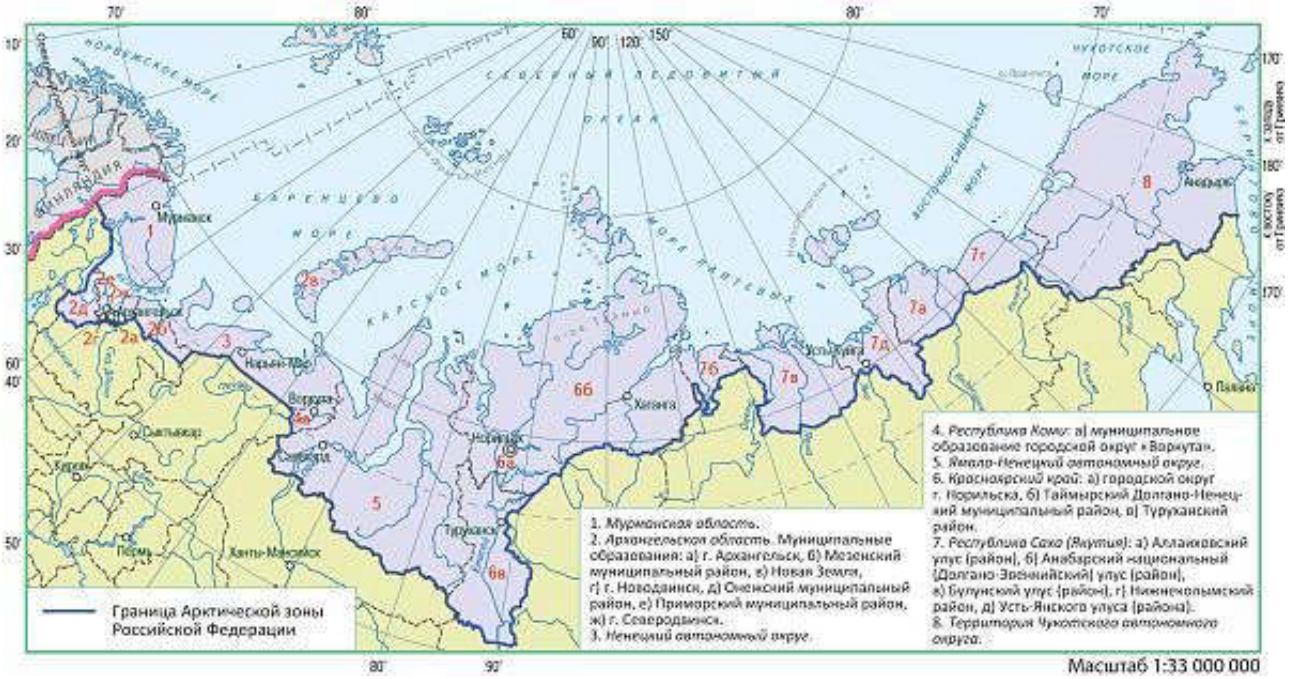


Рис. 1. Схема территории Арктической зоны Российской Федерации

Объем и качество наблюдений на фактически действующей сети не обеспечивают полноценное гидрометеорологическое обслуживание отраслей экономики, особенно в азиатской части Арктической зоны России. На водных объектах бассейнов Лаптевых, Восточно-Сибирского, Чукотского и Берингова морей гидрометеорологическое обеспечение практически прекратилось. В этой связи государственные и коммерческие структуры в настоящее время организуют свою ведомственную сеть гидрометеорологических наблюдений, причем часто без лицензии Росгидромета.

Рассмотрим состояние сети на примере устьевой гидрометеорологической сети крупных рек Арктической зоны РФ.

В соответствии с нормативными документами Росгидромета [1; 2] основной структурной единицей гидрометеорологических наблюдений и работ в устьевых областях рек является специализированная устьевая станция, на которую замыкается гидрологическая сеть, расположенная в зоне взаимодействия реки и моря, а также на водотоках и водоемах устьевой области. В состав гидрологической сети устьевых объектов входят речные посты, морские береговые гидрометеорологические станции и посты всех разрядов**.** Задачей устьевой станции является координация гидрометеорологических наблюдений на сети устьевой области реки, методическое руководство сетью независимо от категории, статуса, вида и разряда закрепленных станций и постов.

Ввиду отсутствия специализированных устьевых станций (или устьевой группы при ГМО и ЦГМС) их функции по методическому руководству гидрологической сетью на устьевых объектах Арктической зоны дополнительно к своим прямым обязанностям вынуждены выполнять морские и гидрологические отделы ГМЦ УГМС.

Модернизация гидрометеорологической сети фактически не коснулась восточных районов АЗРФ. Установка автоматических метеостанций (АМС) привела к закрытию морских береговых гидрологических наблюдений на станциях МГ-II и гидрологических устьевых постах ГП-II, хотя метеонаблюдения являются лишь составной частью их типовой программы. Отдельные установки автоматических гидрологических комплексов в западной части АЗРФ работают с перебоями и требуют постоянного контроля за их работой.

По результатам инспекций ААНИИ, а также сведениям УГМС состояние и комплектация приборов, необходимых для выполнения плановых гидрологических работ, находятся в крайне неудовлетворительном состоянии с высокой степенью физического износа.

На многих станциях и постах арктической устьевой сети в течение длительного ряда лет отмечены значительные пропуски наблюдений за основными элементами гидрологического режима – уровнем и температурой воды, ледовыми явлениями и толщиной льда, что привело к нарушению многолетних рядов наблюдений. Отсутствие самописцев уровня воды на большинстве сетевых подразделений в зоне взаимодействия речного и морского режимов не отражает картину внутрисуточных периодических и непериодических колебаний уровня воды и не обеспечивает качественное решение научных и практических задач.

В течение длительного ряда лет (15–20) не выполняется план наблюдений и работ по измерению расходов воды и взвешенных наносов на устьевых гидрометрических створах рек Печора, Енисей, Хатанга, Анабар, Лена, Яна, Индигирка, Алазея, Колыма и Анадырь, что не обеспечивает надежность расчетов стока воды и наносов в бассейнах арктических морей для их публикации в изданиях Водного кадастра. Следовательно, ставится под сомнение и объективная оценка многолетней изменчивости водных ресурсов в этом регионе.

Основной причиной является отсутствие на этих гидрометрических створах (замыкающих створах сибирских рек) необходимых для выполнения измерений по учету стока воды и взвешенных наносов в период свободного ото льда русла плавсредств (катера класса «О», маломерные суда, лодки), лодочных моторов и спасательных жилетов. Для выполнения таких работ в период ледостава крайне недостаточно наземного транспорта, не хватает автомашин типа «УАЗ», «ГАЗ-66», «Урал», вездеходов, тракторов, снегоходов с нартами.

Тарировочные лотки для поверки гидрометрических вертушек в УГМС не всегда отвечают необходимым требованиям. Гидрометрические вертушки морально устарели. Имеющиеся ледовые буры не предназначены для бурения ледяного покрова свыше 100 см, тогда как толщина льда в зимний период может достигать 350 см. Модернизированные ледовые буры на сеть не поступают. Не хватает чугунных реперов и свай для мерзлотных почв. Не организована надлежащим образом поверка нивелиров.

Анализ состояния высотной основы гидрологической сети (системы реперов), выполненный ААНИИ совместно с Архангельским ЦГМС-Р (по сети в Обско-Тазовской устьевой области) и Тиксинским филиалом Якутского УГМС (по гидростворам в устьевых областях рек Оленек, Лена и Яна) позволил дать оценку надежности и однородности наблюдений за уровнем и стоком воды в многолетнем плане. Результаты выполненных работ являются основанием для необходимости проведения таких работ по всей сети АЗРФ с целью обеспечения современных требований к высотной основе и, следовательно, однородности и качеству наблюдений за уровнем и стоком воды и на гидрологической сети.

Оперативно-методическое руководство сетью в УГМС

Основной целью методического руководства является обеспечение единства, сопоставимости методов и качества наблюдений за состоянием окружающей среды, сбора и распространения полученной в результате наблюдений информации.

Методическое руководство осуществляется на основе принципов нормативных документов [3; 4]:

– непрерывности наблюдений за состоянием окружающей среды;

– соблюдения установленных требований к сбору, обработке, контролю качества, хранению и распространению информации о состоянии окружающей среды;

– обеспечения пространственно-временного разрешения результатов измерений для определения характеристик гидрометеорологических величин с требуемой для практических целей точностью;

– единства измерений и сопоставимость их результатов;

– обеспечения достоверности и однородности результатов наблюдений о состоянии окружающей среды, ее загрязнении и доступности информации для пользователей.

К сожалению, перечисленные принципы не соблюдаются по ряду ниже перечисленных причин.

В результате передачи сетевых и методических подразделений бывших Амдерминского, Диксонского и Тиксинского УГМС в соседние УГМС нарушен бассейновый принцип и утрачена организационная система оперативно-методического руководства сетью. При ликвидации методических подразделений (ЦГМС, ГМО, ОГМС, Г) и сокращении профильных специалистов бывших Амдерминского, Диксонского и Тиксинского УГМС значительно снизился уровень оперативно-методического руководства сетью в АЗРФ.

Дефицит специалистов и опыта методической работы в области морских и устьевых наблюдений арктического региона в подразделениях Северного, Среднесибирского, Якутского и Чукотского УГМС привели к нарушению координации работ на гидрометеорологической сети в АЗРФ. Следует учесть и специфику наблюдений и работ в устьевых областях арктических рек, освоение которой требует совместных усилий специалистов гидрологов и океанологов, так как специалистов устьевиков учебные заведения не готовят. В последнее время наблюдается тенденция заполнения вакансий гидрологов и океанологов специалистами смежных профессий (географы, геологи, экологи), тем более не имеющих специализированного образования и опыта работы в гидрометеорологии.

Значительный кадровый дефицит инженерно-технического персонала гидрологических станций и методических отделов УГМС связан, в первую очередь, с низкой оплатой труда и отсутствием распределения специалистов. Негативную роль сыграли и неоднократные реорганизации подразделений, сокращения штатного состава гидрологических станций, методических отделов УГМС и отток опытных специалистов в смежные отрасли. Необходимо учитывать, что в отличие от Европейской территории в арктическом регионе трудоустройство специалистов имеет временные рамки и осуществляется по трудовому соглашению сторон. А такие условия оплаты за опасный и физически тяжелый труд в Арктике не устраивают ни молодых, ни опытных специалистов. При этом, как правило, отсутствует преемственность при выполнении работ, что значительно снижает качество гидрологических наблюдений.

Специалисты подразделений УГМС озабочены сокращением инженерно-технического состава специалистов-гидрологов и океанологов в методических отделах и на станциях, что неизбежно влияет на выполнение плана наблюдений и работ, снижение качества гидрологических наблюдений и методического руководства сетью, возникновению и накоплению задолженности по подготовке материалов наблюдений к публикации в ежегодных и многолетних изданиях Водного кадастра.

Используемые программы речных гидрологических и морских гидрометеорологических станций, и постов не позволяют получить достоверную информацию об устьевых процессах в зонах преобладания сезонных проявлений морского и речного режимов. Состав и сроки стандартных гидрологических наблюдений и работ не всегда соответствуют нормативным документам и не учитывают особенности гидрологического режима устьевых объектов бассейнов арктических морей [2; 4].

В ААНИИ выполнен анализ программ гидрологических наблюдений и работ в пунктах, расположенных в морских устьях рек Арктики в зонах преобладания сезонных проявлений морского и речного режимов и проведена оценка репрезентативности гидрологических наблюдений. Следует отметить, что программы наблюдений и работ сетевых подразделений УГМС не согласованы с ААНИИ, как предусмотрено нормативными документами [2; 4]. В Среднесибирском, Якутском и Чукотском УГМС длительное время не проводятся полноценные инспекции сетевых и методических подразделений ввиду отсутствия финансовых средств.

Следует отметить, что приказами по УГМС практикуется снятие плановых гидрологических наблюдений и работ. При этом выполнение плана по станции (посту) оценивается на «отлично», а выполнение плана наблюдений и работ сетевых подразделений в целом по УГМС 98–100 %. Оценка выполнения плановых работ и качества наблюдений сетевых под-

разделений Северного, Среднесибирского и Якутского УГМС проводится с нарушением основного критерия – обеспечения полноты (непрерывности) и качества (надежности) наблюдений, подготовленных к публикации в изданиях Водного кадастра в соответствии с нормативными документами [5].

По результатам научно-методических инспекций и экспертизы ААНИИ материалов Водного кадастра в Северном, Среднесибирском, Якутском и Чукотском УГМС выявлено неполное соблюдение действующих нормативных-методических документов по обеспечению объема и качества наблюдений на сети в АЗРФ [6]. На стадии подготовки изданий Водного кадастра в УГМС выявлены существенные недостатки по состоянию материалов и надежности результатов наблюдений:

– наличие задолженности по подготовке ежегодных и многолетних изданий;
– не обеспечена непрерывность наблюдений (наличие пропусков);
– не обеспечено единство методов измерений и сопоставимость результатов;
– не обеспечен контроль качества наблюдений и публикуемых данных;
– не обеспечена достоверность и однородность результатов наблюдений;
– не обеспечен пространственно-временной анализ результатов наблюдений.

Пропуски наблюдений отмечены за уровнем и температурой воды, толщиной льда и ледовыми явлениями, длительные перерывы или отсутствие измерений расходов воды и взвешенных наносов на замыкающих створах крупных и средних рек: Онеги (с. Порог), Печоры (с. Оксино), Енисея (г. Игарка), Хатанги (с. Хатанга), Анабар (с. Саскылах), Лены (с. Кюсюр), Яны (п. ст. Юбилейная), Индигирки (пос. Чокурдах), Алазеи (с. Андрюшкино), Колымы (с. Колымское), Анадырь (г. Анадырь).

Состояние подготовки изданий Водного кадастра и качество публикуемых наблюдений на территории Арктической зоны РФ не отвечает установленным нормативным требованиям. К основным причинам выявленных недостатков нужно отнести недостаточный уровень оперативно-методического руководства сетевыми подразделениями со стороны УГМС:

– недостаточный уровень технического (первичного) контроля;
– недостаточный уровень критического (смыслового) контроля;
– недостаточный уровень анализа надежности и однородности наблюдений;
– недостаточный геодезический контроль за состоянием высотной основы;
– сокращение состава и программы наблюдений сетевых подразделений;
– сокращение стандартных сроков гидрологических наблюдений.

В рамках научно-методического руководства ААНИИ проведена проверка выполнения предложений и рекомендаций по результатам экспертизы материалов ВК и планов мероприятий УГМС по результатам инспекций ААНИИ по ведению и подготовке изданий Водного кадастра РФ в Арктической зоне деятельности Мурманского (2013, 2015 гг.), Северного (2009, 2013, 2014 гг.), Обь-Иртышского (2010, 2014 гг.), Среднесибирского (2011, 2013, 2014 и 2017 гг.), Якутского (2012 г.), Чукотского УГМС (2016 г.). В результате анализа выявлено неполное выполнение предложений и рекомендаций ААНИИ в Северном, Среднесибирском и Якутском УГМС.

Научно-методическое руководство ААНИИ подразделениями УГМС в АЗРФ

В соответствии с Положением о государственной наблюдательной сети [6] и Уставом ААНИИ на институт возложены функции научно-методического руководства работой государственных сетевых и методических подразделений Мурманского, Северо-Западного, Северного, Обь-Иртышского, Среднесибирского, Якутского и Чукотского УГМС и ведомственной сетью по производству всех видов гидрометеорологических наблюдений в Арктической зоне Российской Федерации.

Работа по методическому руководству наблюдениями за состоянием окружающей среды, получением, сбором и распространением гидрометеорологической информации в Арктике и Антарктике (далее – наблюдения) ведется подразделениями ААНИИ в рамках плановых заданий Росгидромета. Направление деятельности по методическому руководству наблюдениями закреплено в положениях об этих подразделениях.

С целью совершенствования научно-методического руководства наблюдениями в Арктике и Антарктике и координации работ подразделений в ААНИИ создана постоянно действующая координационная группа, которая руководствуется Уставом ААНИИ, Положением о методическом руководстве наблюдениями и действующими нормативными документами, регламентирующими осуществление головными НИУ методического руководства.

В соответствии с Уставом ААНИИ методическое руководство осуществляется научными подразделениями института по направлениям:

– по геофизическим наблюдениям и работам;
– по метеорологическим наблюдениям и работам;
– по морским гидрологическим наблюдениям и работам;
– по ледовым наблюдениям на водных объектах;
– по гидрологическим наблюдениям и работам на водных объектах суши;
– по метрологическому обеспечению гидрологических наблюдений;
– по ведению фонда гидрологических данных;
– по вопросам связи в Арктике и Антарктике;
– по инженерно-гидрометеорологическим изысканиям и специализированному гидрометеорологическому обеспечению транспортных, грузовых и других технических операций на ледяном покрове поверхностных водных объектов.

В рамках научно-методического руководства отделы ААНИИ выполняют работы:

– формирование и обеспечение функционирования наблюдательных сетей;
– подготовка нормативных документов по гидрометеорологическим наблюдениям;
– учет гидрометеорологических сетей;
– инспекции подразделений УГМС по гидрометеорологическим наблюдениям;
– инспекции подразделений УГМС по подготовке изданий Водного кадастра;
– инспекции подразделений УГМС по оборудованию, приборам и связи;
– экспертиза материалов наблюдений при подготовке изданий Водного кадастра;
– подготовка ежегодных обзоров о состоянии гидрометеорологических сетей;
– подготовка ежегодных обзоров о состоянии и качестве изданий Водного кадастра;
– контроль выполнения предложений инспекций и подготовка заключений;
– контроль выполнения предложений экспертной научно-методической комиссии ААНИИ (ЭНМК) материалов изданий Водного кадастра.

ААНИИ осуществляет функции УГМС в Арктике и Антарктике:

– Высокоширотная арктическая экспедиция;
– Российская антарктическая экспедиция;
– Центр ледовой и гидрометеорологической информации;
– Мировой центр данных по морскому льду;
– Полярный геофизический центр.

За институтом закреплена гидрометеорологическая сеть: полевая база «Архипелаг Шпицберген», полярная станция им. Баранова на островах Северной земли, учебно-тренировочный и методический центр полярных исследований «Полевая база «Ладога», геофизическая станция «Горьковская», антарктические станции.

В настоящее время существуют нерешенные вопросы по координации действий научно-методических и оперативно-методических работ между НИУ и УГМС. К ним можно отнести:

1. Противоречия современному законодательству в действующих нормативных документах Росгидромета. При организации гидрометеорологической сети в АЗРФ нарушаются бассейновый принцип и гидрографическое районирование.

2. Несогласованное взаимодействие НИУ при разработке нормативных документов. На стадии текущей разработки нормативно-методических документов разработчиками нарушаются правила разработки РД и не всегда принимаются во внимание предложения НИУ-соисполнителей.

3. Раздробленная в Планах НИОКР Росгидромета тематика по видам наблюдений затрудняет выполнение ААНИИ единого научно-методического подхода к обеспечению работ на гидрометеорологической сети в Арктике.

4. В Уставах отдельных НИУ взаимно не увязано разграничение функций, а в Уставах УГМС взаимно не увязано разграничение зон ответственности (например, между Северным, Среднесибирским и Обь-Иртышским УГМС) в Арктической зоне РФ.

Предложения по повышению эффективности оперативно-методического руководства гидрометеорологическими наблюдениями в Арктической зоне РФ

Для Росгидромета и НИУ

1. Разработать Административный регламент с установкой границ ответственности для НИУ и УГМС в Арктической зоне для использования в научно-методической деятельности Росгидромета.

2. Установить конкретные виды наблюдений в Арктике, за которые ААНИИ несет ответственность без дублирования с другими НИУ и закрепить в разрабатываемых нормативных документах.

3. Привести подчиненность сети в АЗРФ в соответствие бассейновому принципу с детализацией по гидрографическому районированию в соответствии с Водным, Экологическим кодексами, Приказами Минприроды РФ, руководящими документами Росгидромета, ГОСТ по стандартизации.

4. Наладить контроль за исполнением правовых и нормативных документов по методическому руководству НИУ и УГМС в АЗРФ.

5. Восстановить целевое финансирование филиалов УГМС (ЦГМС, ЗГМО, ГМО) для содержания сети в Арктике.

Для УГМС и НИУ

1. Восстановить ранее действующую сеть гидрометеорологических наблюдений с учетом оптимального числа станций и постов.

2. Повысить методический статус объединенных, метеорологических и гидрологических станций, создать специализированные устьевые станции, в первую очередь, в Обско-Тазовской, Енисейской, Ленской и Колымской устьевых областях.

3. Провести в УГМС и НИУ уточнение сведений по действующей, длительное время не работающей, законсервированной и закрытой сети, в том числе и ведомственной в рамках АСУНП (Автоматизированной системы учета наблюдательных подразделений).

4. Провести анализ и усовершенствование программ наблюдений с учётом особенностей строения сети и гидрометеорологического режима в Арктике.

5. Выполнить оценку репрезентативности гидрометеорологических наблюдений.

6. Провести работы по обновлению и совершенствованию высотной основы сети (системы реперов) с использованием спутниковых систем. Создать электронный каталог реперов с выполнением анализа динамики высотных отметок и однородности наблюдений за исторический период.

7. К основным задачам по модернизации сети следует отнести:

– обеспечение гидрологической сети современными приборами и оборудованием с учётом современного уровня развития технических средств, системой спутниковой навигации, эхолотами, геодезическими приборами нового поколения;

– обеспечение гидрологической сети современными средствами связи (мобильной радиосвязью дальностью до 100 км);

8. Для выполнения гидрологических работ по учету водных ресурсов необходимо обеспечить сетевые подразделения водными транспортными средствами соответствующего класса с обеспечением безопасности. Для выполнения летних работ на устьевых взморьях необходимы научно-исследовательские суда класса «О», на устьевых участках крупных сибирских рек необходимы суда типа «Ярославец», в малых и больших протоках дельты – маломерные плавсредства (катера, мотоботы и лодки). В период ледостава в арктических усло-

виях необходимы наземные транспортные средства: вездеходы типа ГАЗ-71, тракторы, снегоходы «Буран» с нартами.

9. Кадровые вопросы в условиях Арктики могут быть решены путем:

– повышения статуса наблюдателя гидрологического поста до техника-гидролога с оплатой труда по соответствующему объему наблюдений и работ;

– дополнительной оплаты существующего физического труда наблюдателей и инженерно-технических специалистов сетевых подразделений при выполнении гидрологических работ в арктических условиях;

– обеспечения преемственности при смене специалистов-гидрологов;

– существенного снижения ротации специалистов-гидрологов путем значительного повышения стимулирующих надбавок в условиях Арктики;

– повышения квалификации специалистов-гидрологов.

Список литературы

1. РД 52.04.107-86 Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 1. Л., 1987. 184 с.
2. РД 52.10.324-92 МУ «Гидрологические наблюдения и работы на гидрометеорологической сети в устьевых областях рек». ГОИН, 1993. 188 с.
3. РД 52.04.576-97 Положение о методическом руководстве наблюдениями за состоянием и загрязнением окружающей среды. Общие требования. 24 с.
4. РД 522.04.567-2003 Положение о государственной наблюдательной сети. Росгидромет, 2003 г., с изм. 1 от 01.12.2008. 45 с.
5. РД 52.19.751-2010 Оценка гидрометеорологических наблюдений и работ. Обнинск, 2011. 108 с.
6. РД 52.18.5-2012 Перечень нормативных документов (по сост. на 01.08.2012). 268 с.
7. О сухопутных территориях Арктической зоны Российской Федерации : указ Президента РФ от 2 мая 2014 г. № 296 (с изм. 27.06.2017 № 287). 3 с.

УДК.556

Изучение формирования стока малых рек Республики Алтай

М. А. Чулунов (chulunovmega17@gmail.com), М. Параев (paraev_1993@mail.ru)

Горно-Алтайский государственный университет, Горно-Алтайский

Аннотация. Рассмотрены проблемы прогноза стока малых рек. Особенно это сложно в горных территориях. Приведены результаты снегомерной съёмки и расчетов по характеру снежного покрова.

Ключевые слова. Сток рек, горные территории, снежный покров, подтопление.

Введение

Сегодня нет сомнения в значимости снежного покрова для различных сфер жизни на Земле. В последние десятилетия много говорится о существенных изменениях климата [9], что неизбежно отражается на характере режима зимних осадков. Для транспорта [6] наиболее важно распределение снега в пространстве и некоторые другие показатели, для сельского хозяйства – сроки формирования устойчивого снежного покрова и его схода, ледовая корка и пр. При решении ряда вопросов важно знать запас снега к началу снеготаяния [5]. Даже на бытовом уровне мы часто прогнозируем по количеству снега характер половодья. Для горных стран это особенно важно.

В настоящее время сформировано достаточно ресурсов мониторинга этого компонента природной среды и представления в различном виде (табличный, текстовый, графический и пр.) его количества, характера распределения и пр. [10–12 и др.]. Например, один из наиболее часто используемых ресурсов это интернет-ресурс – сайт гидрометеорологической службы России (рис. 1).

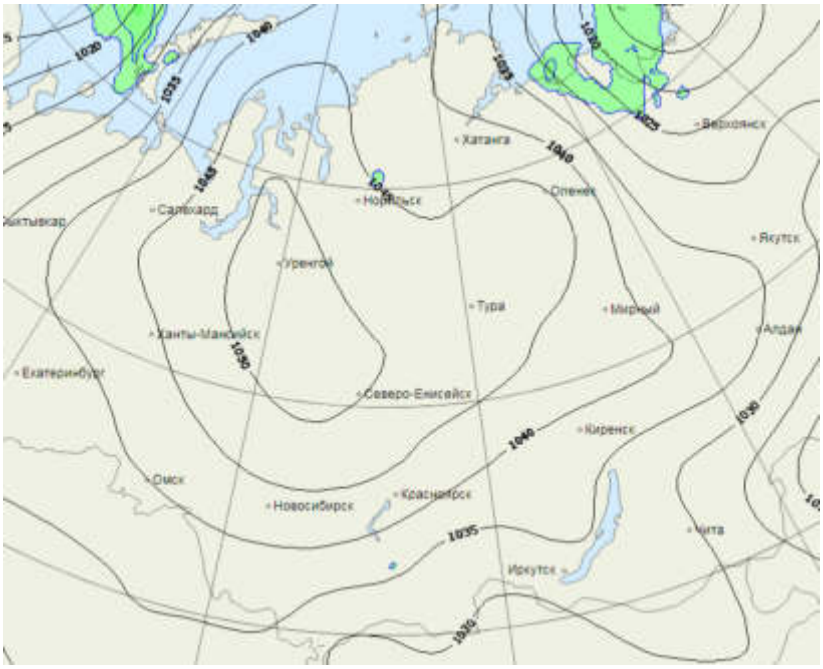


Рис. 1. Карта снежного покрова на 19.01.2018 г. [10]

В Западной Сибири первый снег появляется на севере в сентябре, а ко второй декаде октября почти на всей территории региона. Устойчивый снежный покров на побережье Карского моря образуется в начале октября, в центральной части – в третьей декаде октября и в южной – в начале ноября. Процесс весеннего снеготаяния и разрушения устойчивого снежного покрова начинается в апреле и завершается окончательно в южных степных районах в конце апреля, в лесной зоне – в конце мая, в северных районах – в середине июня. Но в зависимости от характера зимних условий, эти сроки могут сдвигаться на две недели или даже на месяц. В высокогорных районах Алтая снег сохраняется большую часть года, а снежники сохраняются в течение всего лета, как на Алтае, так и в горах Кузнецкого Алатау. Число дней со снежным покровом на севере составляет около 250 дней, уменьшаясь до 160–140 в степных районах [13].

Всё это свидетельствует об актуальности проведения изучения снежного покрова, особенно для прогноза подтоплений и наводнений. Зима 2016–2017 гг. была многоснежной. Устойчивый снежный покров установился по наблюдениям авторов 18 октября. Для территории Северного Алтая характерно малое количество снега в первой половине зимы [2]. Однако зима 2016–2017 гг. была необычной в том, что установился снежный покров раньше средних значений [8; 9], высота его продолжала расти в течение всей зимы. Этим был обусловлен риск подтопления низинных территорий в случае активного таяния снега в бассейне р. Майма.

Учитывая опыт 2014 г. авторы возобновили исследования в бассейне реки Майма. Целью стала оценка качественного и количественного потенциала природных вод бассейна р. Майма. В качестве долгосрочной программы авторы предполагают решение ряда задач:

– изучение природных особенностей бассейна р. Майма;
– изучение факторов динамики стока в бассейне р. Майма;
– изучение факторов динамики качества воды в бассейне р. Майма;
– оценка состояния водоснабжения населения при проявлении ЧС в бассейне р. Майма.

Полученные результаты

Начало нашей работы базировалось на результатах предыдущих исследований [1; 3; 4; 7–9], которые мы нашли в опубликованной литературе.

Д. В. Золотов, Л. Ф. Лубенец, Д. В. Черных разработали серию карт для этой территории, часть из которых важна для наших работ [3]. Например, карта крутизны склонов позволяет производить расчеты стока талой воды [3].

«Разные ландшафты различно преобразуют выпадающие осадки. Формирование стока в горах в значительной степени подчинено высотной поясности – с высотой увеличиваются атмосферные осадки, понижается температура воздуха, уменьшается испарение, что отражается в возрастании речного стока. Проявление этой общей закономерности в пределах одной горной системы или ее пояса зависит от геологического строения и размеров элементов рельефа, экспозиции склонов (солярной и ветровой) и их крутизны. Так чем больше уклон поверхности при прочих равных условиях, тем выше коэффициент стока. Тогда как мощность снежного покрова и число дней с ним также изменяются с высотой, экспозицией и крутизной склонов» [3, с. 362].

Бассейн р. Майма имеет замыкающий створ в с. Майма (гидропост) (рис. 2), а также одну длительно функционирующую метеостанция, также расположенную в низовьях бассейна – в с. Кызыл-Озёк.

Среднегодовая температура в бассейне р. Майма составляет +1,0 °С, сумма осадков – 795 мм. Период со среднесуточной температурой ниже 0 °С – 170 дней. Устойчивый снежный покров образуется в первую декаду ноября. Среднемноголетняя высота снежного покрова – 68 см, период с устойчивым снежным покровом – 167 дней. Преобладающие ветры: в январе – юго-восточные, северо-западные и южные; в июле – южные и северо-западные.

Средняя наибольшая скорость ветра в январе 4,7 м/сек, наименьшая – 1,6 м/сек. Повторяемость фенов около 30 % [7; 8, с. 26].

Все эти показатели очень важны для общего представления об условиях в бассейне с наибольшей плотностью населения. Однако в последнее время всё чаще погодные ситуации отклоняются от средних многолетних показателей [4; 9]. Этим определяется начало работ авторского коллектива, которое пришлось на конец зимы 2016–2017 гг.

Автор в составе группы (Р. А. Аванесян, Н. А. Кочеева, М. А. Чулунов) участвовал в проведении снегомерной съёмки в долине р. Майма (рис. 2) в границах с. Кызыл-Озёк – город – Майма.



Рис. 2. Замеры на левом берегу р. Майма в с. Кызыл-Озёк. Одна из крайних южных точек (фото Н. А. Кочеевой)

Крайние точки показаны на рисунке (рис. 2) вне масштаба. Они находились в пойме р. Майма в непосредственной близости от гидропоста (на рис. 2 – ГП) и на вершине горной гряды в 150 м от окраины с. Кызыл-Озёк.

Результаты замеров и расчётов приведены в табл. 1.

Проведенные исследования показали, что даже в однородных условиях бассейна одной реки снежный покров представляет собой явление исключительной сложности, чрезвычайно изменчивое в пространстве. На формирование снежного покрова влияет ветер, экспозиция склона, а, следовательно, солнечная радиация. Даже его плотность колеблется в некоторых пределах (табл. 1). По нашим наблюдениям это в значительной степени зависит от экспозиции склона.



Рис. 3. Схематичное расположение крайних точек полевого изучения зимой 2016–2017 гг. и фото гидрологического поста на р. Майма (фото Н. А. Кочеевой)

Таблица 1

Фактический материал, собранный в ходе снегомерной съёмки

Высота снега	Масса, г	Объем снега, см³	Плотность снега, г/см³	Запас воды, г/см²
77	1500	24 663,98	0,060817	46,82943
120	3500	38 437,37	0,091057	109,2687
50	1000	16 015,57	0,062439	31,21962
70	1800	22 421,8	0,080279	56,19531
65	1500	20 820,24	0,072045	46,82943
75	1800	24 023,36	0,074927	56,19531
75	1800	24 023,36	0,074927	56,19531
26,50	800,00	8488,252	0,094248	24,9757
60	1200,00	19 218,68	0,062439	37,46354
42	800	13 453,08	0,059466	24,9757
23	500	7367,162	0,067869	15,60981
63	1300	20 179,62	0,064421	40,58551
57	1000	18 257,75	0,054771	31,21962
58	1200	18 578,06	0,064592	37,46354
60	1200	19 218,68	0,062439	37,46354
52	1300	16 656,19	0,078049	40,58551
72	1400	23 062,42	0,060705	43,70747
43	900	13 773,39	0,065343	28,09766
30	800	9609,342	0,083252	24,9757

Расчёты проводились с использованием программы Excel2013. Они показали, что весной 2017 г. при таянии снега в бассейне р. Майма подтопление маловероятно.

Высота снега не может ответить на вопрос о характере весеннего таяния и подтопления. Необходимо знать запас воды в снеге. В таблице приведены расчётные данные, полученные обработкой результатов замеров (табл. 1). Плотность снега определялась отношением объёма воды, получающегося при таянии данного объёма снега к объёму этого снега до таяния [5, с. 410].

Авторы отмечают, что работа продолжается. Следующая снегомерная съёмка намечена на конец зимы.

Однако уже в настоящее время проявляются интересные явления, связанные с высотой снежного покрова (рис. 4).

У подножья горнолыжной трассы в черте города Горно-Алтайск зафиксированы трещины, глубиной от нескольких сантиметров до 67 см. Ширина трещин колеблется в широких пределах, достигая максимумы на отметке 5 см.

По нашим наблюдениям это явление связано с общей обводнённостью восточного склона г. Тугая, где располагается трасса. В течение осени и начала зимы температура воздуха была выше многолетних значений [14], высота снежного покрова не превышала 5 см. У подножья трассы высота снежного покрова не превышала 2 см из-за постоянного уплотнения и выбивания (дети катались на санках). В начале января 2018 г. температура понизилась до – 30 [14] без снега. В результате произошло промерзание грунта и его разорвало – образовались трещины. Наблюдается небольшая возвышенность, которой в летнее время в рельефе не существует.



Рис. 4. Фото трещин снежного наката и грунта у подножья горнолыжной трассы в г. Горно-Алтайске (Фото М. Чулунова, 12.01.2018)

Выводы

Прогноз количества воды представляет большие трудности, чем характер распределения снежного покрова в бассейне горной реки Майма. Это связано с неравномерностью распределения снега, что в свою очередь контролируется рельефом, температурой воздуха, ветрами, антропогенной деятельностью, облачностью и пр. Явления, которые наблюдаются в настоящее время у подножья склона г. Тугая свидетельствуют о том, что весеннее просачивания талой воды в почву и в более глубокие слои будет затруднено. Может сформироваться ситуация, когда небольшое количество снега приведёт к неблагоприятной гидрологической ситуации. Поэтому малоснежная зима требует даже большего внимание с точки зрения мониторинга состояния бассейнов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 16-45-040266 р-а.

Список литературы

1. Аванесян Р. А. Пространственно-временные особенности формирования стока горных рек Алтая в условиях изменения природной среды : автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Барнаул, 2013. 22 с.

2. Атлас Алтайского края. М. ; Барнаул : Изд-во ГУГК, 1978. Т. 1. 222 с.

3. Золотов Д. В., Лубенец Л. Ф., Черных Д. В. Ландшафтные факторы формирования стока в бассейне р. Майма. Северный и Северо-восточный Алтай // Мир науки, культуры, образования. 2012. № 2. С. 360–369.

4. Зимние наводнения, как результат резонанса природной и антропогенной составляющей современных геосистем / Н. А. Кочеева, М. Г. Сухова, О. В. Журавлева, Р. А. Аванесян, С. С. Драчёв // Вестн. ТГУ. Бюл. № 72. 2006. С. 12–35.

5. Поляков Б. В. Гидрологический анализ и расчёты. Л. : Гидрометеоиздат, 1946. 480 с.

6. Самодурова Т. В., Бакланов Ю. В., Перегудова В. Н. исследование температурного режима в период возможного образования зимней скользкости на автомобильных дорогах // Дороги и мосты. 2017. № 37-1. С. 12–25.

7. Природно-ресурсный потенциал, как определяющий фактор сбалансированного развития трансграничных горных территорий (на примере Республики Алтай / М. Г. Сухова, О. В. Журавлева, Н. А. Кочеева, Е. О. Гармс // Учен. зап. Тавр. нац. ун-та им. В. И. Вернадского. Сер. География. 2012. Т. 25 (64), № 4. С. 14–20.

8. Сухова М. Г. Эколого-климатический потенциал ландшафтов Алтае-Саянской горной страны для жизнедеятельности населения и рекреационного природопользования : автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. Томск, 2009. 40 с.

9. Climate change and the identification of ecosystem services in Northern Altai conditions / M. Sucova, O. Zhuravlyova, N. Kocheeva, A. Karanin, Yu. Nikolchenko // Geography, Culture And Society For Our Future Earth : the 2015 IGU Regional Conference (17–21 August 2015 g.). Moscow, 2015. P. 177.

10. https://www.gismeteo.ru/maps/sib/wind.

11. http://globalmeteo.ru/map/region-siberia/precipitation.

12. http://meteo-nso.ru/pages/graphics.

13. https://geographyofrussia.com/snezhnyj-pokrov.

14. http://www.meteo-altai.ru.

УДК69.034.95; 625.7/.8.05

Гидрологическое обоснование мостового перехода через р. Витим

М. В. Шишковский[1] (schischkovski-mv@vstp.ru), В. М. Казакова[2] (vikakazak96@gmail.com), О. А. Бархатова[2] (barhat@geogr.isu.ru)

[1] ЗАО «Востсибтранспроект», г. Иркутск
[2] Иркутский государственный университет, Иркутск

Аннотация. Работа содержит сведения о выполненном комплексе инженерно-гидрометеорологических изысканий по объекту «Проектирование мостового перехода через р. Витим в Бодайбинском районе Иркутской области».

Ключевые слова: инженерно-гидрометеорологические изыскания, проектирование мостовых переходов, река Витим, метод моментов, метод наибольшего правдоподобия, графоаналитический метод.

Введение

Инженерно-гидрометеорологические изыскания выполняются для комплексного изучения гидрометеорологических условий территорий намечаемого строительства, с целью получения необходимых и достаточных материалов для подготовки документов территориального планирования и планировки территории, архитектурно-строительного проектирования, строительства и реконструкции зданий и сооружений [2].

В учебных целях, были взяты и актуализированы данные по выполненному объекту «Проектирование мостового перехода через р. Витим в Бодайбинском районе Иркутской области», изыскания проводились в 2013 г. (рис. 1). При актуализации были добавлены расходы воды за 2014 и 2015 гг. для построения обновленной кривой расходов и получения расчетных уровней воды различной вероятности.

Целью работы является выполнение инженерно-гидрометеорологических изысканий для проектирования и дальнейшего строительства и реконструкции мостового перехода через реку Витим в Бодайбинском районе Иркутской области.

Планируется рассмотреть два варианта размещения мостового перехода. В данной работе проанализирован первый вариант мостового перехода. Расчетный уровень воды получен с помощью переноса по уклону от гидрологического поста в створ мостового перехода.

Первый вариант мостового перехода был запроектирован давно и в 1985 г. началось его строительство, но с 1995 г. объект находится в стадии незавершенного строительства.

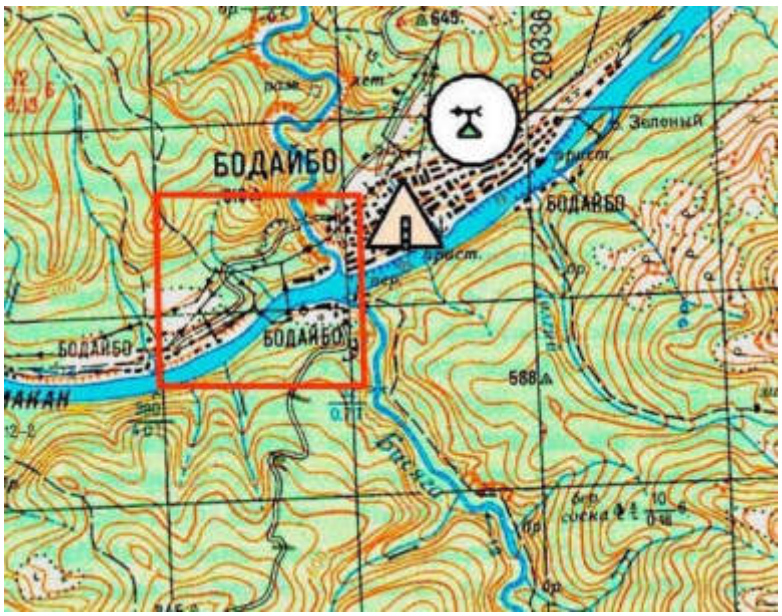


Рис. 1. Карта-схема района изысканий

Выбирая участок под новое строительство и выполнение инженерно-гидрологических изысканий, специалисты рассматривали участок на основании старого проекта, но после проведения экспертизы в 2013 г. сделали вывод, что строительство необходимо планировать в другом месте, так как поставленные когда-то опоры моста непригодны для дальнейшего строительства.

В итоге изыскания были проведены по второму варианту, выше по течению, после впадения рек Бисяга и Бодайбо, и полный расчет будет приведен в выпускной квалификационной работе Казаковой В. М.

Гидрометеорологическая характеристика района проектирования

Климат рассматриваемой территории характеризуется резко выраженной континентальностью, которая проявляется в очень низких зимних и высоких летних температурах воздуха, т. е. абсолютная амплитуда достигает 95 °С (абсолютный минимум января: –55 °С, абсолютный максимум июля: +40 °С) [3; 6].

Река Витим берет начало в горных районах Бурятской республики на высотах Икатского хребта, протекает по северо-западной границе Читинской области, пересекает Иркутскую область и на территории Якутии впадает справа в реку Лена на 2870 км от её устья. Река образуется от слияния рек Чина и Витимкан, её истоком принято считать реку Витимкан. Длина реки от истока до устья 1978 км, а от места слияния Чины и Витимкан1837 км [4].

Бассейн реки Витим расположен в горной части западного Забайкалья и Витимского плоскогорья. Площадь бассейна составляет 225 тыс. км^2. Средний годовой расход воды в устье 2200 м^3/с. Берега реки Витим большей частью высокие, обрывистые, местами скалистые, сложенные из трудно размываемых пород, поросли смешанным лесом. Средний уклон реки Витим составляет 0,8 ‰. Коэффициент извилистости русла здесь 1,25 [4].

Регулярное судоходство реки Витим осуществляется на протяжении около 300 км – до города Бодайбо. Основной поток грузов на р. Витим поступает с железнодорожной станции Лена.

Река Витим имеет преимущественно дождевое питание (до 88 %), доля снегового и грунтового питания в годовом стоке незначительна и составляет соответственно 9 % и 3 %.

Расчет основных гидрологических характеристик, необходимых для проектирования мостового перехода

Расчёт уровня воды производился по расходам воды дождевых паводков, так как расход воды весеннего половодья меньше, чем расход воды дождевых паводков.

Максимальные расчетные уровни воды пересекаемой реки определены морфометрическим путем в комплексной программе «CREDO-Морфоствор».

Программа рассчитывает отметки водной поверхности по заданному расходу воды. Исходными данными являются: профиль морфоствора (отметки и расстояние), шероховатость участков морфоствора, уклон реки, расходы.

Расчет морфоствора осуществляется на основании уравнения Шези (1):

$$\upsilon = C\sqrt{h_{cp} \cdot \imath}\,, \tag{1}$$

где C – коэффициент, учитывающий потерю энергии на определение сил трения, зависящих от степени шероховатости и поперечных размеров русла, по формуле Маннинга определяется $\frac{1}{n}h_{cp}$; где h_{cp} – средняя глубина участка, м; i – уклон реки; шероховатость участка, которая определяется по таблице М. Ф. Срибного [7].

Максимальные расходы рассчитывались для дождевых паводков тремя методами: методом моментов, методом наибольшего правдоподобия и графоаналитическим методом.

При расчётах было получено, что метод наибольшего правдоподобия, который разработан на основе трехпараметрического гамма-распределения, предложенного Крицким и Менкелем не подходит для данного ряда данных, так как полученные значения не входят в номограммы для вычисления параметров трёхпараметрического гамма распределения.

При дальнейших расчётах за основу были взяты результаты, полученные при расчётах графоаналитическим методом, применение которого допускается на начальных стадиях проектирования. Использовались следующие расчетные формулы (2)–(5) [8]:

$$S = \frac{Q_5 + Q_{95} - 2Q_{50}}{Q_5 - Q_{95}}\,; \tag{2}$$

$$\sigma = \frac{Q_5 - Q_{95}}{\Phi_5 - \Phi_{95}}\,; \tag{3}$$

$$\overline{Q} = Q_{50} - \sigma\Phi_{50}\,; \tag{4}$$

$$C_v = \frac{\sigma}{\overline{Q}}\,, \tag{5}$$

где Q_5, Q_{50}, Q_{95} – значения расходов воды вероятности превышения соответственно – 5, 50 и 95 %, которые устанавливаются по сглаженной эмпирической кривой распределения; Φ_5, Φ_{50}, Φ_{95} – нормированные ординаты биномиальной кривой распределения. Значение коэффициента асимметрии C_s определяют по функциональной зависимости от коэффициента скошенности S.

$$Q_{p\%} = k_{p\%} \cdot \overline{Q}\,. \tag{6}$$

Снимая с эмпирической кривой значения модульных коэффициентов 5, 50, 95 % обеспеченности мы можем получить расходы при этих же обеспеченностях (табл. 1).

Таблица 1

Параметры биномиального распределения

$Q_{5\,\%}$	$Q_{50\,\%}$	$Q_{95\,\%}$	S	σ	$Q_{ср}$	C_s	C_v
15 028,0	9147,4	4293,7	0,096	3274,43	11 194,0	0,35	0,29

Получив значение расхода 0,33 %, 1 %, 2 %, 5 %,10 % обеспеченности, с помощью программы «CREDO-Морфоствор», рассчитываютсяуровни воды.

Далее в программе «CREDO-Морфоствор» строится профиль перехода через реку Витим с графиками зависимостей уровня от скорости, уровня от расхода и уровня от скорости (рис. 2). [Срок давности материалов инженерно-гидрометеорологических изысканий при изучении гидрологического режима водных объектов не должен превышать два года (от окончания инженерно-гидрометеорологических изысканий до начала проектирования).]

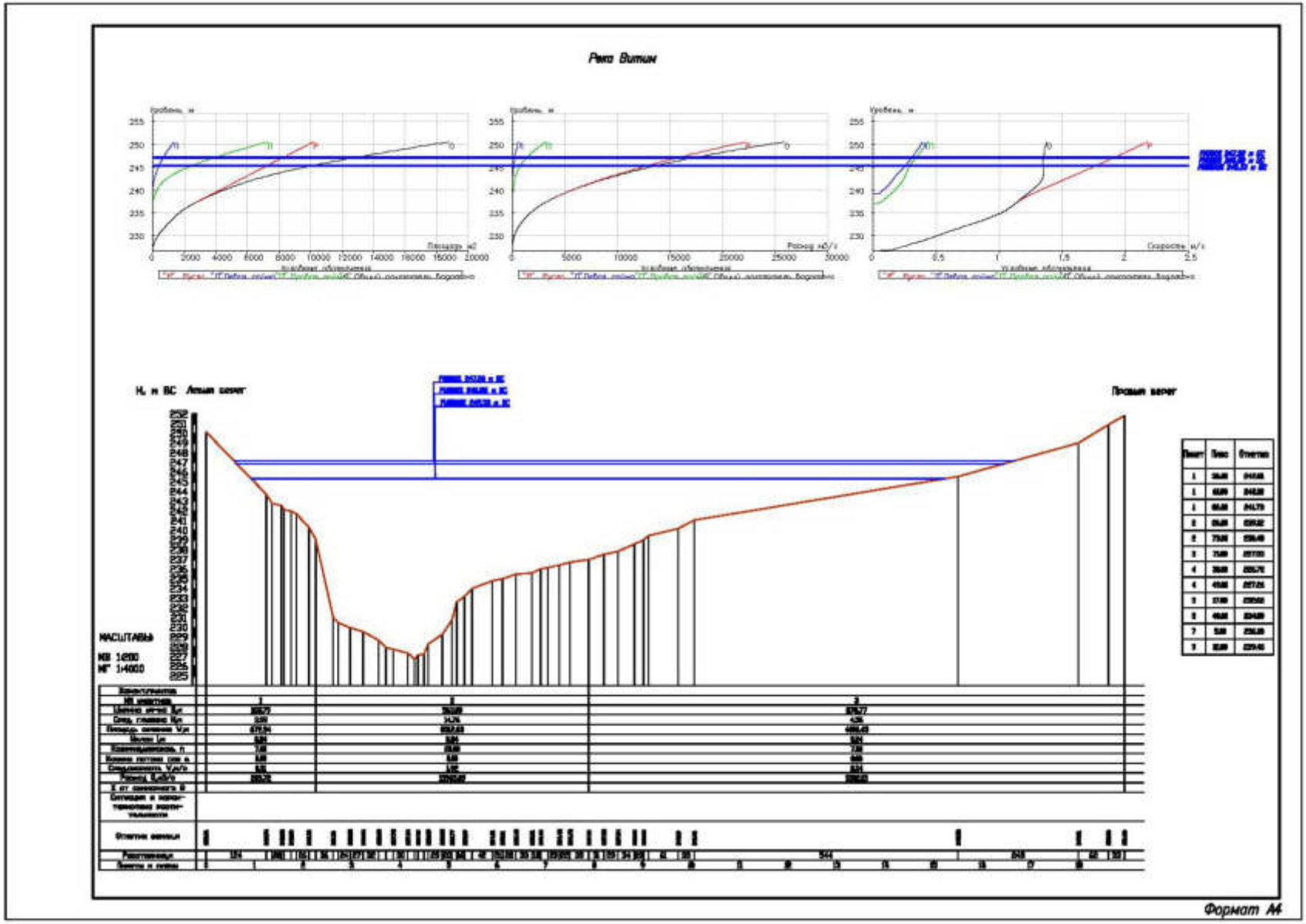


Рис. 2. Морфоствор пересекаемого водотока

Результатом обработки данных в программе,является профиль перехода с кривыми зависимости $Q = f(H)$, $W = f(H)$, $V_{ср} = f(H)$.

На профиле перехода отмечается уровень 1 %, 2 %, 10 % обеспеченности.

Заключение

Рассмотрен один из двух вариантов расчёта гидрологических характеристик для мостового перехода на участке р. Витим.

Строительство моста необходимо, поскольку Бодайбинский район ежегодно в течение четырех месяцев весной и осенью остается без устойчивой транспортной связи, что не позволяет оперативно решать вопросы доставки продовольственных, промышленных и технических грузов по автодороге Бодайбо – Таксимо. Новый мост позволит обеспечить непрерывное круглогодичное движение автотранспорта и соединит Бодайбинский район с вышеназванной железнодорожной станцией в Бурятии.

Рассматриваемый в работе вариант перехода удобен для расчёта гидрологических характеристик, так как расположен вблизи постоянного водомерного поста. Предложенный вариант является первым этапом для дальнейшего расчёта мостового перехода по автодороге Токсимо Бодайбо в Бодайбинском районе Иркутской области. Полученные расчётные гидрологические характеристики будут являться аналогом.

Список литературы

1. Водный кодекс Российской Федерации : утв. 03.06.06 № 74-ФЗ (в ред. федер. законов от 04.12.2006 № 201-ФЗ, от 19.06.2007 № 102-ФЗ, от 14.07.2008 № 118-ФЗ, от 23.07.2008 № 160-ФЗ, с изм. от 7.12.2011 № 417-ФЗ) // Гарант [Электронный ресурс] : справочная правовая система.

2. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения // СНиП 11-02-96 (СП 47.13330.2016). М. : Минрегион России, 2012. 52 с.

3. Строительная климатология // СНиП 23-01-99* (131.13330.2012). М. : Минрегион России, 2012. 118 с.

4. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 17: Лено-индигирский район. Л. : Гидрометиздат, 1973. 432 с.

5. *Васильев А. В.*, Шмидт С. В. Водно-технические изыскания. Л. : Гидрометиздат, 1970. 342 с.

6. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Сер. 3, ч. 1–6, вып. 22. Л. : Гидрометиздат, 1925–1990.

7. Определение расчётных гидрологических характеристик // СП 33-101-2003. М. : Госстрой России, 2004. 70 с.

8. *Фролов С. В.* Речной сток и гидрологические расчёты. Иркутск : Изд-во ИГУ, 2015. 131 с.

УДК 551.510.42

Роль приливообразующих сил Луны и Солнца в образовании крупномасштабных циркуляций в океанах, морях и крупных озерах

В. А. Щевьёв (shtshevev@rambler.ru)

Государственный океанографический институт (ГОИН), г. Москва

Аннотация. Показано, что крупномасштабные антициклонические циркуляции в Атлантическом, Тихом и Индийском океанах образованы воздействием приливообразующих сил Луны и Солнца на водные массы вблизи экватора. Крупномасштабные циклонические циркуляции (наиболее известные части которых – экваториальные противотечения) в тех же океанах, в морях и крупных озерах образованы воздействием приливообразующих сил Луны и Солнца на водные массы вне экватора. Ветровые течения – это волновой перенос ветровых волн. Роль термохалинных течений близка к нулю.

Ключевые слова: крупномасштабные антициклонические циркуляции в океанах, крупномасштабные циклонические циркуляции в океанах, морях и в крупных озерах. Приливообразующие силы Луны и Солнца. Экваториальные противотечения. Ветровые и термохалинные течения.

Общая схема течений океана в главных своих чертах справедлива для Тихого, Атлантического и Индийского океанов [2]. По обе стороны от экватора с востока на запад идут два пассатных течения: Северное и Южное. Эти течения образуются в результате воздействия на водную поверхность весьма устойчивых ветров – пассатов.

У западных берегов океанов пассатные течения дают начало экваториальному противотечению, так и течениям, движущимся к С и Ю вдоль материков. Следуя очертаниями берега, эти течения достигают 45–50 параллелей и, постепенно уклоняясь к востоку, вновь пересекают океан, образуя замкнутую крупномасштабную антициклоническую циркуляцию. Схема океанических течений находится в полном соответствии с воздушными течениями – ветрами. (рис. 1). Таких взглядов придерживаются абсолютное большинство исследователей.

Но высказываются и другие мнения. Е. Г. Никифоров (ААНИИ) на I съезде советских океанологов (1977 г.) сказал: «Проблема объяснения современной циркуляции вод не может считаться удовлетворительно решенной даже на уровне качественных гипотез. Гипотезы о ветровом происхождении циркуляции вод не объясняют глубинную циркуляцию, а гипотеза о термохалинной природе циркуляции вод опирается главным образом на существующее поле плотности. Поэтому никаких выводов о природе циркуляции вод на основе расчетов, выполненных по фактическому полю плотности сделать так же невозможно».

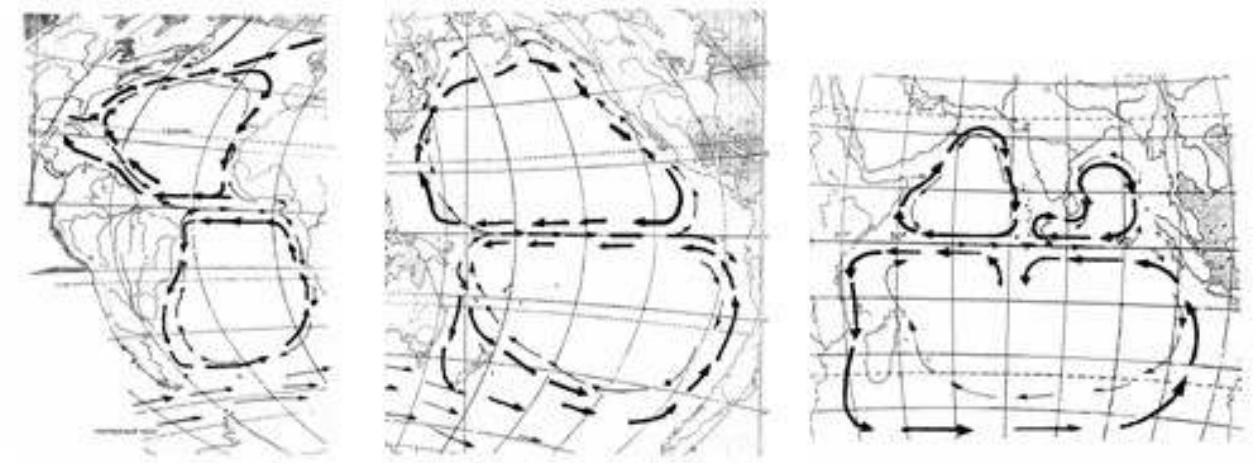


Рис. 1. Крупномасштабные циркуляции Атлантического (слева), Тихого (в центре), и Индийского (справа) океанов. Антициклонические циркуляции – толстые линии, циклонические – тонкие [8; 9; 14]

Вызывает большое удивление, что альтернативная гипотеза, наиболее физически обоснованная, о причине образования крупномасштабных циркуляций океана остается практически неизвестной более 250 лет. В 1744 г. И. Кант предположил, что Луна (и Солнце) тащит воду вдоль экватора с востока на запад, таким образом образуются экваториальные течения. Мы находим более 20 авторов, в работах которых описан этот механизм образования крупномасщтабных антициклонических циркуляций в океанах.

Известно, что в результате воздействия приливообразующих сил Луны, в водной оболочке океана образуются приливные горбы (рис. 2) [5]. Из-за инерции водных масс максимальный прилив в данной точке океана наступает спустя некоторое время после верхней кульминации Луны в этой точке. Благодаря наличию этого запаздывания приливообразующая сила Луны имеет составляющую, нормальную к линии центров Луны и Земли. Говоря о воздействии гравитационного притяжения на водную массу, Ле Блон П., Майсек Л. (1981) пишут: «Приливное ускорение очень мало по сравнению с ускорением собственного гравитационного поля Земли (9,8 см/с). Радиальная компонента приливного ускорения ведет к незначительному изменению локальной гравитации. Касательное ускорение так же мало, но оно существенно неуравновешенно и создает движущую силу, которая гонит воду вдоль земной поверхности с востока на запад» [4].

Многочисленные наблюдения показывают, что течения на экваторе имеют волновую природу (рис. 3). На этом рисунке приведены результаты измерения течений на экваторе Тихого океана в пункте 0°, 110° з. д., на глубине 10 м. Эти наблюдения продолжаются более 15 лет (ТОГО ТАО). Периоды изменчивости около 30 суток.

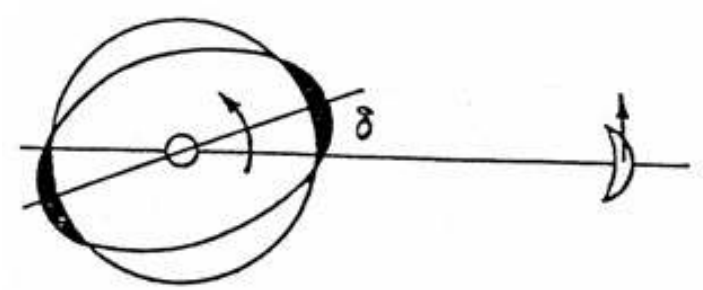


Рис. 2. Запаздывание максимума прилива по отношению к кульминации Луны [5]

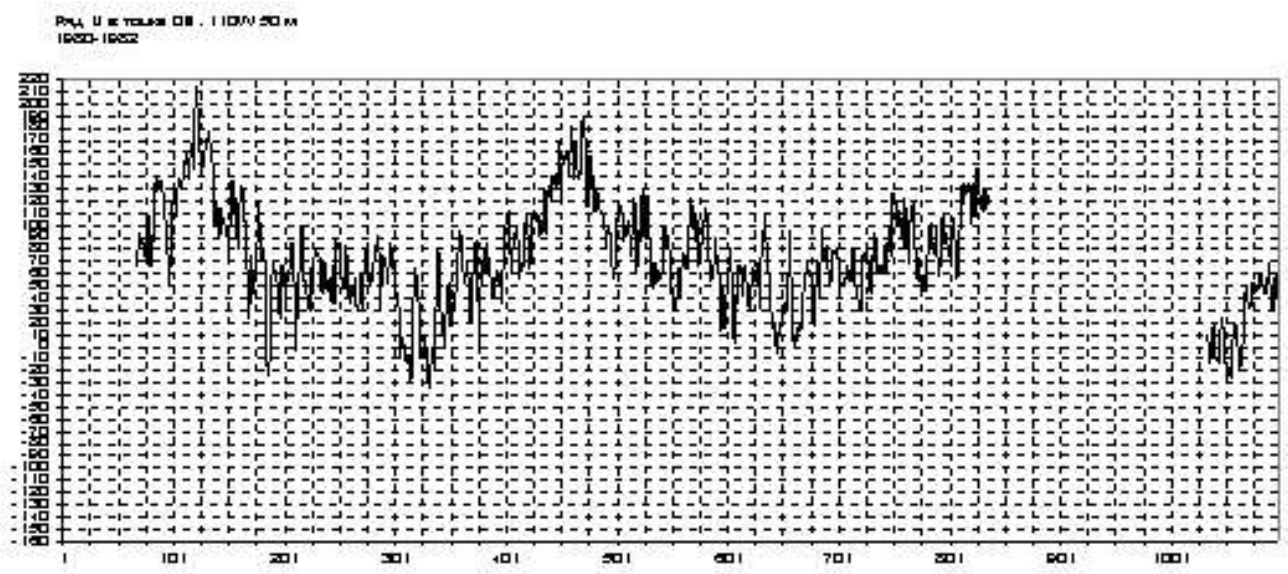


Рис. 3. Пример измерения течения на экваторе Тихого Океана в пункте 0°, 110° з. д., на глубине 10 м. Зональная компонента (W – E). Продолжительность записи 3 года

Течения волновой природы стали наблюдать в 60-х гг. прошлого века, и к 80-му г. стало ясно, что основные течения в океане существуют в виде долгопериодных волн. По мнению С. С. Лаппо начался «волновой» этап в исследовании течений в океанах и морях. Такой вывод сделан на основе анализа долговременных инструментальных наблюдений на буйковых станциях, которые производились предшествующие 20 лет. Они привели к коренному пересмотру представлений о закономерностях изменчивости течений в океане, особенно на глубинах более 1000 м, что весьма резко расходилось с существующими теоретическими концепциями» [3].

Хорошее представление о видах течений дают энергетические спектры (рис. 4). Они показывают, что основная энергия сосредоточена в долгопериодных волновых течениях с периодом 1–2 мес. и в инерционных. На рис. 3 хорошо видно, что течение волновой природы периодически увеличивается, достигает максимума, затем уменьшается до нуля, иногда направление изменяется на обратное. Результирующее движение волнового течения и есть крупномасштабная циркуляция.

В отличии от антициклонических циркуляций, существование которых не вызывает сомнений, наличие в тех же частях (северных и южных) трех океанов циклонических циркуляций (против часовой стрелки в северном полушарии и по часовой стрелке в южном) менее известно. Самым известным проявлением этих циркуляций являются экваториальные противотечения (Ломоносова в Атлантике, Тареева в Индийском, Кромвела в Тихом), которые были открыты в 50–60-х гг. прошлого века.

В настоящее время открыты другие ветви этих циклонических циркуляций. В 1969 г. открыто Антило-Гвианское противотечение протяженностью 3900 миль от Багамских островов до до экватора (5й и 12й рейсы НИС «Академик Курчатов», Руководитель В. Г. Корт). Это постоянный поток юго-восточного направления, противоположный Антильскому и Гвианскому течениям от 5° до 23° ю. ш. Его ширина 200 км, глубина от 200 до 1000 м, расход вдвое меньше Гольфстрима. По мнению ученых, открывших Антило-Гвианское противотечение, оно служит одним из основных источников глубинного противотечения Ломоносова.

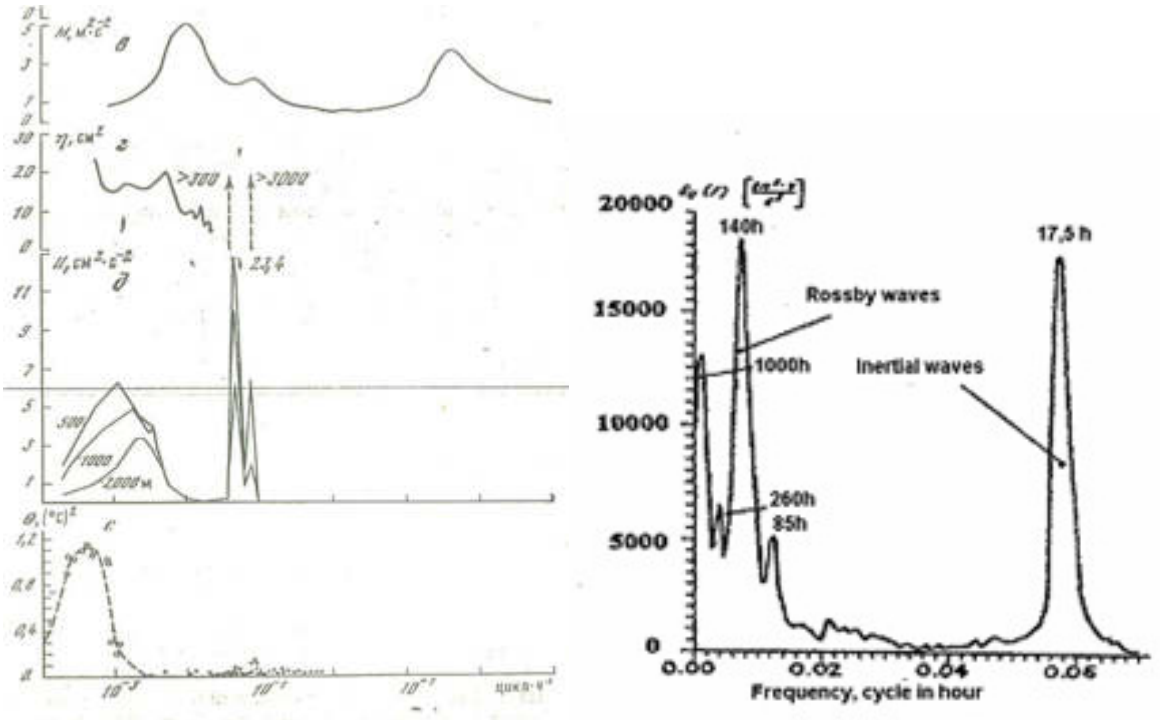


Рис. 4. Спектры изменчивости характеристик атмосферы и океана:
в – скорости ветра в нижнем слое атмосферы (Van der Hoven, 1957); *г* – приведенного уровня океана (Hamon, 1962); *д* – скоростей течений на горизонтах 500, 1000, 2000 м в западной части Атлантики. (Низкочастотные колебания скорости течений); *е* – температура воды на горизонте 500–600 м у Бермудских островов (40–200 суток) (Wunsch, 1972) [3]. Спектры изменчивости течений Среднего Каспия [1]

В 1968 г. в юго-западной части Атлантического океана был выявлен мощный циклонический круговорот (по часовой стрелке), и на его восточной периферии – Ангольское течение южного направления. На поверхности это течение замаскировано тонким (до 20 м) слоем пассатного течения, идущего на север. Ангольское течение занимает уровень до глубин 800–1000 м. Оно является продолжением течения Ломоносова на юг.

В 1968 г. французскими океанологами было обнаружено глубинное противотечение, направленное на запад на глубинах 40–200 м от 0° до 8° з. д. Оно является стоком течения Ломоносова на север и на запад.

Таким образом разные исследователи наблюдали отдельные ветви циклонических циркуляций в северной и южной Атлантике. Аналогичные циклонические циркуляции существуют в Индийском и в Тихом океанах (рис. 1). Наиболее распространенная точка зрения о причине существования этих циркуляций – ветровое воздействие и термохалинный фактор. Наши исследования показали, что роль ветра в динамике моря ограничена 5 %, а термохалинные течения столь малы, что практически никакой роли в динамике моря не играют [12; 13].

Причину возникновения циклонических циркуляций в океане помогают понять исследования природы течений внутренних морей и крупных озер.

Филатов Н. Н. показал, что во всех крупных озерах и внутренних морях северного полушария наблюдается крупномасштабный циклонический круговорот. Это фундаментальный вывод, который подтверждается всеми последующими наблюдений течений во внутренних и окраинных морях и крупных озерах.

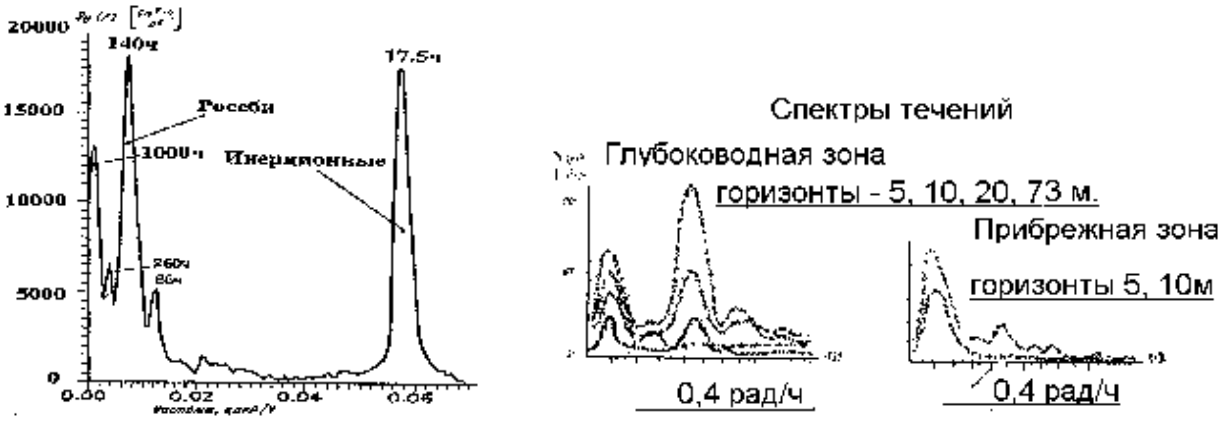


Рис. 5. Спектры течений Среднего Каспия (слева) (Бондаренко А. Л. и др. 2004). Спектр течений Ладожского озера (справа) (Филатов Н. Н., 2010). Частоте 0,4 рад/ч соответствует период 15,7 ч – инерционная частота. Частоте 0,1 рад/ч соответствует период 62 ч

Спектры течений Среднего Каспия, Ладожского озера, других морей показывают, что основная энергия течений сосредоточена в инерционных течениях и длиннопериодных волновых течениях (рис. 5). На рис. 6 показана зависимость периода изменчивости течений волновой природы от длины шельфа (окружности) моря для Онежского озера, Южного Каспия, Среднего Каспия, Балтийского моря, Черного моря, Охотского моря. Хорошо видно, что период изменчивости течений волновой природы прямо пропорционален длине шельфа, напрямую зависит от размеров водоема.

Очень результативными для выявления природы течений Каспийского моря и других подобных объектов являются результаты анализа срочных наблюдений в пункте «Нефтяные камни» (Средний Каспий). Наблюдения производились с эстакады 4 раза в сутки, на 4х горизонтах более 10 лет. Мы обработали данные наблюдений за 3 года, за 1962–1964 гг. Энергетические спектры (рис. 5) показывают, что основная энергия течений сосредоточена на периоде 140 ч (волны Россби) и 17,5 ч (инерционные волны). Они разделены большим промежутком с малой энергией, который позволяет отделить одни колебания от других, и изучать их отдельно.

В действительности измерительный прибор регистрирует суммарное течение, состоящее из волновых крупномасштабных течений и инерционных течений. Фильтром «скользящее равновесное среднее» с интервалом сглаживания 48 ч. отфильтровываем инерционные течения. Остаются течения континентальных шельфовых волн с периодом изменчивости 140 ч (рис. 7, *а*). Затем фильтром с интервалом сглаживания 140ч. получаем закономерность изменчивости квазипостоянного течения, т. е. скорости крупномасштабной циркуляции Среднего Каспия (рис. 7, *б*). На рисунке 7, *в* такая же закономерность, но за 3 года. И с помощью полинома получаем закономерность изменчивости средней скорости крупномасштабной циркуляции за 3 года (графики рис. 6 построила В. И. Швейкина).

Отсюда следует, что крупномасштабная циркуляция это результирующее (осредненное) движение длиннопериодных волновых течений. Из (рис. 7, *в*) видно, что скорость переноса воды в 1962 г. уменьшалась от 8, до 5 см/с, затем увеличивалась до середины 1963 г. до 12 см/с, затем до октября 1964 г. уменьшалась до 6,5 см/с, и до конца 1964 г. увеличивалась до 7,5 см/с. Таким образом, среднняя скорость крупномасштабной циркуляции изменялась от 5 до 12 см/с. Средняя скорость за весь рассматриваемый трехлетний период равна 8,5 см/с. Мы предполагаем, что средняя скорость циркуляции в основном не выходит за полученные значения.

Таким образом, с большой вероятностью можно объяснить наблюдаемые факты следующим образом: долгопериодные волны в Каспийском море существуют всегда. Их результирующее движение и есть крупномасштабная циклоническая циркуляция.

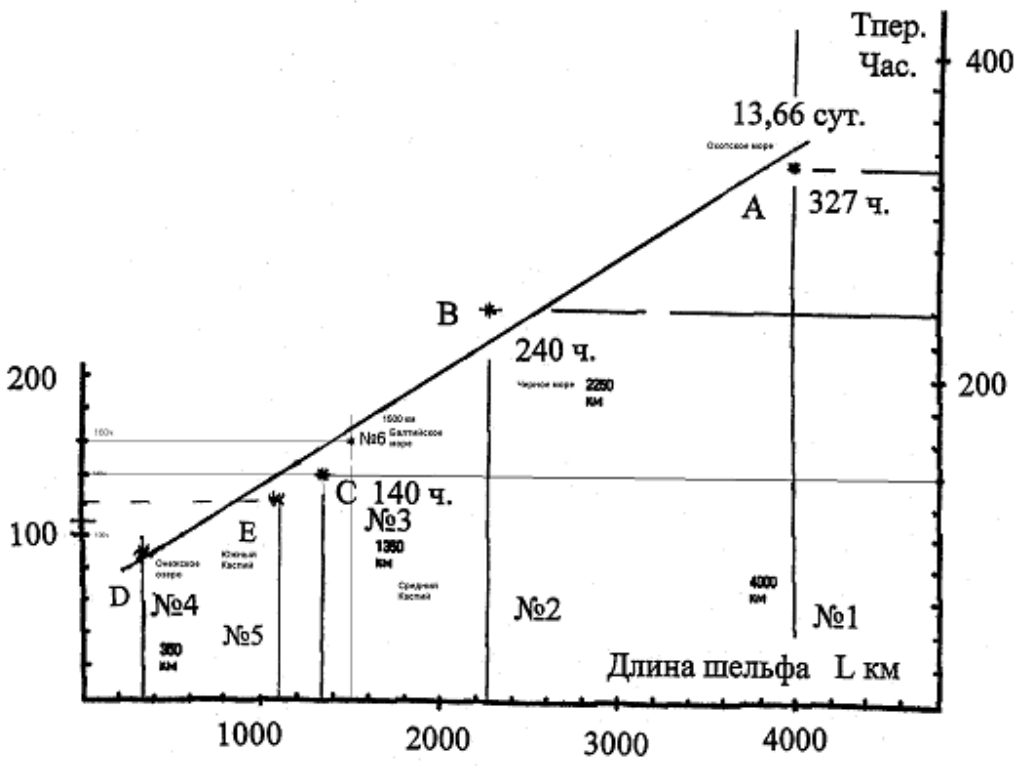


Рис. 6. Зависимость периода длиннопериодных волновых течений от дины шельфа (окружности) моря [8; 11]

Причина образования ДПВ течений циклонической направленности обоснована теоретически «каналовой теорией Эри» (1842 г.), в соответствии с которой в результате воздействия приливообразующих сил на водные массы в каналах, ориентированных по параллелям возникают поступательные приливные волны, а в узких каналах, ориентированных по меридианам – стоячие. В природных условиях имеет место сочетание волн различного типа в зависимости от типа водоема. Хорошо известно, что во внутренних и окраинных морях и в крупных озерах наблюдаются циклонические циркуляции. На рис. 8. показано возникновение вращательного движения наклонной поверхности моря вокруг некоторой неподвижной

точки в Атлантике и в оз. Верхнее. Логично предположить, что в результате такого ежедневного циклонического движения приливных волн в морях и крупных озерах образуются крупномасштабные циклонические циркуляции в виде длиннопериодных волн, наблюдаемые в действительности.

В северной и южной частях Атлантики под действием приливообразующих сил Луны и Солнца наблюдается прохождение циклонического волнового движения (рис. 8, слева). По аналогии с таким же процессом в морях логично предположить, что и в океанах причина возникновения циклонической циркуляции такая же, т. е. воздействие приливообразующих сил на водную массу этих водоемов.

Итак, многочисленные наблюдения показывают, что крупномасштабные циркуляции в океанах и морях существуют в виде долгопериодных волновых течений (волн Россби, шельфовых, захваченных экватором, планетарных и т. д.). Отклоняющее воздействие силы Кориолиса на долгопериодные волновые течения образует инерционные течения.

Ежедневное воздействие приливообразующтх сил Луны и Солнца на водные массы в районе экватора приводит к образованию длиннопериодных волновых течений с результирующим движением с востока на запад. Течения достигают берегов континентов и растекаются на юг и на север. Таким образом формируются крупномасштабные антициклонические циркуляции отдельно в северных и южных частях Атлантического, Тихого и Индийского океанов.

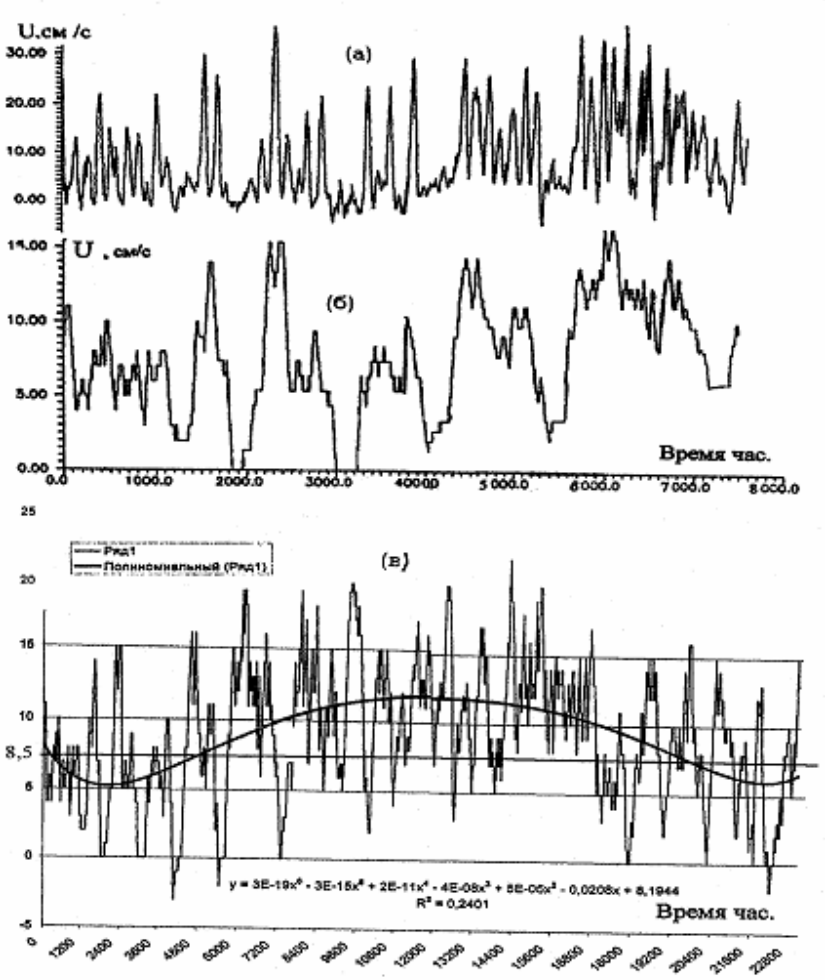


Рис. 7. Осредненный временной ряд вдольбереговой составляющей вектора скорости за год в пункте Нефтяные камни. Время осреднения $T_{оср.}$ = 48 ч (*а*); тот же ряд осредненный фильтром скользящее равновесное среднее с временем осреднения $T_{оср.}$ = 140 ч, представляет изменчивость скорости квазипостоянного течения Среднего Каспия (*б*); такой же временной ряд, но за 3 года. Время осреднения 140 ч (*в*). Жирной линией показана изменчивость средней скорости квазипостоянного течения (получено с помощью полинома) [8; 14]

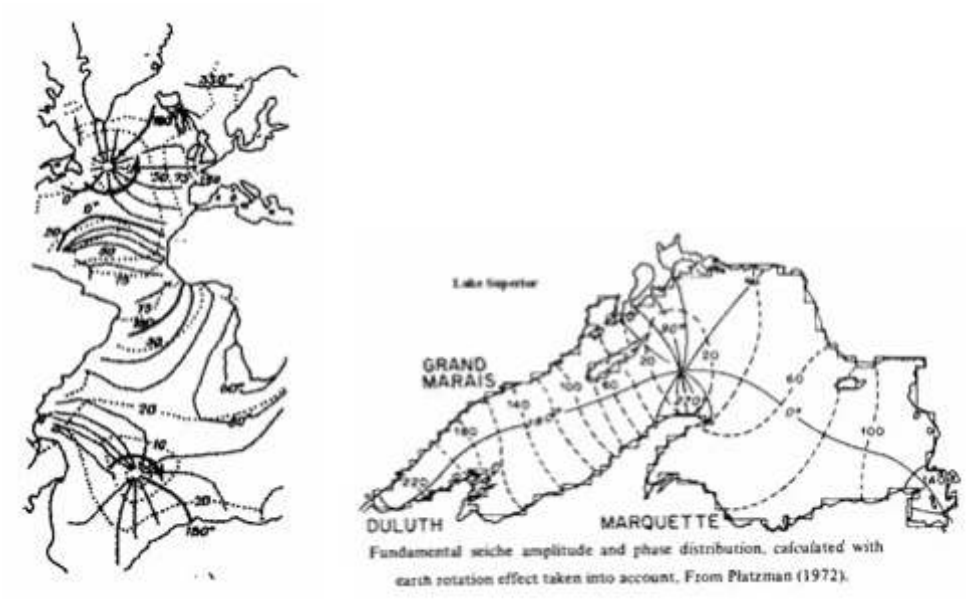


Рис. 8. Кривые равных фаз, т. е. котидальные линии в Атлантическом океане, расположение которых «указывает на существование волны, обегающей бассейн циклонически» [7] (слева), и в оз. Верхнее (справа) [15]

Ежедневное воздействие приливообразующих сил Луны и Солнца на водные массы океанов вне экваториальной зоны приводит к образованию циклонических крупномасштабных циркуляций в северных и южных частях трех океанов. Такие же циркуляции формируются в замкнутых морях.

Список литературы

1. О переносе масс воды морскими и океанскими долгопериодными волнами / А. Л. Бондаренко, В. В. Жмур, Ю. Г. Филиппов, В. А. Щевьев // Мор. гидрофиз. журн. 2004. № 5. С. 24–34.

2. Краткая географическая энциклопедия. М. : Сов. энцикл., 1962.

3. *Лаппо С. С.* Среднемасштабные динамические процессы океана, возбуждаемые атмосферой. М. : Наука, 1979. 182 с.

4. *Ле Блон П.*, Майсек Л. Волны в океане. М. : Мир, 1981. Т. 1, 2. 365 с.

5. *Монин А. С.*, Шишков Ю. А. История климата. Л. : Гидрометеоиздат, 1979. 408 с.

6. *Филатов Н. Н.* Динамика озер. Л. : Гидрометеоиздат, 1983. 168 с.

7. *Шулейкин В. В.* Физика моря. М. : Наука, 1968. 1083 с.

8. *Щевьёв В. А.* Физика течений в океанах, морях и в озерах. История поисков, размышлений, заблуждений, открытий. М. : Lambert Academic Publishing, 2012.

9. *Щевьёв В. А.* Физика течений в океанах, морях и в озерах: Сокращенный вариант книги. URL: http://www.randewy.ru/gml/shev5.html.

10. *Щевьёв В. А.* Крупномасштабная циркуляция в океанах, как результирующее движение длиннопериодных волн // Исследовано в России : электрон. журн. 2007. С. 808–825. URL: http:/zhurnal.ape.relarn.ru/ articles/2007/077pdf.

11. *Щевьёв В. А.* Приливообразующие силы Луны и Солнца – причина образования длиннопериодных волновых течений в океане // Исследовано в России : электрон. журн. 2009. 032. С. 320–334. URL: http/zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2009/032.pdf.

12. *Щевьев В. А.* Природа термохалинных течений // Исследовано в России : электрон. журн. 2011. 043. С. 559–568. URL: http/zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2009/043.pdf.

13. *Щевьев В. А.* Ветровые течения во внутренних морях и озерах // Исследовано в России : электрон. журн. 2008. 005. URL: http:/hurnal.ape.relarn.ru/articles/2008/005.pdf.

14. *Shtchevev V. A.* Physics of Currents in Oceans, Seas and Lakes. M. : Lambert Academic Publishing, 2013.

15. *Csanady G. T.* Circulation in the coastal ocean. Netherland, 1982.

Секция

ОПАСНЫЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ И ПРОЦЕССЫ

УДК 551.555(571.53)

Метеорологические и синоптические условия сильного ветра на АМСГ Братск

К. С. Антонова (antonova_ksenia@mail.ru)

АМСГ Братск Иркутского филиала ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета»

Аннотация. Проведено исследование многолетнего режима ветра в районе аэродрома Братск по данным непрерывных метеорологических наблюдений за 2007–2017 гг. Установлено, что наиболее неблагоприятные условия для взлета и посадки воздушных судов на АМСГ Братск при усилении ветра ≥ 15 м/с отмечаются в апреле, мае и июле в основном при прохождении холодных атмосферных фронтов и на восточной периферии антициклона. Уточнена методика прогноза средней и максимальной скорости ветра путем расчета переходных коэффициентов по методу Ларионова с учетом направления ветра на аэродроме Братск.

Ключевые слова: авиация, ветер, барический градиент, атмосферный фронт.

Введение

Аэродром Братск с абсолютной отметкой 488,7 м (φ = 56°21′52′′с. ш., λ = 101°43′18′′в. д.) расположен в условиях холмистой местности в 5 км западнее левого берега р. Ангары и в 8–9 км северо-западнее п. Падун и п. Энергетик. Магнитное склонение аэродрома минус 1°13′. Рабочие курсы 296° и 116° (рис. 1).



Рис. 1. Схема расположения аэродрома Братск

Климат района аэродрома Братск – резко континентальный, но подверженный влиянию Братского водохранилища [1; 4; 5]. Высокую степень континентальности климата аэродрома Братск наглядно отражает годовое распределение средних месячных значений температуры воздуха (рис. 2).

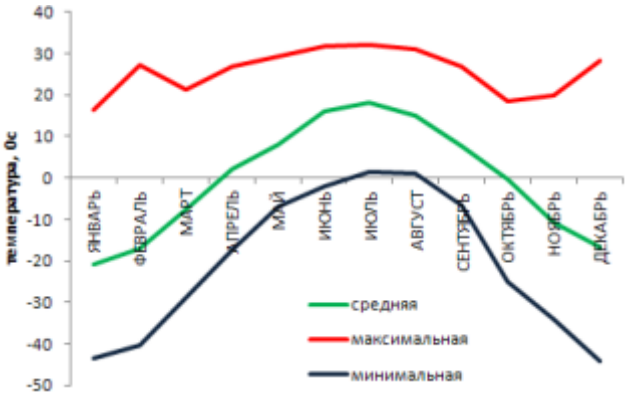


Рис. 2. Годовое распределение температуры воздуха по данным АМСГ Братск в 2007–2017 гг. [6]

Известно, что скорость и направление ветра оказывают существенное влияние на взлётно-посадочные характеристики воздушных судов [2; 3]. Наиболее благоприятным для взлёта и посадки является встречный ветер, который снижает скорость отрыва и посадочную скорость, следовательно, уменьшает длину разбега при взлёте и длину пробега при посадке самолёта. Значительно усложняется взлёт и посадка при боковом ветре, так как в этом случае образуются дополнительные аэродинамические силы, затрудняющие управление воздушным судном. В целях безопасности для каждого типа воздушного судна установлена максимальная боковая составляющая скорости ветра, при превышении которой взлёт и посадка не разрешаются [8]. По перечисленным причинам в целях безопасности полётов необходимо иметь сведения о многолетнем режиме параметров ветра на аэродроме.

Методика исследования

Для составления климатического описания аэродрома Братск в работе использованы ежечасные метеорологические наблюдения за фактическим состоянием погоды на АМСГ Братск, обобщённые за период 2007–2017 гг. Общее количество наблюдений за ветром в данный период составляет 78 879 случаев. Используемые данные по характеристикам ветра соответствуют требованиям к точности метеорологических измерений и проверены на достоверность методами первичного критического контроля [7; 9].

В работе рассчитывалась повторяемость (%) безветрия (штилей), переменного ветра и градаций скоростей ветра при различных направлениях по месяцам и за год (без разделения по времени суток), а также средние значения скорости ветра по различным направлениям и независимо от направления. Для расчётов повторяемости скоростей ветра по направлениям берутся порывы ветра в срок наблюдения или между сроками (если скорость ветра больше, чем в срок наблюдения). При отсутствии порывов берётся скорость ветра, определённая за 10 мин.

Повторяемость штилей (скорость ветра, равная нулю), переменного ветра (скорость ветра 1 или 2 м/с при неопределённом направлении ветра) и градаций направлений ветра в 30-градусных интервалах [350–010], [020–040], [050–070], [080–100], [110–130], [140–160], [170–190], [200–220], [230–250], [260–280], [290–310], [320–340] определяется в процентах от общего числа наблюдений за месяц или за год.

Средняя месячная или средняя годовая скорость ветра в метрах в секунду по каждому направлению (или без учёта направлений) рассчитывается как средняя арифметическая из всех значений скорости ветра по данному направлению (или без учёта направлений).

Обсуждение результатов

Преобладающими на аэродроме Братск в 2007–2017 гг. являются ветры западного направления [260–280°] со средней годовой скоростью 5,2 м/с (19,8 %), юго-западного направления [230–250°] со средней скоростью 4,0 м/с (15,0 %) и северо-западного направления [290–310°] со средней скоростью 4,3 м/с (10,2 %). Реже всего (2,8 % случаев/год) отмечался ветер северной четверти [350–010°] со средней скоростью 2,8 м/с.

Повторяемость направления и скорости ветра меняется по сезонам. В январе, феврале, марте, апреле, сентябре, октябре, ноябре и декабре согласно рис.3 наибольшую повторяемость имеют градации направлений ветра [260–280°] (19,0 %, 25,1 %, 23,2 %, 20,8 %, 17,9 %, 21,0 %, 23,6 % и 17,9 % соответственно) и [230–250°] (16,8 %, 19,5 %, 16,8 %, 13,2 %, 14,6 %, 21,2 %, 19,3 % и 19,1 % соответственно); в мае, июне, июле и августе [260–280°] (22,4 %, 16,5 %, 14,4 % и 15,8 % соответственно) и [290–310°] (13,3 %, 12,6 %, 11,8 % и 12,2 % соответственно).

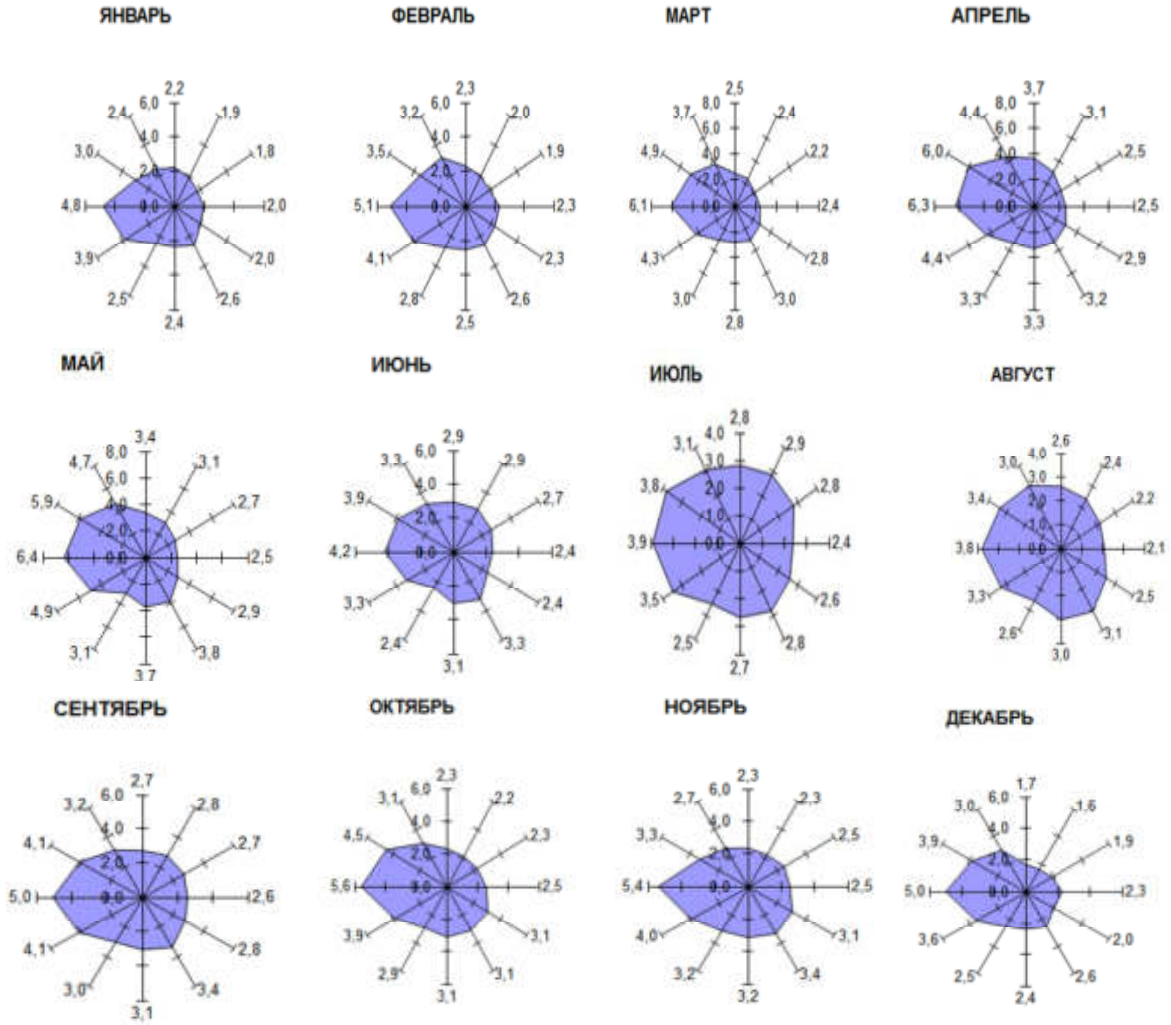


Рис. 3. Повторяемость (%) одновременных значений направления (в 30-градусных секторах) и скорости ветра в указанных диапазонах по данным АМСГ Братск в 2007–2017 гг.

Средняя годовая скорость ветра составила 3,2 м/с. Штили в среднем за год наблюдались в 8,3 % случаев. В течение года наибольшие значения средней скорости ветра составили 3,9 м/с и отмечались в мае, второй максимум приходится на сентябрь (3,3 м/с) и октябрь (3,2 м/с). Наименьшие значения средней скорости ветра составили 2,6 м/с и отмечались в январе. В целом, за год наибольшее число случаев приходится на градации скорости [3–5 м/с] (41,5 % случаев), несколько меньшее число случаев (36,5 %) на более слабый ветер со средней скоростью [1–2 м/с].

Ветры со средней скоростью ≥ 15 м/с в исследуемый период отмечались в 283 случаях, что составляет 0,4 % случаев от общего числа наблюдений за ветром. По данным рис. 4 усиление ветра до градации ≥ 15 м/с наблюдалось в среднем в течение 8,5 дней, до градации ≥ 20 м/с в среднем 1 день в году. Максимум в распределении числа дней с ветром ≥ 15 м/с приходится на май (2,2). Минимум в распределении числа дней с ветром ≥ 15 м/с наблюдался в августе (0,0). Ветер ≥ 20 м/с отмечался в июле и с февраля по апрель, с максимум числа случаев в апреле (0,3) и июле (0,2).

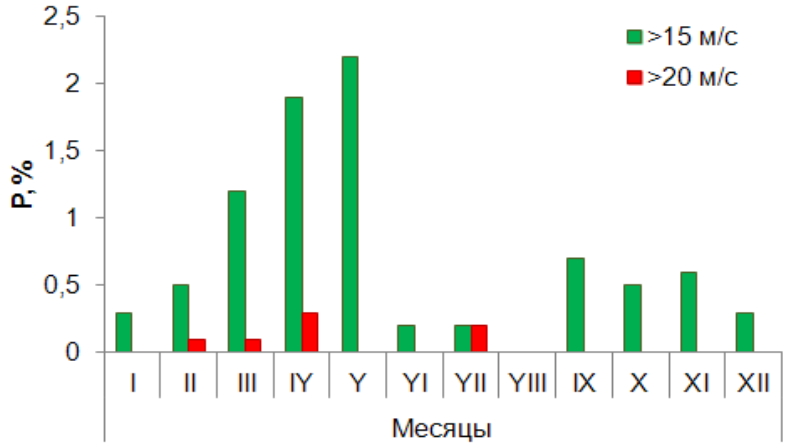


Рис. 4. Среднее число дней с градациями ветра ≥ 15 м/с и ≥ 20 м/с
по данным АМСГ Братск в 2007–2017 гг.

Методика прогнозирования скорости ветра на АМСГ Братск основана на прямой зависимости изменения скорости ветра от величины барического градиента. Для прогноза скорости ветра необходимо знать коэффициенты перехода от барического градиента к скорости ветра. Для расчетов использовалась формула, имеющая вид:

$$V = A\frac{\partial p}{\partial n}, \qquad (1)$$

где V – скорость ветра в м/с; A – переходный коэффициент от барического градиента к скорости ветра; $\frac{\partial p}{\partial n}$ – барический градиент в гПа/км. Значения коэффициентов различны для отдельных пунктов, в связи с различием их физико-географических условий.

В работе по данным наблюдений за 5-летний период (2008–2012 гг.) проведен расчет переходных коэффициентов от барического градиента к максимальной и средней скоростям ветра на АМСГ Братск по формуле (1). Эмпирическим материалом послужили кольцевые карты погоды и дневники наблюдений станции АМСГ Братск. По данным кольцевых карт рассчитывался барический градиент в радиусе 300 км, градиенты давления определялись на 1 км, с дневников погоды фиксировалось направление и скорость фактического ветра. На основе статистической обработки данных наблюдений была также построена линейная зависимость максимальной и средней скорости ветра от значения барического градиента для каждого месяца с учетом направления ветра (табл. 1).

Анализируя полученные значения переходных коэффициентов, можно отметить, что наименьшие значения переходных коэффициентов отмечаются в зимние месяцы – январь и декабрь, а наибольшие значения соответствуют весенне-летнему периоду времени. Необходимо отметить, что наибольшие значения коэффициентов наблюдаются при направлениях: 180–269° и 270–360°, что соответствует на приземной синоптической карте тыловой части циклона, ложбине, смещению фронта окклюзии и холодного фронта, где наблюдаются наибольшие значения термических и барических градиентов – основных факторов усиления ветра.

Таблица 1

Значения переходных коэффициентов от барического градиента к максимальной и средней скоростям ветра на АМСГ Братск за 2008–2012 гг.

Месяц	Переходный коэффициент средний / максимальный	Переходный коэффициент с учетом направления ветра средний /максимальный			
		0–89 °	90–179 °	180–269 °	270–360 °
январь	184 / 459	57 / –	123 / –	217 / 425	200 / 505
февраль	207 / 525	91 / –	143 / –	227 / 535	264 / 513
март	245 / 581	143 / –	172 / 593	275 / 622	310 / 564
апрель	299 / 545	226 / –	237 / 583	366 / 578	322 / 533
май	319 / 630	258 / –	240 / 632	339 / 643	354 / 624
июнь	312 / 580	246 / –	298 / 795	334 / 658	328 / 553
июль	301 / 561	272 / –	274 / –	320 / 704	316 / 535
август	301 / 617	256 / –	285 / 576	310 / 605	322 / 632
сентябрь	283 / 542	250 / –	247 / 591	288 / 563	309 / 526
октябрь	270 / 584	170 / –	221 / –	276 / 627	318 / 575
ноябрь	219 / 541	112 / –	162 / –	251 / 518	313 / 571
декабрь	155 / 501	58 /–	104 / –	202 / 501	267 / 501

С практической точки зрения важно знать синоптические условия усиления ветра на аэродроме. На основе анализа синоптических карт (приземных и высотных) электронного архива АМЦ Иркутск для случаев с ветром ≥ 15 м/с на аэродроме Братск за период 2007–2017 гг. было выявлено следующее. Такой ветер на аэродроме Братск в большинстве случаев (41 %) отмечался при прохождении основного или вторичного холодного фронта, в 31 % случаев на восточной периферии антициклона, по 12 % случаев приходится на влияние барической ложбины и прохождение фронта окклюзии и в 5 % случаев это были динамически значимые теплые фронты.

В качестве примера на рис.5 показаны синоптические условия усиления ветра фронтального характера (280°–16 м/с), с порывами до 25 м/с, который наблюдался на аэродроме Братск 02.04.2017 г. с 00.19 всв до 6.39 всв при прохождении оси глубокой меридионально ориентированной ложбины ныряющего циклона (рис. 5, *а*). На фронтальный характер усиления ветра указывают хорошо выраженная зона повышенных термических и барических градиентов вдоль оси ложбины на АТ-850 гПа, прохождение оси высотной фронтальной зоны на АТ-700 гПа (рис. 5, *б*) и АТ-500 гПа (рис. 5, *в*) и оси струйного течения на АТ-300 гПа (рис. 5, *г*). Барическая тенденция за линией арктического холодного фронта составляла 8–9 гПа/3 часа, значение барического градиента 0,045 гПа/1 км. Следует отметить, что при расчете прогнозируемой скорости ветра методом Ларионова получается: средняя скорость 13 м/с, максимальная 24 м/с, что указывает на неплохую оправыдваемость уточненного метода прогноза скорости ветра на аэродроме Братск.

Выводы

Усиление ветра представляет опасность для пилотирования воздушных судов. Важно не только дать правильный прогноз скорости ветра, но и спрогнозировать ослабление или усиление ветра. В этом случае важно уточнять существующие методы прогноза средней и максимальной скорости ветра.

В работе уточнена методика прогноза средней и максимальной скорости ветра по Ларионову для АМСГ Братск за период 2008–2012 гг. В отличие от ранее проведенных исследований за период 1970–1972 гг. были рассчитаны переходные коэффициенты для прогноза скорости ветра на аэродроме с учетом направления, что представляет актуальность для безопасности и регулярности полетов.

Установлено, что максимум в распределении числа случаев с ветром ≥ 15 м/с на АМСГ Братск в 2007–2017 гг. приходится на май. Усиление ветра ≥ 20 м/с отмечалось в июле и с февраля по апрель, с максимум числа случаев в апреле и июле. Чаще всего усиление ветра было связано с прохождением холодных фронтов или наличием значительных

термических и барических градиентов на восточной периферии антициклона в холодной неустойчиво стратифицированной воздушной массе.

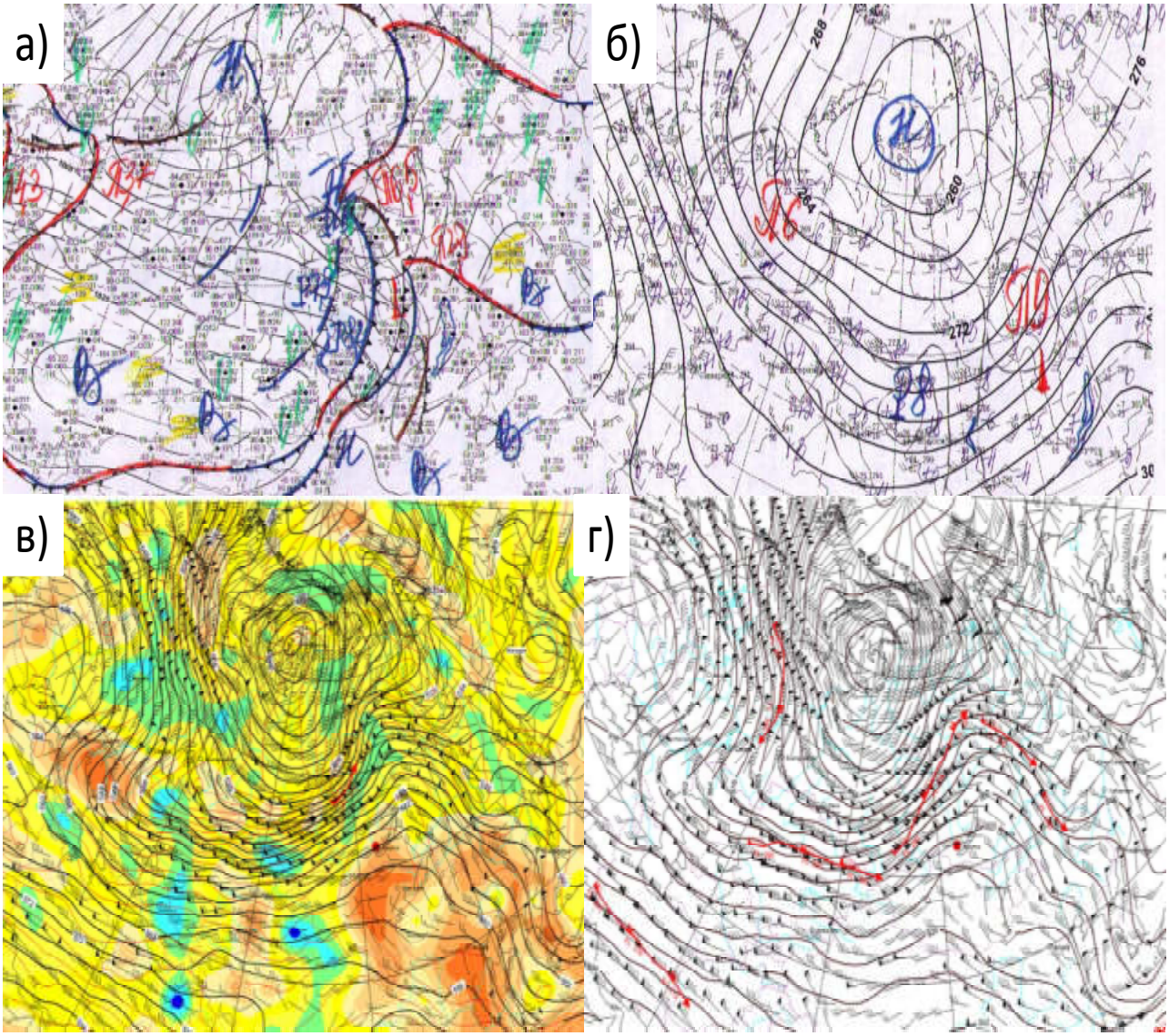


Рис. 5. Фактические карты 02.04.2017 г. за 00 ВСВ: приземная (*а*), АТ-700 гПа (*б*), АТ-500 гПа (*в*) АТ-300 гПа (*г*)

Список литературы

1. Атлас. Иркутская область: экологические условия развития. М. : Роскартография ; Иркутск : Ин-т географии СО РАН, 2004. 90 с.
2. Баранов А. М., Солонин С. В. Авиационная метеорология. Л. : Гидрометеоиздат, 1981. 384 с.
3. Богаткин О. Г., Говердовский В. Ф., Еникеева В. Д. Практикум по авиационной метеорологии. Л. : Гидрометеоиздат, 1987. 184 с.
4. Бояркин В. М. География Иркутской области. Иркутск : Вост.-Сиб. кн. изд-во, 1995. 200 с.
5. Климатическая характеристика аэродрома Братск / сост. Е. В. Касаткина ; под рук. И. В Латышевой. Иркутск : ИГУ, 2007. 52 с.
6. Климатическая характеристика аэродрома Братск за 2007–2017 гг. / сост. Е. В. Касаткина ; под рук. И. В. Латышевой. Иркутск, 2017. 249 с.
7. Наставление по метеорологическому обеспечению гражданской авиации России (НМО ГА-95), Обнинск, 1995. 91 с.
8. Руководство по прогнозированию метеорологических условий для авиации / под ред.: К. Г. Абрамович, А. А. Васильева. Л. : Гидрометеоиздат, 1985. 304 с.
9. Шакина Н. П., Нудельман Л. А. Руководящий документ. Требования к составлению климатического описания аэродрома. М., 2007. 51 с.

УДК 551.582

Динамика и условия формирования опасных явлений на территории Томской области

М. А. Волкова (mv2101@mail.ru)[1], Н. Н. Чередько (atnik3@rambler.ru)[2]

[1] Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск;
[2] Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск

Аннотация. Приведены результаты пространственно-временной оценки критериев температурного режима и режима атмосферных осадков, формирующих опасные явления погоды на территории Томской области. Рассчитаны повторяемость, продолжительность и динамика изменения периодов низких – высоких температур, аномально холодной – аномально жаркой погодой, сильного мороза – сильной жары, сильных и очень сильных осадков. Проанализированы макроциркуляционные условия, способствующие формированию экстремальных условий на территории Томской области.

Ключевые слова: сильный мороз, аномально-холодная погода, очень сильный дождь, типизация Б. Л. Дзердзеевского.

Введение

Происходящие изменения климата и ожидаемые в связи с ними негативные последствия требует регулярного мониторинга наблюдаемых глобальных и региональных изменений в климатической системе для выстраивания систем адаптации. Наблюдаемое глобальное потепление ведет к увеличению повторяемости неблагоприятных и опасных природно-техногенных явлений, а также растущему от них ущербу во всем мире [7; 8; 11]. Современные данные говорят о том, что 90 % самых тяжелых экономических потерь связаны с опасными гидрометеорологическими явлениями (ОЯ): паводки, наводнения, сильный ветер, ливневые дожди, град, засухи. При этом наблюдаемые в течение двух последних десятилетий ОЯ на территории России оказались более интенсивными и разрушительными, чем когда-либо [8], число гидрометеорологических опасных явлений, нанесших значительный ущерб, выросло вдвое [5].

С учетом данных за 2016 г. по-прежнему среднегодовая температура на территории Российской Федерации растет более чем в 2,5 раза быстрее глобальной, со скоростью 0,45 °С за 10 лет (за период 1976–2016 гг.), наблюдается рост годовой суммы осадков со скоростью 2,1 % от нормы за 10 лет. По статистическим данным Гидрометцентра в 2016 г. на территории России было зарегистрировано 590 случаев возникновения метеорологических ОЯ и комплексов неблагоприятных метеорологических явлений (КМЯ). Это наибольшее количество ОЯ за период наблюдений с 1998 по 2016 гг. Высокой была повторяемость сильных осадков, КМЯ и сильного ветра, что составило 60 % от всех ОЯ. КМЯ по своим параметрам не достигают критериев ОЯ, но в значительной степени затрудняют хозяйственную деятельность регионов. Все эти явления, как правило, наносили наиболее значительный ущерб секторам экономики и частному сектору [7].

Наибольший ущерб хозяйству Томской области, как показано в нашей предыдущей работе [3], наносят периоды низких температур, провоцируя экономические потери порядка 2 млн руб. за средний такой период.

Для принятия эффективных решений по сокращению ущерба от экстремальных погодных явлений и действенных упреждающих мер адаптации требуются долгосрочные планы действий, основанные на научно обоснованных перспективных оценках изменения климата, включая оценки изменения статистики экстремальных погодных явлений [8].

Целью настоящей работы является оценка пространственно-временной изменчивости ОЯ и КМЯ в режимах температуры и осадков, а также анализ циркуляционных процессов, приводящих к установлению экстремальных условий в Томской области.

Материалы и методы исследования

Материалами для исследования послужили временные ряды значений минимальной, максимальной температуры воздуха и количества атмосферных осадков суточного и 8-срочного разрешения из ВНИИГМИ-МЦД (www.meteo.ru) за период с 1961 по 2015 г. на 10 метеорологических станциях Томской области.

По суточным данным температуры воздуха рассчитывались характеристики (число периодов с ОЯ, средняя и максимальная продолжительность, повторяемость за соответствующие периоды времени) аномально холодной погоды, когда минимальная температура воздуха принимает значение –35 °С и ниже в течение 5 суток и более; аномально жаркой погоды, когда максимальная температура воздуха составляет +30 °С и выше в течение 5 суток и более; периодов низких (<–30 °С) и высоких (>+30 °С) температур любой продолжительности в соответствующие полугодия; периодов с сильным морозом и сильной жарой, когда значение минимальной (максимальной) температуры воздуха составляет –40 °С (+35 °С) или ниже (выше) в течение трех суток и более с ноября по март (с мая по август). По срочным данным рассчитывались характеристики экстремальных явлений, связанных с осадками, а именно: очень сильного дождя (значительные жидкие или смешанные осадки с количеством выпавших осадков не менее 50 мм за период времени не более 12 ч.: дождь, ливневый дождь, дождь со снегом, мокрый снег) и сильного дождя (не менее 35 мм за период не более 12 ч) [12].

Непосредственно к ОЯ относят сильную жару/сильный мороз, периоды с аномально холодной/жаркой погодой и очень сильный дождь, тогда как низкие/высокие температуры и сильный дождь составляют КМЯ в сочетании другими неблагоприятными факторами (сильный ветер и т. д.).

Для оценки динамики ОЯ и КМЯ в работе рассматривались три периода, соответствующие современным климатическим колебаниям в глобальном температурном режиме. Период 1961–1990 гг. рекомендован Всемирной метеорологической организацией, как период для расчета климатических норм [11]. Интервал лет 1976–1997 гг. соответствует периоду наибольшей выраженности современного глобального потепления, уже широко обсуждаемого не только учеными, но и общественностью. Период 1998–2015 гг. – замедление потепления. Значительное внимание приостановке потепления после 1998–2000 гг. было уделено в научной литературе последнего десятилетия [13], в том числе в 5-м докладе МГЭИК [11]. При этом, согласно Второму оценочному докладу Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации [5], «приостановка» роста средней глобальной приземной температуры практически не проявилась на территории нашей страны: «…в отличие от глобальной ситуации, изменение климата России в целом (в среднем за год и по территории) следует охарактеризовать как продолжающееся потепление, отметив, что тенденция к замедлению потепления пока по данным наблюдений не прослеживается (по крайней мере, во все сезоны, кроме зимы)».

Решающую роль в формировании ОЯ и КМЯ играет состояние общей циркуляции атмосферы (ОЦА), определяющей характер обмена воздушными массами, переноса тепла, влаги, энергии. Важнейшими элементами ОЦА являются синоптические вихри – циклоны и антициклоны, взаимное расположение которых характеризует соответствующие элементарные циркуляционные механизмы (ЭЦМ), выделенные и классифицированные для Северного полушария Б. Л. Дзердзеевским с учениками [6; 9]. По каждой станции и в целом по территории области был выявлен вклад различных ЭЦМ в формирование рассматриваемых опасных явлений.

Результаты исследования

Согласно [2; 4] на территории Томской области средняя годовая температура воздуха возрастает, за период с 1961 по 2016 г. скорость изменения составила 0,3–0,4°°С/10 лет. Минимальная температура увеличивается со скоростью 0,3–0,6 °С/10 лет, максимальная – со скоростью 0,2–0,4 °С/10 лет. Темпы потепления в период максимальных скоростей глобального потепления (1976–1997 гг.) в Томской области, также, были максимальны за рассмотренный период и составили 0,4–0,7 °С/10 лет, то есть повысились на 0,2–0,4 °С/10 лет по

сравнению с периодом, принимаемым за норму. В последние 17 лет скорость изменения температуры изменилась по сравнению с периодом нормы неоднозначно: на некоторых станциях рост средней годовой температуры усилился (до 0,6–0,7 °С/10 лет на ст. Александровское, Ванжиль-Кынак, Напас, Прохоркино), на большей части станций – снизился на 0,1–0,3 °С/10 лет, преимущественно за счет похолодания зимних месяцев. Как и в среднем по территории России, годовые суммы осадков на территории Томской области имеют тенденцию к увеличению, в среднем на 12 мм/10 лет [1].

Расчеты показали, что для территории Томской области более характерны и продолжительны ОЯ холодного периода года (сильный мороз, аномально-холодная погода и периоды низких температур), с наибольшей повторяемостью в северной части территории (ст. Ванжиль-Кынак, Напас и Александровское).

Так, за период с 1961 по 2015 г. суммарное число случаев (периодов) с сильными морозами для территории Томской области составило от 7 (ст. Томск) до 63 (ст. Ванжиль-Кынак), и наблюдалось соответственно от 30 до 295 дней. Средняя продолжительность ОЯ в год на разных станциях составила 3,9–4,7 дней (рис. 1). Максимальная продолжительность, 11 дней, была зафиксирована на ст. Напас. В среднем по области повторяемость периодов с сильным морозом за год составила 0,7 %.

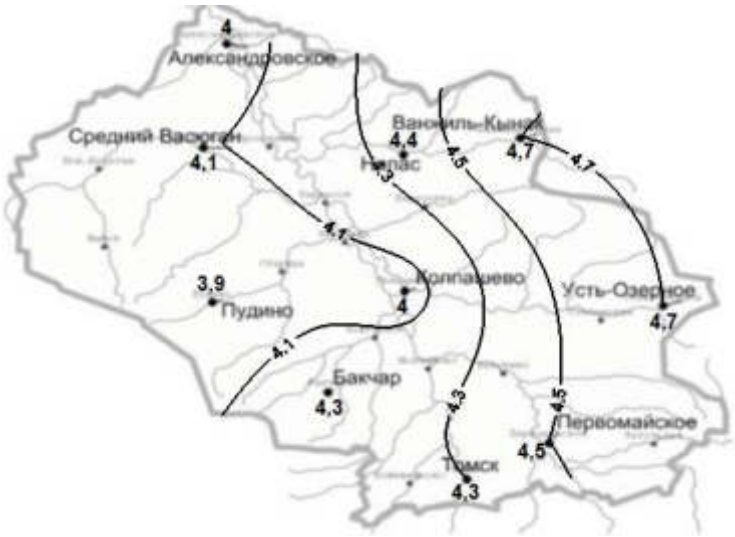


Рис. 1. Средняя продолжительность периода (дни) с сильным морозом

В годовом ходе максимальная повторяемость ОЯ сильный мороз наблюдается в январе (5,1 %) Повторяемость для ноября составила 0,2 % за год, для февраля и декабря – 1,8 % и 1,6 % соответственно.

Опасное явление «сильная жара» для территории Томской области не характерно, за рассмотренный период не было зафиксировано ни одного случая.

В таблице 1 представлены статистические характеристики дней с аномально холодной и аномально-жаркой погодой. Максимальное количество дней с рассматриваемым критерием зафиксировано на ст. Ванжиль-Кынак, и составило 465 дней за 55-летний период и 60 случаев, самый продолжительный из которых составил 23 дня (январь 2006 г.). Средняя продолжительность случая с аномально холодной погодой составила 6,6–7,9 дней. В годовом ходе аномально холодная погода встречается в большинстве случаев в январе. Повторяемость аномально-холодной погоды на рассматриваемой территории выше по сравнению с сильным морозом и изменяется за год в диапазоне от 0,5 % (ст. Бакчар) до 2,3 % (ст. Ванжиль-Кынак).

Средняя продолжительность периода с аномально жаркой погодой для рассматриваемой территории составила от 5,8 (ст. Александровское и Первомайское) до 8,3 дня (ст. Усть-Озерное) При этом наибольшее количество дней с рассматриваемым критерием отмечено на ст. Средний Васюган, где составило 100 дней (15 случаев).

Таблица 1

Статистические характеристики дней с аномально-жаркой/аномально холодной погодой температурой воздуха в Томской области за период 1961–2015 гг.

Станция	Аномально-холодная погода			Аномально-жаркая погода		
	Среднее годовое число случаев с ОЯ	Средняя продолжительность ОЯ, дни	Максимальная продолжительность ОЯ, дни	Среднее годовое число случаев с ОЯ	Средняя продолжительность ОЯ, дни	Максимальная продолжительность ОЯ, дни
Александровское	0,7	7,4	16	0,1	5,8	7
Бакчар	0,3	6,6	10	0,2	6,7	13
Ванжиль-Кынак	1,1	7,9	23	0,2	6,2	11
Колпашево	0,6	6,9	13	0,1	6,5	9
Напас	0,8	7,5	23	0,2	6,6	13
Первомайское	0,3	6,9	11	0,2	5,8	9
Пудино	0,5	7,0	13	0,2	6,0	8
Средний Васюган	0,4	7,5	12	0,3	6,7	12
Томск	0,3	7,3	13	0,1	6,9	11
Усть-Озерное	0,6	7,6	13	0,1	8,3	14

Повторяемость периодов низких температур за год в пределах исследуемого интервала лет варьирует от 4,4 % (ст. Томск) до 11,4 % (ст. Ванжиль-Кынак). Так, на ст. Ванжиль-Кынак в 2006 г. было зафиксировано 28 дней подряд с температурой ниже –30 °С. В годовом ходе максимальное количество дней с низкими температурами наблюдается в январе. Среднее годовое число случаев варьируется в пределах от 12 на ст. Томск до 38 дней на ст. Ванжиль-Кынак. Средняя продолжительность непрерывных периодов низких температур за изучаемый период наблюдений в регионе составила 2,7–6 дней, тогда как максимальная продолжительность достигала 20–28 дней.

Среднее годовое число случаев с высокими температурами (≥ 30 °С) составило от 3,9 дней (ст. Александровское) до 7,4 дней (Средний Васюган и ст. Первомайское), средняя и максимальная продолжительность периода составили 1,8 и 14 дней, соответственно (в среднем по области).

Сравнение повторяемости температурных ОЯ и КМЯ по трем выделенным периодам (табл. 2) показало, что по сравнению с периодом максимальных скоростей глобального потепления (1976–1997 гг.) последний период (1998–2016 гг.) характеризуется повсеместным увеличением случаев сильных морозов, и на большей части области – аномально-холодной погоды и периодов с высокими температурами. Повторяемость аномально-жаркой погоды и периоды с низкими температурами изменяется по территории неоднозначно. Следует отметить, что на станциях Томск и Первомайское наблюдается рост повторяемости всех рассматриваемых явлений.

Расчеты повторяемости явлений, связанных с осадками показали, что КМЯ «сильный дождь» и ОЯ «очень сильный дождь» на территории области наблюдаются крайне редко и были зафиксированы только в летний период. Исключение составили станции Пудино, Средний Васюган, Усть-Озерное, где сильный дождь был зафиксирован в мае. Число случаев с сильным дождем ≥ 35 мм на исследуемой территории за период исследования составило от 7 на ст. Первомайское и Колпашево до 16 на станции Пудино (табл. 3). Повторяемость явления «сильный дождь» за сезон с мая по август составила 0,1–0,24 % (за год 0,03–0,07 %, соответственно). Больше всего случаев было в июле, что связано с увеличением активности процессов внутримассовой конвекции. Абсолютный максимум осадков зафиксирован 12 августа 2012 г. на станции Пудино и составил 92 мм/12 ч, где отмечалось и максимальное число случаев с очень сильным дождем (4 случая). Повторяемость за сезон составила от 0.01 % на станциях Ванжиль-Кынак до 0,06 % на ст. Пудино, на станциях Первомайское и Средний Васюган ОЯ «очень сильный дождь» не было зафиксировано ни разу за период с 1961 по 2015 г.

Таблица 2

Повторяемость (за сезон) опасных явлений на станциях Томской области в различные временные интервалы (%)

Станция	Аномально-холодная погода			Аномально-жаркая погода		
	Среднее годовое число случаев с ОЯ	Средняя продолжительность ОЯ, дни	Максимальная продолжительность ОЯ, дни	Среднее годовое число случаев с ОЯ	Средняя продолжительность ОЯ, дни	Максимальная продолжительность ОЯ, дни
Александровское	0,7	7,4	16	0,1	5,8	7
Бакчар	0,3	6,6	10	0,2	6,7	13
Ванжиль-Кынак	1,1	7,9	23	0,2	6,2	11
Колпашево	0,6	6,9	13	0,1	6,5	9
Напас	0,8	7,5	23	0,2	6,6	13
Первомайское	0,3	6,9	11	0,2	5,8	9
Пудино	0,5	7,0	13	0,2	6,0	8
Средний Васюган	0,4	7,5	12	0,3	6,7	12
Томск	0,3	7,3	13	0,1	6,9	11
Усть-Озерное	0,6	7,6	13	0,1	8,3	14

Примечание: АХ – аномально-холодная погода, АЖ – аномально-жаркая погода, НТ – периоды низких температур, ВТ – периоды высоких температур, СМ – сильный мороз.

Таблица 3

Число случаев и повторяемость дней (%) с сильным и очень сильным дождем на территории Томской области за 1961–2015 гг.

Станция	КМЯ «сильный дождь» (≥ 35 мм)		ОЯ «очень сильный дождь» (≥ 50 мм)	
	Число случаев	Повторяемость за май-август %	Число случаев	Повторяемость за май-август %
Александровское	8	0,12	3	0,04
Бакчар	13	0,19	3	0,04
Ванжиль-Кынак	9	0,14	1	0,01
Колпашево	7	0,10	2	0,03
Напас	15	0,22	3	0,04
Первомайское	7	0,10	0	0,00
Пудино	16	0,24	4	0,06
Средний Васюган	8	0,12	0	0,00
Томск	12	0,18	4	0,06

При анализе повторяемости сильных осадков на станциях Томской области в различные временные интервалы (табл. 4) обнаружено, что в период максимальных скоростей глобального потепления (1976–1997 гг.) наблюдается также и максимальное число повторяемости осадков практически на всех станциях Томской области. Исключение составила станция Ванжиль-Кынак, пик повторяемости экстремальных осадков которой приходится на период замедления глобального потепления (1998–2015 гг.).

Таблица 4

Повторяемость сильных осадков (≥ 35 мм) на станциях Томской области в различные временные интервалы, (%)

Станция	Период		
	1961–1990	1976–1997	1998–2015
Александровское	0,14	0,18	0,09
Бакчар	0,14	0,26	0,18
Ванжиль-Кынак	0,08	0,11	0,23
Колпашево	0,06	0,11	0,14
Напас	0,14	0,37	0,27
Первомайское	0,08	0,18	0,05
Пудино	0,16	0,30	0,23
Средний Васюган	0,14	0,15	0,09
Томск	0,16	0,22	0,18
Усть-Озерное	0,16	0,18	0,14

Далее, с целью выявления основных физических предпосылок формирования рассмотренных экстремальных периодов погоды в регионе, были рассмотрены циркуляционные процессы на основе типизации Б. Л. Дзердзеевского, способствующие формированию таких ситуаций на территории Томской области за период 1961–2015 гг.

Анализ показал, что экстремальные температурные условия, обусловленные низкими температурами, аномально холодной погодой и сильным морозом (рис. 2), в 75–85 % дней отмечались при меридиональных группах циркуляции, с существенным преобладанием (45–58 %) меридиональной северной группы. Данная группа циркуляции характеризуется активными блокирующими процессами, с которыми связаны продолжительные и сильные погодные аномалии на значительных территориях. Оценивая вклад каждого из ЭЦМ, следует отметить ведущую роль ЭЦМ 13з (25–28 %), входящего в меридиональную южную группу циркуляции, со стационированием обширного антициклона над Азиатской частью России.

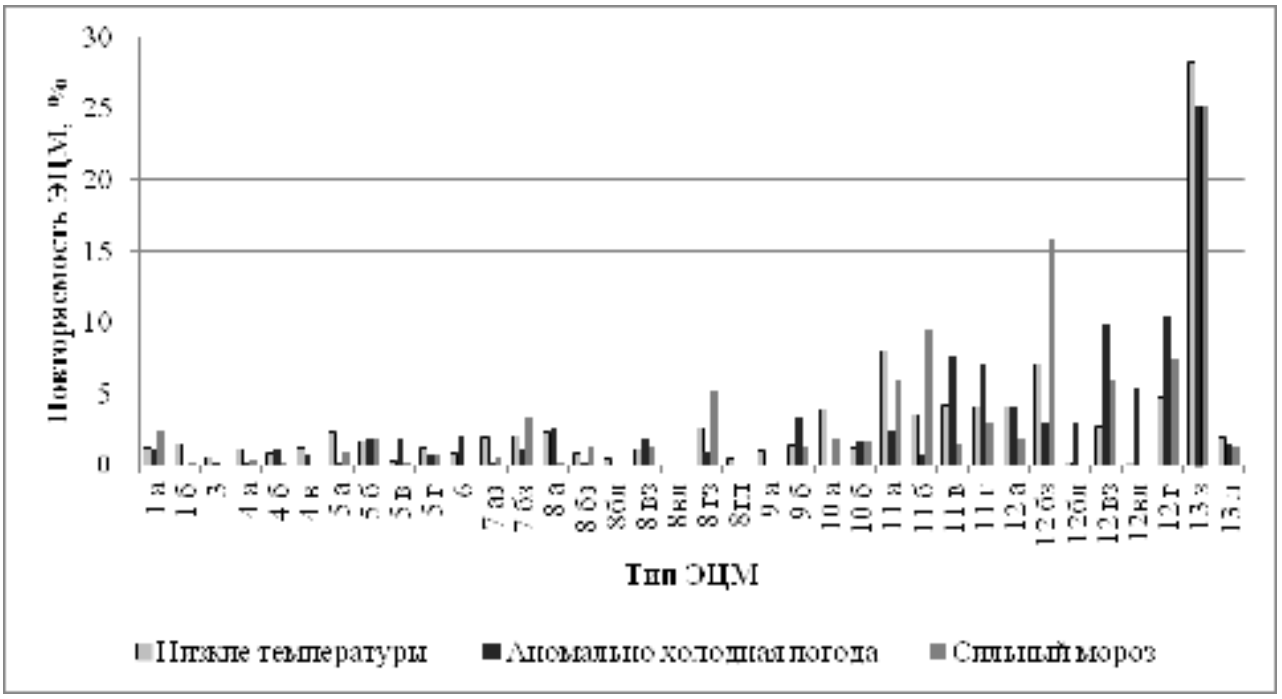


Рис. 2. Повторяемость (%) ЭЦМ в дни с ОЯ и КНЯ в холодный период

Аномальные температурные условия в теплый период на территории Томской области формируются преимущественно при антициклонической циркуляции, либо при формировании малоградиентной области пониженного давления. Так, периоды с аномально жаркой погодой и высокими температурами над территорией Томской области (рис. 3) устанавливались преимущественно при ЭЦМ 13л (34–41 %), 9а (4–9 %), 11г (5–11 %), 2а (4–5 %), 3 (4–6 %).

На рисунке 4 приведена повторяемость (%) ЭЦМ в дни с осадками ≥ 50 мм «очень сильный дождь» и ≥ 35 мм КНЯ «сильный дождь». Выделяется, также, ЭЦМ 13л из меридиональной южной группы циркуляции.

Таким образом, наибольший вклад в формирование всех рассматриваемых ОЯ и КМЯ на территории Томской области вносят ЭЦМ 13з и 13л (рис. 2–5). Так, в январе при ЭЦМ 13з в Сибирском секторе формируются экстремумы, обусловленные стационированием антициклона (сильные морозы, аномально-холодная погода). Более 60 % всех июльских экстремумов в Сибири связаны с ЭЦМ 13л, при котором выходят южные циклоны. С этим ЭЦМ связаны интенсивные осадки, град, смерчи, шквалы. В то же время в местах образования локальных антициклонов (в южных районах Западной Сибири) формируются положительные температурные экстремумы [10].

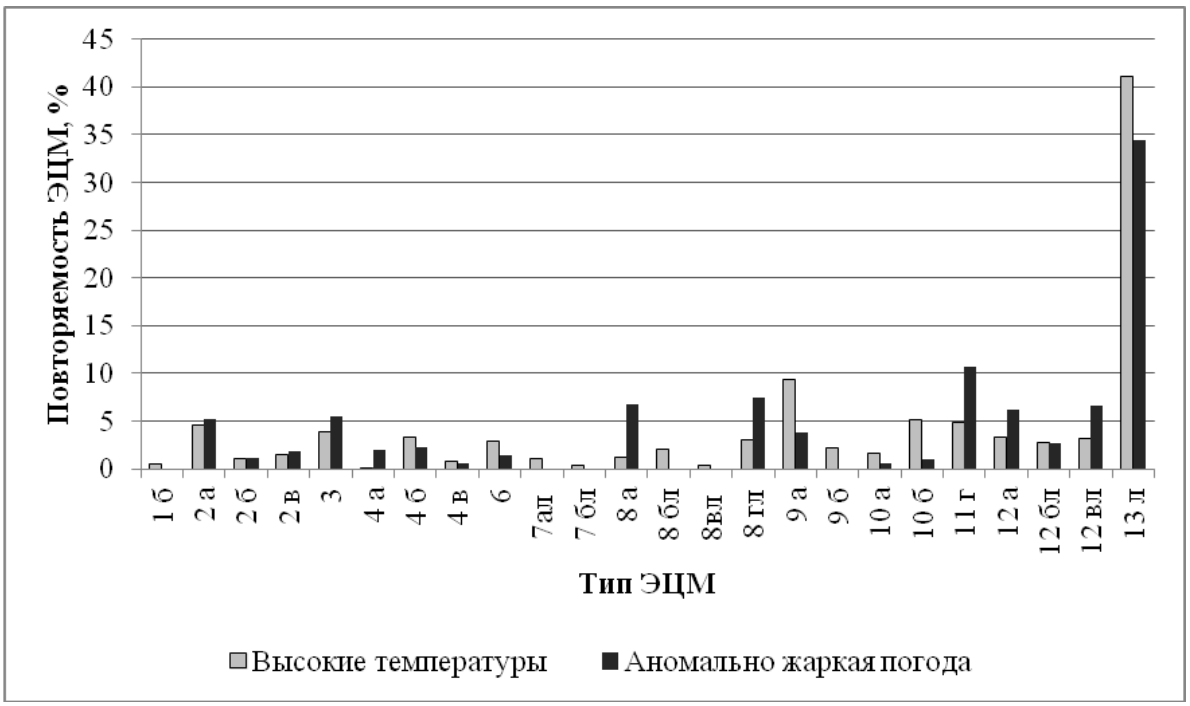


Рис. 3. Повторяемость (%) ЭЦМ в дни с температурными ОЯ и КМЯ в теплый период

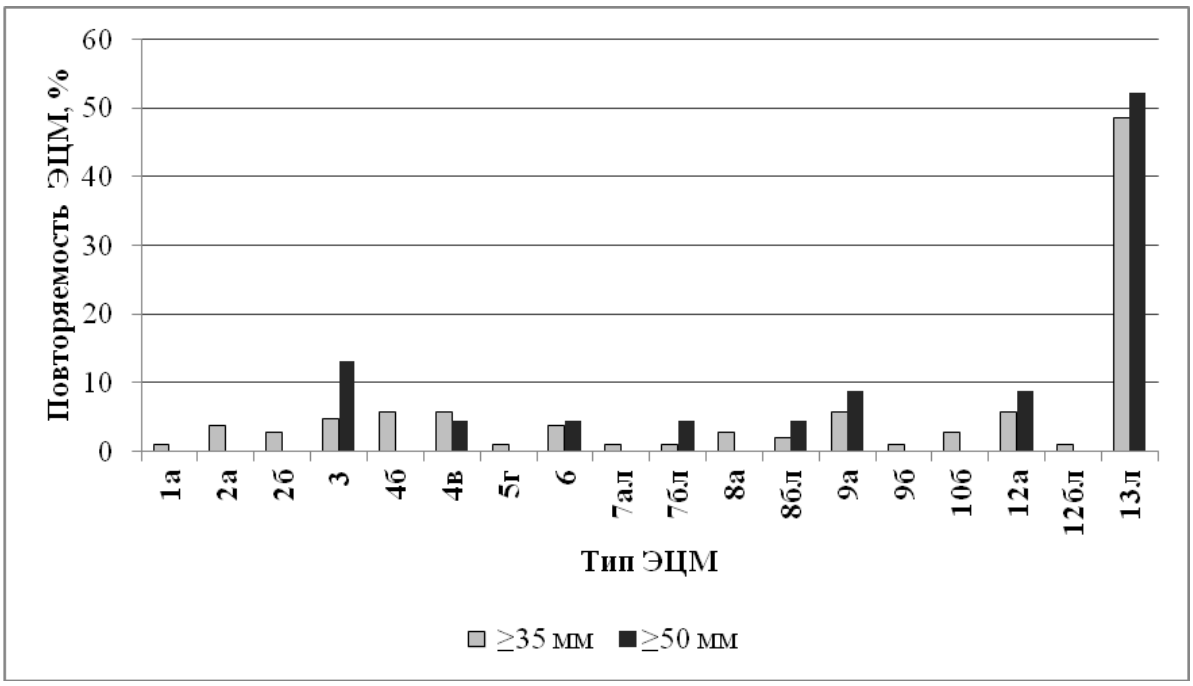


Рис. 4. Повторяемость (%) ЭЦМ в дни с осадками ≥ 50 мм и ≥ 35 мм

Выводы

Расчеты показали, что для территории Томской области более характерны и продолжительны опасные явления холодного периода года (сильный мороз, аномально-холодная погода и периоды низких температур), с наибольшей повторяемостью в северной части территории (ст. Ванжиль-Кынак, Напас и Александровское).

Повторяемость аномально-жаркой погоды, в среднем, по области составила 0,7 %, а периодов с высокой температурой (≥ 30 °С) – 3,6 %, ОЯ «Сильная жара» на территории области не было зафиксировано.

Сравнение повторяемости температурных ОЯ по периодам показало, что по сравнению с периодом максимальных скоростей глобального потепления (1976–1997 гг.), период (1998–2015 гг.) характеризуется повсеместным увеличением случаев сильных морозов, на

большей части области – аномально-холодной погоды и периодов с высокими температурами. Повторяемость аномально-жаркой погоды и периоды с низкими температурами изменяется по территории неоднозначно.

При анализе повторяемости сильных осадков на станциях Томской области в различные временные интервалы выявлено, что в период максимальных скоростей глобального потепления (1976–1997 гг.) наблюдается также и максимальное число повторяемости осадков практически на всех станциях Томской области.

Исследование показало, что экстремальные температурные условия, обусловленные низкими температурами, аномально холодной погодой и сильным морозом, в 75–85 % дней отмечались при меридиональных группах циркуляции, с существенным преобладанием (45–58 %) меридиональной северной группы. Наибольший вклад в формирование всех рассматриваемых ОЯ и КМЯ вносят ЭЦМ 13з и 13л.

Список литературы

1. Барашкова Н. К., Волкова М. А., Кужевская И. В. Современный климатический режим атмосферных осадков на территории Томской области // Тр. Гл. геофиз. обсерватории. 2015. Вып. 576. С. 129–152.

2. Барашкова Н. К., Волкова М. А. Кужевская И. В. Оценка термического режима воздуха и тенденций процессов антициклогенеза на юге Западной Сибири в прикладных целях // Вестн. Том. гос. ун-та. Сер. Науки о Земле. 2014. № 387. С. 225–232.

3. Волкова М. А., Ивашкова О. А, Чередько Н. Н. Особенности формирования и социально-экономические последствия температурных рисков в Томской области // Вестн. Том. гос. ун-та. Сер. Науки о Земле. 2013. № 374. С. 180–181.

4. Волкова М. А., Чередько Н. Н., Журавлев Г. Г. Пространственно-временная структура температурного режима Томской области // Современные проблемы географии и геологии : материалы IV Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (16–19 окт. 2017 г.). Томск : Том. гос. ун-т, 2017. Т. 1. С. 230–233.

5. Второй оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М : Росгидромет, 2014. 1009 с.

6. Дзердзеевский Б. Л., Курганская В. М., Витвицкая З. М. Типизация циркуляционных учреждений Гл. упр. гидрометеорол. службы при Совете Министров СССР. Сер. 2. Синоптическая метеорология. Вып. 21. Центральный институт прогнозов. М. ; Л. : Гидрометиздат, 1946. 80 с.

7. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2016 г. М. : Росгидромет, 2016. 70 с. http://cc.voeikovmgo.ru/images/dokumenty/2017/doc2016.pdf.

8. Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации. СПб., 2017. 106 с.

9. Кононова Н. К. Классификация циркуляционных механизмов Северного полушария по Б. Л. Дзедзеевскому / отв. ред. А. Б. Шмакин. М. : Воентехиниздат, 2009. 372 с.

10. Кононова Н. К., Черенкова Е. А. Циркуляционные условия возникновения опасной атмосферной засухи на юге Западной Сибири // ГЕОРИСК-2009 : Междунар. науч.-практ. конф. М. : РУДН, 2009. Т. 1. С. 38–43.

11. МГЭИК, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of WorkingGroup I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 1535 p. http://ipcc.ch/report/ar5/wg1/.

12. Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения. Обнинск : ИГ-СОЦИН, 2009. 62 с.

13. Чередько Н. Н., Журавлев Г. Г., Кусков А. И. Оценка современных климатических тенденций и синхронности их проявления в Алтайском регионе // Вестн. Том. гос. ун-та. 2014. № 379. С. 200–208.

УДК 551.551

Характеристика турбулентности на аэродроме Томск

Т. Ф. Газимов (chakit@yandex.ru), М. А. Волкова (mv2101@mail.ru)

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск

Аннотация. Приведены случаи с турбулентностью атмосферы, вызвавшей болтанку воздушных судов в районе аэродрома Томск. Рассмотрены следующие характеристики: годовой ход дней с турбулентностью, распределение в зависимости от интенсивности, а также метеорологические и синоптические условия формирования.

Ключевые слова: турбулентность атмосферы, болтанка воздушного судна.

Введение

Одним из наиболее опасных явлений, оказывающих влияние на полеты воздушных судов, является атмосферная турбулентность, которая посредством неупорядоченных вертикальных движений может вызывать болтанку воздушного судна. Попадание самолета в зону интенсивной турбулентности может служить причиной происшествий различной степени тяжести, вплоть до авиакатастроф.

Атмосфера практически всегда находится в турбулентном состоянии. Однако интенсивность атмосферной турбулентности сильно изменяется во времени и в пространстве. Обычно вне пограничного слоя атмосферы воздушный поток является слабо возмущенным и только в отдельных слоях или целых зонах наблюдается усиленное перемешивание воздуха. Основными причинами турбулизации воздушных течений в атмосфере являются возникающие контрасты в полях температуры и скорости ветра [4]. Факторами, обусловливающими развитие турбулентности в нижнем слое атмосферы (до 3 км), являются торможение воздушного потока вблизи поверхности Земли, различие в нагреве отдельных участков земной поверхности солнечной радиацией, а также деформация воздушного потока различными препятствиями. Соответственно турбулентность, возникающая под действием перечисленных факторов, называется механической, термической и орографической. Зачастую развитие турбулентности происходит при одновременном воздействии нескольких указанных факторов.

В теплый период года отмечается преимущественно термическая турбулентность, а механическая (называемая также динамической) фиксируется при полетах на предельно малых высотах, начиная со скорости ветра 5 м/с. В холодный период большее значение приобретает механическая турбулентность. Она развивается при наличии сильных ветров (в частности, во фронтальных зонах), в условиях пересеченной местности и наиболее интенсивна в слабоустойчивых и неустойчивых воздушных массах и над поверхностями с большой шероховатостью (лесные массивы, городская застройка).

Помимо перечисленных видов турбулентности в нижнем слое, необходимо иметь в виду еще один, не метеорологический, а техногенный механизм образования турбулентных пятен – так называемую турбулентность спутного следа. Турбулентность спутного следа, или спутный след, – это мелкомасштабные вихри, образующиеся за самолетом или вертолетом. Вихри формируются на верхней поверхности каждого крыла самолета и на главных лопастях несущего винта вертолета. При высокой плотности воздушного движения взлетающий самолет может попасть в турбулентный след предыдущего самолета и испытать сильнейшую болтанку [5].

Изучение турбулентности необходимо для более детального понимания условий её формирования и прогноза, что способствует последующему предотвращению аварийных ситуаций. В истории авиапроисшествий, турбулентность неоднократно являлась их

причиной. Так, 30 апреля 2017 г. около 23:30 UTC примерно за 200 км до аэропорта Бангкока на эшелоне 350FL попал в зону кратковременной сильной турбулентности (по докладу КВС). В результате 27 пассажиров (24 гражданина РФ и 3 иностранца) получили травмы различной степени тяжести (переломы конечностей, ушибы и т. п.) и были госпитализированы [1].

Целью работы явилось формирование базы данных со случаями болтанки воздушных судов в районе аэродрома Томск по данным бортовой погоды; расчет числа дней и повторяемости болтанки различной интенсивности; анализ годового хода, а также, оценка синоптических условий в дни с болтанкой.

Материалы исследования

В качестве информационной базы использовались данные о турбулентности атмосферы, вызывающей болтанку самолетов (интенсивность, толщина слоя) и сопутствующих метеорологических условиях из дневников погоды АВ-6 и данных АМИС-РФ за 2012–2016 гг. [3], а также синоптические карты [5].

На основе выбранных дат с турбулентностью было рассчитано: число дней, повторяемость числа дней (%) в зависимости от интенсивности за год и по месяцам, определено количество дней с болтанкой при наличии конвективной облачности (кучево-дождевой).

Результаты исследования

В таблице 1 приведено число дней с турбулентностью, вызвавшей болтанку за исследуемый период. Исследование показало, что за рассмотренный 5-летний период турбулентность в районе аэродрома Томск наблюдалась в течение 175 дней. В межгодовой изменчивости за рассмотренный период наиболее часто турбулентность атмосферы наблюдалась в 2014 г. и составила 48 дней.

Таблица 1

Число дней с турбулентностью в период с 2012–2016 гг.

Год	Месяцы												Сумма за год
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
2012	1	-	7	7	11	1	2	1	2	-	3	3	38
2013	6	6	5	5	6	1	2	-	1	1	1	8	42
2014	2	-	15	6	6	-	-	1	2	5	3	8	48
2015	4	-	-	2	4	3	-	-	3	2	3	3	24
2016	3	-	3	-	1	1	1	-	-	-	2	12	23
Σ	16	6	30	20	28	6	5	2	8	8	12	34	175

Оценивая годовой ход данного явления (рис. 1), следует отметить, что наиболее часто болтанка воздушных судов была зафиксирована весной (с марта по май), а также с ноября по январь, с максимумом за 5 лет в декабре (34 дня – 19 %). В холодный период повышенная повторяемость обусловлена вкладом динамического фактора, когда в атмосфере формируются слои с большими горизонтальными и вертикальными сдвигами ветра. Увеличение дней с турбулентностью весной связано с перестройкой барического поля и увеличением меридионального переноса.

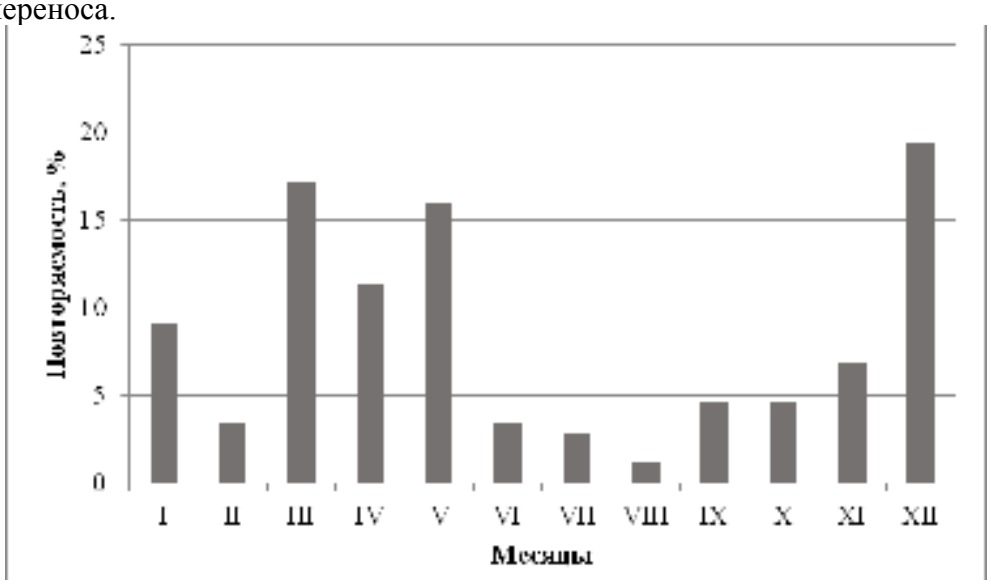


Рис. 1. Годовой ход повторяемости числа дней с турбулентностью

Далее оценим распределение случаев турбулентности в зависимости от интенсивности (табл. 2). Из таблицы следует, что больше всего дней (170) было зафиксировано с умеренной болтанкой воздушных судов. При этом, максимальное количество дней с болтанкой данной интенсивности наблюдалось в марте (17 %) и в декабре (20 %). Слабая и сильная турбулентность наблюдалась редко (4 и 1 день, соответственно) и была зафиксирована в январе, марте и мае (слабая интенсивность) и в апреле (сильная интенсивность).

Также стоит отметить значительный вклад кучево-дождевой облачности в формирование зон турбулентности. При наличии облачности вертикального развития на эшелоне полета повторяемость болтанки самолетов составляет 90–95 %. Самая сильная болтанка в растущих Cb (calvus – лысые), так как сильные восходящие движения (до 40 м/с), особенно в центре облака, на втором месте по опасности – Cb (capillatus incus – волосатые с наковальней). Так за период с 2012 по 2016 г. в 78 % дней с турбулентностью наблюдалась кучево-дождевая облачность.

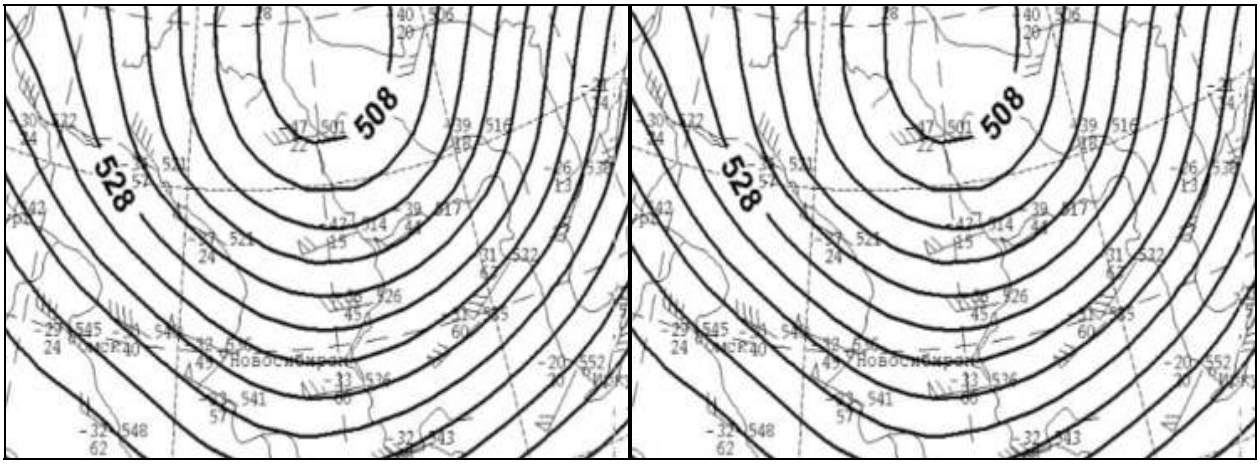
Таблица 2

Повторяемость (%) дней в зависимости от интенсивности в период 2012–2016 гг.

Интенсивность	Месяцы												Σ дни
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Слабая	25,0	-	25,0	-	50,0	-	-	-	-	-	-	-	4
Умеренная	8,8	3,5	17,1	11,2	15,3	3,5	2,9	1,2	4,7	4,7	7,1	20,0	170
Сильная	-	-	-	100	-	-	-	-	-	-	-	-	1
Σ	9,1	3,4	17,1	11,4	16,0	3,4	2,9	1,1	4,6	4,6	6,9	19,4	175

За рассмотренный 5-летний период, наиболее продолжительный случай с турбулентностью в атмосфере в районе аэродрома Томск наблюдался 82 часа 21 мин. в период с 12:39 27 октября до 23:00 ВСВ 30 октября 2014 г. Оценивая синоптические условия данного случая с турбулентностью, следует отметить, что на приземных картах к югу от Томска находился антициклон, а по северу в это время проходила серия циклонов.

На рисунке 2 приведены фрагменты приземной карты за 00 ВСВ 29.10.14 и карта АТ-500 за 00 ВСВ 28.10.14.



1 2

Рис. 2. Фрагменты приземной (1) и высотной карты АТ-500 (2)

На высотных картах барической топографии вплоть до уровня АТ-300 наблюдался глубокий циклон, а Томск находился в его барической ложбине. Такое барическое поле способствовало сгущению изогипс, что приводит к усилению ветра (струйное течение), повышению его градиентов, и как следствие, возможной зоны турбулентности. Также из карт приземного анализа видно, что через Томск практически непрерывно проходили атмосферные фронты, что тоже в свою очередь способствует формированию зон турбулентности.

Список литературы

1. Авиаметтелеком Росгидромета. [Электронный ресурс] : Авиационные происшествия. URL: http://www.aviamettelecom.ru/?id_top=2.
2. Дневник погоды АВ-6 Томск, АМСГ Томск. 2006–2010 гг.
3. Пинус Н. З., Шметер С. М. Атмосферная турбулентность, вызывающая болтанку самолетов. М. : Гидрометеоиздат, 1962. 166 с.
4. Синоптические бюллетени Северного полушария. Ч. 1: Электронные данные. М. : Гидрометцентр России, 2006–2015. CD-ROM.
5. Шакина Н. П., Иванова А. Р. Прогнозирование метеорологических условий для авиации. М. : Триада лтд, 2016. 311 с.

УДК 551.59

Погодные аномалии на территории Ханты-Мансийского автономного округа – Югры

Л. Г. Коробейникова (metodist@ugramet.ru)

Авиационный метеорологический центр (АМЦ), Ханты-Мансийск

Аннотация. Проведено описание редких явлений погоды, наблюдавшихся в ХМАО-Югре за последние годы.

Ключевые слова: погодные аномалии, Ханты-Мансийский автономный округ-Югра.

В последнее десятилетие на территории Ханты-Мансийского автономного округа – Югры отмечаются аномальные явления погоды, которые абсолютно нетипичны для нашего района и северных широт. В этот список попали зимние грозы, водяные смерчи, участившиеся случаи гололедных явлений.

Экстремальных погодных явлений становится больше, эту тенденцию во время Российской климатической недели отмечали самые авторитетные специалисты.

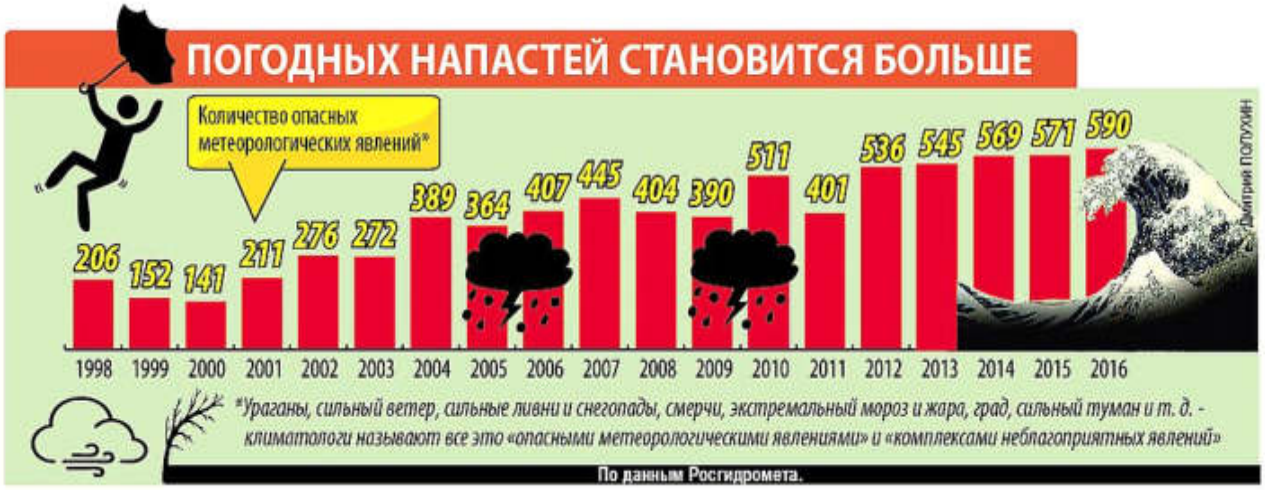
По статистике Росгидромета в 2016 г. в России произошло 590 опасных погодных явлений, из них 250 были связаны со штормовым ветром и сильными осадками.

Еще 15–20 лет назад погодных аномалий было вдвое меньше.

По прогнозам специалистов, общее число опасных гидрометеорологических явлений в России в 2018 г. составит не менее 550–600.

Таблица 1

Таблица распределения количества ОЯ за 1998–2016 гг. по данным Росгидромета



Данная работа носит обзорный характер, и основывается только на фактических наблюдениях аэродрома Ханты-Мансийск и метеостанций округа. Работа не претендует на научный уровень, так как на АМЦ Ханты-Мансийск не ведется научно-исследовательская

работа по причине катастрофической нехватки синоптиков. Синоптики АМЦ выполняют функции по обслуживанию авиации, верифицируют отдельные метеорологические величины, регулярно составляют климатические описания аэродрома Ханты-Мансийск и приписных аэродромов.

Рассмотрим погодные аномалии на территории ХМАО – Югры за последние годы.

Водяные смерчи в Ханты-Мансийском автономном округе

Воронкообразное облако (смерч) – это явление, представляющее собой часто жестокие вихри. Характеризуется наличием облачного столпа или воронкообразного облака, спускающегося от основания кучево-дождевого облака, но необязательно достигающего земли. Маломасштабный атмосферный вихрь, диаметр может колебаться в пределах от нескольких метров до нескольких сотен метров. Скорость ветра при жестоких торнадо может достигать 150 м/с. Если четко выраженное воронкообразное облако находится над землей, то оно называется тромб (или торнадо в США), а если над водой – то водяной смерч. Чаще всего смерчи встречаются в тропических широтах. Вид вихря зависит от того, что он в себя вобрал. Так, различают водяные, снежные, земляные и даже огненные смерчи.

Смерч не характерное для нашего региона и широты явление погоды.

Атмосферные условия, необходимые для возникновения смерчей (рис. 1):

– высокая влажность;

– температурная нестабильность;

– схождение в одной точке теплого влажного воздуха на нижних уровнях и прохладного сухого воздуха на высоте.

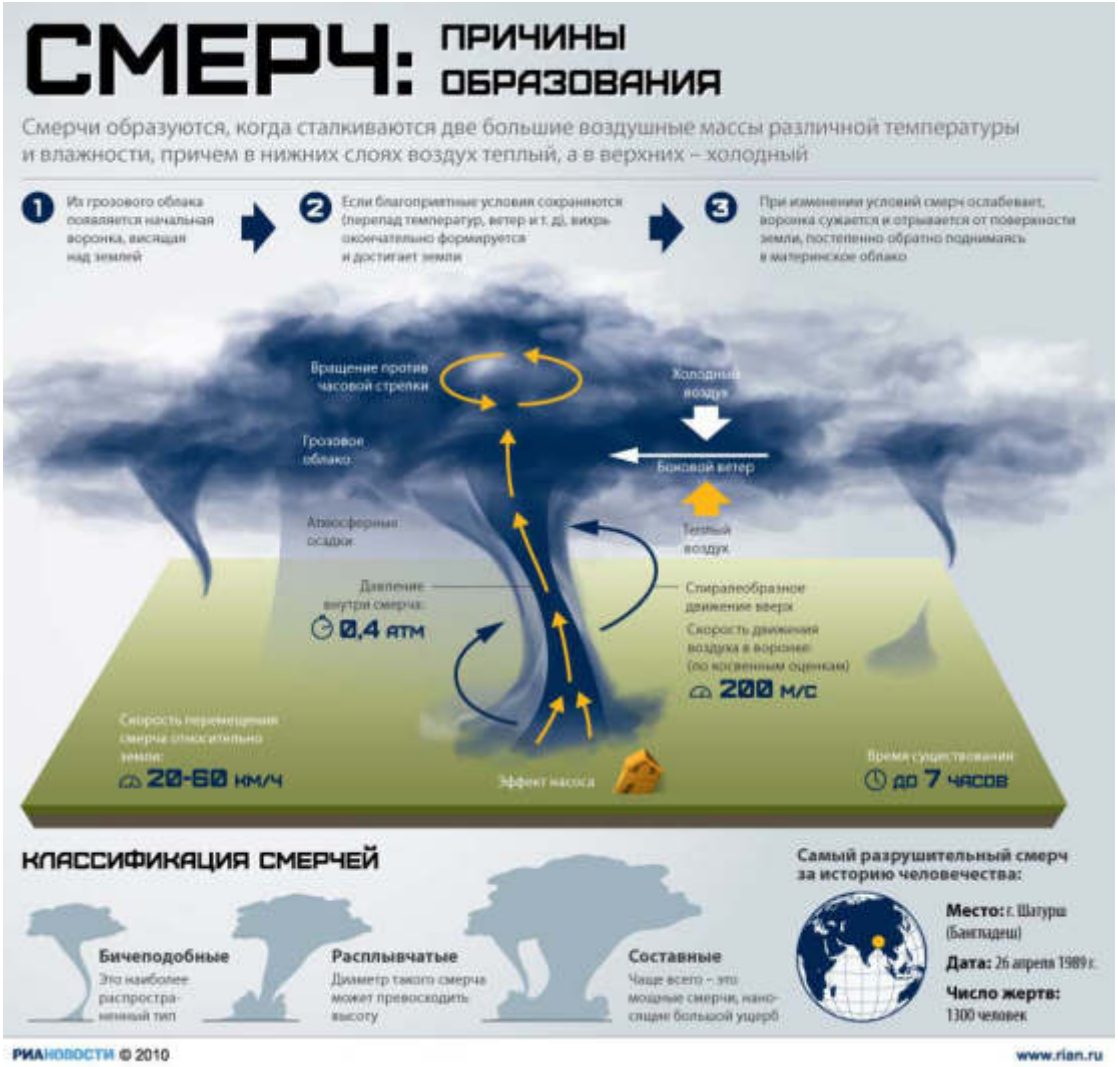


Рис. 1. Условия, необходимые для возникновения смерчей

13 июня 2012 г. в Ханты-Мансийске сформировались условия для образования водяного смерча (рис. 2). В первой половине июня сохранялась устойчивая жаркая погода. При прохождении активного медленно смещающегося с запада на восток атмосферного фронта с большим запасом энергии, образовались мощные кучево-дождевые облака, началась грозовая деятельность. Вихрь с вертикальной осью вращения сформировался над обширной теплой водной поверхностью реки Иртыш, при большой водности облака и наличии прохладного сухого воздуха на высоте. Кучево-дождевое облако вобрало в себя огромное количество влаги.

Затем это напитанное влагой облако сместилось на южную часть города, столкнулось с Самаровской горой (высота горы – 120 м), и весь объем накопленной воды обрушился на город. Количество выпавших осадков за сутки составило 33 мм, это 67 % от климатической нормы июня. Произошло подтопление жилых домов и улиц. Вода не успела впитаться в грунт, обильные осадки образовали мощные потоки, парализующие движение на дорогах города (рис. 2).



Рис. 2. Водяной смерч над акваторией реки Иртыш, г. Ханты-Мансийск 13 июня 2012 г.

Напитанные водой грунты просели под собственной тяжестью, и целые склоны сползли вниз. Так как часть города Ханты-Мансийск располагается в холмистой, рассеченной оврагами местности, обильные осадки спровоцировали схождение оползней. Наиболее сильно пострадал комплекс строений и атлетических дорожек биатлонного центра. Так, 13 июня 2012 г. после сильного ливня, образовавшийся оползень размыл асфальтированные дорожки и укрепленные склоны, произошло падение опор осветительных фонарей, были повалены опоры рекламных щитов (рис. 3).

Подобная синоптическая ситуация при которой сформировался водяной смерч над акваторией реки Иртыш, сложилась и 23 июня 2015 г. Внешний вид сформировавшегося вихря был очень похож на вихрь 2012 г., и временем зарождения вихря также стал июнь месяц. По классификации смерчей вихри в Ханты-Мансийске можно отнести к расплывчатым.

Смерч 2015 г. образовался и разрушился над акваторией реки Иртыш, поэтому на город не обрушились тонны воды, инфраструктура города не пострадала. На аэродроме Ханты-Мансийск прогремела гроза, порывы ветра достигали 18 м/с, прошел ливневый дождь.



Рис. 2. Последствия ливня 13 июня 2012 г., г. Ханты-Мансийск улица Ленина



Рис. 3. Последствия оползня на биатлонном центре 13 июня 2012 г.

На фото представлен биатлонный центр в разное время года. Летом тут проводятся тренировки и соревнования спортсменов по летнему биатлону (рис. 4), а зимой – классические биатлонные соревнования Российского и международного уровня (рис. 5).



Рис. 4. Вид на биатлонный центр г. Ханты-Мансийска с высоты птичьего полета до разрушительных последствий водяного смерча



Рис. 5. Соревнования по биатлону, март 2017 г.

В последнее время водяные смерчи отмечаются и над водохранилищем Сургутской ГРЭС-2 (рис. 6). Эта электростанция является крупнейшей тепловой электростанцией России, по состоянию на 2012 г. является второй ТЭС в мире по установленной мощности и по годовой генерации, а также самым крупным производителем электричества в России. Водохранилище располагается вблизи ГРЭС на реке Чёрная, имеет площадь 12,9 км², объем 80 млн м³ (рис. 7).



Рис. 6. Вид с водохранилище на ГРЭС-2, г. Сургут

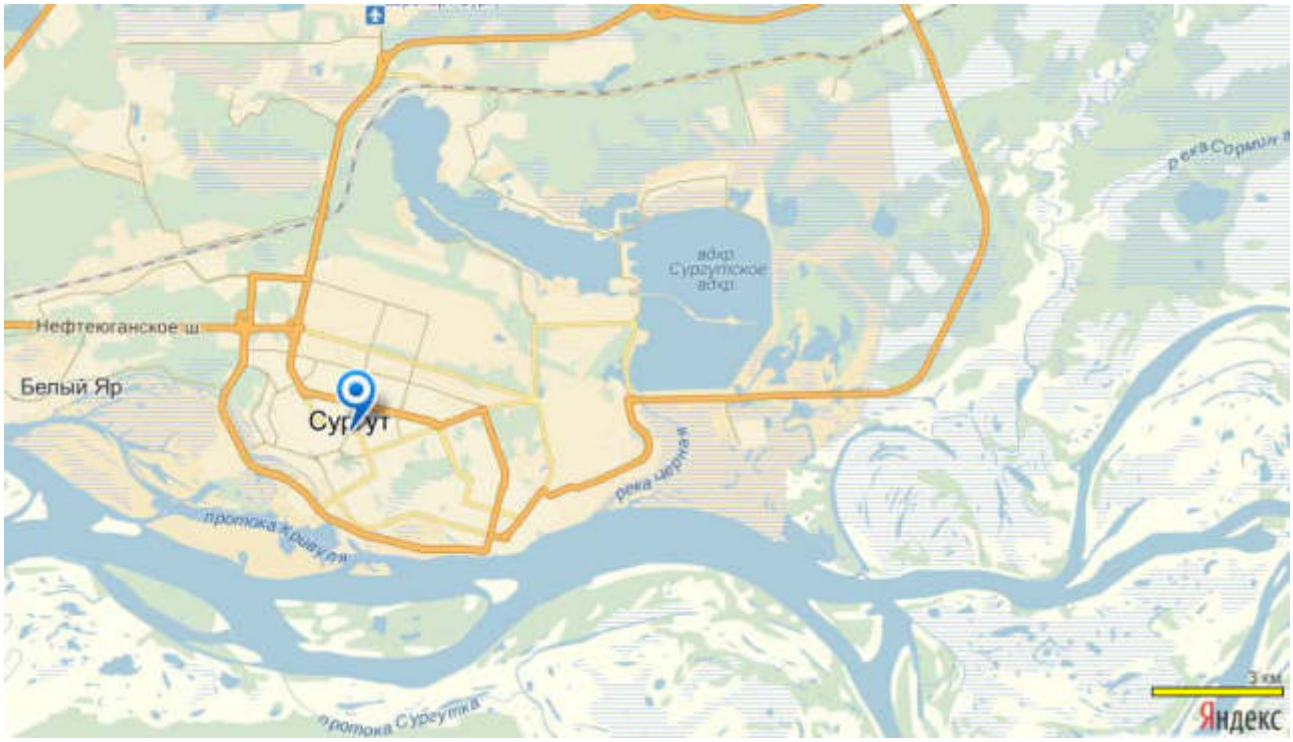


Рис. 7. Карта г. Сургут и водохранилища ГРЭС-2

При высокой температуре поверхности воды, высокой влажности и неустойчивой стратификации атмосферы возникают условия для образования водяных смерчей, иногда их бывает несколько (рис. 8).

Следует сделать вывод, что при интенсивной выработке электричества тепловые выбросы труб ГРЭС в атмосферу и вода, которая используется для охлаждения турбин и сливаемая в водохранилище, будет постоянно поддерживать очень высокую температуру поверхности воды. По этой причине при благоприятных синоптических условиях водяные смерчи в районе Сургутской ГРЭС-2 будут наблюдаться и в дальнейшем.



Рис. 8. Смерч 6 июля 2016 г. над водохранилищем Сургутской ГРЭС-2

Таблица 2

Даты наблюдения водяных смерчей на территории Ханты-Мансийского округа – Югры

Дата	Населенный пункт
04.09.2008	г. Сургут
25.05.2011	г. Сургут
04.09.2012	г. Сургут
04.10.2013	г. Сургут
07.07.2016	г. Сургут
13.06.2012	г. Ханты-Мансийск
23.06.2015	г. Ханты-Мансийск
27.06.2016	г. Нижневартовск

В какой-то мере именно человек является «творцом» этих водяных смерчей, и мы, люди, не желая этого, создали условия для образования вихрей микро и мезо масштаба. Важно, чтобы они возникали, развивались и разрушались именно над акваторией водохранилища и не выходили за его пределы, так как при выходе на земную поверхность «хобот» кучево-дождевого облака разрушается, и вся накопленная влага выпадает в виде сильных ливневых осадков, которые могут вызвать разрушения и затопления.

Водяные смерчи над акваториями рек в районе Ханты-Мансийска и Нижневартовска смогут сформироваться только тогда, когда возникнут синоптические условия для образования этих вихрей и при естественном интенсивном прогреве воды в реках Иртыш и Юганская Обь.

Зимние грозы

Зимние грозы непродолжительны. Они сопровождаются шквалистым ветром, сильными снегопадами, метелями. Известно, что осадки всех видов несут в себе электрические заряды. Снег представляет собой типичное сыпучее тело. При трении снежинок друг о друга и их ударам о землю и местные предметы, снег электризуется. При низких температурах во время сильных снегопадов и метелей электризация снега настолько велика, что происходят зимние грозы. В облаках снежной пыли бывают видны синие и фиолетовые вспышки и даже образуются шаровые молнии. Наличие осадков имеет важное значение при образовании зимних гроз. Чем осадки интенсивнее, тем больше вероятность грозы (рис. 9).

За последние 2 года в Ханты-Мансийском автономном округе – Югра зимние грозы наблюдались 3 раза в феврале–марте, при этом отмечался сильный ветер, выпадал сильный ливневый снег с ухудшением видимости до 200 метров, автомобильный транспорт и авиасообщение в Округе было парализовано (рис. 10, 11).



Рис. 9. Зимняя гроза



Рис. 10. В марте 2016 г. в результате сильного снегопада движение автотранспорта в Округе было парализовано



Рис. 11. Во время метели, накрывшей округ в марте 2016 г., видимость ухудшалась до 200 м, были отменены десятки авиарейсов в аэропортах округа

Интересно отметить тот факт, что зимняя гроза 20 марта 2016 г. наблюдалась не только в Ханты-Мансийске, видели молнии и слышали раскаты грома в городе Тюмени, в Свердловской области.

Таблица 3

Даты наблюдения зимних гроз на территории Ханты-Мансийского округа – Югры

Дата зимней грозы	Населенный пункт
20.03.2016	г. Ханты-Мансийск
13.03.2017	г. Ханты-Мансийск
28.02.2017	г. Нижневартовск

Прогноз такого явления, как зимняя гроза крайне затруднен, однако возможен. При анализе большого статистического материала выявлены пять синоптических признаков атмосферных процессов, способствующих образованию интенсивных конвективных явлений:

1. Наличие динамического фактора, обеспечивающего подъем теплого и влажного воздуха нижней тропосферы вверх, что имеет место на волновых возмущениях, циклонах, на фронтах и на разделах воздушных масс с различной влажностью, снежные грозы наблюдаются на ХФ и ФО по типу холодного.

2. Большая конвективная неустойчивость в атмосфере, характеризующаяся вертикальными градиентами температуры значительно больше влажно-адиабатических;

3. Сильные, с большим сдвигом ветры западной четверти в средней и верхней тропосфере и наличие мощного струйного течения нижних уровней, имеющего юго-восточное или южное направление;

4. Подток с юга или юго-востока влажного воздуха в слое земля – 1500 м одновременно с этим подток сухого воздуха с юго-запада, запада и северо-запада в слое 1500–3000 м;

5. Наличие задерживающего слоя (инверсии) выше пограничного слоя, вследствие чего образование мощных кучево-дождевых облаков происходит «взрывным» образом.

Анализируя эти ситуации, синоптики пришли к выводу, что во всех случаях создавались однотипные условия для образования и развития интенсивных конвективных явлений при выходе мощного южного циклона, отмечались синоптические признаки атмосферных процессов, о которых говорилось выше, и которые способствовали образованию такого редкого явления как зимняя гроза.

При анализе статистических данных отмечено, что за 2001–2010 гг. грозы отмечались с мая месяца. В период 2011–2015 гг. грозы начали отмечаться с апреля, а в последние два года, в 2016 и в 2017 г. – отмечены два случая гроз в марте. Из этого следует сделать вывод о том, что при сложившихся синоптических условиях, благоприятных для образования зимних гроз, синоптики могут смело прогнозировать это редкое атмосферное явление.

Замерзающие осадки

Гололед – слой плотного льда, нарастающего на предметах при выпадении замерзающего дождя или мороси. Замерзающий дождь выпадает при отрицательных температурах. При соприкосновении с землей капли переохлажденной воды образуют смесь воды и прозрачного льда. Ударяясь о поверхность земли, капли замерзают и образуют гололед. Ледяной дождь – внутри ледяного шарика остается незамерзающая (переохлажденная) вода. Падая на предметы, эти шарики разбиваются, вода вытекает и замерзает (рис. 12).

При анализе статистических данных за пятнадцатилетний период (с 2001 по 2015 г.) на АМЦ Ханты-Мансийск наблюдалось 64 явления, которые вызвали образование гололеда, т. е. в среднем 4,3 случая в год. В 2017 г. только за период с октября по ноябрь было отмечено 9 явлений, таких как замерзающий дождь и замерзающая морось, которые вызвали образование гололеда.

Различают внутримассовый и фронтальный гололед.

Внутримассовый гололед образуется в зоне адвекции теплого и влажного воздуха при отрицательной температуре в приземном слое. Такие условия создаются в холодное полугодие в теплых секторах циклонов, а также на западной и северной периферии малоподвижных антициклонов (гребней).

Фронтальные гололеды образуются при резкой смене отрицательных температур перед фронтом на положительные за линией фронта. Обычно это бывает при медленном (20–25 км/ч) смещении теплого фронта, когда перед фронтом температура воздуха находится в пределах от -1° до -8 °С, а за фронтом от +5° до +10 °С. Реже гололеды связаны с медленно перемещающимися холодными фронтами первого рода, особенно при образовании на них волновых возмущений.



Рис. 12. Гололед

Таблица 4

Дата замерзающих осадков	Вид замерзающих осадков	Время наблюдения
02.10.2017	Замерзающий дождь	20:20–21:15 UTC
02.10.2017	Замерзающий дождь	20:30–21:45 UTC
31.10.2017	Замерзающая морось	02:44–03:30 UTC
09.11.2017	Замерзающий дождь	04:43–05:07 UTC
09.11.2017	Замерзающий дождь	05:11–06:00 UTC
11.11.2017	Замерзающий дождь	21:00–21:36 UTC
11.11.2017	Замерзающий дождь	23:00–23:21 UTC
29.11.2017	Замерзающий дождь	03:43–04:33 UTC
29.11.2017	Замерзающий дождь	07:38–07:50 UTC

Погодные условия последних месяцев 2017 г. носили крайне неустойчивый характер. Среднесуточная температура воздуха наблюдалась выше средней климатической нормы. Территория Ханты-Мансийского округа находилась под влиянием циклонов и связанных с ними фронтальных разделов. Происходила резкая смена температуры воздуха от отрицательных к положительным значениям и наоборот. На высотах установилась меридиональная циркуляция ВФЗ, что способствовало беспрепятственному выносу тепла с юга на север. На высотах наблюдались мощные температурные инверсии и изотермии. Создавались все условия для образования гололедных явлений. В этот период были отмечены все виды гололеда: и внутримассовый, и фронтальный, и что необычнее всего – образовался гололед при прохождении вторичного холодного фронта, такая ситуация не описана в теоретических выкладках синоптической метеорологии.

Особенность сложившейся ситуации заключается в том, что Ханты-Мансийский округ – Югра в этот период года обычно находится под влиянием отрога Сибирского антициклона, и на нашей территории устанавливается ясная, морозная погода с высоким атмосферным давлением.

В заключение можно сказать, что сегодня и в будущем техники-метеорологи смогут отмечать такие явления, которые в наших широтах никогда не наблюдались. А синоптики должны быть готовы прогнозировать необычные явления и не должны заключать себя в «рамки» классической метеорологии.

К сожалению, на рабочих местах синоптиков имеется литература, выпущенная в 50–70-е гг. прошлого века, которая требует обновления. Также требуется научный подход в изучении процессов, которые наблюдаются в последние годы и иногда совершенно не характерны для нашей территории. Анализ, который применен в старой литературе для привычных классических схем различных синоптических ситуаций, не всегда актуален, поэтому необходимо развивать метеорологию как науку с учетом изменения климата. Помимо литературы необходимы новые расчетные методы основных метеорологических величин, новое программное обеспечение, которые помогут синоптику вовремя и эффективно спрогнозировать опасные явления.

УДК 630.431.1(571.5)

Природные факторы возникновения лесных пожаров на территориях проживания коренных малочисленных народов в Иркутской области, Республике Бурятия и Забайкальском крае

В. Н. Курдюков (vit.kurdyukov@list.ru), И. В. Латышева (abababl1967@mail.ru)
Иркутский государственный университет, Иркутск

Аннотация. Приводится анализ многолетней динамики характеристик лесных пожаров в районах проживания коренных малочисленных народов на территории Иркутской области, Забайкальского края и Республики Бурятия по данным спутникового мониторинга за 2002–2017 гг. Выявлена тенденция увеличения площади гарей и количества очагов возгораний на исследуемой территории, которая тесно согласуется с возросшей повторяемостью антициклональных типов приземных барических полей и динамических факторов роста давления в средней тропосфере на фоне увеличения числа положительных аномалий температур в теплое время года.

Ключевые слова: лесные пожары, циркуляция, температура воздуха, атмосферные осадки, коренные малочисленные народы.

Введение

Исследуемая территория – Иркутская область, Республика Бурятия и Забайкальский край – входят в число 28 субъектов Российской Федерации, где проживают коренные малочисленные народы. Сойоты проживают, в основном, в горной части Окинского района Республики Бурятия, эвенки – в северных районах Иркутской области и Республики Бурятия, а также в Каларском, Тунгиро-Олёкминском и Тунгокоченском районах Забайкальского края. Тофалары проживают преимущественно на юге Нижнеудинского района (рис. 1).

Разнообразие природных условий проживания коренных малочисленных народов на исследуемой территории способствовало формированию различных отраслей хозяйственной деятельности. Можно выделить две большие исторически сложившиеся области: южную – область древнего горно-долинного оленеводства, скотоводства и земледелия, где ведут хозяйственную деятельность тофалары и сойоты, и северную – область таежного оленеводства, охотничьего промысла и рыболовецкого хозяйства, в которой заняты в основном эвенки [11].

Для рационального использования природно-ресурсного потенциала территории современного расселения коренных малочисленных народов важно учитывать возросшую степень антропогенного воздействия и тенденции изменения погодных и климатических параметров. Среди факторов, которые имеют как антропогенное, так и естественное происхождение и оказывают существенное влияние на экономический потенциал развития коренных малочисленных народов, выделяются лесные пожары. Следует отметить, что исследование причин возникновения лесных пожаров в настоящее время рассматривается как одно из приоритетных направлений развития лесной науки [6; 12].

В отдельных природных округах крупные лесные пожары происходили задолго до поселенческих рубок. Так, на севере Прибайкалья леса страдали от палов, применяемых местным тунгусским населением с целью привлечения зверя на гари и в послепожарные молодняки. В начале 1930-х гг. экспедицией под руководством В. Н. Сукачева получены данные о последствиях такого рода хозяйствования местного населения. Гари сосны в долине Верхней Ангары занимали 17,6 тыс. га, а гари лиственницы – 103,1 тыс. га. Пирогенные потери в кедровниках отягощались необратимостью, несмотря на умеренные площади гарей [8]. В настоящее время отмечается существенный рост частоты лесных пожаров и площади, ежегодно подвергающейся пирогенному воздействию в различных регионах Северного полушария [15], включая территорию Сибири [18]. По имеющимся оценкам на территорию Сибири приходится до 70–90 % ежегодного количества лесных пожаров России [16]. В этой связи изучение природных и антропогенных факторов возникновения лесных пожаров представляет актуальность, особенно в регионах проживания коренных малочисленных народов, где охотничий промысел является одним из основных видов занятости населения.

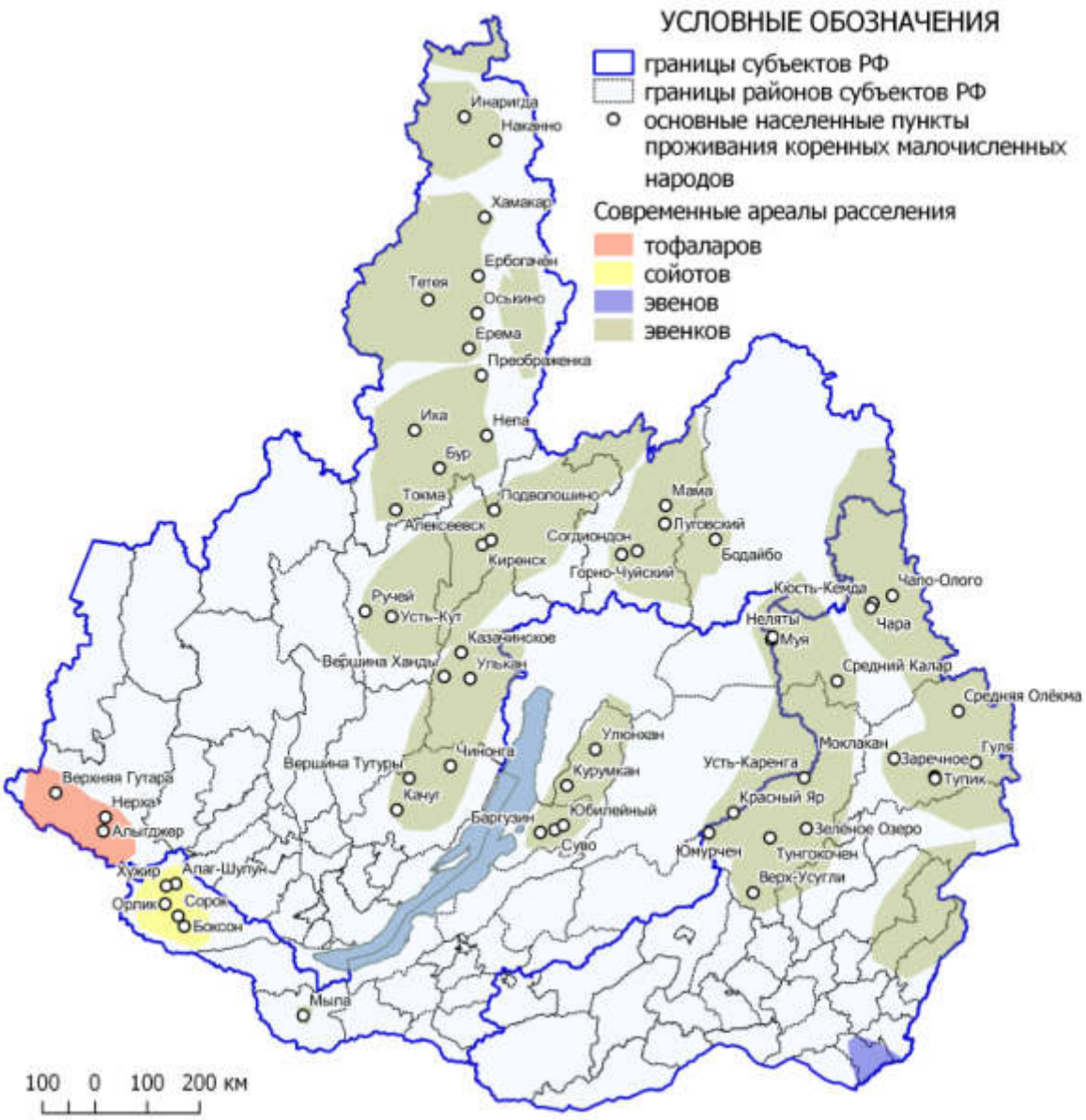


Рис. 1. Современные ареалы расселения коренных малочисленных народов на территории Иркутской области, Республики Бурятия и Забайкальского края

Постановка задачи

Предрасположенность территории Иркутской области, Республики Бурятия и Забайкальского края к возникновению лесных пожаров обусловлена сравнительно высокой повторяемостью бездождных периодов, особенно на территории Забайкалья [4; 17]. Современные масштабы и частота воздействия пожаров на светлохвойные леса Забайкалья значительно превышают естественную эволюционно обусловленную норму [3]. Одной из причин увеличения засушливости климата исследуемой нами территории является рост температур [9]. Среди естественных факторов возникновения лесных пожаров рассматривают молнии. В работе [5] выявлена связь гроз в Сибири с широтой местности и гранулометрическим составом почвы, а также с интенсивностью геомагнитных аномалий территории.

Одним из перспективных методов дистанционного мониторинга пожаров является использование характеристик спутниковых систем (NOAA/AVHRR, Terra, Aqua/MODIS, Suomi NPP/VIIRS, Landsat-8 OLI, Sentinel-2), включая российский сегмент (Ресурс-П) [10]. В настоящее время противопожарный мониторинг более чем 51 % лесов России осуществляется только на основе спутниковой информации [1].

Определенные результаты достигнуты в области математического моделирования. Например, Гришиным А. М. и Фильковым А. И. предложена детерминированно-

вероятностная модель и геоинформационная система прогноза пожарной опасности по условиям погоды в лесу [2]. Согласно данным сценарных экспериментов климатических моделей пятого поколения в России до конца XXI в. прогнозируются положительные тренды горимости лесов на региональном и особенно на субрегиональном уровне [14].

Целью данной работы явился анализ многолетних изменений характеристик лесных пожаров на территории проживания коренных малочисленных народов в Иркутской области, Республике Бурятия и Забайкальском крае по выходным данным спутникового сервиса ВЕГА, который широко используется в региональных системах дистанционного мониторинга [7]. За период 2002–2017 гг. проводился расчет количества очагов возгорания и площади гарей (га). Для оценки вклада метеорологических факторов в межгодовую динамику лесных пожаров проводился анализ аномалий средних месячных значений температуры воздуха и атмосферных осадков по данным метеорологических станций Иркутск, Чита и Улан-Удэ за 2002–2017 гг. (гр-5). Учитывая, что максимум повторяемости лесных пожаров приходится на теплый период, в работе анализировались аномалии полей давления и геопогенциала в период с апреля по сентябрь путем построения карт по выходным данным реанализа NCEP/NCAR.

Обсуждение результатов

В таблице 1 представлены результаты обработки данных по пожарам на территории проживания коренных малочисленных народов, где отчетливо видно, что наиболее неблагоприятная ситуация складывается в Забайкальском крае. В межгодовой динамике по площади гарей выделяется 2003 г., когда они были максимальными на территории Республики Бурятия и в Забайкалье, и 2014 г., когда максимум отмечался на территории Иркутской области. Важно отметить, что в целом во всех трех регионах отмечается тенденция увеличения, как площади гарей, так и количества очагов лесных пожаров.

Таблица 1

Характеристики лесных пожаров на территории Иркутской области, Республики Бурятия и в Забайкальском крае в 2002–2017 гг.

Годы	Площадь гарей (га)			Количество очагов		
	Иркутская область	Республика Бурятия	Забайкальский край	Иркутская область	Республика Бурятия	Забайкальский край
2002	278 119	32 648	188 548	523	118	286
2003	760 199	4 688 304	14 044 321	410	456	870
2004	37 999	75 196	224 516	106	71	257
2005	197 675	53 569	250 540	193	248	314
2006	353 807	93 583	304 876	325	235	423
2007	236 423	74 349	612 727	356	263	449
2008	269 630	398 164	1 288 354	448	427	525
2009	81 872	225 143	254 299	135	297	297
2010	139 173	165 086	110 844	329	266	466
2011	415 890	338 025	436 469	489	386	511
2012	178 363	245 099	988 538	260	193	345
2013	240 205	106 487	267 009	297	203	389
2014	1 405 440	240 094	704 689	724	336	426
2015	756 190	989 216	158 4426	343	510	588
2016	724 562	813 681	409 469	480	216	256
2017	1 044 993	398 618	855 160	798	320	630
среднее	445 034	558 579	1 407 799	389	284	440
максимальное	1 405 440	4 688 304	14 044 321	798	510	870
минимальное	37 999	32 648	110 844	106	71	256

По районам проживания коренных малочисленных народов наиболее значительные показатели общей площади гарей в исследуемый период 2002–2017 гг. выявлены в Баунтовском районе (Бурятия), Тунгокоченском районе (Забайкалье), Катанском и Качугском районах (Иркутская область) (рис. 2).

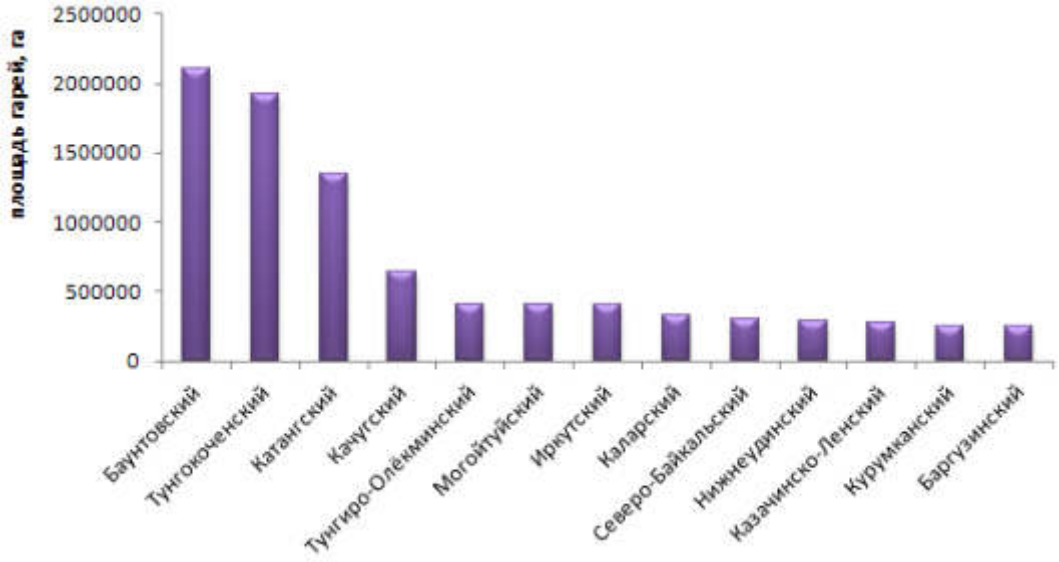


Рис. 2. Суммарная площадь гарей (га) на территории проживания коренных малочисленных народов в Иркутской области, Республике Бурятия и Забайкальском крае в 2002–2017 гг.

Анализ метеорологических параметров по данным метеорологических станций Иркутск, Чита и Улан-Удэ показал следующее. В исследуемый период 2002–2017 гг. преобладали положительные аномалии средних месячных температур, повторяемость которых составила 70 % на станциях Иркутск и Улан-Удэ и 73 % на ст. Чита (рис. 3). Отрицательные аномалии температур чаще отмечались в холодный период года, а положительные аномалии – в теплый период. В отличие от температуры воздуха, где преобладали тенденции роста температур, в аномалиях отклонений месячных сумм осадков от многолетних норм на ст. Иркутск и Чита примерно равновероятны тенденции увеличения и уменьшения месячных сумм атмосферных осадков (55 %), а на ст. Улан-Удэ несколько большая повторяемость (59 %) приходится на уменьшение сумм атмосферных осадков.

Анализ метеорологических параметров по данным метеорологических станций Иркутск, Чита и Улан-Удэ показал следующее. В исследуемый период 2002–2017 гг. преобладали положительные аномалии средних месячных температур, повторяемость которых составила 70 % на станциях Иркутск и Улан-Удэ и 73 % на ст. Чита (рис. 3). Отрицательные аномалии температур чаще отмечались в холодный период года, а положительные аномалии – в теплый период. В отличие от температуры воздуха, где преобладали тенденции роста температур, в аномалиях отклонений месячных сумм осадков от многолетних норм на ст. Иркутск и Чита примерно равновероятны тенденции увеличения и уменьшения месячных сумм атмосферных осадков (55 %), а на ст. Улан-Удэ несколько большая повторяемость (59 %) приходится на уменьшение сумм атмосферных осадков.

Обращает внимание согласованность изменения температурно-влажностного режима на исследуемой территории Иркутской области, Республики Бурятия и в Забайкалье, что можно объяснить общей структурой крупномасштабных барических полей, определяющей погодные и климатические аномалия на достаточно большой территории. Кроме того, современные тенденции изменения количества лесных пожаров также тесно согласованы на изучаемой территории. По данным Понамарева Е. И. и Харука В. И. [9] в период с 2011 по 2016 г. пожары в течение одного сезона регулярно группируются в нескольких субрегионах Сибири (Эвенкия, Якутия, Прибайкалье и юг Дальнего Востока), нередко действуя одновременно; регулярно повторяются сезоны (2006, 2007, 2011–2013 гг.). Возрастание числа пожаров одновременно в границах нескольких территорий может быть следствием устойчивых антициклонических процессов [13].

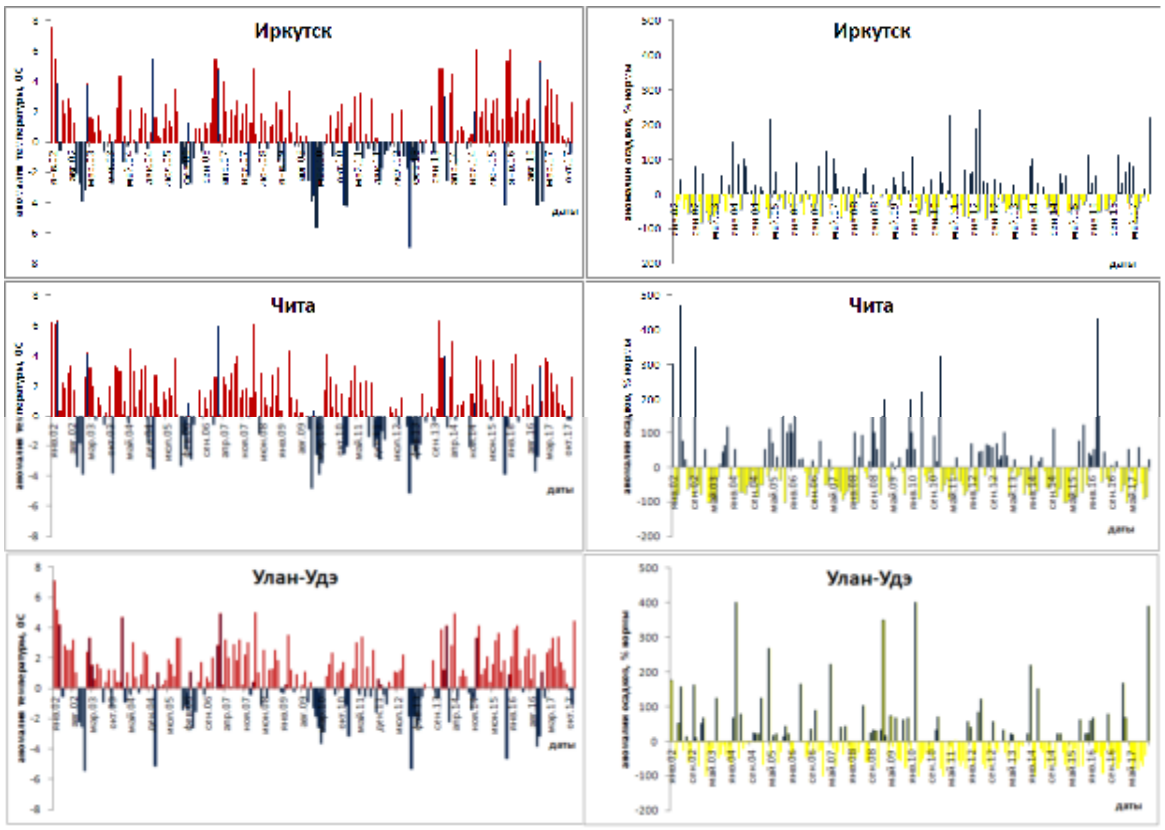


Рис. 3. Аномалии средних месячных температур и месячных сумм атмосферных осадков в 2002–2017 гг. на ст. Иркутск по отношению к многолетней норме 1882–2018 гг., Чита (1890–2018 гг.) и Улан-Удэ (1886–2018 гг.)

Для исследования вклада крупномасштабных циркуляционных факторов в возникновение лесных пожаров на территории Иркутской области, Забайкалья и Республики Бурятия первоначально был проведен сравнительный анализ полей приземного давления и геопотенциала АТ–500 гПа в годы, резко различающиеся по характеристикам лесных пожаров: 2003 г., когда количество очагов лесных пожаров и площади гарей были одними из наибольших в исследуемый период 2002–2017 гг., и 2004 г., когда эти показатели были одними из наименьших (рис.4). Выявлено, что в теплый период (апрель – сентябрь) 2003 г. над значительной частью территории Евразии преобладали положительные аномалии давления и геопотенциала, а блокирующие антициклоны на северо-западе препятствовали смещению ныряющих циклонов, которые оказывали влияние преимущественно на высокие широты. Длительное влияние теплых и сухих воздушных масс явилось одним из основных факторов высокой пожароопасности в теплый период 2003 г. в Иркутской области, Забайкалье и в Республике Бурятия. В теплый период 2004 г. аномалии барического поля носили противоположный характер, как в поле давления, так и в поле геопотенциала на исследуемой территории преобладали отрицательные аномалии (динамические факторы падения давления), которые способствовали развитию циклогенеза и влиянию влажной воздушной массы. Соответственно уровень пожарной опасности был сравнительно низким.

Более детальный анализ показал, что в теплый период 2002–2017 гг. на территории Иркутской области, Забайкальского края и Республики Бурятия на высоте ведущего потока АТ-500 гПа (5 км) преобладали тенденции повышения геопотенциальных высот, т. е. факторы, способствующие антициклогенезу (рис. 5). Причем из шестнадцати рассмотренных лет в течение восьми лет длительное стационирование антициклонов отмечалось на юге Восточной Сибири, в Монголии и Забайкалье, что препятствовало не только смещению ныряющих циклонов из Атлантики, но и образованию южных монгольских циклонов – основных поставщиков влаги в исследуемый нами регион.

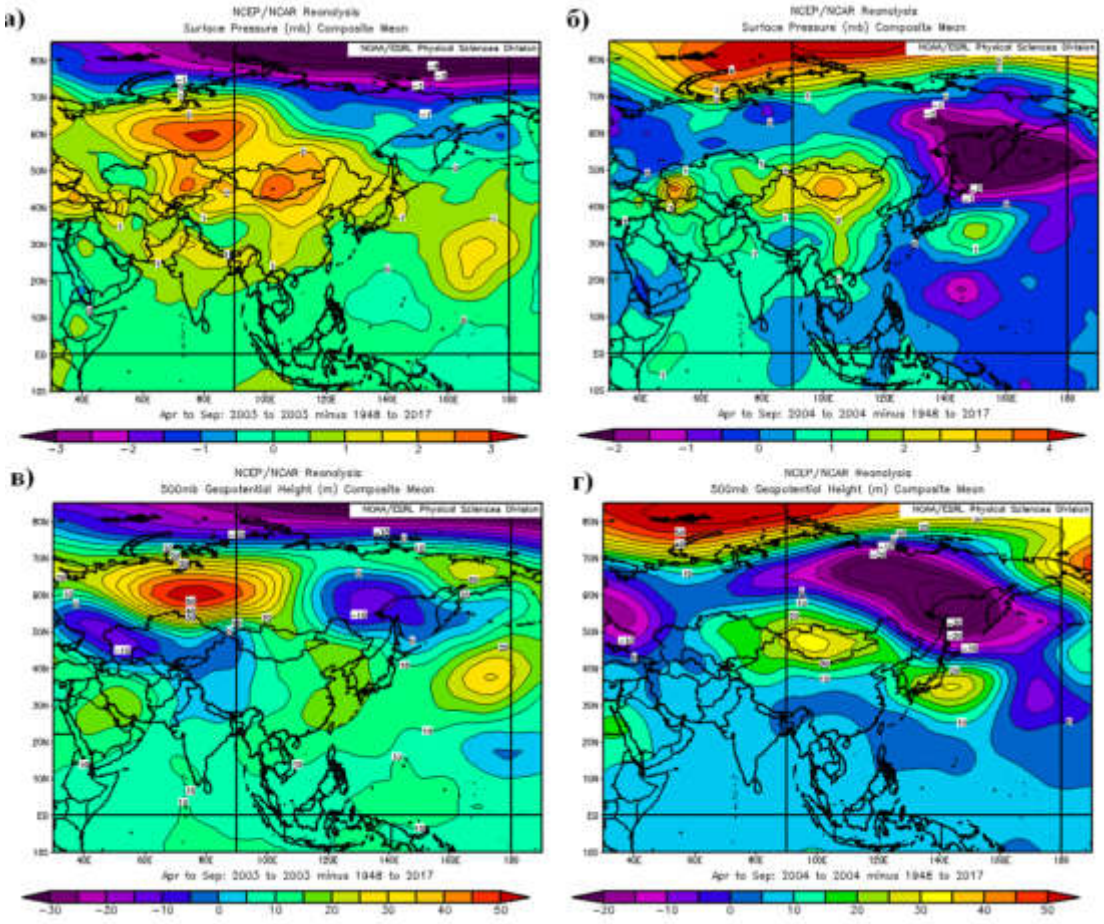


Рис. 4. Аномалии средних значений приземного давления (*а*, *б*) и геопотенциала АТ-500 гПа (*в*, *г*) по отношению к средним значениям за 1948–2017 гг. в период с апреля по сентябрь

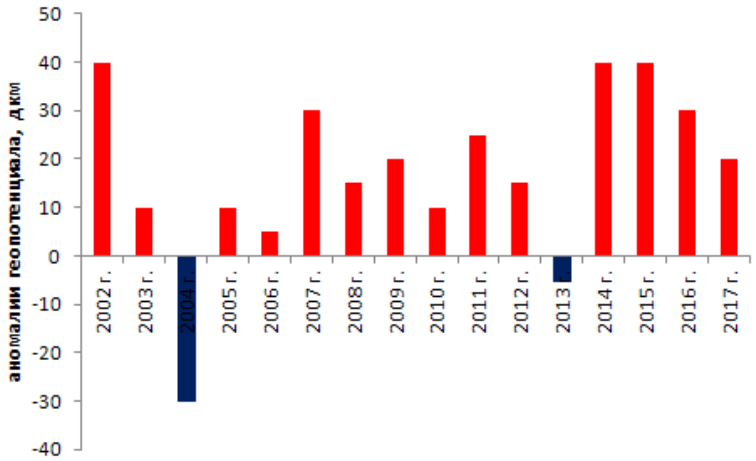


Рис. 5. Средние значения аномалий геопотенциальных высот (м) изобарической поверхности АТ-500 гПа на территории Иркутской области, Республики Бурятия и Забайкальского края по отношению к средним значениям за 1948–2017 гг. в период с апреля по сентябрь

Выводы

Территория Иркутской области, Республики Бурятия и Забайкальский край относятся к регионам, где проживают коренные малочисленные народы, одним из основных видов хозяйственной деятельности которых является охотничий промысел. Развитие последнего напрямую зависит от состояния лесных массивов, которые в последние годы подвержены негативному влиянию лесных пожаров. Проведенное исследование показало, что в период 2002–2017 гг. количество лесных пожаров растет на фоне тенденции повышения температур.

Особенно ярко это выражено в теплый период года, когда на фоне роста температур увеличивается повторяемость антициклонального типа погоды, что наглядно подтверждают тенденции роста приземного давления и геопотенциальных высот в средней тропосфере.

Таким образом, несмотря на то, что непосредственным виновником лесных пожаров часто является человеческий фактор, проведенное исследование показало, насколько значимы погодные аномалии на фоне наблюдаемых климатических изменений в увеличении числа лесных пожаров. Рост числа лесных пожаров негативно сказывается на хозяйственной деятельности коренных малочисленных народов, проживающих на территории Иркутской области, Забайкалья и Республики Бурятия. При прогнозировании погодных факторов возникновения лесных пожаров следует учитывать высокий уровень статистической связи между динамикой лесных пожаров в пределах данных регионов, который во многом обусловлен крупномасштабным характером атмосферной циркуляции.

Список литературы

1. Спутниковая оценка гибели лесов России от пожаров / С. А. Барталев, Ф. В. Стыценко, В. А. Егоров, Е. А. Лупян // Лесоведение. 2015. № 2. С. 83–94.

2. Гришин А. М., Фильков А. И. Прогноз возникновения и распространения лесных пожаров. Кемерово : Практика, 2005. 202 с.

3. Евдокименко М. Д. Лесоэкологические последствия пожаров в светлохвойных лесах Забайкалья // Экология. 2011. № 3. С. 191–196.

4. Евдокименко М. Д. Пирогенные аномалии в лесах Забайкалья и их прогнозирование // География и природ. Ресурсы. 2000. № 4. С. 64–71.

5. Иванов В. А., Иванова Г. А. Пожары от гроз в лесах Сибири. Новосибирск : Наука. Сиб. отд-ние, 2010. 164 с.

6. Приоритетные направления развития лесной науки как основы устойчивого управления лесами / Н. В. Лукина, А. С. Исаев, А. М. Крышень, А. А. Онучин, А. А. Сирин, Ю. Н. Гагарин, С. А. Барталев // Лесоведение. 2015. № 4. С. 243–234.

7. Использование спутникового сервиса ВЕГА в региональных системах дистанционного мониторинга / Е. А. Лупян, С. А. Барталев, В. А. Толпин, В. О. Жарко, Ю. С. Крашенинникова, А. Ю. Оксюкевич // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11 (3). С. 215–232.

8. Поварницын В. А. Почвы и растительность бассейна р. Верхней Ангары // Бурят-Монголия (почвенно-ботанический, лесоводственный и охотоведческий очерки Северо-Байкальского района). М. ; Л. : Изд-во АН СССР, 1937. С. 7–132.

9. Пономарев Е. И., Харук В. И. Горимость лесов Алтае-Саянского региона в условиях наблюдаемых изменений климата // Сиб. экол. журн. 2016. № 1. С. 38–46.

10. Пономарев Е. И., Швецов Е. Г. Характеристики категорий пожаров растительности в Сибири по данным спутниковых и других наблюдений // Исслед. Земли из космоса, 2013. № 5. С. 45–54.

11. Рагулина М. В. Методы этноэкономических исследований коренных малочисленных народов Сибири в преддверии коллективизации // Науковедение : интернет-журн. 2015. Т. 7, № 5. DOI: 10.15862/203EVN515.

12. Цветков П. А. Лесная пирология в России: Достижения и проблемы // Сиб. лес. журн. 2017. № 5. С. 6–17.

13. Швиденко А. З., Щепащенко Д. Г. Климатические изменения и лесные пожары в России // Лесоведение. 2013. № 5. С. 50–61.

14. Шерстюков Б. Г., Шерстюков А. Б. Оценки тенденций усиления лесных пожаров в России до конца XXI в. по данным сценарных экспериментов климатических моделей пятого поколения // Метеорология и гидрология. 2014. № 5. С. 17–30.

15. Flannigan M., Stocks B., Turetsky M. Wotton M. Impacts of climate change on fire activity and fire management in the circumboreal forest // Glob. Change Biol. 2009. Vol. 15 (3). P. 549–560.

16. Extreme fire events are related to previous-year surface moisture conditions in permafrost-underlain larch forests of Siberia / M. Forkel, K. Thonicke, C. Beer, W. Cramer, S. Bartalev, C. Schmullius // Environ. Res. Lett. 2012. Vol. 7 (4). P. 1–9.

17. Fire emissions estimates in Siberia: evaluation of uncertainties in area burned, land cover, and fuel consumption / E. A. Kukavskaya, A. J. Soja, A. P. Petkov, E. I. Ponomarev, G. A. Ivanova, S. G. Conard // Can. J. For. Res. 2013. Vol. 43 (5). P. 493–506.

18. Ponomarev E. I., Kharuk V. I., Ranson K. J. Wildfires dynamics in Siberian larch forests // Forests. 2016. Vol. 7. (6. 125). P. 1–9.

УДК 551.515.4(571.53)

Анализ опасных явлений погоды в горных районах Восточных Саян по космическим снимкам облачности и синоптическим картам

А. М.-Д. Ощоров [1, 2] (oshorov_ayusha@mail.ru),
К. А. Лощенко [1] (loshchenko@bk.ru)

[1] Иркутский государственный университет, Иркутск,
[2] Иркутское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, Иркутск

Аннотация. Выполнено дешифрирование космических снимков облачного покрова для случаев развития конвективной облачности, сопровождаемой ливнями и грозами, в горных районах Восточных Саян в теплый период 2012–2017 гг. Предложена классификация облачных полей с учетом мезоструктуры облаков, исследована динамика развития конвективных ячеек в дневные часы в условиях теплой и неустойчивой воздушной массы.

Ключевые слова: Восточные Саяны, дешифрирование, снимки облачности, ливни, грозы.

Введение

Влияние гор на метеорологический режим нижнего слоя тропосферы давно привлекает внимание метеорологов [1]. Известно, что даже небольшие возвышенности приводят к значимому увеличению сумм атмосферных осадков, а внутри горных районов велика горизонтальная неоднородность метеорологических полей [2].

Особенно сложно в горных районах прогнозировать ливни и грозы. Важным инструментом исследования конвективных облаков служат спутниковые данные, которые позволяют анализировать мезоструктуру облаков, динамику развития конвективных ячеек во времени, проводить анализ характеристик облачности, включая водность и вертикальную протяжённость [3–6].

В этой связи была поставлена цель – исследовать структуру конвективных облаков, с которой было связано образование ливней и гроз в горных районах Восточных Саян по спутниковым данным за период 2012–2017 гг. В качестве исходного материала использованы архивы космических снимков облачности, данные метеорологических наблюдений на станции Тунка и приземные синоптические карты.

Результаты исследования

Оказалось, что ливни с грозами в горных районах Восточных Саян в исследуемый период отмечались в 2 раза чаще, чем выпадение ливневых осадков без гроз. Интересно, что в 16 % рассмотренных случаев грозы были без осадков (рис. 1).

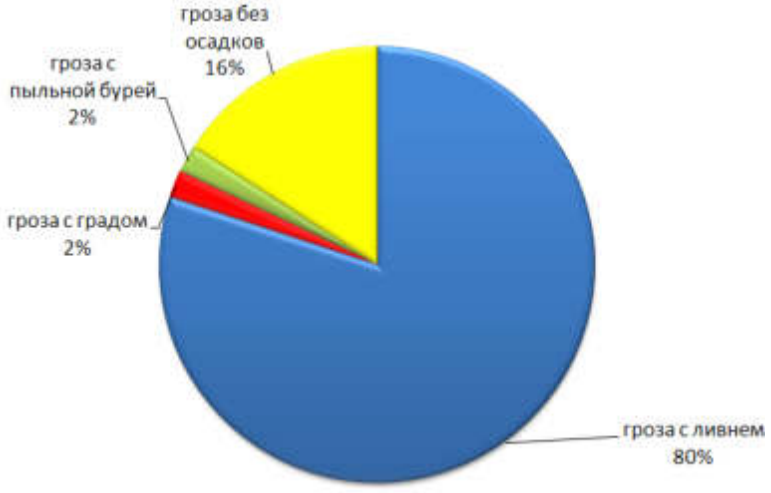


Рис. 1. Повторяемость (%) различных типов гроз в горных районах Восточных Саян в 2012–2017 гг.

Дешифрирование снимков облачности показало, что в большинстве случаев (30 %) грозы отмечались при наличии конвективных комплексов, часто близких к округлой форме размерами 200×300 км (рис. 2). Несколько меньшая повторяемость приходится на грозы фронтального характера, когда конвективная облачность имеет вид сплошной облачности. Внутримассовые грозы имеют преимущественно вид разбросанных конвективных ячеек. Реже всего грозовые облака имели грядовую структуру.

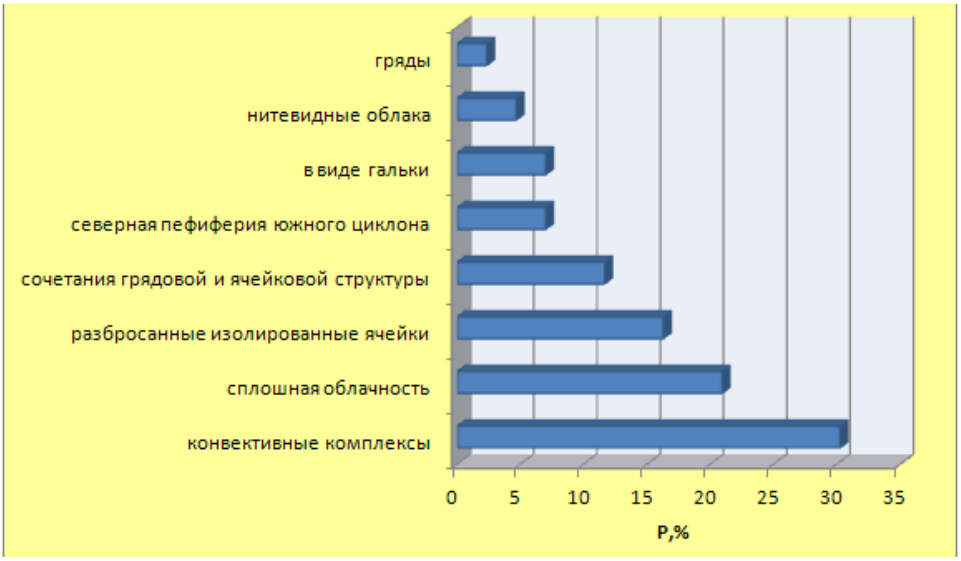


Рис. 2. Повторяемость (%) различных типов мезоструктуры грозовых облаков в горных районах Восточных Саян в 2012–2017 гг.

На рисунке 3 в качестве примера показан грозовой конвективный комплекс, который наблюдался 2 августа 2016 г., в котором интенсивность ливня достигла 23 мм за 12 часов.

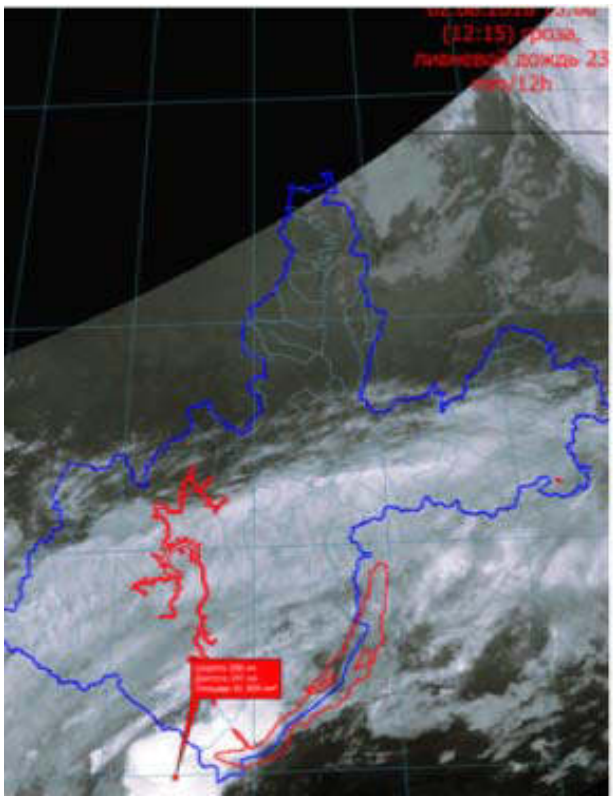


Рис. 3. Снимок облачности 2 августа 2016 г.

Летом 2015 г. при высоком уровне лесных пожаров на территории Иркутской области, в горных районах Восточных Саян увеличилась повторяемость гроз без осадков. Возможно, в условиях сухой атмосферы в конвективных облаках недостаточно влаги для укрупнения облачных капель и кристаллов и выпадения атмосферных осадков.

В отличие от грозовых облаков конвективная облачность с выпадением ливней без гроз характеризуется преобладанием фронтальной сплошной облачности, на долю которой приходится 60 % случаев с ливнями в горных районах Восточных Саян в 2012–2017 гг. (рис. 4).

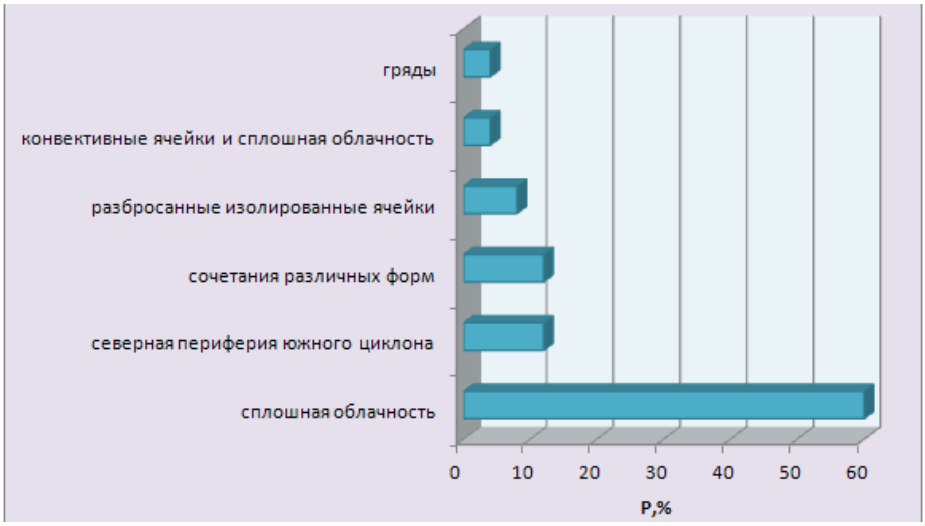


Рис. 4. Повторяемость (%) различных типов мезоструктуры конвективных облаков с выпадением ливневых осадков в горных районах Восточных Саян в 2012–2017 гг.

Оказалось, что после затухания грозового облака может вновь возобновиться конвективный рост облака (рис. 5). Установлено, что примерно за три часа размер отдельных конвективных ячеек увеличивается приблизительно вдвое. Иногда существенных изменений в размерах конвективных ячеек не наблюдалось.

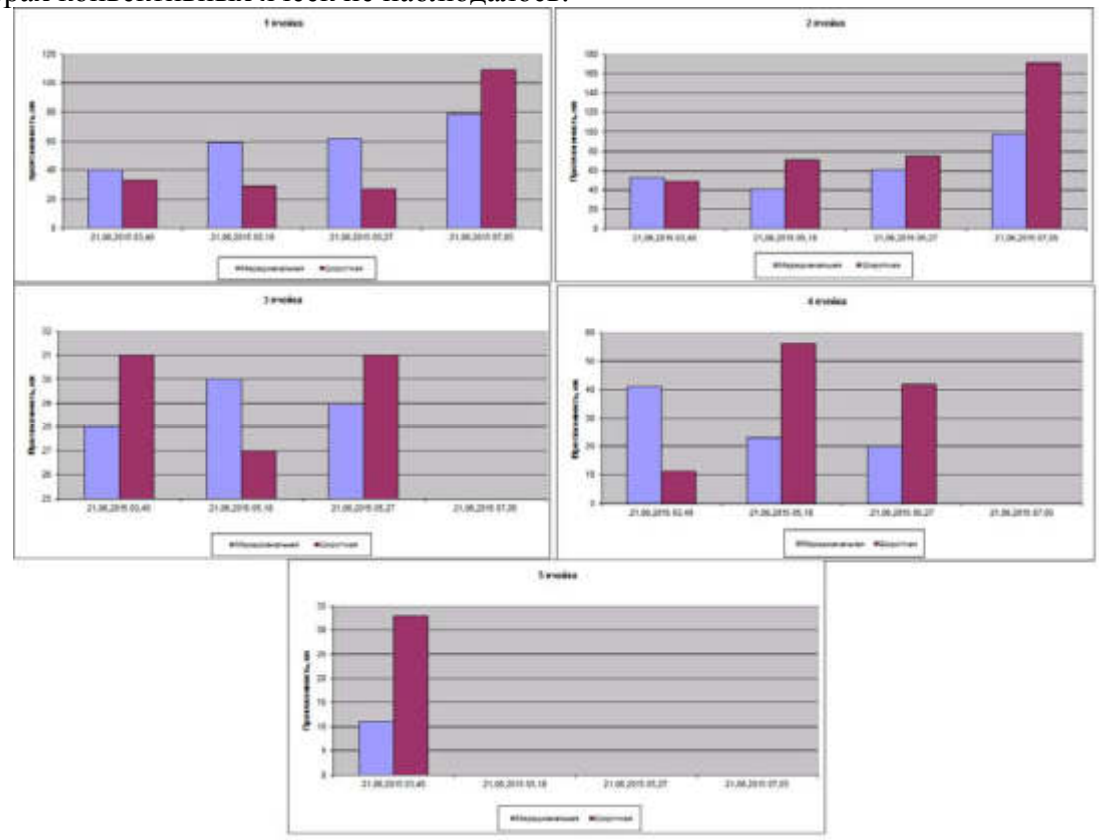


Рис. 5. Пример динамики развития конвективных ячеек в горных районах Восточных Саян 21.06.2015

Современные методы космических наблюдений позволяют количественно оценить ряд параметров облачности, включая высоту верхней границы грозовых облаков и их водность [7]. В большинстве случаев в теплый период 2012–2017 гг. высота грозовых облаков в горных районах Восточных Саян достигала градаций 8800–9600 м. Однако в середине лета грозовые облака нередко пробивали тропопаузу, что наглядно видно по высотам, достигающим 12 км и более на рис. 6.

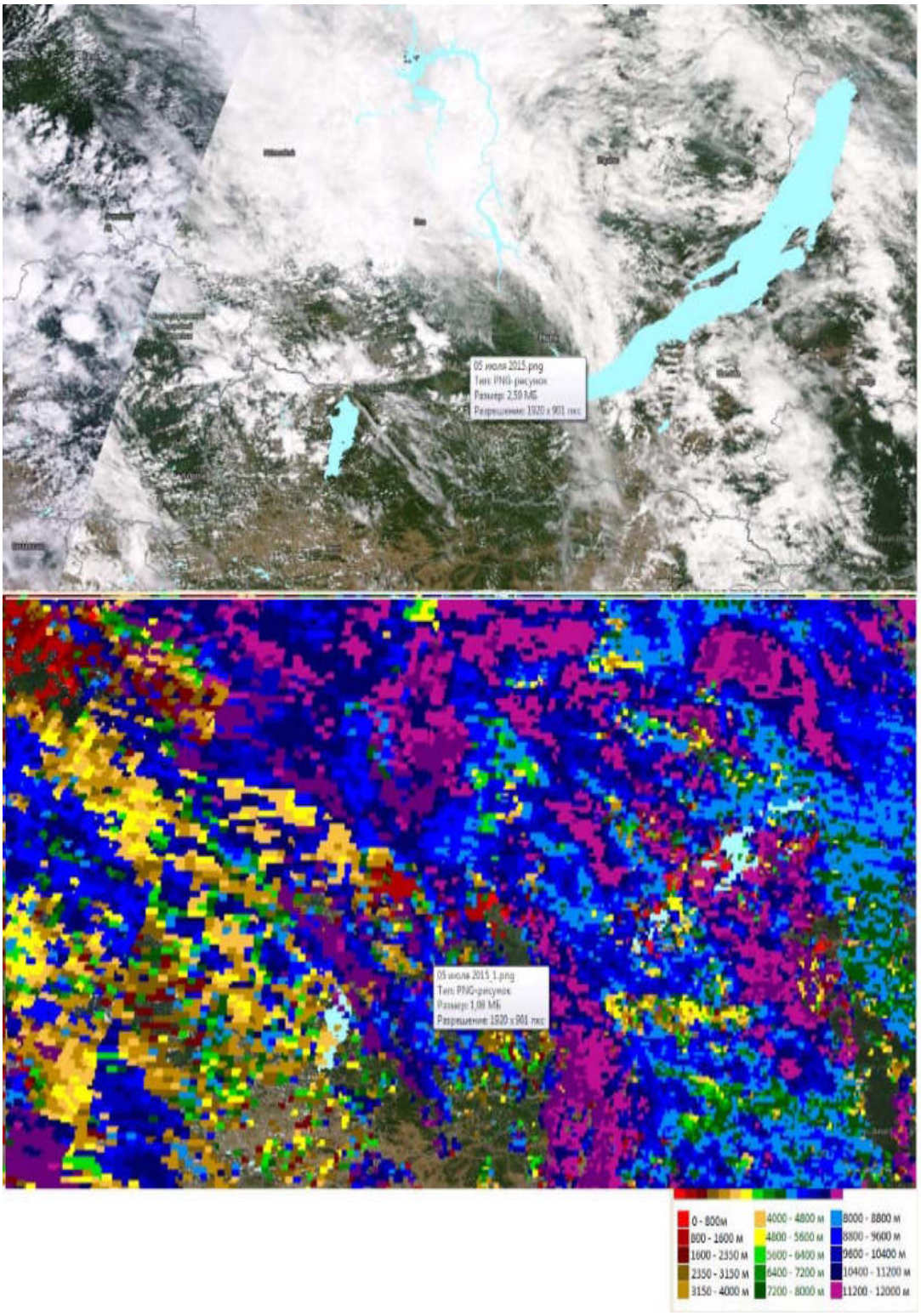


Рис. 6. Карта грозовых облаков и высоты их верхней границы
в горных районах Восточных Саян 5 июля 2015 г.

Выводы

Использование космических снимков облачности позволило впервые для горных районов Восточных Саян начать исследование мезоструктуры грозовых облаков.

Также впервые начато исследование динамики развития конвективных ячеек во времени и в пространстве, что представляет актуальность для прогнозирования внутримассовых гроз в дневные и вечерние часы.

Список литературы

1. Комплексная оценка территории Тункинского национального парка. Улан-Удэ : БНЦ СО РАН, 1995. 84 с.
2. Богаткин О. Г., Геворгян А. М. Расчет параметров конвекции при обильных ливневых дождях в Армении // Проблемы лётной эксплуатации и безопасность полётов. 2009. Вып. 3. С. 74–79.
3. Алексеева А. А. Распознавание конвективных стихийных явлений погоды на основе цифровой информации с ИСЗ с целью их сверхкраткосрочного // Тр. Гидрометцентра России. 2000. Вып. 335. С. 59–73.
4. Бухаров М. В. Диагноз вероятности гроз по спутниковой информации // Метеорология и гидрология. 2013. № 8. С. 5–16.
5. Волкова Е. В., Успенский А. Б. Детектирование облачности и выделение зон осадков регионального масштаба по данным полярно-орбитальных метеорологических ИСЗ // Метеорология и гидрология. 2002. Т. 4. С. 28–38.
6. Толмачева Н. И. Исследование динамики конвективной облачности по радиолокационной информации // Геогр. вестн. 2010. № 4 (15). С. 22–34.
7. Василевский К. Д., Садоков В. П. Одномерная модель формирования кучевого облака // Тр. Гидрометцентра России. 2010. Вып. 344. С. 99–113.

УДК 551.509.326

Анализ и рекомендации к прогнозу грозовой деятельности в районе аэродрома Сургут

С. Л. Скидоненко (sveta9ld@mail.ru)
О. А. Точенова (olyatochenova@gmail.com)
Филиал Севера Сибири ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета» АМСГ Сургут, Сургут

Аннотация. На основании материалов наблюдений за пять лет было проведено исследование образования гроз на аэродроме Сургут с учетом местных особенностей. В результате исследования выявлены необходимые и достаточные признаки высокой вероятности образования данного явления на аэродроме Сургут и даны рекомендации по прогнозированию. Результаты данного исследования могут быть интересны всем специалистам, занятым в области авиационного метеорологического обеспечения.

Ключевые слова: гроза, шквал, анализ грозовой деятельности, опасные явления, рекомендации к прогнозу гроз, аэродром Сургут.

Гроза – опасное атмосферное явление, во время которого происходят электрические разряды между облаками или между облаком и землей. С грозой связан целый комплекс опасных для авиации метеорологических явлений, таких как: мощные кучево-дождевые облака, в которых воздушное судно может подвергнуться влиянию электризации, обледенения, турбулентности, сильных восходящих и нисходящих токов. Шквалистое усиление ветра, интенсивные ливневые осадки и град, также сопровождающие грозу, значительно усложняют или вовсе делают полет невозможным. Грозовая деятельность представляет большую опасность для авиации, как на эшелонах полетов воздушных судов, так и в зоне взлета и посадки.

Очевидно, что удачное прогнозирование образования грозовых облаков, степени их интенсивности и продолжительности существования, а также скорости и направления их смещения помогает экипажу принять верное решение в отношении полета. И вся работа авиационного синоптика в первую очередь направлена на обеспечение безопасности полетов, которая достигается за счет своевременного прогнозирования и предупреждения об опасном явлении.

Исходная информация

В качестве исходной информации были использованы данные наблюдений журналов АВ-6 за период 2013–2017 гг., а также карты барической топографии (АТ-850 гПа, АТ-500 гПа) и приземного анализа за период 2015–2017 гг.

1 Анализ грозовой деятельности на аэродроме Сургут

1.1. Суточно-годовой ход повторяемости гроз (период наблюдений 2013–2017 гг.)

За исследуемый период грозы на аэродроме Сургут наблюдались с мая по сентябрь. 20 марта 2016 г. был отмечен один случай аномальной грозы.

На рисунке 1 представлен суточно-годовой ход повторяемости гроз, из которого видно, что наибольшая повторяемость гроз отмечалась в июне и июле, наименьшая – в сентябре. В дневное время чаще всего грозы наблюдались с 08 до 14 ВСВ, ночью – с 00 до 02 ВСВ.

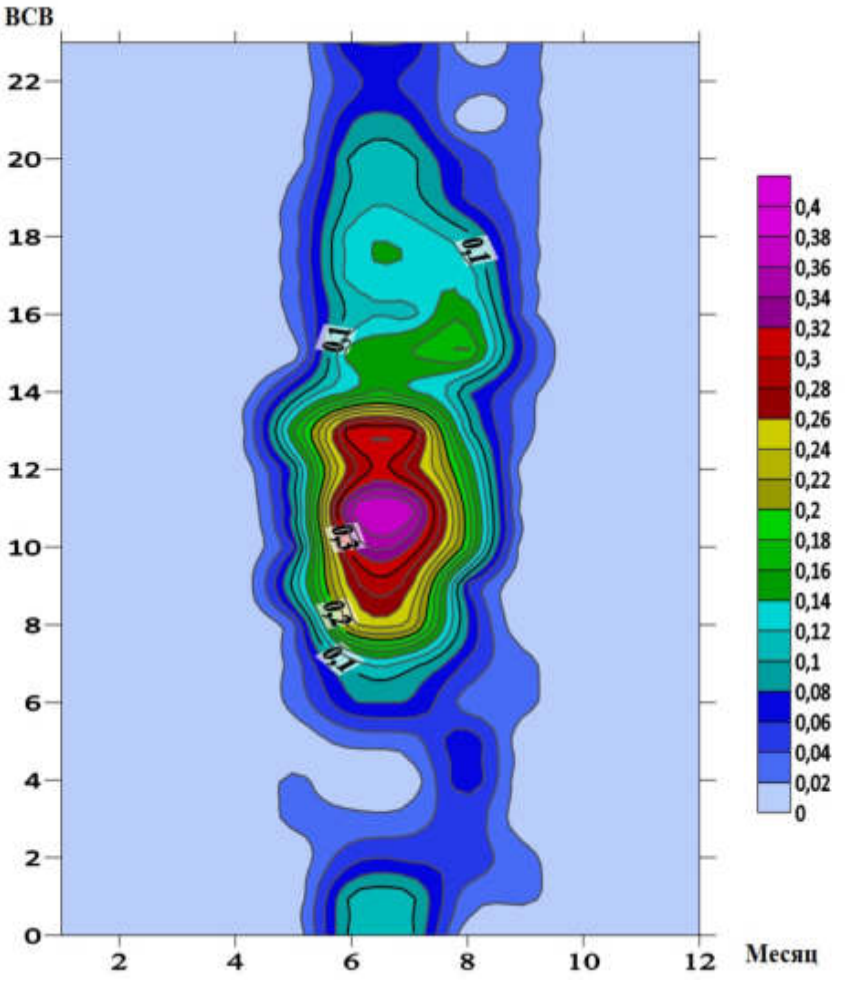


Рис. 1. Суточно-годовой ход повторяемости, % гроз на аэродроме Сургут

1.2. Повторяемость непрерывной продолжительности гроз (период наблюдений 2013–2017 гг.)

Таблица 1

Повторяемость, % непрерывной продолжительности гроз на аэродроме Сургут

Месяц	Продолжительность, ч				Среднее число периодов	Средняя продолжительность, ч
	<1	1–3	3–6	>6		
Май	74,1	25,9	0,0	0,0	3,6	0,9
Июнь	61,5	38,5	0,0	0,0	10,4	1,1
Июль	47,3	47,3	5,5	0,0	11,0	1,4
Август	48,6	45,9	5,4	0,0	7,4	1,4
Сентябрь	66,7	16,7	16,7	0,0	1,2	1,4
Май – сентябрь	56,5	40,1	3,4	0,0	6,7	1,2

На аэродроме Сургут грозы наблюдались чаще всего непродолжительные – менее 1 часа, их повторяемость составила – 56,5 % (табл. 1). Немного меньше повторяемость гроз с продолжительностью от 1 часа до 3 часов – 40,1 %. Грозы с продолжительностью от 3 до 6 часов отмечались только с июля по сентябрь месяц – 3,4 %. Грозы с продолжительностью более 6 часов не наблюдались. Средняя непрерывная продолжительность грозы по месяцам не превышала 1,4 часа.

1.3. Количественные характеристики наблюдавшихся гроз

Таблица 2

Количественные характеристики гроз за период с 2013 по 2017 г. на аэродроме Сургут

Характеристика грозовой деятельности	2013	2014	2015	2016	2017	Итого
Количество дней с грозой (случаев гроз)	16 (23)	15 (20)	26 (36)	31 (45)	19 (40)	106 (164)
Дата первой грозы в году	22.05	04.05	01.05	20.03	27.05	–
Дата последней грозы в году	26.08	19.08	01.09	20.09	01.09	–
Наибольшая непрерывная продолжительность (число, месяц)	3 ч 25 м (04.08)	4 ч 24 м (09.08)	2 ч 58 м (17.07)	4 ч 11 м (14.07)	2 ч 52 м (04.08)	–
Случаи с ливнями	3	1	2	2	4	12
Случаи со шквалом	1	2	1	0	0	4
Случаи с градом	0	0	0	1	2	3

В таблице 2 представлены количественные характеристики гроз с 2013 по 2017 г. На аэродроме Сургут наблюдалось 106 дней с грозами (164 случая), максимальное их количество пришлось на 2016 г. – 31 день (45 случаев). Самый ранний (20 марта) и самый поздний (20 сентября) случай с грозой был зафиксирован также в 2016 г. Гроза с наибольшей непрерывной продолжительностью (4 часа 24 минуты) отмечалась 9 августа 2014 г.

Ливни (видимость менее 1000 м), шквал и град, относящиеся к ОЯ (опасным явлениям), на аэродроме наблюдались не так часто и были связаны с прохождением через район аэродрома Сургут атмосферных фронтов. Наибольшее число гроз с ливнями (4 случая) и градом (2 случая) пришлось на 2017 г., а шквалистым усилением ветра на 2014 г. (2 случая).

2. Типизация синоптических условий образования гроз на аэродроме Сургут

Таблица 3

Повторяемость, % синоптических условий образования гроз на аэродроме Сургут за период с 2015 по 2017 г.

Год	Фронтальные					Внутримассовые		
	Фронт окклюзии		Холодный фронт		Теплый фронт	Теплый сектор	Седловина	РБП[1]
	по типу теплого	по типу холодного	основной	вторичный				
2015	17	8	39	0	36	0	0	0
2016	40	0	29	11	13	4	0	2
2017	48	0	28	0	13	0	3	10
Всего	36	2	31	4	20	2	1	4
	93					7		

Повторяемость синоптических условий образования гроз на аэродроме Сургут с 2015 по 2017 г. приведена в табл. 3, из которой видно, что большая часть гроз имела фронтальный характер образования – 93 % случаев. Максимальное количество гроз отмечалось на фронтах окклюзии: по типу теплого – 36 % случаев, по типу холодного – 2 % случаев. В 34 % случаев фронтальные грозы наблюдались и при прохождении основных и вторичных холодных фронтов. На теплых фронтах грозы наблюдались в ночное время (20 % случаев).

Внутримассовые грозы наблюдались в послеполуденные и вечерние часы в местной неустойчивой воздушной массе (7 % случаев). Максимальное количество из них отмечалось в размытом барическом поле – 4 % случаев, по 1–2 % случаев пришлось на седловину и теплый сектор.

Таблица 4

Повторяемость, % типов высотного барического поля при грозах на аэродроме Сургут за период с 2015 по 2017 г.

Год	ВФЗ[1]	РБП[2] (седловина)	Поле циклоническое				Поле антициклоническое		
			Тыловая часть ложбины	Ось ложбины	Передняя часть ложбины	Высотный циклон	Тыловая часть гребня	Ось гребня	Передняя часть гребня
2015	59	0	4	0	19	7	7	0	4
2016	18	3	11	16	18	5	18	5	5
2017	39	13	13	0	17	4	13	0	0
Всего	36	5	9	7	18	6	14	2	3
	36	5	40				19		

Анализ высотного барического поля (табл. 4) показал, что при образовании гроз в большинстве случаев (40 %) на высоте ведущего потока (АТ-500 гПа) аэродром Сургут находился под влиянием циклонического поля с благоприятными условиями для развития восходящих движений. Наибольший процент гроз при циклоническом типе высотного поля пришелся на переднюю часть ложбины – 18 % случаев. В 36 % случаев на высоте ведущего потока аэродрому Сургут соответствовала высотная фронтальная зона, ориентированная преимущественно с юго-запада на северо-восток. При антициклоническом типе высотного поля грозы наблюдались, в основном, в тыловой части гребня – 14 % случаев.

3. Повторяемость гроз на аэродроме Сургут при разности температур между изобарическими поверхностями 850 и 500 гПА (период наблюдений 2015–2017 гг.)

Разность температур между стандартными изобарическими поверхностями 500 и 850 гПа (ΔТ500/850) характеризует запас энергии неустойчивости в этом слое, и естественно, что с возрастанием температуры будет возрастать вероятность образования гроз [1]. Таблица 5 свидетельствует о наличии взаимосвязи явления «гроза» и значений ΔТ 500/850.

Таблица 5

Повторяемость, % гроз при различных значениях ΔТ 500/850, °С

Месяц	ΔТ 500/850, °С	Повторяемость случаев с грозой днем, %	Повторяемость случаев с грозой ночью, %	Повторяемость случаев с грозой за сутки, %
Май	≤22	0	0	0
	23–26	17	50	25
	≥27	83	50	75
Июнь	≤22	0	0	0
	23–26	35	57	41
	≥27	65	43	59
Июль	≤22	6	0	4
	23–26	38	71	48
	≥27	56	29	48
Август	≤22	0	0	0
	23–26	33	100	57
	≥27	67	0	43
Сентябрь	≤22	33	0	25
	23–26	33	100	50
	≥27	33	0	25
Май–сентябрь	≤22	4	0	3
	23–26	35	75	47
	≥27	60	25	50

За период с мая по сентябрь, в течение суток, грозы в большинстве случаев наблюдались, когда разность температур между изобарическими поверхностями 500 и 850 гПа превышала 22 °С. Повторяемость гроз заметно возрастала с ростом разности температур ΔТ

500/850, так при разности в 22 °С она была равна 4 %, а при увеличении величины больше 27 °С она уже была равна 75 %. Особенно заметно выражена данная тенденция в дневные часы – при значениях менее 22 °С повторяемость гроз равна 6 %, а при значениях более 27 °С – 83 %. В ночные часы грозы при разности температур 22 °С и менее не наблюдались за весь период исследования.

4. Повторяемость гроз на аэродроме Сургут при различных значениях температуры воздуха у земли (период наблюдений 2013–2017 гг.)

Термический режим нижней тропосферы, так же как и развитие конвективных процессов, определяются интенсивностью прогревания подстилающей поверхности. В связи с этим в работе сделана попытка выявить зависимость между процессами формирования грозоопасных форм облаков при различных значениях максимальной температуры воздуха в дневные часы и значениях температуры, наблюдавшихся в 7 часов утра [1].

Таблица 6

Повторяемость, % гроз при различных значениях температуры воздуха у земли

Месяц	Максимальная дневная температура, °С	Повторяемость случаев с грозой, %	Температура в 02 ВСВ, °С	Повторяемость случаев с грозой, %
Май	≤16	18	≤7	6
	17–19	29	8–10	29
	≥20	53	≥11	65
Июнь	≤19	2	≤12	2
	20–24	43	13–17	19
	≥25	55	≥18	79
Июль	≤19	8	≤12	5
	20–24	28	13–17	8
	≥25	64	≥18	87
Август	≤19	11	≤12	14
	20–24	54	13–17	29
	≥25	36	≥18	57
Сентябрь	≤15	50	≤12	25
	16–17	50	13–14	75
Май–сентябрь	≤19	15	≤12	12
	20–24	34	13–17	23
	≥25	51	≥18	65

За период с мая по сентябрь повторяемость гроз на аэродроме Сургут заметно возрастала с повышением максимальной температуры воздуха (табл. 6). Так, при значениях температуры 19 °С и ниже наблюдалось всего 15 % случаев с грозами, а при значениях 25 °С и выше – 51 % случаев. Более тесная зависимость прослеживалась между значениями утренней температуры в 7 часов местного времени и наличием или отсутствием грозы на аэродроме. При 12 °С и ниже на аэродроме наблюдалось всего 12 % случаев с грозами, а при 18 °С и выше – 65 % случаев.

5. Повторяемость гроз на аэродроме Сургут при различных значениях абсолютной влажности (период наблюдений 2013–2017 гг.)

С помощью статистического метода было установлено наличие взаимосвязи между абсолютной влажностью и количеством гроз, которая характеризуется коэффициентом корреляции. Полученное значение, равное 0,5, означает, что между исследуемыми величинами присутствует взаимосвязь средней силы.

Таблица 7

Повторяемость случаев с грозой, % при различных значениях абсолютной влажности

Месяц	Абсолютная влажность, г/м³	Повторяемость случаев с грозой, % (за 30 мин до начала грозы)	Повторяемость случаев с грозой, % (за 1 ч до начала грозы)
Май	<6	5	5
	6,0–9,9	53	53
	10,0–13,9	32	32
	≥14	11	11
Июнь	<14,0	13	13
	14–15,9	18	19
	16,0–17,9	20	34
	≥18	50	34
Июль	<14,0	5	4
	14–15,9	18	17
	16,0–17,9	24	23
	≥18	53	56
Август	<14,0	6	6
	14–15,9	12	16
	16,0–17,9	12	9
	≥18	71	69
Сентябрь	<14,0	17	17
	14–15,9	33	33
	16,0–17,9	50	50
Май – сентябрь	<14,0	14	14
	14–15,9	15	16
	16,0–17,9	21	26
	≥18	50	45

Анализ изменений абсолютной влажности за 1 час и за 30 минут перед грозой (табл. 7) показал, что большая часть гроз наблюдалась при значениях абсолютной влажности: в мае – 6 г/м³, в период с июня по август – 18 г/м³, а в сентябре – 16 г/м³. Стоит отметить, что единичные случаи гроз были зафиксированы в мае при значениях абсолютной влажности менее 6 г/м³, а в период с июня по сентябрь при значениях – менее 14 г/м³.

Из таблицы 7 видно, что с ростом значений абсолютной влажности увеличивалась и повторяемость гроз.

По итогу работы можно сделать следующие выводы:

1. За исследуемый период грозы наблюдались с мая по сентябрь, наибольшая повторяемость отмечалась в июне и июле месяце, наименьшая – в сентябре. На аэродроме был зафиксирован один случай аномальной грозы – 20 марта 2016 г.

2. Максимальное количество гроз отмечалось в дневные часы с 8 до 14 ВСВ, а в ночные с 00 до 02 ВСВ.

3. На аэродроме отмечались чаще всего непродолжительные грозы – менее 1 часа. Средняя продолжительность непрерывной грозы по месяцам за сутки не превышала 1,4 часа. Грозы с продолжительностью более 6 часов за исследуемый период не отмечались.

4. Максимальное количество гроз было отмечено в 2016 г. (31 день – 45 случаев). В этом же году был зафиксирован самый ранний (20 марта) и самый поздний (20 сентября) случай с грозой.

5. Большая часть гроз наблюдалась на фронтах окклюзии по типу теплого, а также при прохождении основных и вторичных холодных фронтов.

6. Повторяемость гроз заметно возрастала с ростом разности температур ΔT 500/850.

7. С ростом значений максимальной дневной температуры и утренней температуры в 7 часов местного времени повторяемость гроз также возрастала.

8. С увеличением значений абсолютной влажности 6 г/м³ и более повторяемость гроз возрастала. Было выявлено, что в мае могут наблюдаться единичные случаи гроз при значениях влажности < 6 г/м³.

Рекомендации

При прогнозировании гроз в оперативной работе стоит обращать внимание на некоторые особенности в распределении комплекса метеорологических величин:

1. Вероятность развития грозовой деятельности велика в случаях, когда комплекс метеорологических величин превышает следующие значения в мае – сентябре: разность температур в слое 1,5–5,5 км – 27 °С; температура воздуха в 7 часов местного времени у поверхности земли – 18 °С, максимальная дневная температура воздуха – 25 °С; абсолютная влажность за 30 минут и за 1 час до начала грозы – 18 г/м³.

2. Вероятность развития грозовой деятельности невелика в случаях, когда комплекс метеорологических величин не превышает следующих значений в мае – сентябре: разность температур в слое 1,5–5,5 км – 22 °С; температура воздуха в 7 часов местного времени у поверхности земли – 12 °С, а максимальная дневная температура воздуха – 19 °С; абсолютная влажность за 30 минут и за 1 час до начала грозы – 14 г/м³.

Анализ высотного барического поля показал, что периоду формирования гроз сопутствует циклоническое поле или ВФЗ, ориентированная преимущественно с юго-запада на северо-восток.

Список литературы

1. Блохина В. И., Давыдюк Г. Ф., Плотникова И. Е. Рекомендации к прогнозу грозовой деятельности в районе Комсомольска-на-Амуре // Альманах современной науки и образования. Тамбов : Грамота, 2013. № 5 (72). С. 27–29.

УДК 551.515.14(571.53)

Исследование опасных явлений погоды на восточной периферии антициклона в районе аэродрома Иркутск

Г. С. Сметанин (ice-meteo@mail.ru)

АМЦ Иркутск Иркутского филиала ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета»

Аннотация. Проведён анализ метеорологических параметров и синоптических условий выпадения сильного ливневого снега с ухудшением видимости ниже минимумов на аэродроме Иркутск по данным журнала АВ-6 и синоптическим картам в осенний и зимний период 2012–2017 гг. В отличие от ранее проводимых исследований впервые рассматривались случаи выпадения сильного ливневого снега на восточной периферии антициклона после прохождения основных и вторичных холодных атмосферных фронтов. Выделены прогностические признаки данного опасного явления погоды, что может улучшить качество прогноза сильных осадков на аэродроме Иркутск.

Ключевые слова: авиация, сильный ливневой снег, антициклон, аэродром Иркутск.

Введение

Современные тенденции изменения климата сопровождаются ростом числа опасных явлений погоды. По данным Росгидромета [3] первую позицию в пятерке главных глобальных рисков на территории России, ранжированных по вероятности, заняли экстремальные гидрометеорологические явления: паводки, наводнения, сильный ветер, ливневые дожди, град, засухи, оставляя таким стихийным бедствиям, как извержения вулканов, цунами и землетрясения, лишь 10 %. Значительные изменения отмечаются в климатическом режиме атмосферных осадков. В целом по территории России в период 1976–2016 гг. годовые суммы атмосферных осадков увеличиваются приблизительно на 2,1 % за 10 лет. Причем особенно быстро увеличиваются суммы выпавших осадков весной ~5,9 % за10 лет (в Восточной Сиби-

ри до 15–20 % за 10 лет). По выходным данным численных моделей в начале XXI в. рост количества осадков мал, а к середине века он усиливается, особенно в восточных и северных регионах России. Различия в количестве осадков, выпадающих во влажных и засушливых регионах, а также в течение влажного и сухого сезонов, будут увеличиваться, хотя в ряде регионов могут быть исключения [4].

Среди опасных явлений погоды в холодный период года интерес для исследований представляют снегопады. Информация о частоте и интенсивности снегопадов необходима не только для оценки возможности неблагоприятных последствий для разных отраслей народного хозяйства: транспорта, МЧС и др., но и для изучения строения и свойств снежной толщи. При выпадении интенсивных снегопадов значительно ухудшается горизонтальная дальность видимости на аэродромах, что следует учитывать при пилотировании воздушных судов. На картах пространственного распределения среднего числа (частоты) снегопадов определенной интенсивности за усредненный зимний сезон прослеживается тенденция изменения от областей с ярко выраженным преобладанием снегопадов малой интенсивности (0,1–2,5 мм) в Центральной и Северо-Восточной Якутии к областям с наличием снегопадов значительной интенсивности (5–10 мм) на юго-западе ЕТР и на побережьях Берингова, Охотского и Японского морей [1].

Объект и методика исследования

Целью данной работы явилось исследование случаев с выпадением сильного ливневого снега (видимость менее 1000 м) на аэродроме Иркутск в осенне-зимний период 2012–2017 г. Аэродром Иркутск расположен на правом берегу р. Ангары, на юго-восточной окраине г. Иркутска в 8 км от центра (рис. 1). Абсолютная высота аэродрома 514,43 м. Местность представляет собой расчлененный р. Ангарой (долина направлена с юго-востока на северо-запад) и впадающими в нее притоками (р. Иркут и р. Ушаковка) рельеф с узкими водоразделами, пологими склонами и наличием хорошо разработанных речных долин.



Рис. 1. Фотография Иркутского аэродрома со спутника

Спецификой исследования являлась выборка тех случаев выпадения сильного ливневого снега на аэродроме Иркутск, которые отмечались на восточной периферии антициклона. Выбор восточной периферии антициклона обусловлен тем, что территория Иркутской области в холодный период года часто оказывается под влиянием восточной и северо-восточной периферии Азиатского антициклона, центр которого чаще всего находится на территории Монголии или в районах Восточных Саян [2]. Кроме того, на восточной периферии антициклона при адвекции холодной неустойчиво стратифицированной воздушной массы

возникают благоприятные условия для развития восходящих движений, образования облачности и выпадения атмосферных осадков. Также при выходе южных и ныряющих циклонов на Забайкалье на восточной периферии антициклона часто увеличиваются термические и барические градиенты, которые способствуют фронтогенезу (рис. 2). Особый интерес и сложность в прогнозировании представляют случаи выпадения сильного ливневого снега на восточной периферии антициклона в однородной воздушной массе после прохождения основных и вторичных холодных атмосферных фронтов.

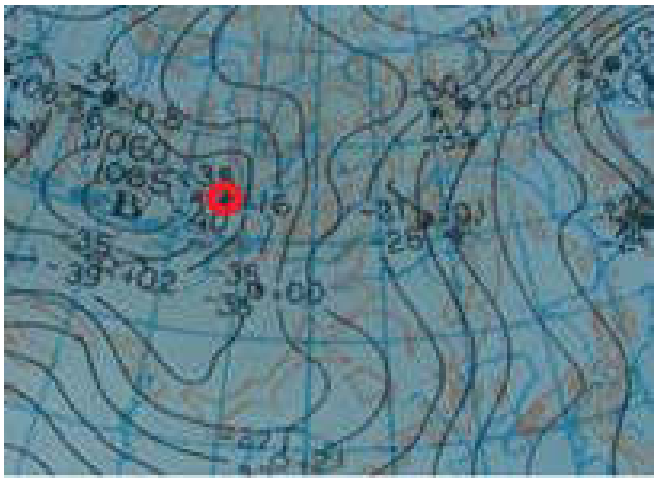


Рис. 2. Пример влияния восточной периферии антициклона на районы аэродрома Иркутск (показан красной точкой)

Для исследования синоптических условий выпадения сильного ливневого снега на аэродроме Иркутск был использован электронный архив синоптических карт (приземных и высотных) АМЦ Иркутск, полученный по выходным данным ГИС «Метео» и ГИС «Океан». Были проанализированы: характер барического поля и характеристики ветра у поверхности Земли и на высотах (АТ-700 гПа, АТ-500 гПа); наличие струйных течений на АТ-300 гПа; структура термобарического поля на АТ-850 гПа; рассчитывались численные значения адвекции температуры на АТ-850 гПа и АТ-500 гПа, значения горизонтального градиента температуры на АТ-850 гПа и градиента давления у поверхности Земли, значения дефицитов точки росы на АТ-850 гПа и АТ-700 гПа; определялся тип воздушной массы в слое ОТ 500/1000.

Обсуждение результатов

В осенне-зимний период 2012–2017 гг. в районе аэродрома Иркутск наблюдалось 87 случаев выпадения сильного ливневого снега, из которых 10 случаев наблюдалось на восточной периферии антициклона, после прохождения вторичных холодных фронтов фронтальных разделов, что в качестве примера наглядно отражено на рис. 3. Несмотря на то что в районе аэродрома отсутствовали фронтальные разделы, в большинстве случаев (50 %) при выпадении сильного ливневого снега наблюдались значительные барические градиенты (11–20 гПа/1000 км), в 20 % случаев они превышали 20 гПа/1000 км и в 30 % случаев изменялись от 0 до 10 гПа/1000 км.

Анализ характеристик воздушных масс в районе аэродрома по данным карты АТ-850 гПа показал, что в 60 % случаев на районы аэродрома оказывала влияние ложбина холода, в 40 % случаев наблюдался гребень тепла. Преимущественно воздушная масса была влажной со значениями дефицитов точки росы (≤ 4°С) как на АТ-850 гПа (70 %), так и на АТ-700 гПа (90 %). Преобладающее влияние адвекции холода в нижней и средней тропосфере при выпадении сильного ливневого снега видно на рис. 4. В 50 % случаев на уровнях изобарических поверхностей АТ-850 гПа и АТ-700 гПа адвекция холода не превышала 3°С/12 часов. В 90 % случаев выпадение сильного ливневого снега в районе аэродрома Иркутск наблюдалось в арктической воздушной массе и в 10 % случаев в северной умеренной воздушной массе.

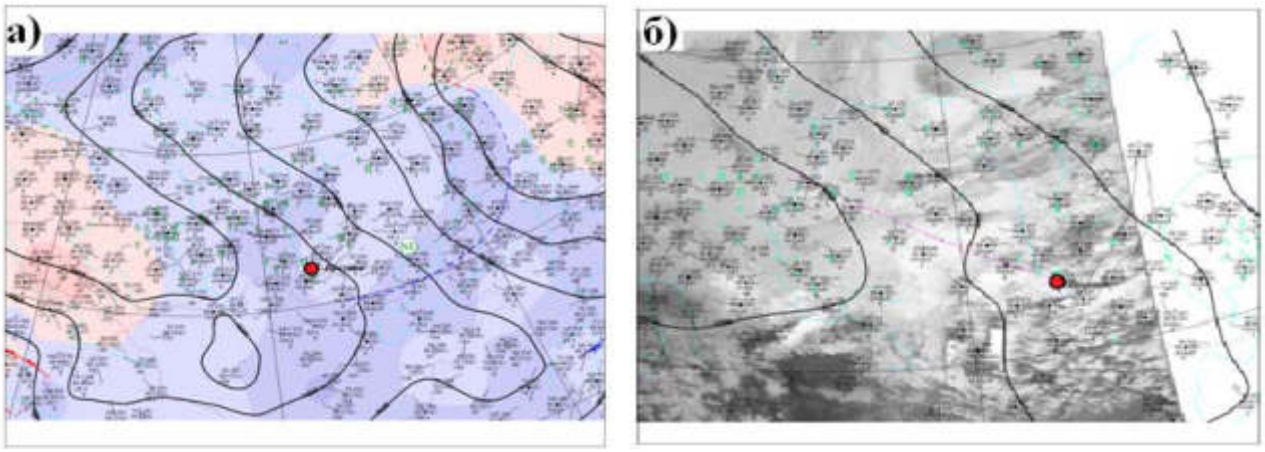


Рис. 3. Приземная синоптическая карта (*а*) и снимок облачности (*б*) при выпадении в районе аэродрома Иркутск сильного ливневого снега в 09.00 ВСВ 26.09.2017 г.

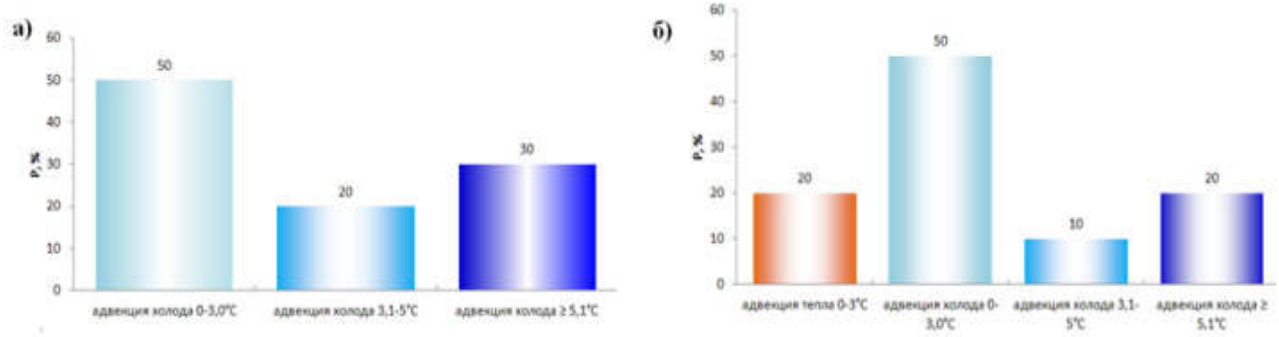


Рис. 4. Повторяемость (%) различных градаций адвекции температуры (°С/12 час.) на АТ-850 гПа (*а*) и АТ-700 гПа (*б*) в районе аэродрома Иркутск при выпадении сильного ливневого снега на восточной периферии антициклона в 2012–2017 гг.

Преобладающее влияние холодной влажной арктической воздушной массы при выпадении сильного ливневого снега в районе аэродрома Иркутск наглядно видно на рис. 5.

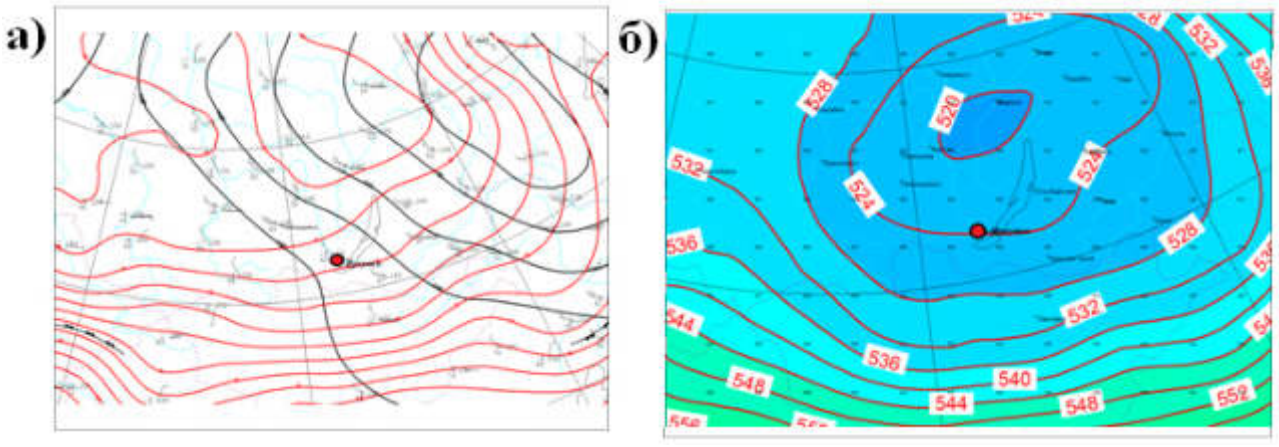


Рис. 5. Карты АТ-850 гПа (*а*) и ОТ500/1000 (*б*) при выпадении в районе аэродрома Иркутск сильного ливневого снега в 09.00 ВСВ 26.09.2017 г.

По типам барических полей в средней тропосфере наибольшую повторяемость при выпадении сильного ливневого снега в районе аэродрома Иркутск в 2012–2017 гг. имеет тыловая часть высотной ложбины на АТ-700 гПа (рис. 6, *а*) и АТ-500 гПа (рис. 6, *б*), где преимущественно с потоками северо-западного направления на АТ-700 гПа (рис. 6, *в*) и АТ-500 гПа (рис. 6, *г*) осуществляются нисходящие движения холодной воздушной массы, вытесняющие более теплый воздух нижней тропосферы.

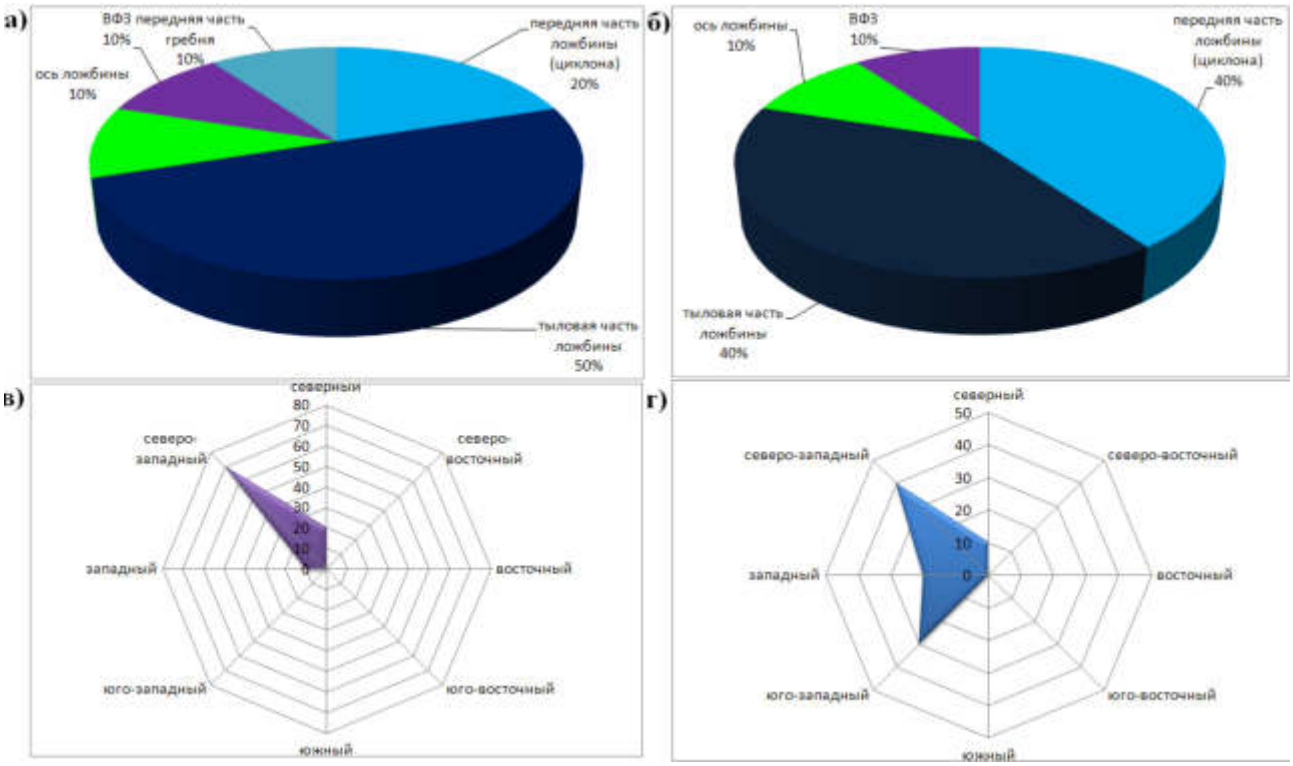


Рис. 6. Повторяемость (%) различных типов высотных барических полей АТ-700 гПа (*а*), АТ-500 гПа (*б*) и ветровых потоков на АТ-700 гПа (*в*), АТ-500 гПа (*г*) в районе аэродрома Иркутск при выпадении сильного ливневого снега на восточной периферии антициклона в 2012–2017 гг.

Усилению вертикальных движений при выпадении сильного ливневого снега на аэродроме Иркутск в 2012–2017 гг. способствовала термическая составляющая ветра в слое активного облакообразования. На уровне АТ-850 гПа в 50 % случаев отмечались динамически значимые для развития тропосферного фронтогенеза горизонтальные контрасты температур 8,1–16°С/1000 км, в 40 % случаев градиент температуры превышал 16°С/1000 км и только в 10 % случаев не превышал 8°С/1000 км. Кроме того, в 40 % случаев на уровне АТ-850 гПа наблюдалась мезоструя, в 30 % случаев скорость ветра составила 30–60 км/ч и в лишь в 30 % случаев скорость ветра не превышала 30 км/ч. Кроме того, на высоте АТ-300 гПа в 50 % случаев отмечалась циклональная сторона струйного течения.

Выводы

Таким образом, впервые для аэродрома Иркутск начаты исследования синоптических условий выпадения сильного ливневого снега на восточной периферии антициклона после прохождения основных и вторичных холодных атмосферных фронтов у поверхности Земли, что существенно затрудняет прогнозирование такого рода атмосферных процессов. Анализ синоптических условий позволил выделить преобладающие типы атмосферных процессов и количественные характеристики параметров атмосферы, которые можно использовать в качестве прогностических признаков выпадения сильного ливневого снега в районе аэродрома Иркутск. Следует обратить внимание на следующие факторы: увеличение горизонтальных градиентов давления у поверхности Земли (≥ 10 гПа/1000 км) и термических градиентов на АТ-850 гПа (≥ 8°С/1000 км), адвекция холодной (0–3°С/12 час.) влажной арктической или северной умеренной воздушной массы в тыловой части высотной ложбины при наличии северо-западных потоков, прохождение мезоструи на АТ-850 гПа и наличие циклональной стороны струйного течения на АТ-300 гПа.

Список литературы

1. Интенсивность и частота снегопадов на территории РФ по материалам наблюдений на сетевых метеостанциях в 1960–2016 гг. / В. Н. Голубев, М. Н. Петрушина, Р. А. Игнатов, Д. М. Фролов // Современные

информационные технологии в гидрометеорологии и смежных с ней областях : тез. докл. Второй науч.-практ. конф. (21–23 нояб. 2017 г.). Обнинск, 2017. 2017. С. 53–54.

2. Лощенко К. А., Латышева И. В. Региональная типизация синоптических процессов на территории Иркутской области за период 2000–2013 // Изв. Иркут. гос. ун-та. Сер. Науки о Земле. 2015. Т. 11. С. 43–54.

3. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2016 г. М. : Росгидромет, 2016. 70 с.

4. Сумак Е. Н., Семенова И. Г. Колебания циклонической активности и повторяемости опасных явлений погоды в Беларуси // Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды. Основные результаты и пути развития : тез. докл. Всерос. науч. конф. М. : Ин-т глобал. климата и экологии Росгидромета и РАН, 2017. С. 76–77.

УДК 551.515.6

Сопоставление грозовой активности в некоторых регионах Северной Азии со сменой атмосферной циркуляции в летние сезоны 2009–2016 гг.

Л. Д. Тарабукина[1] (tarabukina@ikfia.ysn.ru), Н. К. Кононова[2] (NinaKononova@yandex.ru), В. И. Козлов[1] (vkozlov@ikfia.ysn.ru)

[1] Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю. Г. Шафера СО РАН, Якутск
[2] Институт географии РАН, Москва

Аннотация. Проведен сопоставительный анализ атмосферной циркуляции, описываемой классификацией Б. Л. Дзердзеевского, и вариаций числа грозовых разрядов в двух удаленных друг от друга регионах повышенной грозовой активности в Северной Азии. Отрицательная взаимосвязь отклонений вариаций числа грозовых разрядов в этих регионах объясняется развитием атмосферного блокирования над Западной Сибирью, происходящего с вовлечением воздушных масс летнего муссона над Дальним Востоком.

Ключевые слова: гроза, молния, атмосферная циркуляция, Северная Азия, WWLLN, типизация Дзердзеевского.

Введение

Инструментальные наблюдения за грозами на территории Северной Азии ведутся в основном в отдельных регионах. Наблюдения осуществляются однопунктовыми грозопеленгаторами российского и зарубежного производства. Единственной многопунктовой сетью широкого охвата является сеть «Верея», разрабатываемая и используемая для нужд российских электрических сетей [1]. Сеть охватывает почти все регионы России, где повышена грозовая активность. Такая полоса повышенной грозовой активности была установлена по метеорологическим наблюдениям и применяется в государственных рекомендациях по проектировке защиты от грозовых перенапряжений [2]. Единственными инструментальными измерениями с полным охватом территории северной Азии долгое время являлись спутниковые наблюдения оптическим детектором OTD спутника Microlab-2 [3], который действовал с 1995–2000 гг. Последующие спутниковые наблюдения либо не охватывают всю интересующую нас территорию, либо имеют закрытый доступ к данным. Распределение усредненной плотности, определенной спутниковыми наблюдениями, совпало с метеорологическими наблюдениями, где подтверждается наличие смещенного к югу при движении на восток пояса повышенной грозовой активности. К сожалению, на территории всей северной Азии многолетние вариации не рассматриваются в совокупности. Как было выявлено в [4] в Северной Азии изменения грозовой активности двух крупных регионов повышенной плотности грозовых разрядов относительно взаимосвязаны.

Существуют много способов описания глобальной атмосферной циркуляции северного полушария. Самое общее разделение на типы циркуляции производится как зональное и меридиональное по общему направлению ветров на высотах тропосферы и нижней страто-

сферы за долговременные периоды. По самой широко распространенной классификации Вангенгейма-Гирса атмосферная циркуляция северного полушария делится на три глобальные группы: меридиональная, западная и восточная [5]. В данной работе мы применили метод Б. Л. Дзердзеевского описывающий ежедневную смену атмосферной циркуляции всего северного полушария [6].

Данные и методы исследования

В 2009 г. в г. Якутске была установлена однопунктовая станция приема ОНЧ радиоизлучения, которая была включена в мировую сеть грозолокации (WWLLN). Приемный пункт состоит из электрической штыревой антенны высотой 1,5 м, подключенной через широкополосный предварительный усилитель (коэффициент усиления в рабочей полосе около 40) и АЦП к ПК [7]. Точное время определяется по секундным импульсам (PPS) GPS-приемника. Работа системы основана на приеме радиосигналов от молний, атмосфериков, и анализе разностей времени прихода волновых пакетов (TOGA) в ОНЧ-диапазоне частот (6–22 кГц) до, как минимум, 5 ближайших станций [8]. С 2009 по 2016 г. количество радиоприемных пунктов WWLLN в пределах рассматриваемой нами территории Северной Азии (60–180 в. д., 40–80 с. ш.) возросло почти вдвое. В 2009 г. вблизи и в пределах рассматриваемого региона в сети действовало 4 станции. На настоящий момент система расширилась за счет дополнительных 6 станций вблизи выбранного нами региона, и около 7 из 10 станций постоянно действуют. Эффективность детектирования молний типов «облако-земля» и «облако-облако» системы грозолокации по оценкам на 2012 г. в среднем составляет около 11–15 %, и для молний с током более 100 кА – около 30 % [9]. В ОНЧ диапазоне возвратный удар ОЗ разряда – доминирующий источник принимаемых атмосфериков [10], и поэтому количество ОЗ доминирует в ОНЧ радиотехнических наблюдениях грозовых разрядов, даже если число ОО разрядов в 3,5 раза больше числа ОЗ [11]. На 10 кГц излучение от ОО молний составляет примерно 10 % от излучения ОЗ молний [12], поэтому считается, что система регистрирует как ОЗ молнии, так и ОО молнии, однако из-за настроенного ОНЧ диапазона приемного тракта предпочтение отдается более мощным импульсам грозовых разрядов типа «облако-земля».

Составление пространственных карт производилось следующим способом. Во-первых, долгота и широта каждой строки данных, соответствующей одному грозовому разряду, сопоставлялись с порядковым номером интервала 0,25 ° по долготе / широте с включением нижней границы и исключением верхней границы с помощью стандартной процедуры подсчета гистограммы. Во-вторых, каждый разряд раскидывался по порядковому номеру по широте и долготе в соответствующую клетку пространственной сетки, затем производился подсчет количества разрядов в каждой клетке. Суммирование производилось для каждой клетки сетки за весь год (январь – декабрь), за три летних месяца (июнь-август), за месяц и за сутки. Далее для отдельных областей территории производилось полное суммирование количества грозовых разрядов по площади, а также многолетнее усреднение полученных годовых и сезонных карт всей территории. Для сравнения с метеорологическими параметрами суммарные карты строились для каждых 6 часов наблюдений по UT. Для подсчета суточного хода были условно выделены часовые пояса по 15 ° долготы с началом счета от 7,5 °в. д. с присвоением номера один данной долготе. Для каждого пояса были выделены базы из основной с соответствующим диапазоном долгот, а затем корректировалось время (сведенное до часа, причем в этот часовой интервал включались все минуты до 59 мин и 59 с) каждого зарегистрированного импульса грозового разряда согласно порядковому номеру пояса. Те грозовые разряды, у которых скорректированное время равнялось или превышало 24 ч., переносились на следующий день с вычитанием из времени 24 часов. При достижении последнего месяца и дня такие разряды стирались из базы. В каждой такой вторичной базе велся суточный подсчет количества разрядов с интервалом в один час (от 0 до 23 часов). Счет производился через стандартную процедуру подсчета гистограммы. Далее все полученные суточные хода усреднялись в течение заданного периода: года, летного сезона, месяца, а также для каждого усреднения находились стандартные отклонения. Усреднение производилось для всего непрерывного интервала дней без учета были ли грозовые разряды в эти дни или нет.

Для того, чтобы уменьшить влияние изменяющейся с годами эффективности детектирования на межгодовые вариации, а также при условии, что эффективность в течение года и конкретно летних сезонов остается неизменной, количество грозовых разрядов регионов представлялось в виде доли от суммарного количества по территории и рассматривались вариации отклонения значений доли от года к году, либо суммарное по всей рассматриваемой территории приводилось к сумме разрядов за 2009 г., как году с наименьшей эффективностью детектирования.

Для описания атмосферной циркуляции использована типизация циркуляции атмосферы Северного полушария, разработанная под руководством Б. Л. Дзердзеевского [13; 14]. В типизации выделен 41 элементарный циркуляционный механизм (ЭЦМ). На каждый ЭЦМ построена динамическая схема с обозначением путей циклонов и мест стационирования антициклонов. Благодаря наличию динамических схем, при каждом ЭЦМ можно определить характер погоды в любой точке Северного полушария. По Б. Л. Дзердзеевскому выделено четыре группы циркуляции: зональная, нарушение зональности, меридиональная северная, меридиональная южная, включающие 13 типов и 41 ЭЦМ [6]. Данные, полученные по этой методике, имеются с 1899 г. и ежегодно дополняются [URL: www.atmospheric-circulation.ru].

Результаты и обсуждение

Вариации грозовой активности в регионах повышенной плотности грозовых разрядов. В результате непрерывных наблюдений с 2009 г. была получено усредненное пространственное распределение суммарного за летние сезоны количества грозовых разрядов, подсчитанных на сетке 0,25×0,25° географической широты и долготы соответственно на территории с границами 60–180° в. д., 40–80° с. ш. (рис. 1). Полученная усредненная плотность грозовых разрядов была скорректирована на пространственное распределение эффективности детектирования системы, смоделированное авторами сети и адаптированной из статьи [15].

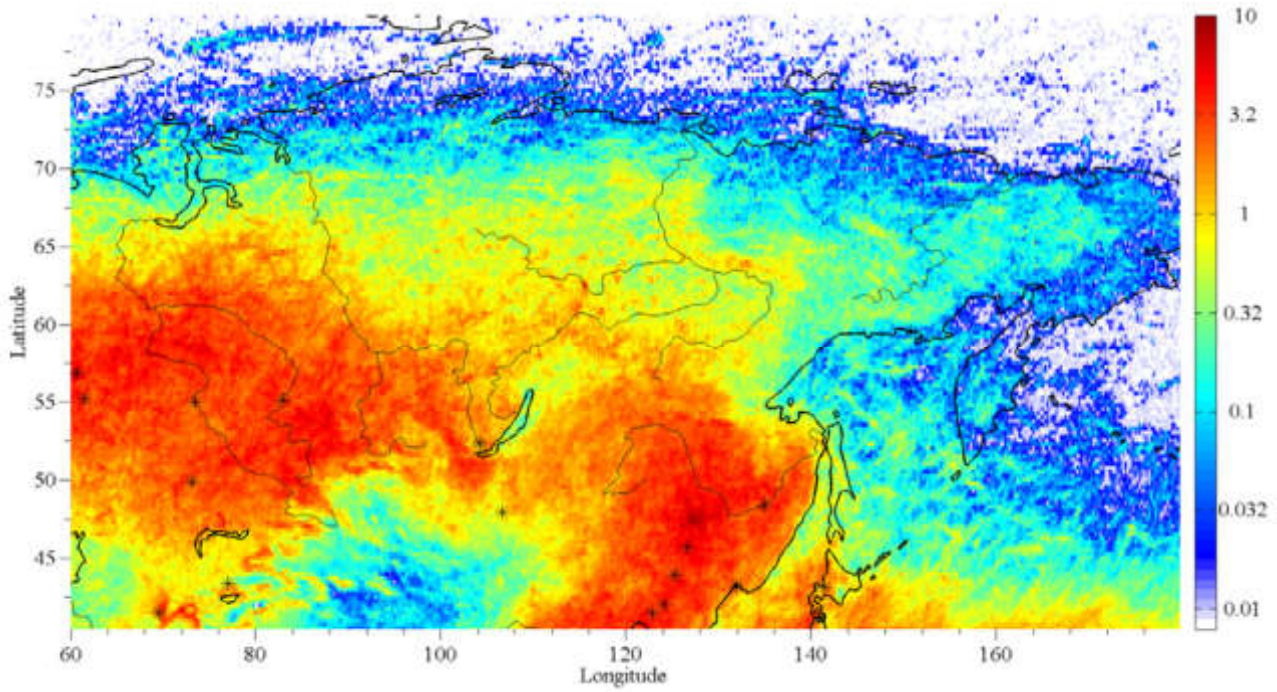


Рис. 1. Среднегодовая плотность грозовых разрядов (разряд км-2 год-1) 2009–2017 гг., скорректированная на эффективность детектирования. Цветовая шкала приведена в логарифмическом масштабе. Черными звездами указаны крупные города

Полученная карта качественно совпадает с ранними картами, полученными в результате спутниковых наблюдений, а также дает более детализованную картину по сравнению с метеорологическими наблюдениями. Отмечается пояс повышенной грозовой активности, протянувшийся вдоль примерно 45–60 параллелей. Как и в спутниковых наблюдениях, зона повышенной грозовой активности отклоняется к югу в восточной части территории. Отмечаются два обширных региона, где годовая плотность грозовых разрядов выше по сравнению с другими территориями примерно в 10–100 раз. Первый регион, который мы условно обозначим, как «западный» находится примерно на территории с границами 45–60° с. ш. и 60–90° в. д. и приходится на Западносибирскую равнину. Максимальная активность первого очага находится в области между 55° с. ш., 60° в. д. и 61° с. ш., 75° в. д., которая приходится на Тобольский материк вдоль рек Тавды, Тобола и Иртыша. Обширные заболоченные экосистемы способствуют развитию местной грозовой активности и длительному поддержанию активности фронтального типа гроз. Второй регион повышенной грозовой активности, обозначенный нами как «восточный», расположен в долине рек Сунгари и Амур. Максимальная активность второго очага наблюдается вдоль 127° в. д. в межгорно-котловинной областях между Малым Хинганом и Становым хребтом. А также можно обособить третью область с соответствующей массивным очагам плотностью грозовых разрядов, находящуюся в пределах 50–60 с. ш., 90–110 в. д. (условно-центральный очаг). Образование этих массивных грозовых очагов связывается с разными атмосферными процессами. Западный очаг, центр которого находится на Западно-Сибирской равнине, образуется, в основном, за счет зонального переноса с запада: воздушные массы обходят Уральские горы с севера и юго-запада. Развитию грозовой активности также способствуют благоприятные условия местности: заболоченная низменность приводит к активной конвекции и неустойчивому состоянию атмосферы [16]. Алтайские горы частично останавливают продвижение воздушных масс на юго-восток. Центр восточного очага находится в долине рек Амур и Сунгари. Формирование очага происходит под влиянием сезонного центра действия атмосферы – дальневосточной депрессии [17]. Со смещением центра дальневосточной депрессии от года к году происходит усиление или ослабление южного переноса (летнего муссона), что в свою очередь приводит к усилению грозовой активности восточного очага [18].

Суммарное количество грозовых разрядов за год по всей территории возрастает (рис. 2), однако в эти годы в связи с увеличением количества станций возрастала и эффективность детектирования, поэтому было решено рассматривать соотношения вариаций между двумя регионами повышенной грозовой активности.

Вариации ежегодного приращения суммарного за летний сезон количества грозовых разрядов в западном очаге находятся в противофазе с вариациями восточного очага: коэффициент линейной корреляции -0,94 (рис. 3). Отношение суммарного числа разрядов за летний сезон и месяц в восточном регионе к числу в западном регионе показывает уменьшение величины отклонений этого параметра к 2014 г. (рис. 4).

На территории всей северной Азии самым активным сезоном грозовой активности является лето – с июня по август. В 2009–2016 гг. этот сезон характеризуется доминированием меридиональных процессов в атмосфере. В целом, как было установлено в работе [19], в данное время длится эпоха северной меридиональной циркуляции. Как показано на рис. 5, при подсчете дней с различными группами типов циркуляции выделяется группа меридиональной северной циркуляции, а также меридиональной южной, которая доминировала летом 2013 и 2016 гг.

От сезона к сезону наблюдаются относительно короткопериодные вариации доминирования циркуляции меридионального северного и южного типов в течение лета. Так в начале (июнь) и конце (августе) лета доминирование меридионального южного типа происходило только в 2013, 2014 и 2016 гг. В июле наблюдается преимущественно меридиональный северный тип циркуляции за исключением 2010 г. Зональный тип циркуляции чаще проявляет себя также в июле по сравнению с другими летними месяцами.

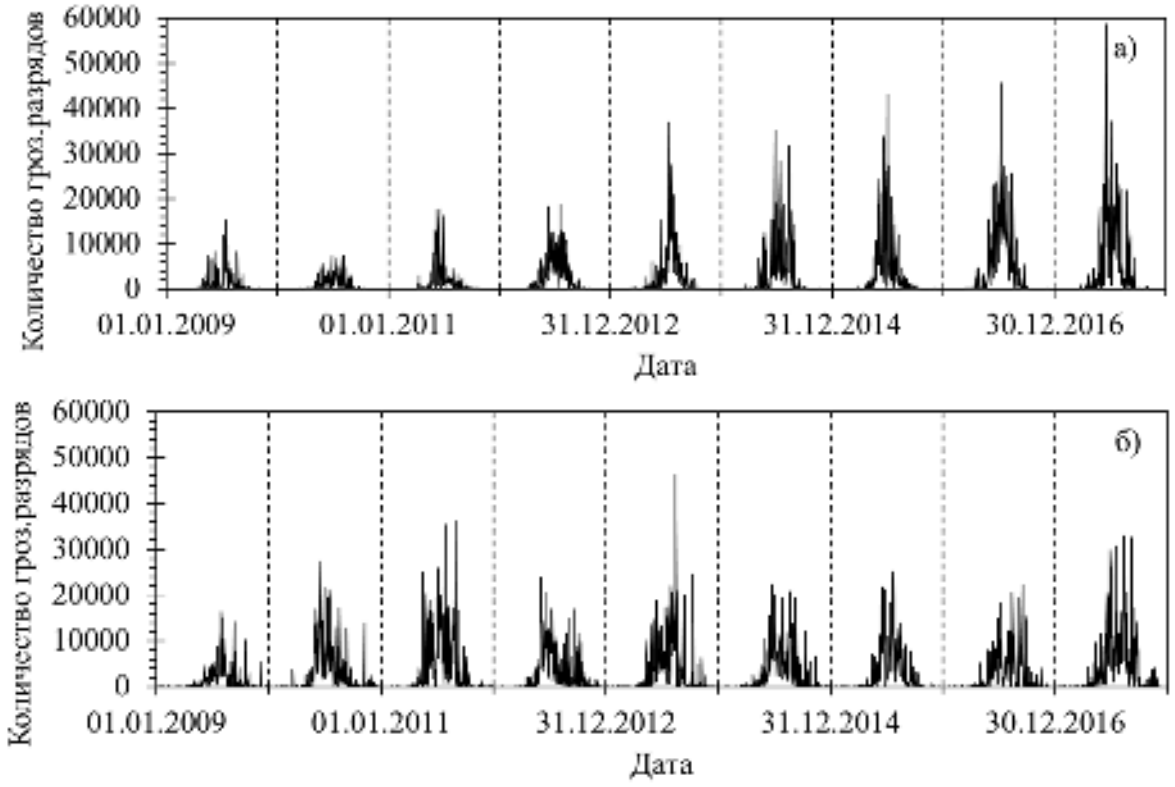


Рис. 2. Многолетние вариации суточного количества грозовых разрядов в двух регионах: западном (*а*) и восточном (*б*)

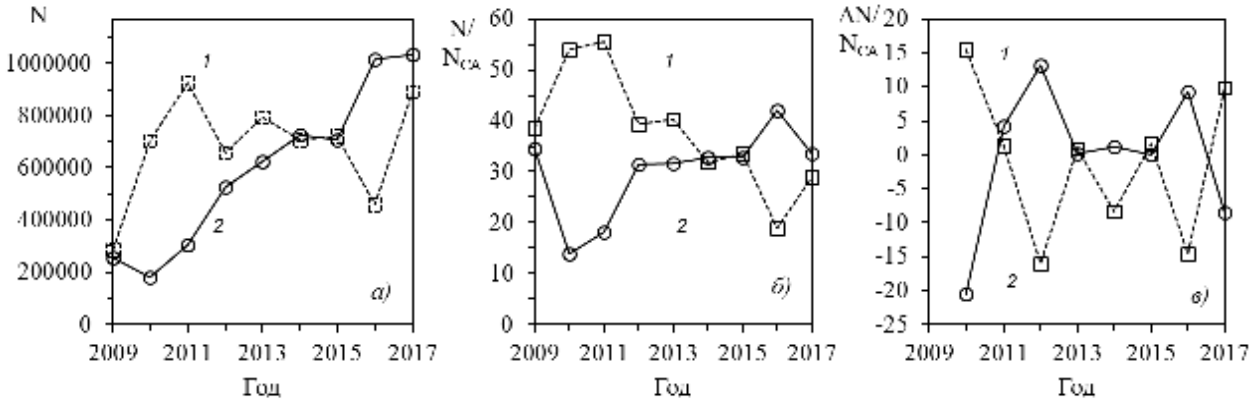


Рис. 3. Вариации за летние сезоны в восточном регионе (линия 1) и западном регионе (линия 2): *а*) суммарного количества грозовых разрядов, *б*) отношения суммарного количества в регионе к количеству в Северной Азии, *в*) ежегодного отклонения отношения количества в регионе к количеству в Северной Азии

В 2009–2015 гг. в летние периоды велика повторяемость ЭЦМ 8-х и 12-х типов, при которых над Сибирью и Дальним Востоком одновременно развиваются выходы южных циклонов и возможны грозы. При ЭЦМ 9а (меридиональная северная группа) и 13л (меридиональная южная группа), которые также часто возникали в рассматриваемый период, над Сибирью развивается в основном циклоническая деятельность, грозы формируются на холодных фронтах северо-западных и южных циклонов. В 2016 г. летом основное направление циркуляции резко меняется на меридиональное южное, при этом на долю ЭЦМ 13л приходится треть сезона.

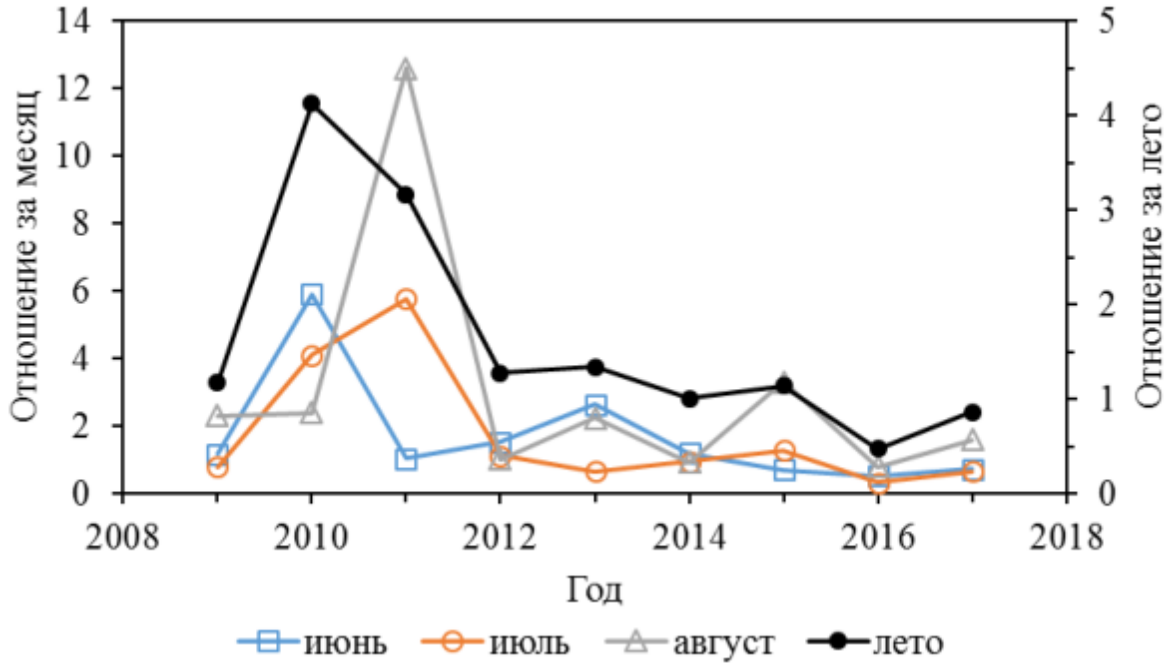


Рис. 4. Отношение суммарного по территории и в выбранный интервал времени количества грозовых разрядов в восточном регионе к количеству в западном

Сопоставление с изменениями атмосферной циркуляции, классифицированной по методу Б. Л. Дзердзеевского

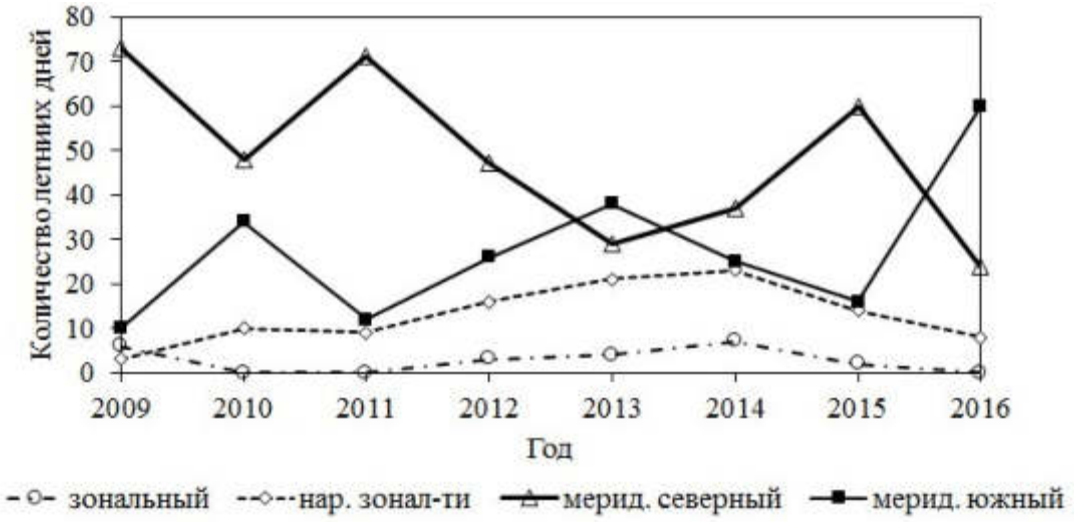


Рис. 5. Суммарная продолжительность групп ЭЦМ за летний сезон

В таблице 1 выделены ЭЦМ, при которых отношение числа дней, когда суточное количество грозовых разрядов в восточном регионе превышало количество в западном регионе, к числу дней, когда суточное количество разрядов в западном регионе превышало количество в восточном, (последняя строка табл. 1) составляло более 2 раз. ЭЦМ, удовлетворяющими такому условию, стали 8а, 8вл, 12а и 12бл меридиональной северной группы циркуляции северного полушария.

При ЭЦМ 8а и 8вл в северном полушарии развиваются 2 близких по географическому положению блокирующих процесса и 2–3 выхода южных циклонов [13]. При ЭЦМ 8а блокирующие процессы не наблюдаются на территории Азии, вдоль северных широт Азии образуется полоса низкого давления и активизируются выходы южных циклонов со средиземного моря и вдоль Дальневосточного побережья Азии. При ЭЦМ 8вл блокирующий процесс направлен на восток Западной Сибири, а южные циклоны выходят на дальневосточный регион с монгольской ветви полярного фронта.

Таблица 1

Количество дней, соответствующее условиям доминирования грозовой активности восточного региона по сравнению с западным регионом, и ЭЦМ за летние сезоны (июнь – август) периода 2009–2016 гг.

ЭЦМ	2а	3	4б	6	8а	8вл	9а	10б	12а	12бл	13л
число дней ЭЦМ	14	50	17	24	21	15	106	23	119	59	218
отношение количества гроз. разрядов в восточным к западному <=1	11	23	7	12	3	4	43	9	26	16	104
отношение количества гроз. разрядов в восточным к западному >1	3	27	10	12	18	11	63	14	93	43	114
отношение числа дней с отн. более 1 к менее 1	0,27	1,17	1,43	1	6	2,75	1,46	1,56	3,58	2,69	1,1

При ЭЦМ 12а происходит 4 арктических вторжения, одно из которых осуществляется широкой полосой на Сибирь и распространяется на весь наш регион. Южные циклоны выходят в других секторах полушария. ЭЦМ 12бл образует схожую с 8вл структуру с областью высокого давления над Сибирью и низкого в Дальневосточном регионе. Вторжение арктических масс на Азию смещено на запад, а траектории южных циклонов более короткие.

Для того, чтобы установить причину, обуславливающую высокую грозовую активность, были рассмотрены отдельно сезонные вариации количества грозовых разрядов двух ранее выделенных масштабных регионов повышенной грозовой активности и ЭЦМ, соответствующие дням с локальными пиками вариаций и дням пониженной активности. Каждый год дни повышенной грозовой активности выбирались по уровню ~0,7 от максимума за лето, а дни пониженной грозовой активности – по уровню 0,1 от летнего максимума. В период с 2009 по 2016 гг. для западного региона выделены 27 дней повышенной грозовой активности (от 2 до 6 дней в каждом сезоне). Наиболее характерными ЭЦМ для высокой грозовой активности западного региона оказались ЭЦМ 9а и 13л (7 и 9 случаев соответственно). Остальные пики приходились на ЭЦМ 12а и 12бл (по 2 дня), 2а, 2б, 3, 4а, 6, 10а, 10б (по 1 дню за весь период). При этом в эти дни высокой грозовой активности отмечается доминирование именно западного очага по количеству грозовых разрядов, этому соответствуют 26 дней. Для восточного региона за весь рассматриваемый период выделены 40 дней максимальной грозовой активности (от 2 до 10 дней на каждый сезон, чаще – по 4 пика за сезон), из них 12 дней приходится на ЭЦМ 13л, 8 дней – на ЭЦМ 9а, 6 дней – на ЭЦМ 12а, 5 дней – на ЭЦМ 8а, менее – ЭЦМ 3, 12бл (по 3 дня), 9б, 8гл, 7ал (по 1 дню). В дни высокой активности восточного региона наблюдалось в основном доминирование активности восточного региона по сравнению с западным регионом – 38 дней, когда отношение суточного количества грозовых разрядов в восточном регионе к количеству в западном было более 1, из них 30 дней это отношение показывало значение более 2. Таким образом, в дни максимальной грозовой активности очагов активность одного из них существенно ниже.

ЭЦМ 9а и 13л являются наиболее способствующими грозовой активности ЭЦМ в целом, что также было показано в табл. 1. При ЭЦМ 9а антициклон с Европейской России распространяется на верхнее и среднее течение Оби, на остальной части Северной Азии развивается циклоническая деятельность с появлением временных антициклонических образований и формированием деформационных полей, обеспечивающих развитие и движение к северо-востоку полярно-фронтовых циклонов. Южные циклоны выходят вдоль Дальневосточного побережья. ЭЦМ 13л характеризуется циклоном на Северном полюсе и обширной областью пониженного давления, охватывающей большую часть внетропических широт Северного полушария. Циклоны, идущие с запада и с юго-запада, задерживаются, и их траектории приобретают северную составляющую. Проходящие по более восточным траекториям по-

лярно-фронтовые циклоны после регенерации быстро движутся в высоких широтах на восток или северо-восток. В приполярную область они проникают в районах Новосибирских островов, Восточно-Сибирского или Чукотского морей. ЭЦМ 13л отличается длительностью существования.

Заключение

Показано, что атмосферная циркуляция северного полушария, представляющая комплексную динамическую схему локализации барических образований, сильно влияет на грозовую активность двух регионов повышенной грозовой активности, расположенных на западносибирской равнине и в долине рек Амур и Сунгари. Как установлено в [20], развитие атмосферного блокирования над Западной Сибирью происходит с вовлечением воздушных масс летнего муссона над Дальним Востоком, что и отображается в вариациях соотношения количества грозовых разрядов двух массивных грозовых очагов. Чаще всего в обоих регионах грозы происходили при ЭЦМ 9а и 13л, однако в дни максимальной грозовой деятельности очагов активность одного из них была существенно ниже. ЭЦМ 8а, 8вл, 12а и 12бл чаще способствуют активному развитию гроз в Дальневосточной области, чем в Западной Сибири. В целом наблюдаемой в период 2009–2015 гг. динамической структуре грозовой активности соответствует преобладание северной меридиональной циркуляции. Летом 2016 г. циркуляция в целом определялась южным меридиональным типом, что сказалось на грозовой структуре Северной Азии, где активность западного региона преобладала по сравнению с восточным регионом.

Список литературы

1. Никитин Д. Системы грозопеленгации на страже электросетевого хозяйства // Энергорынок. 2010. № 6. С. 17–20.

2. ГОСТ Р 50571.19-2000. Электроустановки зданий. Ч. 4: Требования по обеспечению безопасности. Гл. 44: Защита от перенапряжений. Разд. 443: Защита электроустановок от грозовых и коммутационных перенапряжений. М. : Изд-во стандартов, 2001.

3. Global frequency and distribution of lightning as observed from space by the Optical Transient Detector / H. J. Christian, R. J. Blakeslee, D. J. Boccippio, W. L. Boeck // J. Geophys. Res. AGU, 2003. Vol. 108, N D1. P. ACL 4-1-ACL 4-15.

4. Тарабукина Л. Д., Козлов В. И. Пространственно-временное распределение грозовых разрядов по территории северного региона Азии и его сравнение с солнечной активностью в 2009–2016 гг. // Солнечно-земная физика. 2017. Т. 3, № 2. С. 70–74.

5. Гирс А. А., Кондратович К. В. Методы долгосрочных прогнозов погоды. М. : Гидрометеоиздат, 1978. С. 344.

6. Dzerdzeevskii B. L. Fluctuations of Climate and of General Circulation of the Atmosphere in extratropical latitudes of the Northern Hemisphere and some problems of dynamic climatology // TELLUS. Munksgaard International Publishers. 1962. Vol. 14, N 3. P. 328–336.

7. Козлов В. И., Муллаяров В. А., Каримов Р. Р. Пространственное распределение плотности грозовых разрядов на Востоке России по данным дистанционных наблюдений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8, № 3. С. 257–262.

8. Dowden R. L., Brundell J. B., Rodger C. J. VLF lightning location by time of group arrival (TOGA) at multiple sites // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. Elsevier Science Publishing Company. 2002. Vol. 64, N 7. P. 817–879.

9. Abarca S. F., Corbosiero K. L., Galarneau T. J. An evaluation of the Worldwide Lightning Location Network (WWLLN) using the National Lightning Detection Network (NLDN) as ground truth // J. Geophys. Res. AGU. 2010. Vol. 115. P. D18206.

10. Pierce E. T. Atmospherics and radio noise // Golde R. H. (Ed.). Lightning: Physics of Lightning. 1977. Vol. 1. Academic Press. P. 351–384.

11. Location accuracy of long distance VLF lightning location network / C. J. Rodger, J. B. Brundell, R. L. Dowden, N. R. Thomson // Annales Geophysicae. Copernicus Publications. 2004. Vol. 22. P. 747–758.

12. Brook M., Ogawa T. The cloud discharge / Lightning: Physics of Lightning. 1977. Vol. 1–2. Academic Press P. 191.

13. Дзердзеевский Б. Л. Избранные труды. Общая циркуляция атмосферы и климат. М. : Наука, 1975. 288 с.

14. Кононова Н. К. Классификация циркуляционных механизмов Северного полушария по Б. Л. Дзердзеевскому. М. : Воентехиниздат, 2009. 372 с.

15. Relative detection efficiency of the World Wide Lightning Location Network / M. L. Hutchins, R. H. Holzworth, J. B. Brundell, C. J. Rodger // Radio Science. AGU. 2012. Vol. 47, N 6. P. RS6005.

16. Региональный мониторинг атмосферы. Ч. 4: Природно-климатические изменения. М. : РАСКО, 2000. 270 с.

17. Хромов С. П. Муссоны в общей циркуляции атмосферы // А. И. Воейков и современные проблемы климатологии. М., 1956. С. 84–108.

18. Глебова С. Ю. Изменения атмосферного режима над дальневосточным регионом в 2000–2004 гг. и предполагаемые тенденции развития на ближайшие годы // Изв. ТИНРО. 2005. Т. 142. С. 214–222.

19. Кононова Н. К. Изменения циркуляции атмосферы северного полушария в XX–XXI столетиях и их последствия для климата // Фундамент. и приклад. климатология. 2015. Т. 1, № 1. С. 133–162.

20. Peculiarities of the atmospheric blocking events over the Siberia and Russian Far East region during summertime / O. Yu. Antokhina, P. N. Antokhin, E. V. Devjatova, V. I. Mordinov // Proc. SPIE 23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. SPIE. 2017. Vol. 10466. P. 104665V.

УДК 551.5

Изучение характера проявления гроз в горах юга Западной Сибири

М. Х. Шанкибаева [1] (shankibaeva77@mail.ru), С. Ю. Каранина [2], Н. А. Кочеева [2] (nina_kochewa@mail.ru)

[1] Горно-Алтайский ЦГМС, Горно-Алтайск
[2] Горно-Алтайский госуниверситет, Горно-Алтайск

Аннотация. До настоящего времени грозовая активность в горах Алтая изучалась в аспекте пространственного и временного распределения по всей территории. В настоящей работе рассмотрено проявление гроз на северном макросклоне Алтая. Результаты исследования позволили выделить периодизацию в проявлении гроз на границе равнин Западной Сибири и гор Алтая, а также приуроченность их к фронтальным явлениям.

Ключевые слова: гроза, циркуляция воздушных масс, горная страна, атмосферный фронт, корреляция.

Введение

В отдельные периоды возникает иллюзия, что о грозе всё известно. Достигнув более высокого уровня технического оснащения исследователи открывают новые явления [18; 19, с. 12202] в научный оборот поступают новые факты, требующие осмысления и дальнейшего исследования.

Почти в середине прошлого века опубликована работа [1], где рассмотрены вопросы эволюции представлений о возникновении и развитии гроз, несколько глав посвящено изменчивости проявления гроз в различных географических условиях и много других вопросов [1, с. 32].

В работах [5, с. 13; 7, с. 8; 8, с. 7; 9, с. 17] указывается на сложное взаимодействие атмосферных процессов и подстилающей поверхности. Эти и другие работы посвящены изучению территории Западной Сибири и Казахстана [3; 5; 7–9].

Результаты изучения временного и пространственного распределения гроз в пределах Республики Алтай (РА) представлены в работах [2; 4; 8–10]. Республика Алтай находится в пределах горной страны, северная часть которой располагается на границе с равнинами Западной Сибири. Расположение здесь «Авиационной метеорологической станции гражданской (АМСГ) – специализированного учреждения (аэродромный метеорологический орган), осуществляющего метеорологическое обеспечение гражданской авиации» позволяет изучать связь грозовой активности и циклонической деятельности с выходом (в дальнейшем) на практическую значимость этих исследований.

Цель и задачи работы. Общий фон для возникновения и развития грозы на достаточно больших территориях создают макропроцессы [16]. Макроциркуляционные условия определяют пути перемещения циклонов, в которых, в основном, и формируются условия, благоприятные для возникновения грозы. Цель работы состоит в выявлении связи циркуляцион-

ных процессов в атмосфере с возникновением гроз на границе равнин Западной Сибири и горной страны. Для этого выполнен анализ сведений, имеющихся в распоряжении АМСГ Горно-Алтайск и в Горно-Алтайском Центре по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (ЦГМС) за 2006–2015 гг.

Материалы и методы исследования. В работе использовались архивные данные наблюдений на АМСГ Горно-Алтайск, а так же данные, зарегистрированные в период работы одного из авторов (Шанкибаевой М. Х.) на этой станции. В ходе обработки первичных данных было собрано более 5000 значений, которые сгруппированы в 120 таблицах. Выборка за этот период составила: по грозам 207 значений, по фронтальным явлениям 605 значений (табл. 1).

Таблица 1

Повторяемость атмосферных фронтов (фрагмент исходной таблицы) [16]

Год	2006	2007	2008	…	2013	2014	2015
Фронтальная деятельность	Дни						
Высотная барическая ложбина	14	13	14		12	27	24
Ложбина у земли	1	2	1		4	14	4
Малоподвижная высотная ложбина циклон	15	10	7		-	5	4
Фронт окклюзии	22	14	11		5	9	10
Холодный фронт	23	11	18		7	7	12
Вторичный холодный фронт	5	1	3		1	1	5
Теплый фронт	18	6	11		5	4	2
Вторичный тёплый фронт	1	1	1		-	-	2

Расчеты производились в программах: Exel STATISTICA.

Обсуждение результатов

Место проведения исследования было выбрано на основе анализа публикаций [4; 8 и др.], в которых излагались результаты изучения пространственного распространения гроз для всей территории Республики Алтай. Исследование проводилось на базе [11] многолетних данных.

Проведенный в работах [2; 8; 9] анализ показал, что на территории Республики Алтай грозовая активность характеризуется выраженной периодизацией. Статистический анализ позволил выделить в пределах республики пять групп ГМС, где число гроз статистически различно. Привлечение инструментальных данных [2, с. 28; 10, с. 112] позволило подтвердить результаты, полученные на данных гидрометеослужбы. В ходе районирования были выделены три района: малой, средней и высокой грозовой активности. Были установлены метеорологические станции, где на фоне любой интенсивности гроз их число всегда больше, чем в смежных территориях. Такие районы классифицировались авторами [4; 2, с. 28; 8, с. 10; 10, с. 112] как грозовые очаги [8, с. 11].

В последние годы для изучения пространственного и временного распределения гроз в планетарном масштабе и для решения региональных задач оценки территорий по степени грозоопасности, а также для оценки точности грозопеленгационных систем [11], активно привлекаются данные Всемирной сети локализации гроз (World Wide Lightning Location Network, WWLLN) [14; 15].

Авторы использовали данные этой системы рассчитали плотность атмосфериков для разных высот Республики Алтай (рис. 2).

Проведенное исследование для двух лет позволило подтвердить факт преобладания гроз в низкогорной зоне Республики Алтай. Это важно в свете нашего исследования – изучения грозовой активности в низкогорье Западной Сибири.

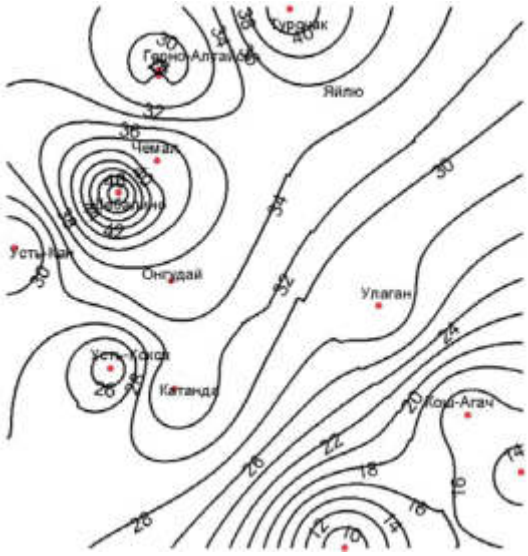


Рис. 1. Среднее число гроз на метеорологических станциях Горного Алтая [4, с. 89]

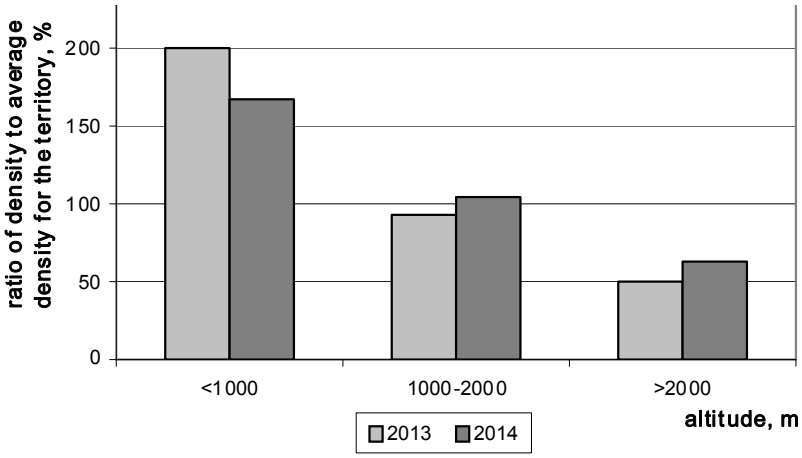


Рис. 2. Распределение плотности атмосфериков над территорией Республики Алтай

АМСГ Горно-Алтайск располагается на границе равнин Западной Сибири и гор Алтая. Для нашего исследования это наиболее удобный пункт наблюдений.

Для выявления причин особенностей временного распределения гроз было важно рассмотрение характера атмосферной циркуляции в грозовой (летний) сезон в северном Алтае, где располагается территория исследования. Здесь, на границе гор и равнин Западной Сибири исключительно важную роль в формировании погодных условий играет перенос воздушных масс из других регионов Земли в процессе общей циркуляции атмосферы [17, с. 67].

Районами формирования адвективных воздушных масс являются моря Арктики, Атлантический океан, европейская часть России, Западная и Восточная Сибирь, Центральная Азия. Широтная, или зональная, циркуляция представляет собой перенос воздуха с запада, юго-запада, северо-запада. Меридиональная циркуляция приостанавливает перенос воздуха с запада и обеспечивает господство арктических или тропических воздушных масс – холодных и сухих с севера, жарких и сухих с юга [13, с. 50].

В процессе перемещения воздушных масс под влиянием подстилающей поверхности свойства воздуха изменяются, несмотря на это, арктический воздух приносит похолодание, тропический – сильное потепление, атлантический – осадки.

С изменением типа воздушных масс погода резко изменяется. Под влиянием подстилающей поверхности происходит трансформация адвективной воздушной массы в местную умеренную континентальную воздушную массу. Наиболее активная трансформация свойств воздуха происходит при антициклональной погоде, фронтальные явления приостанавливают

этот процесс. При прохождении циклонов последовательно сменяются типы погод (теплого фронта, внутримассовая, холодного фронта) [13, с. 51].

По мере прогревания подстилающей поверхности в Средней Азии усиливается циклоническая деятельность на полярном фронте, где взаимодействуют тропический воздух Ирана и еще холодный континентальный воздух Сибири. Образовавшиеся циклоны с большой энергией поднимаются к северу и северо-востоку. Массовые выходы теплого воздуха вызывают потепление, но приход свежего арктического воздуха вновь приводит к восстановлению низких температур. Вторжения арктического воздуха происходят только с севера и северо-запада. К апрелю полностью прекращаются вторжения континентального арктического воздуха из Восточной Сибири, так как исчезают условия для его переноса – гребни высокого давления Восточно-Сибирского антициклона [13, с. 53].

В мае погода очень неустойчива. Еще велика роль в климате вторжений арктического воздуха, поступающего в тылу циклонов арктического фронта. Адвекция холодного воздуха происходит и по восточной периферии антициклонов, центры которых находятся над европейской частью России. При положении малоподвижного антициклона над Восточной Сибирью вдоль западной периферии распространяется с юга прогретый над Средней Азией сухой воздух, и погода становится теплой. Однако теплая солнечная погода вскоре сменяется холодной и пасмурной с моросящими дождями, в высокогорье – со снегопадами. По сравнению с апрелем, в мае сумма осадков возрастает в 2–3 раза. Для лета характерна наиболее устойчивая погода. В это время выпадает наибольшее количество осадков. Перенос воздушных масс с запада приостанавливается, когда с юго-запада от Азорского антициклона подходит гребень высокого давления. В северных районах горной страны наблюдаются активные фронтальные явления [13, с. 54].

Таким образом, в процессе общей циркуляции в зоне наблюдения гидрометеостанции в аэропорту «Горно-Алтайск» оказываются воздушные массы, которые приходят из Атлантики и Арктики, Центральной и Средней Азии, Европы и Восточной Сибири и других регионов. Во все сезоны года преобладающими являются циклональные процессы. Под влиянием рельефа и особенностей общей циркуляции в долине р. Катунь образуются местные ветры типа фёнов, играющие важную климатообразующую роль [13, с. 56].

Анализ фронтальных явлений (табл. 1, 2) показал большой диапазон изменчивости в течение периода исследования.

Таблица 2

Математические характеристики некоторых фронтальных явлений за 2006–2015 гг. [16]

Статистический показатель	Высотная Барическая ложбина	Ложбина у земли	Фронт окклюзии	Холодный фронт	Теплый фронт
Среднее	15,6	4,2	11,8	11,8	7,8
Стандартное отклонение	8,8	3,9	5,2	5,6	5,6

Выявленная закономерность отвечает тем особенностям, которые формируются при рассмотренной выше циркуляционной специфике в сочетании с географическим положением станции.

Наибольшим числом рассмотренных фронтальных явлений отмечен 2006 и 2014 г. На их долю приходится более 30 % аномальных отклонений числа холодного, тёплого и фронта окклюзии. Установлено, что их число статистически значимо превышают средние значения. Превышение в размере двух величин стандартного отклонения соответствующих характеристик природных процессов чаще всего говорит об аномальном характере этих событий.

Вместе с тем имеются годы, когда число фронтальных явлений колеблется вблизи средней величины. Этим определяется то, что величина стандартного отклонения этих лет не вынесена на график [16].

Отчетливо прослеживается тенденция к росту количества гроз с 2010 г. к настоящему времени. Обращает на себя внимание проявление 1–2-годовой цикличности (или её тенденции) в распределении внутримассовых гроз.

Выводы

В настоящее время на фоне различной степени изученности проявления гроз продолжают выявляться интересные региональные аспекты.

В целом по территории Республики Алтай накоплен большой объем фактического материала, однако существуют региональные особенности, которые обуславливают различия в их проявлении. В предгорье республики Алтай – на границе гор и равнин Западной Сибири количество гроз, связанных с прохождением атмосферных фронтов меняется от 2 до 19 за период 2006–2015 гг. Оно существенно превышает число гроз, проявляющихся в областях, где высота поверхности земли не превышает 1000 м (рис. 2). Количество внутримассовых гроз колеблется от 5 до 21. Средние значения этих величин различаются незначительно 10,4 и 11, соответственно.

В общем объёме фронтальных явлений наиболее часто проявляется высотная барическая ложбина. Холодный фронт и фронт окклюзии характеризуются одинаковыми средними значениями (табл. 2). Установлено, что эти процессы в наибольшей степени способствуют формированию гроз на изучаемой территории.

В то же время снижение числа грозовых событий показывает корреляционную связь с уменьшением числа проявлений барической ложбины и прохождением тёплого фронта.

Таким образом, качественные и количественные оценки показали связь формирования и проявления гроз с некоторыми фронтальными явлениями на границе равнин Западной Сибири и гор Алтая. В то же время остаются явления, которые не могут быть увязаны однозначно и напрямую с динамикой количества гроз. Это дает основания для дальнейшего поиска факторов влияния не только на северном макросклоне алтайских гор, но и в глубинных районах горной страны.

Статья публикуется в рамках научно-исследовательского проекта госзадания Минобрнауки РФ «Хозяйственная и социальная адаптация человека к природно-климатическим условиям Алтайских гор во второй половине голоцена» (№ 33.1971.2017/ПЧ), при поддержке фонда РФФИ, проект № 16-47-040081 р_а.

Список литературы

1. Арабаджи В. И. Гроза и грозовые процессы / М-во высш., сред. спец. и проф. образования БССР ; Мин. пед. ин-т им. М. Горького. Минск : Изд-во Белорус. гос. ун-та, 1960. 231 с.

2. Оценка параметров атмосферы по данным спектрорадиометра modis в дни с грозами на территории Республики Алтай / М. Ю. Беликова, С. Ю. Кречетова, Н. А. Кочеева, Т. Н. Гейман // Десятое Сибирское совещание по климато-экологическому мониторингу : тез. рос. конф. / под ред. М. В. Кабанова. Томск : Агаф-Пресс, 2013. С. 27–28.

3. Горбатенко В. П. Влияние географических факторов климата и синоптических процессов на грозовую активность : автореф. дис. … д-ра геогр. наук. СПб., 2003. 39 с.

4. Дмитриев А. Н., Кречетова С. Ю., Кочеева Н. А. Грозы и лесные пожары от гроз на территории Республики Алтай : монография. Горно-Алтайск : РИО ГАГУ, 2011. 154 с.

5. Ершова Т. В., Горбатенко В. П., Клипова О. А. Термодинамические параметры атмосферы при грозах и ливнях // Вестн. ТГПУ (TSPU Bulletin). 2012. № 7 (122). С. 9–14.

6. Закономерности и прогнозирование природных явлений / отв. ред.: С. И. Аагарков, И. П. Дружинин, А. В. Резникова. М. : Наука, 1980. 271 с.

7. Константинова Д. А. Пространственное распределение параметров грозовой активности и конвекции над Западной Сибирью : автореф. дис. … канд. геогр. наук. Томск, 2013. С. 18.

8. Кочеева Н. А. Влияние природно-техногенных систем на грозоактивность Горного Алтая : автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Томск, 2002. 18 с.

9. Кречетова С. Разработка алгоритмов и программного комплекса для решения задач грозовой пожароопасности лесных массивов Горного Алтая : автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Барнаул ; Горно-Алтайск, 2007. 20 с.

10. Изучение опасных явлений (на примере гроз) на территории Республики Алтай с использованием инструментальных данных / С. Ю. Кречетова, Н. А. Кочеева, Н. Г. Кудрявцев, М. Ю. Беликова, Т. Н. Гейман, А. А. Гефнидер // Изв. Алт. отд-я Рус. геогр. о-ва. Барнаул, 2013. Вып. 34. С. 109–113.

11. Российские исследования атмосферного электричества в 2011–2014 гг. / Е. А. Мареев, В. Н. Стасенко, А. А. Булатов, С. О. Дементьева, А. А. Евтушенко, Н. В. Ильин, Ф. А. Кутерин, Н. Н. Слюняев, М. В. Шаталина // Изв. Рос. акад. наук. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52, № 2. С. 175–186.

12. Свидетельство о государственной регистрации базы данных «грозы Республики Алтай».

13. Сухова М. Г. Биоклиматические условия жизнедеятельности человека в Алтае-Саянской горной стране. Томск : Изд-во Том. ун-та, 2009. С. 190.

14. Relative detection efficiency of the World Wide Lightning Location Network / M. L. Hutchins, R. H. Holzworth, J. B. Brundell, C. J. Rodger // Radio Science. 2012. Vol. 47, N RS6005.

15. Dowden R. L., Brundell J. B., Rodger C. J. VLF lightning location by time of group arrival (TOGA) at multiple sites, J. Atmos. Solar.-Terr. Phys. 2002. Vol. 64, N 7. P. 817–830.

16. Peculiarities of Thunderstorms Occurence on the Border of the Western Siberia Plains and Altai Mountains / N. A. Kocheeva, M. H. Chankibaeva, A. I. Minaev, M. G. Sukhova, A. A. Modorov // Journal of Environmental Management and Tourism. 2017. Vol. 8, Fall, N 5(21). P. 1065–1072. DOI:10.14505/jemt.v8.5(21).09.

17. The unusual wet summer (july) of 2014 in Southern Europe / S. B. Ratna, J. V. Ratnam, S. K. Behera, T. Yamagata, A. Cherchi, W. Wang // Atmospheric Research. 2017. Vol. 189. P. 61–68.

18. Observed changes of temperature extremes in Serbia over the period 1961–2010 / M. Ruml, E. Gregorić, M. Vujadinović, G. Matović, A. Vuković, V. Počuča, S. Radovanović, D. Stojičić // Atmospheric Research. 2017. Vol. 183. P. 26–41.

19. Extreme atmospheric electron densities created by extensive air showers / C. Rutjes, E. Camporeale, U. Ebert, S. Buitink, O. Scholten, G. Trinh // Vienna Austria, 2016. EGU General Assembly. 2016. Held 17–22 April. P. 12201.

УДК 910.3

К вопросу о регистрации неблагоприятных явлений погоды на АМСГ Горно-Алтайск

М. Х. Шанкибаева (Shankibaeva77@mail.ru), Н. А. Кочеева

Горно-Алтайский государственный университет, Горно-Алтайск

Аннотация. Представлен краткий обзор влияния барических образований и фронтальных систем на взлетно-посадочный режим аэропорта Горно-Алтайска. Методы исследования и прогнозирования ветра на территории аэропорта.

Ключевые слова: взлетно-посадочный режим, барические образования, неблагоприятные явления, природные условия, горы, Алтай.

К 1922 г. на линии Москва – Смоленск – Ковно (Каунас) – Кенигсберг – Берлин было выполнено 100 рейсов и перевезено 338 пассажиров. Самолеты перевозили почту, госслужащих и частных лиц. 9 февраля 1923 г. Совет Труда и Обороны СССР создал Совет по гражданской авиации, эту дату принято считать Днем рождения воздушного флота России [3]. Авиация развивалась очень быстро и сегодня эти цифры выглядят наивно. Уже в 1968 г. был построен аэропорт в Горно-Алтайске. А в 2012 г. количество пассажиров в нашем аэропорту достигло почти 15 тыс. человек.

Безопасность движения на этом виде транспорта во многом зависит от метеорологических условий. Со временем для обеспечения информацией сформировалась метеорологическая служба, которая имеет в составе несколько категорий метеорологических станций [2].

Авиационная метеорологическая станция гражданская (АМСГ) – специализированное (аэродромный метеорологический орган), осуществляющее метеорологическое обеспечение АМСГ имеются в большинстве России и стран СНГ (кроме части небольших аэропортов [1].

В России большая часть АМСГ находится в ведении ФГБУ «Авиаметтелеком» (бывшее АНО «Метеоагентство Росгидромета»).

Основные функции АМСГ:

- наблюдения за метеорологическими явлениями;
- разработка и выпуск прогнозов погоды и предупреждений по аэродрому, маршрутам и районам полетов;
- проведение консультаций и предоставление полетной документации экипажам воздушных судов и другим авиационным потребителям, связанным с производством полётов;
- обмен метеорологической информацией с другими метеорологическими органами;
- обучение и инструктаж авиационного персонала, привлеченного к производству метеорологических наблюдений на вертолётных площадках;
- осуществление технического обслуживания метеорологических приборов на аэродроме, организация их ремонта и монтажа;
- контроль работы по передаче метеорологической информации;
- изучение климатических условий обслуживаемого района полётов, составление климатических описаний и разделов «Метеорологическое обеспечение» для инструкции по производству полетов на аэродроме [4].

Существуют АМСГ четырёх разрядов:

- Первый – при круглосуточной работе аэродрома, в международных аэропортах; численность штата около 20 человек (из них 1 начальник, 8 техников-метеорологов (метеонаблюдателей), 2 инженера по эксплуатации гидрометеорологических приборов, оборудования и систем).
- Второй – при круглосуточной работе аэродрома, во внутрироссийских аэропортах; численность штата около 14 человек (из них 1 начальник, 5 синоптиков и 5 техников-метеорологов, 1 инженер по эксплуатации гидрометеорологических приборов, оборудования и систем).
- Третий – при некруглосуточной работе аэродрома (по регламенту); численность штата около 9 человек (из них 1 начальник, 3 синоптика и 4 техника-метеоролога, 1 инженера по эксплуатации гидрометеорологических приборов, оборудования и систем).
- Четвёртый – АМСГ без синоптической группы (получает прогнозы погоды от другой АМСГ); численность штата 5 человек (из них 1 начальник и 4 техника-метеоролога) [7].

На территории аэропорта была расположена стандартная метеорологическая станция 4 разряда, на которой производились все измерения метеорологических элементов, т. е. наблюдения за физическими процессами и явлениями, происходящими в атмосфере. Измерения производились по приборам, установленным на метеорологической площадке, а также отдельные измерения – по приборам, установленным в служебном помещении станции.

Наблюдения производились в синоптические сроки (00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, 21 UTC), определяемые по московскому декретному времени, но в дневное время, при наличии воздушных судов измерения производились каждые 30 мин, а также при возникновении опасного явления, производились учащенные наблюдения (период возникновения и прекращения опасных явлений). В синоптические сроки измеряются дальность видимости (наблюдения производятся визуально), количество, форма и высота нижней границы облаков (с помощью прибора РВО – регистратор высоты облачности), атмосферное давление (при помощи барометра), направление и скорость ветра (автоматический датчик М-63), температура и влажность воздуха (с помощью термометра и гигрометра), измерения осадков производились осадкомером конструкции Третьякова. В зимнее время года при наличии снежного покрова производятся определения плотности снежного покрова [1].

С ноября 2010 г. компания «Сибмост» стала владельцем 100 % акций ОАО «Аэропорт Горно-Алтайск» и вела модернизацию аэропорта. Реконструкция аэропортового комплекса и терминальной инфраструктуры велась в рамках реализации федеральной целевой программы «Развитие транспортной системы России» с 2007 г. Была реконструирована взлетно-посадочная полоса – ее увеличили до 2300 м, установили светосигнальное и навигационное оборудование, создана новая инфраструктура и модернизированы действующие инфраструктурные объекты.

С 01.02.2011 г. АМСГ 4 разряда Горно-Алтайска исключена из состава оперативно-прогностических и наблюдательных подразделений и передана в функции по метеорологическому обеспечению полетов авиации в Республике Алтай, а также Центров управления воздушным движением в ВСФ АНО «Метеоагенство Росгидромета» (Согласно приказу Росгидромета от 27.07.2010 № 234 «О совершенствовании метеорологического обслуживания авиации»).

Значительное расширение возможностей авиации потребовали от метеорологической службы коренной перестройки организационной структуры, методов работы и ее технической базы, так как прежняя организация службы погоды не соответствовала возросшим требованиям [5]. Разнообразие методов и технических средств, применяемых для наблюдения за атмосферой, обусловлено весьма сложным ее строением и громадными размерами, и быстрой изменчивостью ее параметров. Таким образом, чтобы постоянно повышать качество метеорологического обеспечения всех заинтересованных потребителей (авиации, сельского хозяйства и т. д.), для автоматизации измерения метеорологических величин и автоматического формирования метеорологических информации, необходимой при метеорологическом обеспечении было установлено и используется в настоящее время автоматизированная метеорологическая измерительная система (АМИС) [6]. Данное устройство представляет с собой комплексную автоматическую систему получения, обработки, распространения и отображения в реальном времени метеорологических параметров.

Целью данной работы является выявление комплекса неблагоприятных природных явлений на основе анализа данных АМСГ Горно-Алтайск. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: Сбор данных АМСГ; сопоставление времени прохождения атмосферных фронтов и времени проявления неблагоприятных природных явлений; корреляционный анализ двух массивов данных.

Для анализа результатов были привлечены данные из электронного журнала АВ-6, которые регистрировались техническим составом АМСГ за период 2006–2015 гг.

До 2011 г. (до установки более усовершенствованного оборудования АМИС) среднемесячное количество измерений метеорологических параметров в среднем составляло от 300 до 500 единиц, после 2011 г. это число составляло от 2000 до 3000 единиц. Данные цифры свидетельствуют о том, что более частая регистрация метеоинформации позволяет более детально рассматривать природные явления и с большей детальностью подходить к составлению прогноза погоды. Что в значительной степени повышает их оправдываемость.

Таблица 1

Зафиксированные случаи ветра со скоростью 15 м/с и более по данным АМСГ Горно-Алтайск

Год	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Всего замеров	4057	10 474	23 889	23 136	21 399	23 550
Значимых	155	161	1084	621	1108	1218
%	3,80	1,5	4,5	2,7	5,2	5,2

Анализ собранного материала показал, что пока невозможно однозначно говорить о том, что введение новой системы мониторинга позволяет увеличить регистрацию неблагоприятных явлений (табл. 1).

Таблица 2

Количество зафиксированных неблагоприятных явлений

Год	2006	2012	2015
число регистраций	213	1730	1773
Количество значимых регистраций	24	412	206
% значимых	0,11	0,24	0,12

Для исследования взят период наблюдений за 2006–2015 гг. В ходе работы было установлено, что для метеорологического обеспечения авиации в условиях горных аэродромов, наибольшие трудности создаются, в основном, в холодное время года.

Наблюдения за видимостью до 2011 г. техником-наблюдателем метеорологической станции 4 разряда при аэропорте, производились визуально. В дневное время при наличии полетов измерения производились каждые 30 мин, при возникновении опасных явлений производились учащенные наблюдения (т. е. от времени возникновения до окончания ОЯ). В вечернее и ночное время при отсутствии полетов наблюдения за видимостью не производились.

Измерения в тумане в исследуемый период времени проводилось автоматически, с помощью финского оборудования, установленного на аэродроме Горно-Алтайск: трансмиссометрами LT31 и нефелометром FS11.

Выводы

Сильные ветры очень редки летом, причём в августе редко отмечаются ветры более 20 м/с, а в июне, июле более 27 м/с. Из весенних месяцев самым ветреным является апрель. Преобладающими направлениями ветра являются южное и юго-западное, а в тёплый период года увеличивается число случаев северных и северо-восточных ветров.

Взлетно-посадочная полоса аэропортов в основном ориентированы с юго-запада на северо-восток. В течение всего года преобладают ветры с направлением вдоль полос, или под небольшим углом к ней. Боковые ветры, которыми в наших условиях являются северо-западный и юго-восточный, в основном, в течение года имеют скорости менее 12 м/с, лишь в отдельные месяцы скорость ветра может превышать 12 м/с, но с очень малой вероятностью.

Сильные ветры часто ограничивают производство полётов в предгорных районах, особенно при выполнении полётов на Краснощёково, Курью, Петропавловское, Быстрый Исток, а ветер силы 4–6 м/с вызывает умеренную и сильную болтанку в районе Чарышского.

Сильная болтанка даже при относительно слабых ветрах отмечается с подветренной стороны горных хребтов с вершинами 2000 м и более. Это характерно для полётов в Джезатор, Усть-Улаган, Кош-Агач, Балыкчу, Онгудай. Для Кош-Агача характерно кратковременное резкое усиление ветра при прохождении холодных фронтов, особенно в переходный период года.

Усиление ветра наблюдается при трёх основных типах синоптических процессов юго-западном, северо-западном и западном направлениях.

Как правило, сильные и штормовые ветры у земли обусловлены углубляющимися циклонами или прохождением фронтальных разделов. При юго-западных процессах сильный ветер чаще всего наблюдается при прохождении холодных фронтов, реже в тылу ложбины, и ещё реже при прохождении тёплых фронтов. При северо-западных процессах штормовые ветры наблюдаются редко. Сильные ветры западных циклонов в 50 % случаев наблюдаются во время прохождения системы фронтов различного типа.

Вследствие того, что на пути циклонов оказываются горные массивы Алтая и Саян, по какой бы траектории они не перемещались, при выходе на южные и центральные районы Западной Сибири они поворачивают на северо-восток, т. е. в обход горных систем. А это означает, что практически в большинстве случаев центры всех категорий циклонов перемещаются по траекториям, проходящим заметно севернее исследуемого района и, следовательно, господствующие ветра здесь преобладают юго-западные и южные. Как правило при этих направлениях чаще наблюдаются большие скорости ветра, поскольку орография сказывается не только на направлении изобар, но и на интенсивности барического поля (горы способствуют заметному к увеличению барических градиентов в передней и южной частях циклона).

Фронты, связанные с этими циклонами довольно быстро проходят по равнине и тормозятся горными хребтами на юге края. Поэтому такие явления как низкая облачность, боковые ветра, ухудшение видимости из-за туманов и снегопадов более продолжительное время (в течении двух и более суток) отмечается, на южных трассах в районе Чарышского, Солонешного, Змеиногорска, Курьи, Краснощеково).

При ограниченном поступлении фактической погоды синоптик не всегда может учесть локальные ухудшения, возникновение опасных явлений по трассам, поэтому единственной рекомендацией командиру при встрече таких явлений в полете, то есть при встрече условий ниже минимума может являться только прекращение полета посадка на запасном или возвращение на аэродром вылета).

Список литературы

1. Неблагоприятные природные явления на примере данных ГМС «Аэропорт» В Республике Алтай / В. В. Анисимова [и др.] // Алтай – Россия: через века в будущее : материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, посвящ. 260-летию добровольного вхождения алтайского народа в состав Российского государства и 25-летию образования Республики Алтай. (9–12 июня 2016 г.). Горно-Алтайск : РИО ГАГУ, 2016. Т. 2. С. 39–42.
2. Опасные гидрометеорологические явления, вызываемые ветром, и их влияние на экономику России / А. И. Бедрицкий [и др.] // Метеорология и гидрология. 2001. № 2. 216 с.
3. Владимиров А. М. Опасные природные явления. СПб. : Изд-во РГТМУ, 2005. 120 с.
4. Разуваев В. Н. Из истории климатических исследований во ВНИИГМИ-МЦД [Электронный ресурс]. URL: http://meteo.ru/publications/125-trudy-vniigmi/trudy-vniigmi-mtsd-vypusk-177-2014-g/512-iz-istorii-klimaticheskikh-issledovanij-vo-vniigmi-mtsd.
5. Карты экологически неблагоприятных и опасных природных процессов [Электронный ресурс]. URL: http://www.polnaja-jenciklopedija.ru/geografiya/karty-ekologicheski-neblagopriyatnyh-i-opasnyh-prirodnyh-protsessov.html.
6. The distribution of cloud cover over the former USSR as derived from the RIHMI-WDC 223-station 6- and 3-hourly meteorological database / D. P. Kaiser, R. S. Vose, T. R. Karl, V. N. Razuvaev // Proceedings of the Ninth Conference on Applied Climatology. American Meteorological Society. Dallas. Texas, 1999. P. 81–86.
7. http://www.gamc.ru/sprav.htm.

УДК 551.515(571.53)

Опасные явления погоды для авиации на территории Иркутской области

И. В. Шахаев (shahaev2010@mail.ru), А. С. Щеблыкин (foxdesert@mail.ru)

Иркутский государственный университет, Иркутск

Аннотация. Проанализированы сезонные особенности и многолетние изменения числа дней с опасными явлениями для авиации в районе аэродромов Иркутск, Братск, Нижнеудинск и Киренск за 1962–2016 гг. Установлено, что современные тенденции изменения климата сопровождаются уменьшением числа дней с туманом, метелями и гололедно-изморозевыми явлениями, особенно в зимние месяцы на фоне повышения средних температур. Обращает внимание увеличение числа дней с грозой – одним из наиболее опасных явлений погоды.

Ключевые слова: авиация, туманы, грозы, метели, обледенение.

Введение

В конце XX – начале XXI в. мировое научное сообщество пришло практически к единому мнению о том, что на Земле происходят значимые климатические изменения. По данным Росгидромета на территории России значительно возросло количество опасных явлений погоды.

Например, по данным Всемирной метеорологической организации установлен научно обоснованный факт воздействий повышенных приземных температур на авиацию. Максимальные значения повышенных температур в сочетании с повышенными значениями удельной влажности в высокорасположенных аэропортах или аэропортах с короткими взлетно-посадочными полосами ограничивают грузоподъемность или потребление топлива. Благодаря повышенным температурам они также приводят к распространению вверх верхней границы слоев обледенения.

Среди опасных явлений погоды наиболее негативное влияние на деятельность аэродромных служб оказывают сильный снег, низкая видимость, замерзающий дождь, сильный ветер, грозы и связанные с ними турбулентность и оледенение воздушных судов [1–3].

Методика исследования

Территория Иркутской области – сложный в орографическом отношении регион, где влияние неоднородного рельефа сказывается в различиях климатического режима. Условия взлета и посадки воздушных судов здесь существенно осложняют туманы, особенно на аэродромах, расположенных вблизи долин крупных рек и водохранилищ. В работе исследован многолетний режим опасных явлений погоды для авиации на аэродромах Иркутск, Братск, Нижнеудинск и Киренск по данным метеорологических станций за 55-летний период с 1962 по 2016 г.

Обсуждение результатов

На рисунке 1 показаны гистограммы средних значений числа дней с туманом на исследуемых аэродромах. Видно, что на аэродромах Нижнеудинск и Киренск наибольшее число дней с туманом отмечается в период с июня по сентябрь. На аэродромах Иркутск и Братск за счет влияния водохранилищ, наряду с летним, выделяется зимний максимум при образовании туманов испарения и выносных туманов. В целом наиболее часто в течение года туманы отмечаются на аэродроме Киренск, в среднем 43 дня и Иркутск (39 дней).

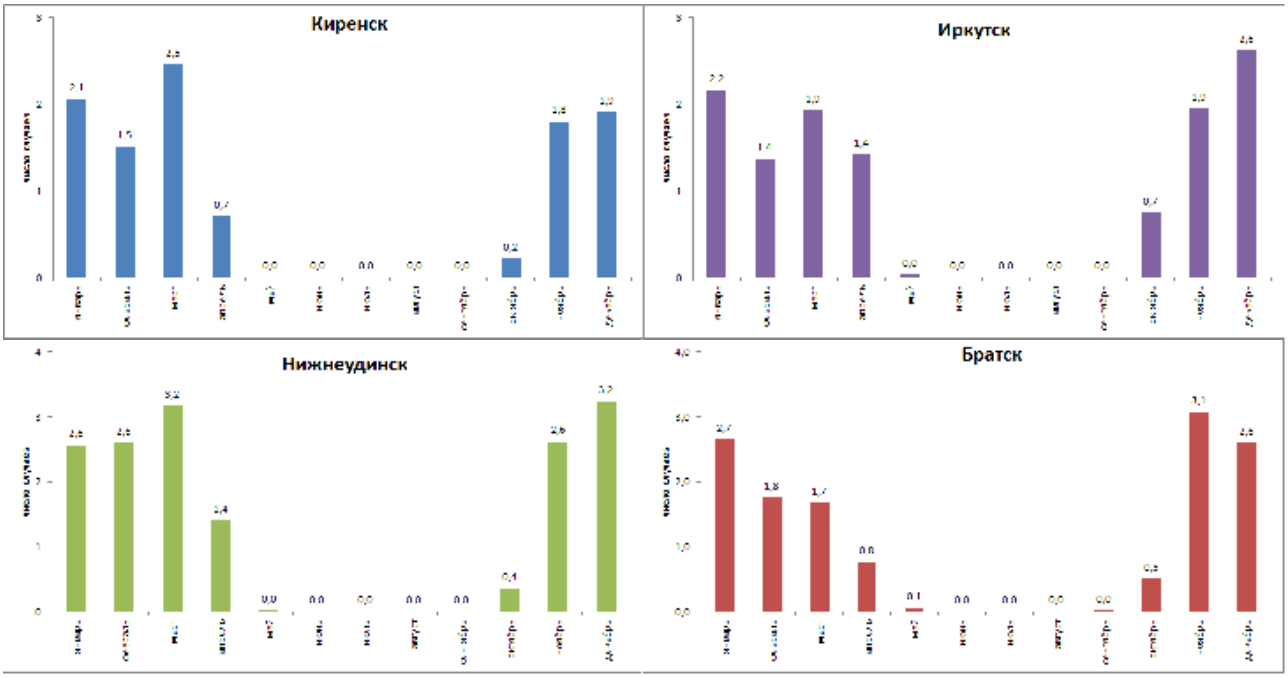


Рис. 1. Годовое распределение числа дней с туманом в 1962–2016 гг.

Более интересны многолетние тенденции изменения числа дней с туманом. В период с 1962 г. по настоящее время на всех аэродромах число дней с туманом уменьшается (рис. 2). Причем на аэродромах Иркутск и Киренск наиболее выражено уменьшение числа зимних туманов в основном за счет уменьшения количества туманов охлаждения в условиях роста зимних температур. В Нижнеудинске хорошо выражено уменьшение туманов в летние месяцы, а в Братске туманов испарения осенью.

Известно, что полеты в грозовых облаках категорически запрещены. Грозы на аэродромах отмечаются с мая по сентябрь, в единичном случае бывают в апреле, в последние годы даже отмечались редкие случаи с зимней грозой. Максимум гроз на всех аэродромах отмечается в июле при максимальном прогреве подстилающей поверхности, что благоприятно для развития термической конвекции. В целом чаще всего грозы отмечаются на аэродромах Нижнеудинск и Иркутск. Необходимо отметить, что в последние годы отмечается увеличение числа дней с грозой в основном в июне и июле (рис. 3).

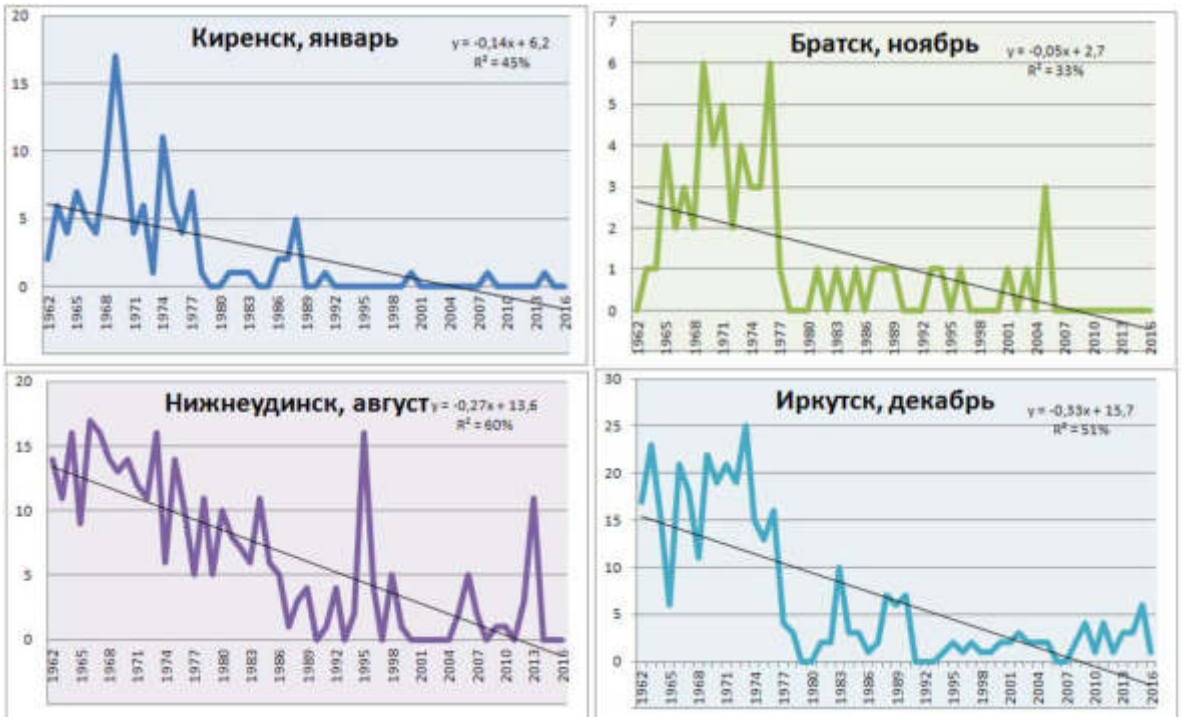


Рис. 2. Изменение числа дней с туманом в 1962–2016 гг.

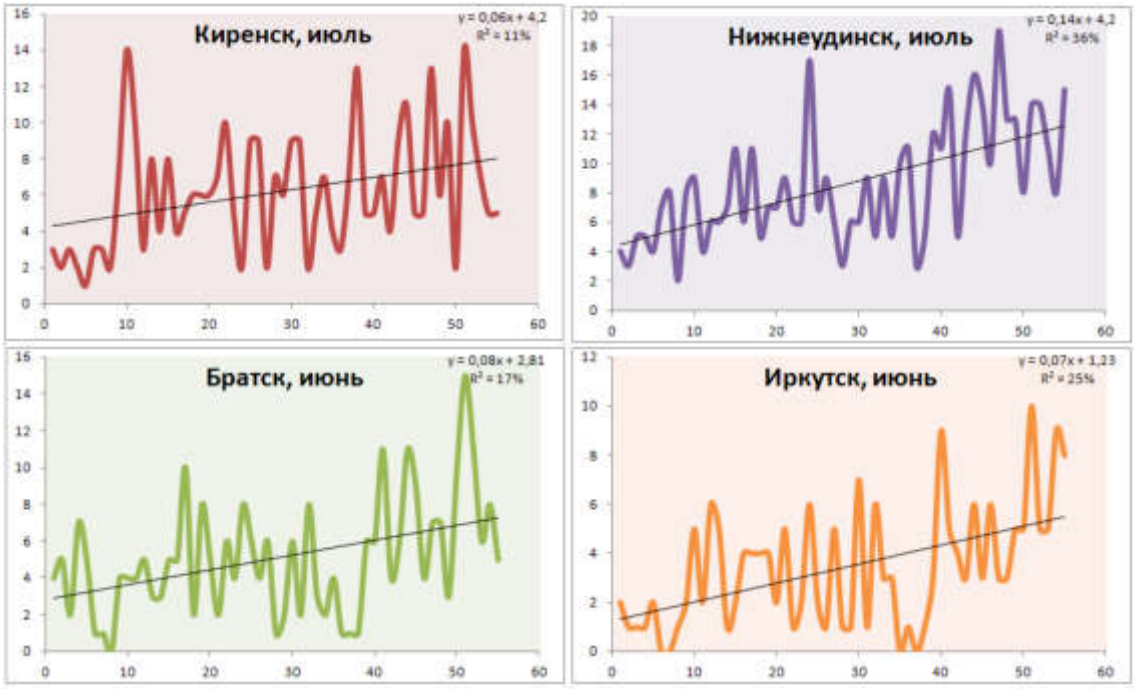


Рис. 3. Изменение числа дней с грозой в 1962–2016 гг.

Не меньшую опасность для авиации представляют гололёдно-изморозевые явления. Такие условия на аэродроме Иркутск наблюдаются с марта по сентябрь с максимумом в декабре, в Нижнеудинске и Братске с апреля по октябрь с максимумом в Нижнеудинске осенью, в Братске зимой, а в Киренске с мая по сентябрь с максимумом в марте. Наибольшая вероятность гололёдно-изморозевых явлений отмечается в Киренске и Иркутске. На фоне повышения температур преобладает в основном тенденция уменьшения числа дней с гололедно-изморозевыми явлениями на всех аэродромах, кроме октября в Нижнеудинске и декабря в Братске, где преобладает незначительная тенденция увеличения числа дней с указанными явлениями погоды.

Метели значительно ухудшают видимость на аэродромах и часто сопровождаются ветром более 15 м/с. Среднее число дней с метелями варьирует от 11 на аэродроме Киренск до 16 на аэродроме Братск. На всех аэродромах число дней с метелями уменьшается, особенно в зимние месяцы на аэродромах Иркутск и Киренск и в переходные сезоны на аэродромах Братск и Нижнеудинск.

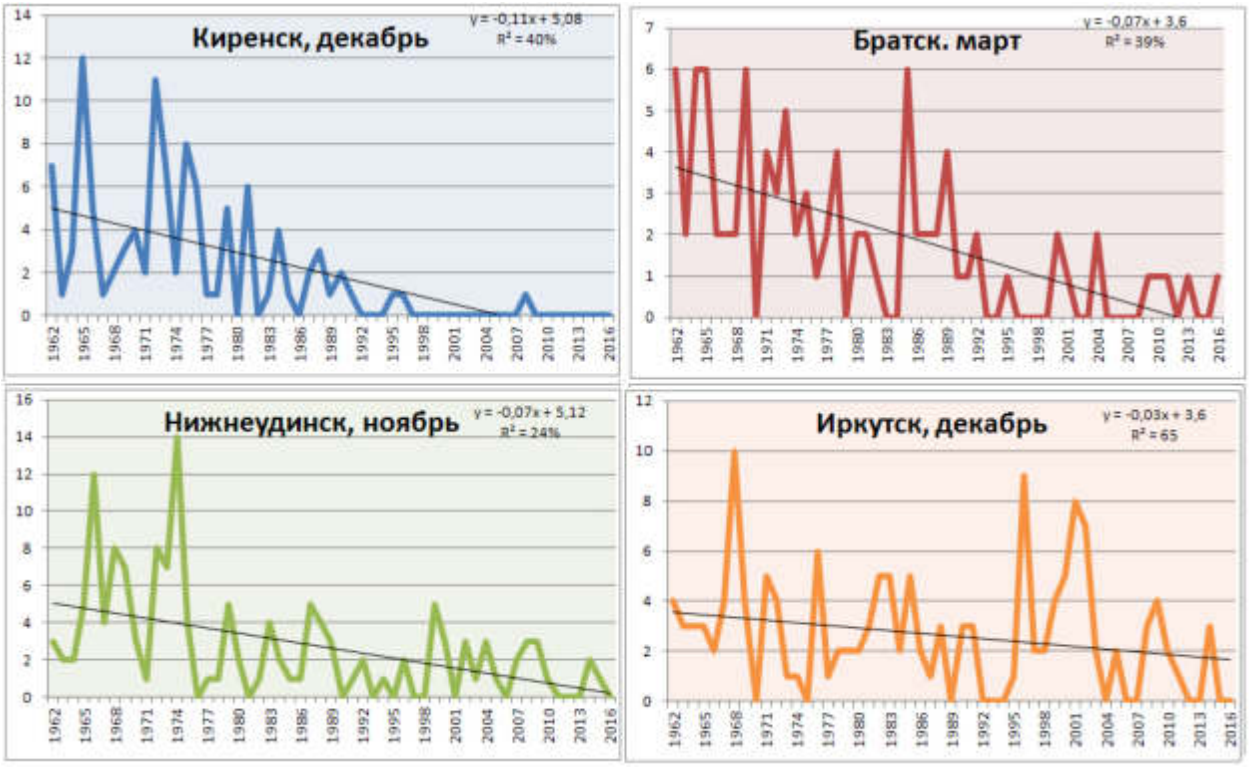


Рис. 4. Изменение числа дней с метелями в 1962–2016 гг.

Выводы

Современные тенденции изменений климата сопровождаются уменьшением числа дней с туманом, метелями и гололёдно-изморозевыми явлениями и незначительным увеличением числа дней с грозой на аэродромах Иркутской области в 1962–2016 гг.

В качестве метеорологических предикторов наблюдаемых тенденций можно рассматривать увеличение температур, которое в зимние месяцы на фоне ослабления ветра сопровождается уменьшением числа дней с туманом охлаждения, гололёдно-изморозевых явлений и метелей, а летом на фоне роста летних температур может возрастать конвективная неустойчивость и число дней с грозой.

Аэродромным службам движения следует учитывать, что вероятность ухудшения видимости в тумане наиболее вероятна зимой в Киренске, летом и зимой в Иркутске, ухудшение видимости в метелях в марте в Киренске, обледенения в Киренске с ноября по март, в Иркутске в декабре и январе. Грозы наиболее вероятны в июле, особенно на аэродроме Нижнеудинск.

В целом, современные тенденции изменения климата на территории Иркутской области с точки зрения рассмотренных опасных явлений погоды являются благоприятными в холодный период года и менее благоприятными летом.

Список литературы

1. Баранов А. М., Солонин С. В. Авиационная метеорология. Л. : Гидрометеоиздат, 1981. 384 с.

2. Наставление по метеорологическому обеспечению гражданской авиации России (НМО ГА-95). Обнинск, 1995. 91 с.

3. Руководство по прогнозированию метеорологических условий для авиации / под ред.: К. Г. Абрамович, А. А. Васильева. Л. : Гидрометеоиздат, 1985. 304 с.

Секция

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ АТМОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ

УДК 551.513(571.1)

Исследование долговременных изменений и особенностей выпадения атмосферных осадков в бассейне р. Селенги в середине летнего сезона (июль)

Антохина О. Ю. (olgayumarchenko@gmail.com), Антохин П. Н. (apn@iao.ru)

Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН, Томск

Аннотация. В 1996 г. начался затяжной маловодный период в бассейне оз. Байкал, который длится по настоящее время. Для понимания причин происходящих изменений в работе сделаны оценки изменчивости атмосферных осадков в период с максимальными климатическими изменениями (июль). Исследован интервал с 1979 по 2017 г. В период 1996–2017 гг. обнаружено трендовое снижение осадков, одним из самых драматических эпизодов является период 2013–2017 гг., так как в этот период количество осадков в течение всего периода было ниже норы. В целом из 39 исследуемых лет, только 8 характеризовались осадками выше нормы, для 17 лет их количество было ниже нормы, и в 14 – около нормы.

Ключевые слова: река Селенга, бассейн озера Байкал, атмосферные осадки, аномалии, реанализ.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования формирования стока и осадков в бассейне Селенги увеличивается с ростом водохозяйственных и экологических проблем, порожденных начавшимся в 1996 г. затяжным маловодьем в бассейне озера Байкал [3; 8]. Река Селенга является ключевым источником питания озера Байкал. Ее бассейн составляет 83,4 % от всей водосборной площади озера [1] и она обеспечивает в среднем 50 % притока в Байкал [1]. Бассейн реки расположен на границе аридного пояса Азии, вдали от основных источников влаги. Снегозапасы в питании реки менее существенны, так как в зимний период на территории бассейна выпадает крайне мало осадков. Около 70 % годовых сумм осадков приходится на июнь-август и в каждый из этих месяцев может выпадать до 90–100 мм [5]. Основной сток реки формируется с июня по август [3; 8]. В этот же период наблюдаются и максимальные расходы воды, обусловленные дождевыми паводками.

Исследования [8] показали, что наиболее существенные изменения, связанные с осадками (уменьшение) и температурой (увеличения) происходят в середине летнего сезона. Оказалось, что на исследуемой территории эти характеристики тесно связаны, и их изменения происходят синхронно. Кроме того, есть основания полагать, что процессы, отвечающие за выпадение атмосферных осадков в середине лета, отличаются от процессов в начале и конце сезона. Основной особенностью формирования осадков в июле, начале августа является формирования фронта, разделяющего воздушные массы летнего муссона Восточной Азии и умеренных широт [5; 8]. Разумеется, нельзя утверждать, что подобные процессы совсем не могут развиваться чуть ранее или позднее, но их повторяемость максимальна именно в середине летнего сезона.

Для того чтобы понять причину изменчивости осадков в этот период необходимо в первую очередь провести их всесторонний анализ: ранжировать годы по величине отклонения от среднемноголетней нормы, составить представление о пространственной локализации аномалии осадков в разные периоды, а также о динамике выпадения осадков на станциях, расположенных в бассейне Селенги. На основании этих комплексных сведений в дальнейшем можно исследовать механизмы, отвечающие за выпадение осадков. Проведение этого анализа для июля и составляет основную цель нашей работы. Кроме того, последние опубликованные графики долговременной изменчивости суммарного количества осадков в бассейне заканчивались 2010 г [5]. Графики осадков, полученные в этой работе, были построены для всего летнего периода (июнь-август) на основании довольно грубого приближения (осреднение проводилось в квадрате, не совсем точно совпадающем с областью бассейна Селенги). Поэтому возникла необходимость пересмотра изменчивости количества осадков, выпадающих в бассейне в июле.

Данные и методика

Мы используем данные архива атмосферных осадков GPCC (The Global Precipitation Climatology Centre) [24]. Использование этих данных обусловлено рядом объективных факторов. В первую очередь необходимо отметить, что эти данные, специально разработанные для исследований в области гидрологии, не являются продуктом моделирования в чистом виде, они основываются на анализе станционных наблюдений, которые тщательно собираются и проверяются на наличие ошибок с помощью различных тестов. Кроме того, они уже хорошо зарекомендовали себя в исследованиях причин уменьшения стока р. Селенги, продемонстрировав высокие коэффициенты связи с рядами гидрологических данных [8]. Мы использовали продукт GPCC Full Data Reanalysis Version 7 для периода 1979–2013 (а также для расчёта среднего 1950–1990), а также продукт GPCC Monitoring Product Version 5 за период 2014–2017 гг. Оба продукта представляют данные в узлах регулярной сетки 1 градус по широте и долготе с месячным разрешением. Основное назначение описанных продуктов в нашей работе это анализ суммарного количества осадков в бассейне Селенги, а также анализ пространственной локализации аномалий осадков за каждый год. На основании данных GPCC получены: изменчивость суммарного количества осадков с 1979 по 2017 г. выпадающих на территории Селенги (выполнено суммирование по контуру бассейна), а также распределения аномалий осадков для каждого июля в этот период. Выбор периода для исследования продиктован в первую очередь тем, что с 1979 г. имеются наиболее надежные метеоданные реанализа необходимые для событийного анализа случаев выпадения осадков.

К исследованию также привлечены ряды наблюдений за количеством осадков, выпадающих на метеостанциях, расположенных в бассейне р. Селенги [2] (российская часть бассейна) (рис. 1).

Всего были отобрано 10 станций: Сосново-Озерское, Чита, Улан-Удэ, Иволгинск, Хилок, Цакир, Кяхта, Красный Чикой, Кыра, Мангут. Среди них не все расположены в самом бассейне некоторые лишь в непосредственной близости, особенно важны для нас были станции, расположенные у восточных границ бассейна.

Суточные данные необходимы для того, чтобы установить временные промежутки, в которые выпадали осадки. На основании этих данных в работе анализируются: периоды, рассматриваемые на основе GPCC; а также выбраны отдельные периоды, когда количество осадков, выпадающих непрерывно на станциях в бассейне, составило около 70 % месячной нормы. В целом мы ожидаем, что эти периоды должны выпадать на месяцы, когда по данным GPCC отмечено превышение среднемесячного количества осадков. Но это могут оказаться и периоды со среднемесячными осадками близкими к норме и даже чуть ниже нормы. И даже в этих случаях они будут вызывать повышенный интерес.



Рис. 1. Бассейн р. Селенги (синяя заливка) и расположение метеорологических станций

Результаты

На рисунке 1 приведена изменчивость аномалий суммарного количества осадков в бассейне Селенги, рассчитанных по формуле.

$$P_{anom} = \frac{P_i}{\bar{P}} - 1,$$

где P_i осадки в текущем году, средние осадки за 1950–1990 гг.

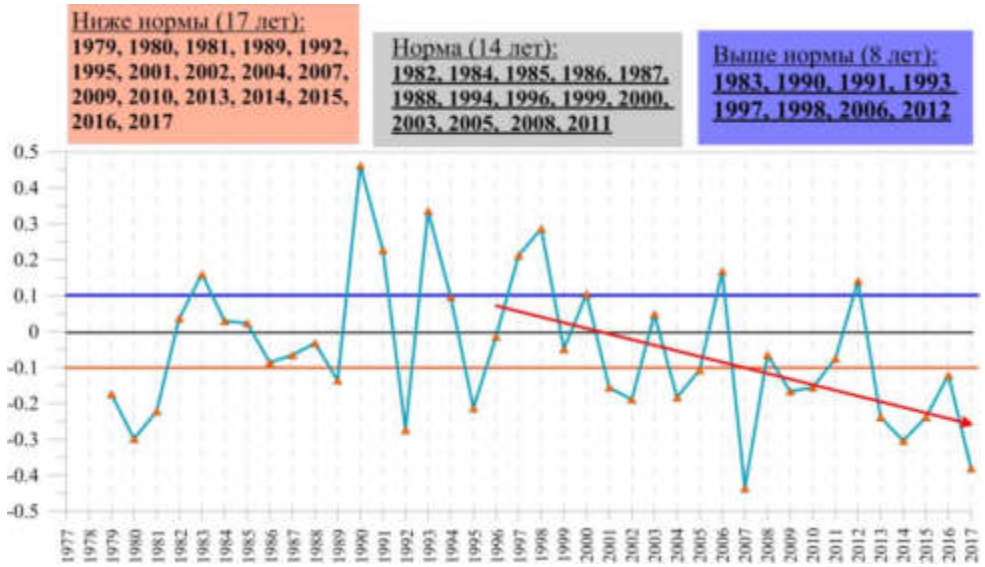


Рис. 1. Изменчивость аномалий количества осадков в бассейне Селенги (голубая линия), синяя линия – порог аномально высоких осадков, оранжевая – аномально низких. Красная стрела показывает линейную аппроксимацию периода 1996–2017 гг.

Хорошо видно трендовую составляющую в период современного маловодья 1996–2017 гг. (красная линия). На основании заданных порогов (оранжевая и синяя линии) мы выбрали годы со средним количеством осадков, а также годы, когда их количество превышало норму, и было ниже нормы. Эти данные отражены в легенде к графику. В целом период 1979–2017 гг. не был благоприятным в плане формирования водности. Два маловодья (современное и предыдущее: 1979–1982), а также высокая амплитуда колебаний в многоводный период 1985–1995 гг. находят свое отражение в графике колебания осадков в июле. Причем в

плане выпадения осадков в июле максимально сложным был период 2013–2017 гг. – пять лет подряд количество осадков было ниже нормы. Из 39 рассматриваемых лет только 8 были с осадками выше нормы. Эти данные в очередной раз подтверждают первостепенную роль естественных факторов в формировании маловодного периода 1996–2017 гг. На рисунке 3 приведены суточные данные по изменчивости осадков в исследуемых группах (выше (В) и ниже нормы (НН), норма (Н)). Для каждой группы графики приведены следующим образом. Для групп ВН и НН: от самого экстремального периода к самому минимальному, для группы Н – от минимального до максимального значения.

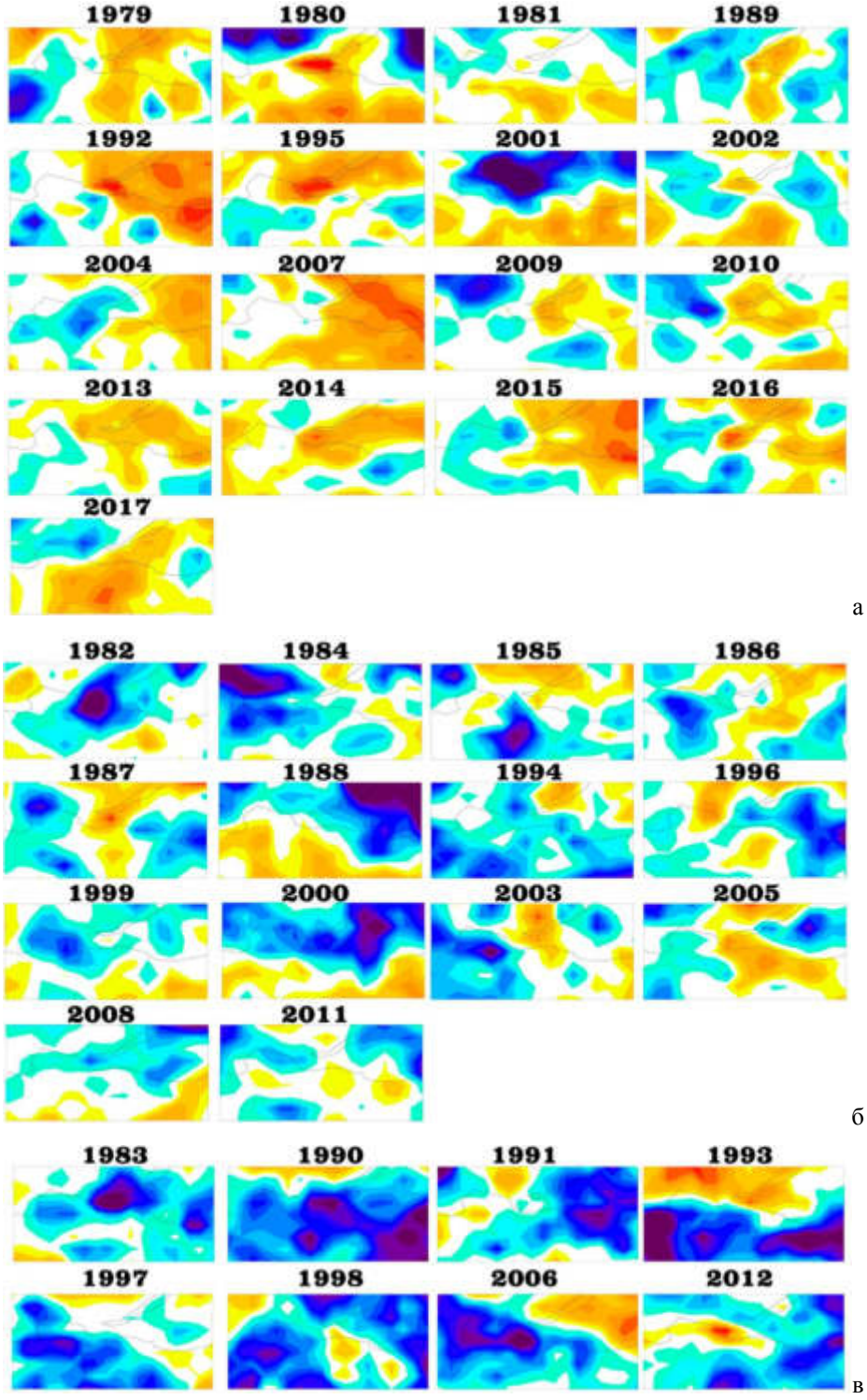
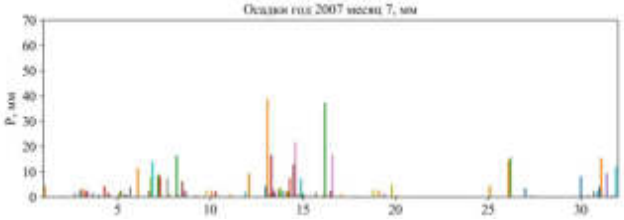
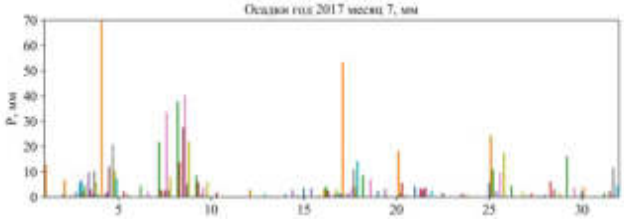


Рис. 2. Аномалии осадков в районе 46–54 с. ш., 96–113 в. д.
а – ниже нормы, б – норма, в – выше нормы
Ниже нормы (НН)

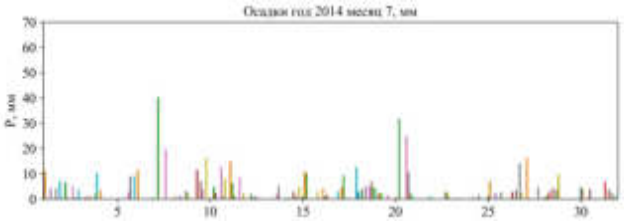
2007



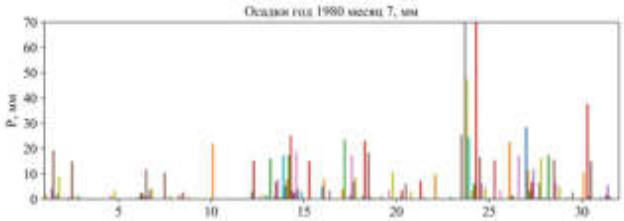
2017



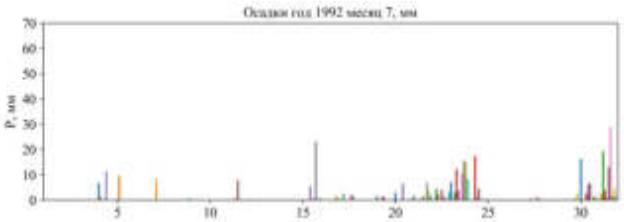
2014



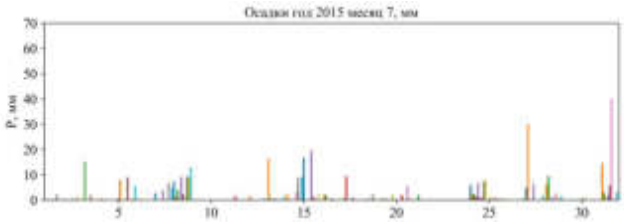
1980



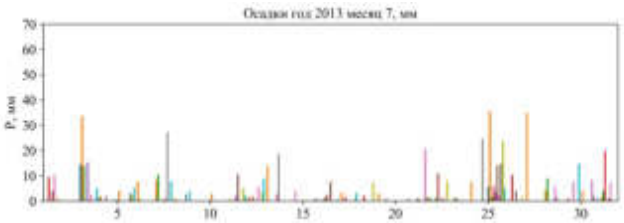
1992



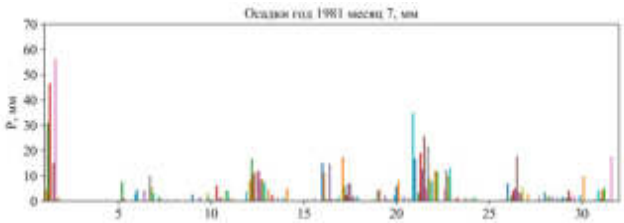
2015



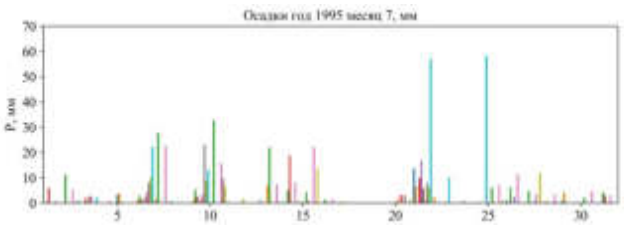
2013



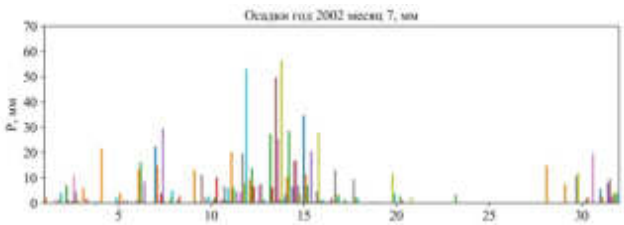
1981



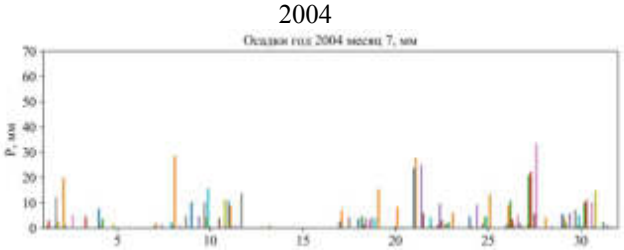
1995



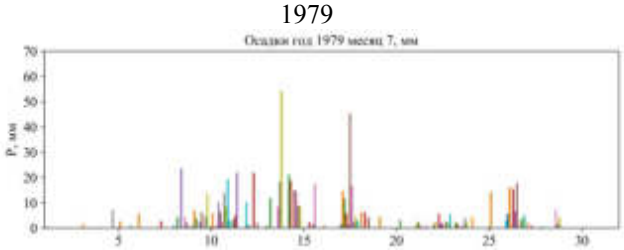
2002



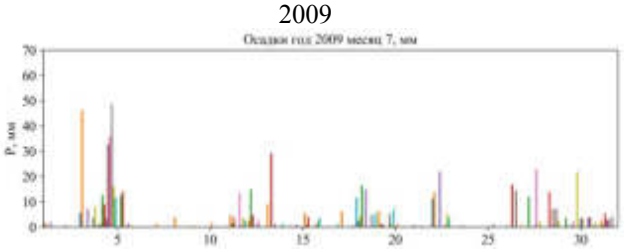
2004



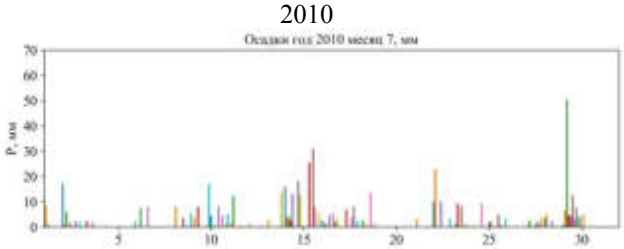
1979



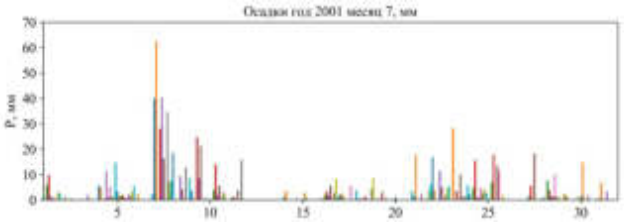
2009



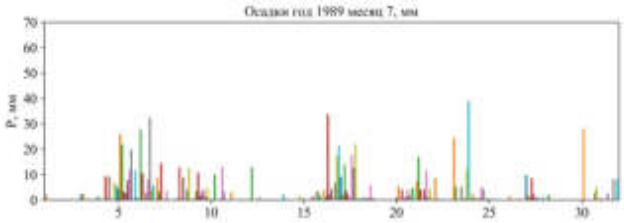
2010



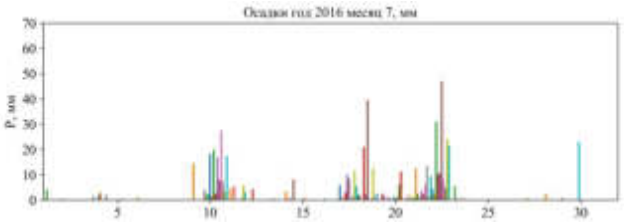
2001



1989

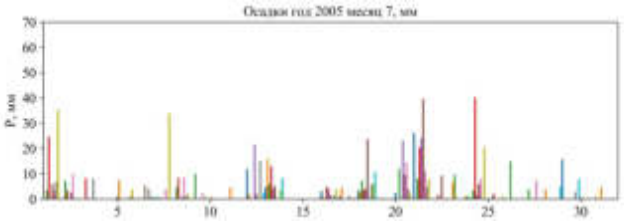


2016

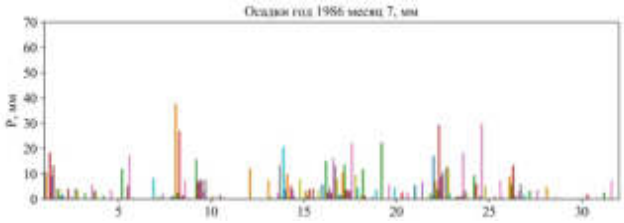


Норма (Н)

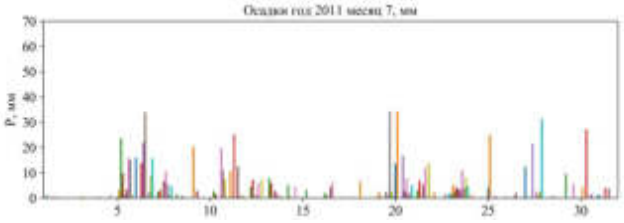
2005



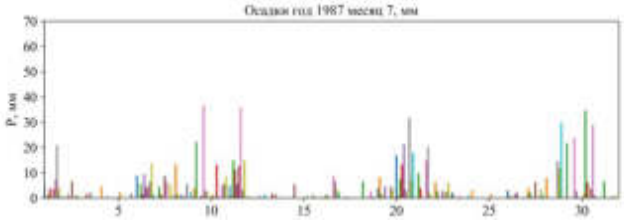
1986



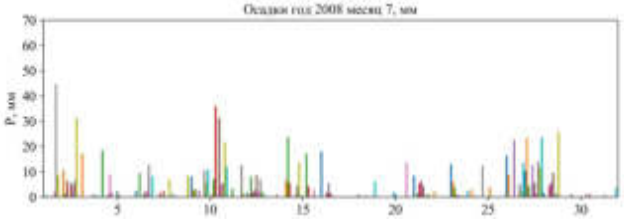
2011



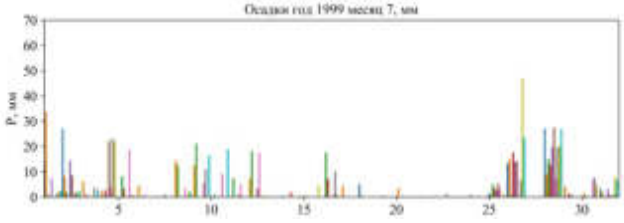
1987



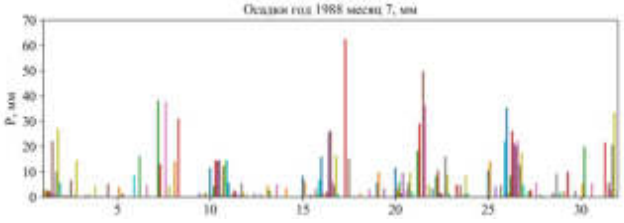
2008



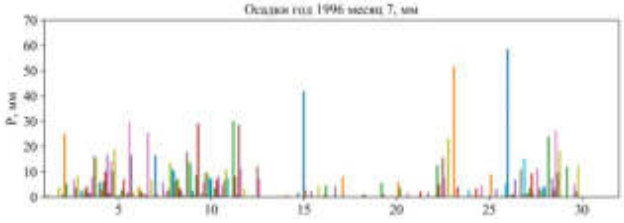
1999



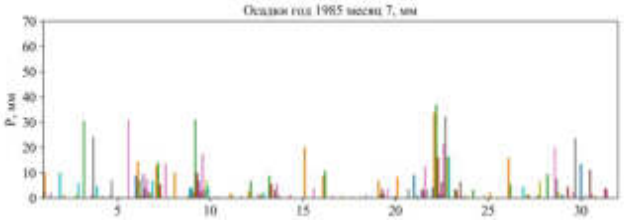
1988



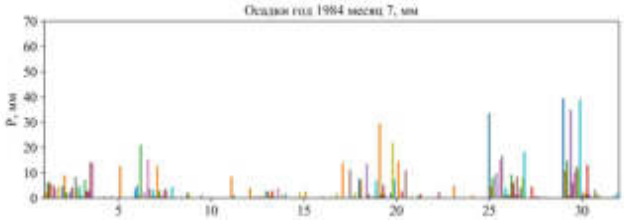
1996



1985



1984



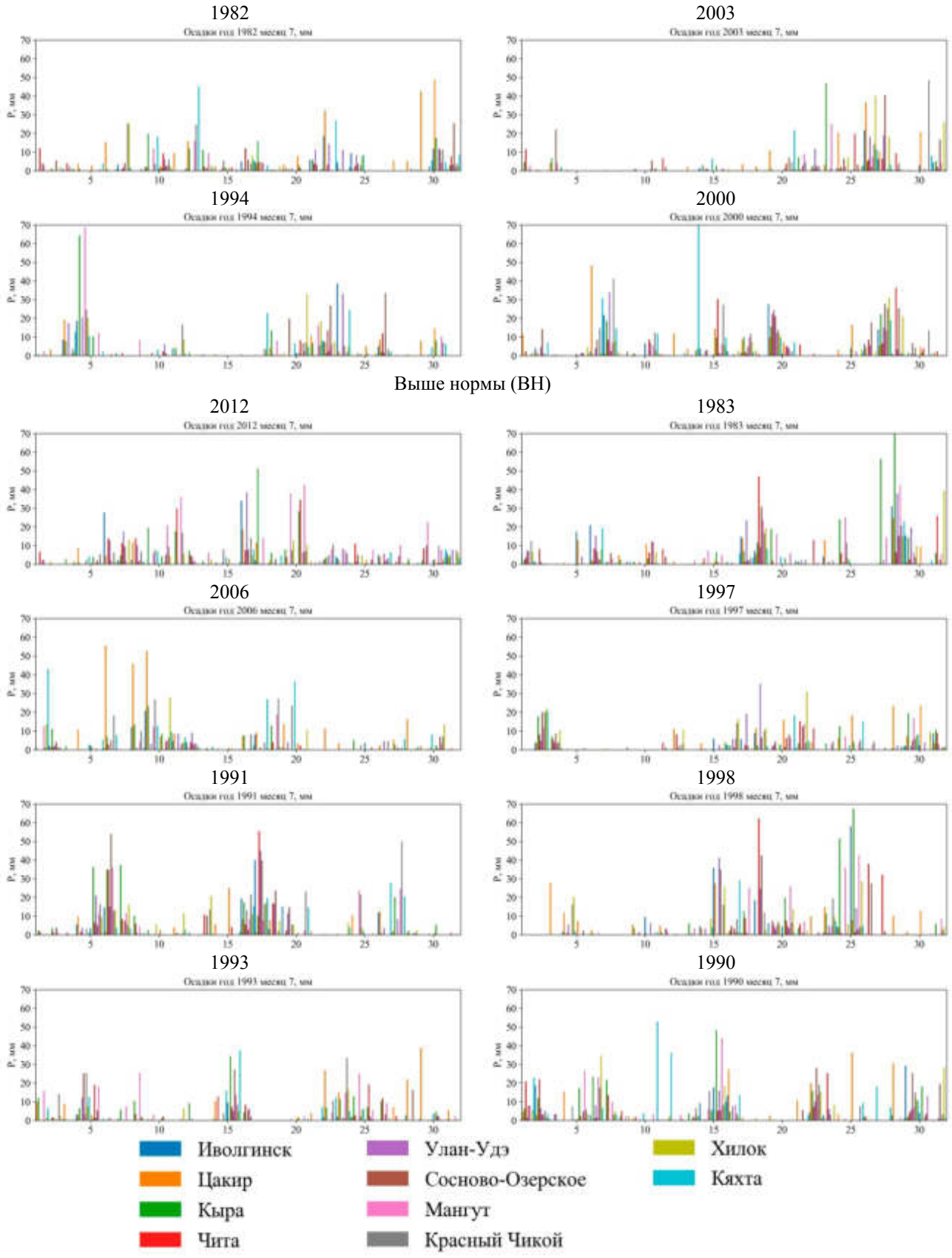


Рис. 3. Динамика выпадения осадков на станциях, расположенных на российской части бассейна Селенги

Приведенные иллюстрации не отражают в полной мере ситуацию с осадками, складывающуюся в каждый июль, так как используемые станции не всегда попадают в область максимального выпадения осадков. Но они позволяют ориентироваться в выборе периодов с максимальным количеством осадков. На основе данных приведенных на рис. 3 были выбраны периоды, характеризующиеся выпадением большого количества осадков в течение короткого промежутка времени.

В таблице 1 приведены периоды, когда на станциях в бассейне выпадали наиболее интенсивные осадки.

Таблица 1

Периоды (июль), в которые на станциях выпадало более 70 % месячной нормы осадков за короткий промежуток времени (около 5 дней)

№	Период	Станции	№	Период	Станции
1	1982|5–17 Н	Кяхта 84 мм Красный Чикой (схоже)	10	1997|14–19 15–25 Н	Улан-Удэ Хилок
2	1983|27–30 ВН	Кыра 163 мм, Мангут, Улан-Удэ (схоже)	11	1998|14–25 19–26 ВН	Улан-Удэ, Красный Чикой, Хилок, Сосново-Озерское Кыра, Мангут, Чита
3	1987|6–12 Н	Мангут 89 мм	12	2000|6–17 25–30 НН	Кяхта, Красный Чикой Сосново-Озерское Чита
4	1988|15–23 Н	Красный Чикой (90 мм), Сосново-Озерское Хилок, Улан-Удэ,	13	2001|3–11	Улан-Удэ Красный Чикой
5	1990|5–16 ВН	Хилок, Мангут	14	2002|9–19 НН	Кяхта, Хилок, Красный Чикой, Кыра, Сосново-Озерское
6	1991|5–20 16–19 ВН	Кыра (123 мм), Красный Чикой, Хилок Улан-Удэ (80 мм), Сосново-Озерское (80 мм), Чита	15	2003|20–28 Н	Хилок, Сосново-Озерское
7	1993|1–12, 15, 23–26 ВН	Кыра, Мангут	16	2006|1–20 ВН	Кяхта Красный Чикой
8	1994|19–27 3–5 Н	Кяхта, Хилок, Сосново-Озерское Кыра 80 мм Мангут	17	2012|весь месяц, max 10–11, 17–20 ВН	Кыра, Мангут
9	1996|2–12 Н	Красный Чикой, Хилок, Чита, Мангут			

Всего отмечено 17 летних периодов с экстремально интенсивными осадками в течение ограниченного промежутка времени. Половина из них (8 периодов) характеризовались среднемесячными аномалиями осадков выше нормы. Для 7 лет были характерны среднемесячные осадки близкие к норме, а для 2 случаев осадки ниже нормы. Представленные периоды представляют большой интерес с точки зрения установления механизмов участвующих в формировании экстремальных ливней на территории бассейна.

Заключение

В 1996 г. начался затяжной маловодный период в бассейне озера Байкал, который длится по настоящее время. Для понимания причин происходящих изменений в работе сделаны оценки изменчивости атмосферных осадков в период с максимальными климатическими изменениями (июль). В качестве данных использованы инструментальные наблюдения на станциях, расположенных в бассейне Селенги (российская часть), а также данные реанализа осадков из базы GPCC. Исследован интервал с 1979 по 2017 г. В период 1996–2017 гг. обнаружено трендовое снижение осадков, одним из самых драматических эпизодов является период 2013–2017 гг., так как в этот период количество осадков в течение всего периода было ниже норы. В целом из 39 исследуемых лет, только 8 характеризовались осадками выше

нормы, для 17 лет их количество было ниже нормы, и в 14 – около нормы. Эти данные подтверждают, что основной причиной низкого притока реки Селенги является снижение атмосферных осадков. Выполненный анализ суточной динамики осадков на станциях в бассейне Селенги позволяет в дальнейшем выбирать периоды для исследования формирования осадкообразующих процессов над бассейном реки.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда проект № 17-77-10035.

Авторы выражают благодарность Осипчук Е. Н. за подготовку данных о границах водосборного бассейна и речной сети р. Селенга.

Список литературы

1. Афанасьев А. Н. Водные ресурсы и водный баланс бассейна оз. Байкал. Новосибирск : Наука, 1976. 238 с.

2. Булыгина О. Н., Разуваев В. Н., Александрова Т. М. Описание массива суточной температуры воздуха и количества осадков на метеорологических станциях России и бывшего СССР (TTTR) [Электронный ресурс]. URL:http://aisori.meteo.ru/ClimateR.

3. Возможные изменения гидрологических характеристик в связи с регулированием стока в бассейне реки Селенги / И. В. Бычков, В. М. Никитин, Н. В. Абасов, Т. В. Бережных, И. И. Максимова, Е. Н. Осипчук // География и природные ресурсы. 2017. № 3. С. 75–86.

4. Ильичева Е. А., Корытный Л. М., Павлов М. В. Русловая сеть дельты р. Селенги на современном этапе // Вестн. Том. гос. ун-та. 2014. № 380. С. 190–194.

5. Марченко О. Ю., Мордвинов В. И., Антохин П. Н. Исследование долговременной изменчивости и условий формирования атмосферных осадков в бассейне р. Селенги // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25, № 12. С. 1084–1090.

6. Ресурсы поверхностных вод СССР. Л. : Гидрометеоиздат, 1973. Т. 16, вып. 3. 400 с.

7. Сутырина Е. Н. Реакция стока р. Селенги на изменение интенсивности осадков и состояния водосборного бассейна // Изв. Иркут. гос. ун-та. Сер. Науки о Земле. 2015. Т. 13. С. 120–130.

8. Changes in the summertime atmospheric circulation over East Asia and formation of long-lasting low-water periods within the Selenga river basin / T. V. Berezhnykh, O. Yu. Marchenko, V. I. Mordvinov, N. V. Abasov // Geography and Natural Resources. 2012. Vol. 33, N 3. P. 223–229.

9. Визуализация и скачивание The Global Precipitation Climatology Centre (GPCC) данных [Электронный ресурс]. URL: ftp://ftp-anon.dwd.de/pub/data/gpcc/html/download_gate.html.

10. GPCC's new land surface precipitation climatology based on quality-controlled in situ data and its role in quantifying the global water cycle / U. Schneider [et al.] // Theoretical and Applied Climatology. 2013. Vol. 115, N 1–2. P. 15–40.

УДК 551.513(571.1)

Особенности атмосферной циркуляции над Сибирью и Дальним Востоком и режимы осадков в бассейне реки Селенги в летний период

О. Ю. Антохина[1] (olgayumarchenko@gmail.com), П. Н. Антохин[1] (apn@iao.ru), Е. В. Девятова[2] (v_mordv@iszf.irk.ru), В. И. Мордвинов[2] (devyatova@iszf.irk.ru)

[1]Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН, Томск
[2]Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск

Аннотация. В 1996 г. начался затяжной маловодный период в бассейне озера Байкал, который длится по настоящее время. Не вызывает сомнений, что основные причины этой гидрологической катастрофы следует искать в особенностях крупномасштабной атмосферной циркуляции. Наша работа представляет собой результат комплексного анализа трех событий с различными сценариями динамики летней атмосферной циркуляции на территории, охватывающей Сибирь, Монголию и Дальний Восток. Для нас представляло интерес изучить какой эффект оказывало каждое из этих событий на режим осадков в бассейне реки Селенги, обеспечивающей в среднем 50 % притока в озеро Байкал и имеющей преимущественно летнее питание. Первый процесс развивался в июле 1982 г.; второй – в августе 1998 г.; третий – в июле 2013 г. Общей особенностью этих событий являлось наличие блокинга над Западной Сибирью на этапе, принятом нами в качестве начального. Комплексный анализ каждого из событий позволил нам выделить несколько стадий их развития: 1. Начальная стадия – гребень (часто блокирующий) над Западной Сибирью; 2. Заток холода по восточной периферии этого гребня, активизация фронта Восточно-Азиатского летнего муссона и формирование циклона восточнее озера Байкал, в систему которого активно начинает вовлекаться муссонный воздух; 3. Формирование гребня или антициклона (часто блокирующего) к востоку от муссонного циклона, обусловленное адвекцией того же муссонного потока, часть которого вовлекается в систему циклона; 4. Финальная стадия, на которой осадки выпадают либо над бассейном Селенги (сценарий 1998 г.), либо на Дальнем Востоке (сценарии 1982 и 2013 гг.). Динамика исходного западносибирского гребня (блокинга) здесь является определяющей. Осадки стремятся выпасть над бассейном Селенги при его смещении (опрокидывании) на Восточную Сибирь. Осадки выпадают на Дальнем Востоке, а бассейн Селенги при этом оказывается в зоне засухи, если западносибирский блокинг развивается без смещения (опрокидывания) на восток. Влияние Восточно-Азиатского летнего муссона во всех событиях сводится к эффектам регенерации и усиления развивающихся циркуляционных систем.

Ключевые слова: река Селенга, бассейн озера Байкал, атмосферные осадки, атмосферное блокирование, потенциальная температура на динамической тропопаузе, критерии блокирования, летний муссон Восточной Азии.

Введение

Актуальность исследования особенностей формирования стока и осадков в бассейне Селенги увеличивается с ростом водохозяйственных и экологических проблем, порожденных начавшимся в 1996 г. затяжным маловодьем в бассейне озера Байкал [4; 9; 15]. Не вызывает сомнений, что основные причины этой гидрологической катастрофы следует искать в изменчивости крупномасштабной атмосферной циркуляции. Это не имеющее аналогов в рядах инструментальных наблюдений маловодье послужило поводом для пересмотра многих взглядов на условия формирования осадков и стока в бассейне озера.

Река Селенга является ключевым источником питания оз. Байкал. Ее бассейн составляет 83,4 % от всей водосборной площади озера [8] и она обеспечивает в среднем 50 % притока в Байкал [2]. Бассейн реки расположен на границе аридного пояса Азии, вдали от основных источников влаги. Снегозапасы в питании реки несущественны, так как в зимний период на территории бассейна выпадает крайне мало осадков. Около 70 % годовых сумм осадков приходится на июнь-август и в каждый из этих месяцев может выпадать до 90–100 мм [6]. Основной сток реки формируется с июня по август [15]. В этот же период наблюдаются и максимальные расходы воды, обусловленные дождевыми паводками.

Исследования [6; 15] показали, что летние осадки в бассейне Селенги выпадают преимущественно при двух типах атмосферных процессов: 1) прохождении холодных фронтов с западного направления в начале июня и в конце августа; 2) смещении к северу и усилении

фронтальной системы летнего муссона Восточной Азии (МВА) в середине летнего сезона. Усиление/ослабление осадков в середине лета ряд китайских исследователей связывают с усилением/ослаблением циклонической активности в области фронта муссона [17]. А известный советский метеоролог С.П. Хромов еще в 1956 году писал о том, что муссон восточной Азии, в частности над восточной Монголией, имеет циклоническую природу [10]. Многие исследователи пишут о том, что в последние десятилетия интенсивность МВА снижается [18; 23; 26]. Как следствие происходит ослабление циклонической активности и увеличение засушливости в области фронта муссона [15]. Авторы обзора, посвящённого МВА [17], предположили, что причину изменчивости муссонной системы следует искать в особенностях циркуляции средних и высоких широт Евразии. В частности, важную роль могут играть блокинги. Действительно, одним из основных условий возрастания/ослабления вихревой активности в области фронта муссона является усиление/ослабление меридиональных переносов. Только развитие глубоких ложбин и гребней, а также формирование блокирующих антициклонов в умеренных широтах приводят к соприкосновению воздушных масс различного происхождения, увеличению бароклинности и возрастанию вихревой активности в области фронта муссона.

В одной из предыдущих работ мы исследовали с помощью корреляционного метода связь евразийских блокингов с количеством осадков, выпадающих над бассейном Селенги в летний период [12]. В работе [12] мы установили, что блокинги, возникающие над Западной Сибирью, в среднем не оказывают какого-то определенного влияния на осадки в бассейне реки. Тогда как блокинги, возникающие над Восточной Сибирью, имеют совершенно определенный значимый характер влияния, способствуя выпадению обильных осадков на большей части бассейна (за исключением северной его оконечности) в течение всех трех летних месяцев. Блокинги, возникающие над Дальним Востоком, оказывают противоположный эффект, способствуя выпадению осадков над северной частью бассейна реки и засушливым условиям – на юге.

Однако объективно атмосферное блокирование – это явление крупномасштабное. Поэтому идентификация блокингов в узком долготным секторе является процедурой искусственной. Она может быть полезной для решения определенных задач, но строго говоря, является не вполне корректной [1]. Мы продолжаем исследовать взаимосвязь блокингов с летними осадками в бассейне Селенги. Для этого мы используем событийный анализ на обширной территории, охватывающей всю Сибирь, Монголию и Дальний Восток. Для анализа выбраны три события, демонстрирующие возникновение и развитие режимов устойчивой крупномасштабной циркуляции на этой территории. Общей особенностью всех трех событий является наличие блокинга над Западной Сибирью на том этапе, который мы приняли за начальный. В дальнейшем все три события развивались по-разному. Для нас представляло интерес изучить какой эффект оказывает каждое из них на режим осадков в бассейне Селенги.

Данные и методика

Мы используем данные архива ECMWF Era Interim о высоте геопотенциальной поверхности 500 гПа, потенциальной температуре на динамической тропопаузе (PV-θ), зональной и меридиональной компонентах ветра [16] и данные архива GPCC об осадках [24]. К исследованию также привлечены ряды наблюдений за количеством осадков, выпадающих на метеостанциях Сибири и Дальнего Востока [3].

Для идентификации блокингов мы применяем критерий GHGS, предложенный в работе [13], а затем модифицированный в [25].

$$GHGS = \frac{Z(\varphi_0)-Z(\varphi_s)}{\varphi_0-\varphi_s},$$

где Z – высота изобарической поверхности 500 гПа, $\varphi_0 = 60°$ с. ш. $\pm \Delta$, $\varphi_s = 40°$ с. ш. $\pm \Delta$, $\Delta = 4$, здесь Z – высота геопотенциальной поверхности 500 гПа, $\varphi_n = 80°$ с. ш. $\pm \Delta$, $\varphi_0 = 60°$ с. ш. $\pm \Delta$, $\varphi_s = 40°$ с. ш. $\pm \Delta$, $\Delta = -5°$, $-2{,}5°$, $0°$, $2{,}5°$ или $5°$. Пять значений Δ вдоль каждой долготы при расчетах впервые приняты к использованию в работе [14]. Эта процедура предусматривает лучшее пространственное разрешение при расчетах и, следовательно, большие

возможности для корректной идентификации блокингов по сравнению с [25], которые использовали только три шага.

Происхождение и свойства воздушных масс мы анализируем по распределениям потенциальной температуры на динамической тропопаузе (PV-θ) [19; 20]. Циркуляционные системы выявляем по данным о распределении горизонтального поля скорости на уровне 850 гПа. Уровень 850 гПа удобен для нашего анализа тем, что на нем одновременно хорошо видны и муссонные переносы и блокирующие вихревые образования. Для анализа распределения атмосферных осадков мы рассчитываем их аномалии за каждый интересующий нас месяц относительно нормы 1950–1990 гг., которая представлена на сайте [21]. Данные наблюдений об осадках, зарегистрированных на метеостанциях Сибири и Дальнего Востока, [3] мы привлекаем для анализа межсуточной динамики выпадения атмосферных осадков.

Мы изучаем три события с различными сценариями развития особенностей циркуляции на территории, охватывающей Сибирь, Монголию и Дальний Восток. Первый процесс развивался в июле 1982 г.; второй – во второй половине июля и августе 1998 г.; третий – в июле 2013 г. Общей особенностью этих событий является блокинг над Западной Сибирью на этапе, принятом нами в качестве начального.

Результаты

На рисунке 1 приведены распределения аномалий атмосферных осадков в июле 1982 и 2013 гг., а также в августе 1998 г. В июле 1982 г. на основной части бассейна Селенги количество осадков было близко к норме. Осадки, превышающие норму, были характерны только для станции Кяхта (с максимумом 12 июля), а яркая положительная аномалия к югу от Байкала обусловлена в основном ливнями в районе станции Хамар-Дабан. Во второй половине июля и августе 1998 г. количество осадков, выпавших над бассейном Селенги, превышало норму, и наблюдались сильные паводки [5]. В июле 2013 г. количество осадков над Селенгой было близко к норме, в северной части бассейна – ниже нормы. На распределениях для 2013 г. невольно обращает на себя внимание огромная положительная аномалия к востоку от бассейна Селенги. Эти осадки вызвали трагически известное наводнение на Дальнем Востоке [7].

Попытаемся понять, какие особенности крупномасштабной циркуляции способствовали появлению распределений, приведенных на рис. 1. Рисунок 2 демонстрирует материал для комплексного анализа события 1982 г.

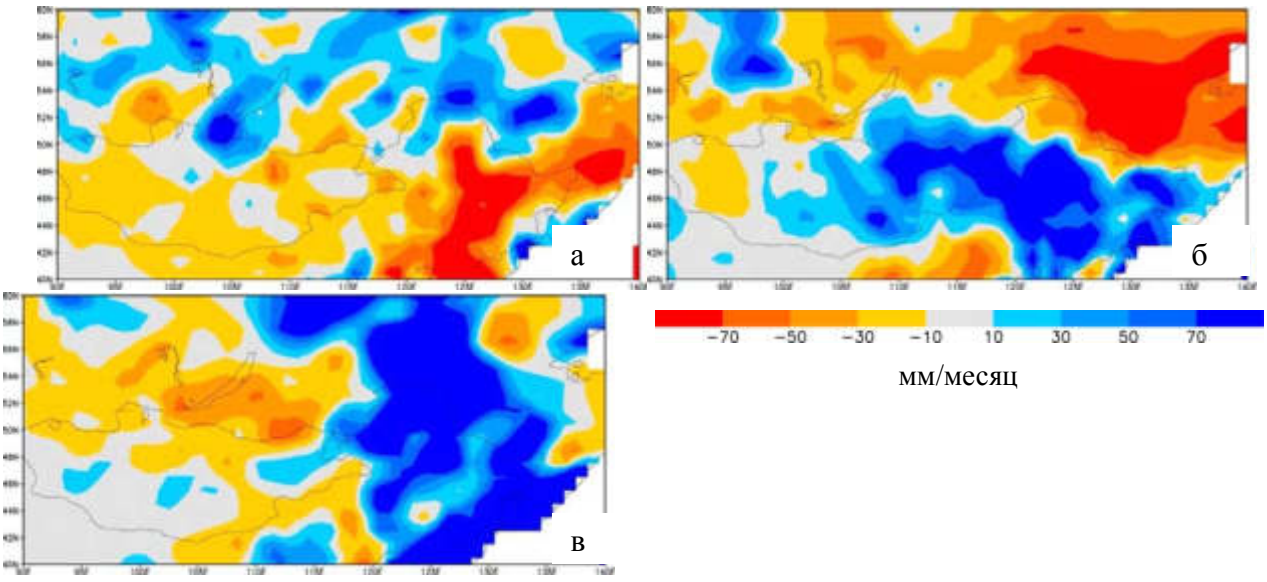


Рис. 1. Аномалии осадков в июле 1982 г. (а), августе 1998 г. (б), июле 2013 г. (в)

На рисунке 2, *е* приведена долготно-временная диаграмма блокирования в июле над Евразией. За отправную точку анализа принято событие блокирования, развивающееся над Западной Сибирью (60° в. д. – 80° в. д.) в первой декаде месяца. Затем начинается процесс блокирования в Восточноазиатско-Тихоокеанском секторе (110° в. д. – 160° в. д.). Приведенные на рис. 2, *а–д* распределения PV-θ и линий тока наглядно иллюстрируют развитие этих блокингов. Видно как постепенно углубляется и отсекается атмосферная ложбина, обусловленная поступлением холодного воздуха по восточной периферии блокирующего антициклона над Западной Сибирью. В это же время происходит постепенное усиление гребня к востоку от озера Байкал, обусловленное адвекцией теплого муссонного воздуха. На восточной периферии гребня формируется еще один холодный циклонический вихрь, который затем заполняется с востока теплыми воздушными массами муссона Восточной Азии (рис. 2, *в–д*). Часть потока теплого воздуха устремляется к северу, формируя антициклон (рис. 2, *д*). Уже 12 июля можно видеть, как муссонные воздушные массы достигают северных границ Азии. «Цепочка» циклонических и антициклонических вихрей, сформировавшаяся к 14 июля за счет адвекции теплых и холодных воздушных масс, просуществует еще несколько дней. Согласно диаграмме на рис. 2, *е* длительность блокирования в секторе 100° в. д. – 160° в. д. составляет порядка 10 дней. Это превышает стандартный синоптический период и, по-видимому, именно этот процесс обусловил длительные и интенсивные осадки на ряде станций Дальнего Востока (рис. 2, *ж*). Анализ количества атмосферных осадков выпадавших в этот период над бассейном Селенги (рисунок не приводится) показывает, что для большей части станций этот процесс не сопровождается их интенсивным выпадением.

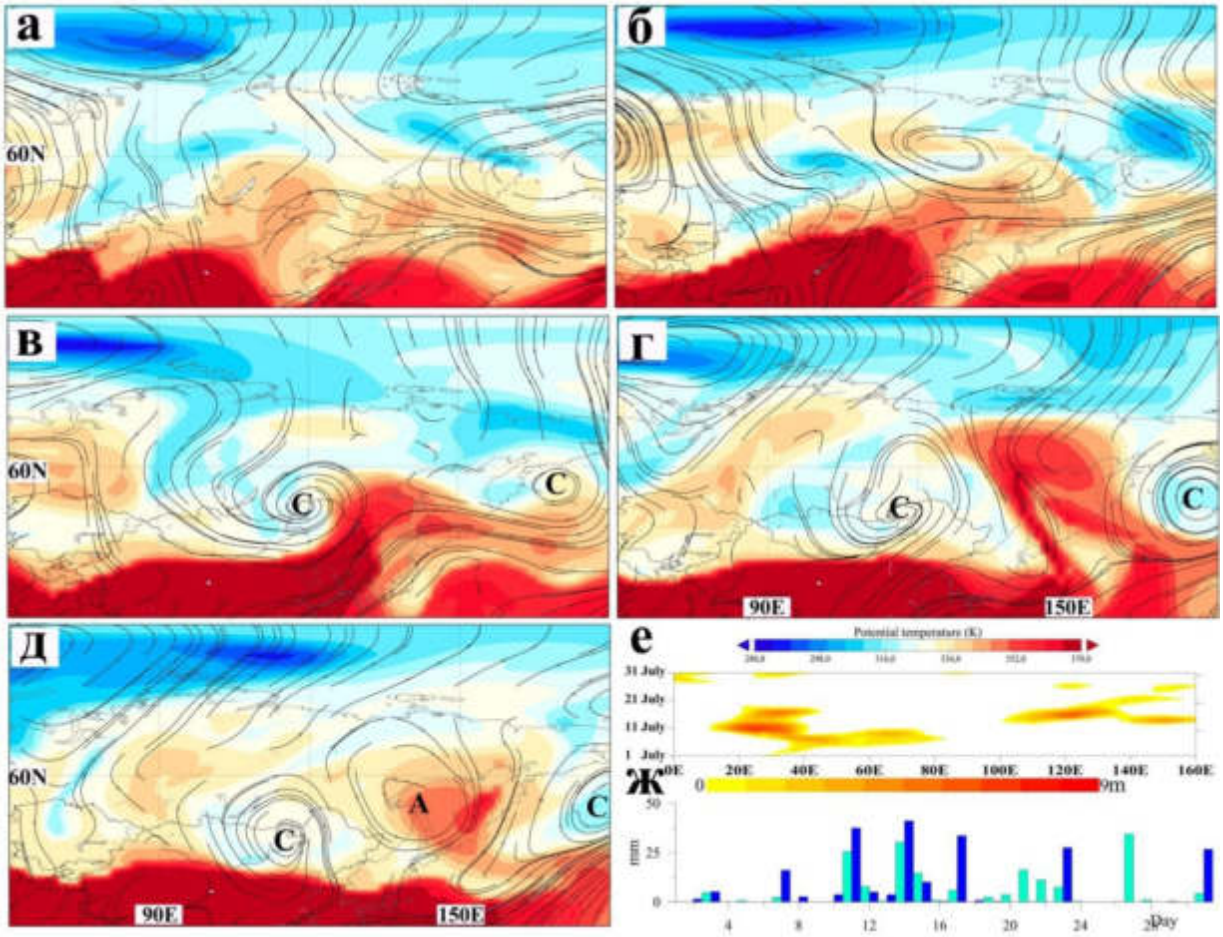


Рис. 2. (а–д) поле скорости ветра на 850 гПа и поле PV-θ с 6 по 14 июля 1982 г. (через день, срок 12 UTC); (е) долготно-временная диаграмма блокирования для июля 1982 г.; (ж) диаграмма межсуточной динамики осадков на станциях Джалинда (темно-синий) и Сковородино, расположенных в районе 53° с. ш., 123° в. д.

На рисунке 3 представлена информация для анализа события 1998 г. Долготно-временная диаграмма блокирования (рис. 3, *е*) показывает, что в этом случае процесс также начинается с блокинга над Уралом – Западной Сибирью, определяющего интенсивность северного затока. На рисунках 3, *а–б* показаны распределения PV-θ и горизонтальной скорости ветра 31 июля и 1 августа 1998 г. На рисунках 3, *в–г* – 8 и 11 августа 1998 г. 31 июля над Восточной Монголией и Северным Китаем расположен циклон. Как показывает график осадков, на станциях, попадающих в зону влияния циклона над Восточной Монголией, к 31 июля осадки почти прекращаются. Однако в этот же период по восточной периферии расположенного на севере Сибири антициклона происходит вторжение холодного воздуха в западную часть интересующего нас циклона. Циклоническая активность вновь активизируется, о чем свидетельствует выпадение осадков на ряде станций, расположенных на границе России, Монголии и Китая (рис. 3, *ж*). Отметим, что отличительной чертой проиллюстрированных блокингов является активное участие в них муссонного воздуха при относительно слабом по интенсивности северном затоке. А как показывают рис. 3, *а–б* для выпадения интенсивных осадков необходимо активное взаимодействие воздушных масс и с севера и с юга. Так же как и рис. 3, *б–д* рис. 3, *в*, *г* показывают «цепочку» циклонических и антициклонических вихрей.

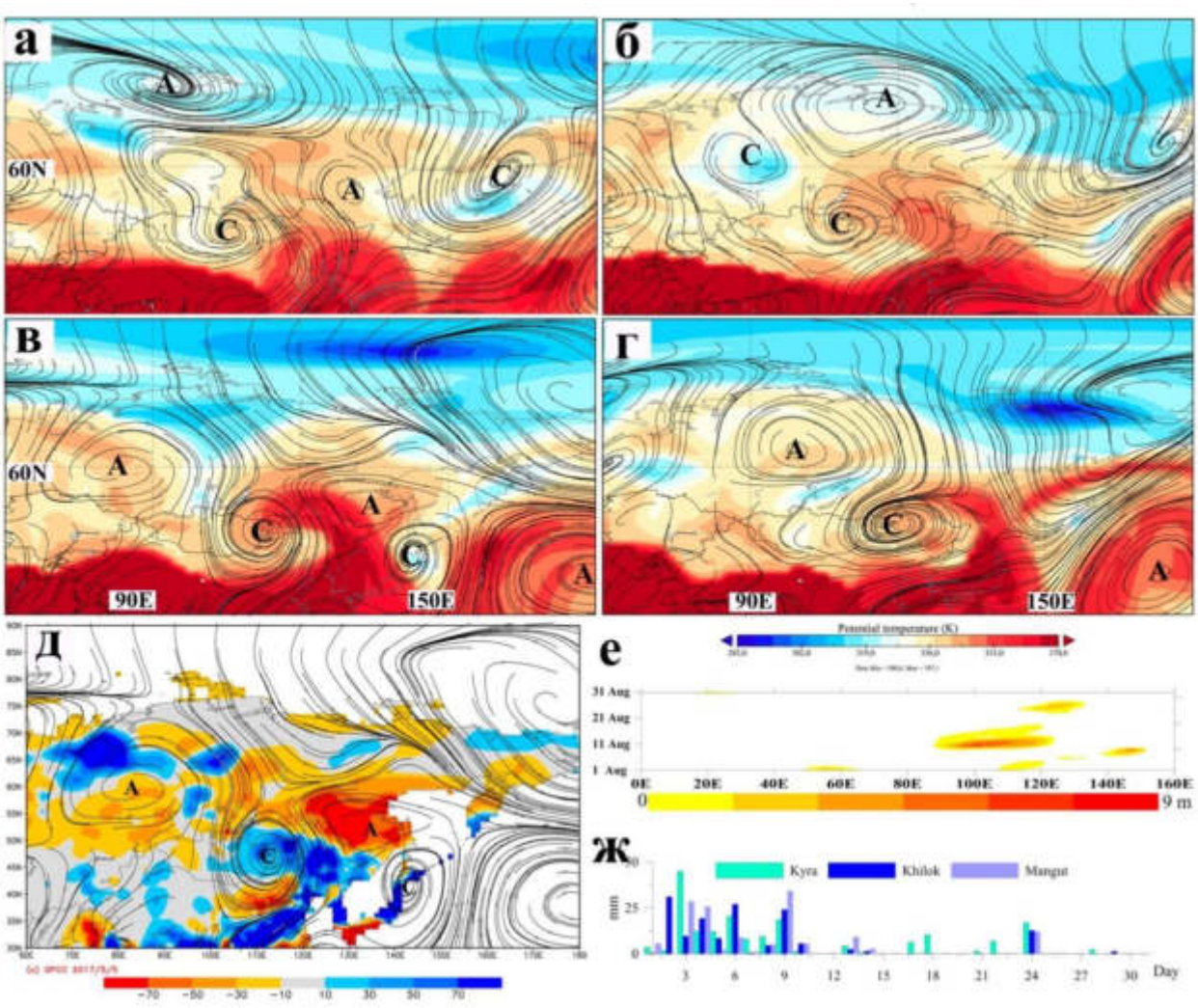


Рис. 3. (а, б) поле скорости на 850 гПа и поле PV-θ 31 июля и 1 августа; (в, г) 8 и 11 августа 1998 г. (срок 12 UTC); (д) распределение аномалий осадков (август) и линий тока на 850 гПа (8 августа); (е) долготно-временная диаграмма блокирования для августа 1998 г.; (ж) диаграмма межсуточной динамики осадков осадков на станциях Кыра (49° с. ш., 111° в. д.), Хилок (51° с. ш., 110° в. д.) и Мангут (49° с. ш., 112° в. д.)

На рисунке 3, *в*, *г* мы видим антициклоны над Западной Сибирью и Дальним Востоком и циклоны над Монголией/Северным Китаем и Сахалином/Японией. 11 августа антициклон над Западной Сибирью смещается на восток с вовлечением холодного воздуха, ситуация блокирования на Дальнем Востоке пропадает, так как пропадает муссонный антициклон. В свою очередь в барическом поле появляется рекс-блокинг в зрелой стадии (рис. 3, *е*). В промежутке между 8 и 11 августа (рисунок не приводится) имеет место двойная подкачка блокирующего антициклона с юга и востока. В аномалиях распределения осадков (рис. 5, *д*) хорошо видно влияние антициклонической (над Дальним Востоком) и циклонической (Монголия/Китай) областей муссона. Особо отметим, что при таком сценарии развития блокирующих процессов интенсивные осадки выпадают над Восточной Монголией и северным Китаем. То есть, в зоне выпадения большого количества осадков оказываются самые водоносные притоки Селенги.

Отметим также, что ситуация 1998 г. показывает практически полную заполненность циклонических частей блокингов муссонным воздухом, что создает технические трудности для идентификации блокингов с помощью характеристики PV-θ (отсутствует обращение градиента этой характеристики). Поэтому в данной работе мы используем критерий блокирования, основанный на анализе барического поля.

Отличительной чертой третьего события, которое мы рассматриваем, являются засуха над бассейном Селенги и интенсивные осадки, сопровождаемые экстремальными паводками на Дальнем Востоке в 2013 г. (рис. 4). Интенсивные осадки выпадали в этом регионе с мая по август, но особенно впечатляющий размах приобрели в июле 2013 г. Распределения PV-θ и линий тока на рис. 4, *а–д* показывают, активное (подобно 1998 г.) вовлечение муссонных воздушных масс в систему циклона на Дальнем Востоке и затем систему антициклона над Охотским морем. Сопоставление индексов блокирования на рис. 2, *е*, 3, *е* и 4, *е* указывает на то, что в 2013 г. процесс блокирования над Западной Сибирью был более интенсивным, чем в 1982 и 1998 гг. Благодаря этому более интенсивным был и заток северных воздушных масс по восточной периферии этого блокинга. Формально на рис. 4, *г–д* виден омега блокинг в своей зрелой стадии (антициклон и два циклона у его основания). По разнице потенциальной температуры между 16 и 17 июля видно, что заполнение антициклона с юга теплым воздухом закончено. И если бы это был одиночный антициклон, то он быстро бы разрушился в течение одного-двух дней. Но ситуация с омега-блокингом совсем другая. После того, как 16 июля закончилось заполнение антициклона с юга, он простационировал еще 10 дней.

Одним из возможных объяснений большой продолжительности блокирования может быть то, что после завершения обычной «подкачки» с юга, в область антициклона 17–19 июля начали поступать теплые воздушные массы муссона через систему циклона с востока (рис. 4, *г–д*). Вероятно, это и было причиной того, что антициклон стационировал практически до конца июля. Вместе с ним стационировал и циклон, который обуславливал осадки над Дальним Востоком (рис. 4, *ж*).

Ситуации 1982 и 2013 гг. показывают, что при процессах такого типа в бассейне р. Селенги количество осадков оказывается ниже нормы, а на Дальнем Востоке – наоборот. А ситуация 1998 г. говорит о том, что когда осадки выпадают над бассейном Селенги, то на Дальнем Востоке будет засушливо. Мы объясняем это тем, что при любых вариантах конфигурации и интенсивности подобного типа блокингов область выпадения осадков не может одновременно захватывать и бассейн р. Селенги и Дальний Восток. Особенно важными для всего последующего процесса в целом, мы считаем особенности развития блокинга над Западной Сибирью. Так как от его длительности и интенсивности зависит то, насколько мощными окажутся вторжение холодного воздуха на Восточную Сибирь и динамика муссонного потока в последующий период. А это в конечном итоге определит интенсивность осадков, обусловленных взаимодействием воздушных потоков с севера и юга.

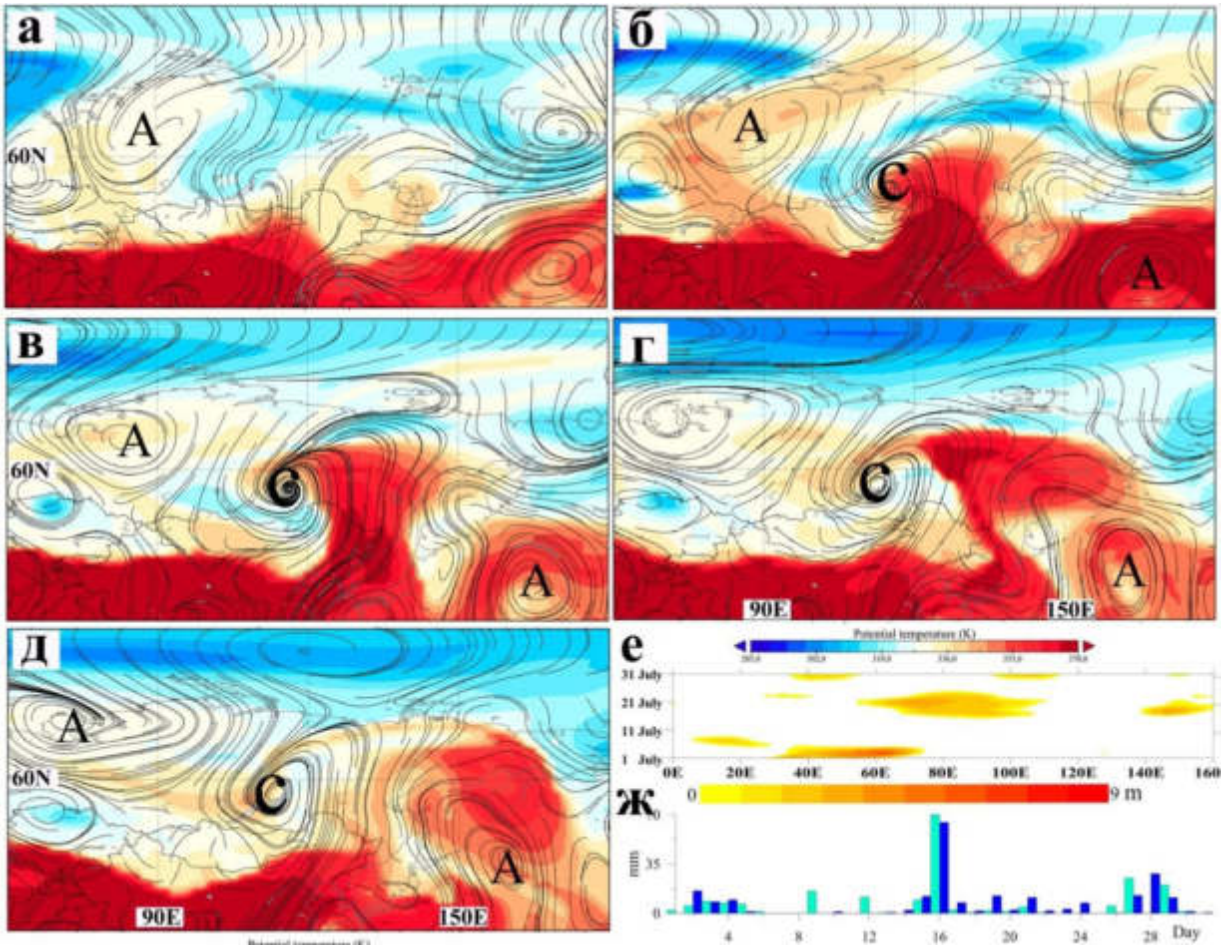


Рис. 4 (а–д) поле скорости на 850 гПа и поле PV-θ с 14 по 18 июля 2013 г. (срок 12 UTC); (е) долготно-временная диаграмма блокирования для июля 2013; (ж) осадки в августе на станциях С. Олекма (темно-синий) и Сковородино с координатами 55° с. ш., 120° в. д. и 53° с. ш., 123° в. д. соответственно

Заключение

Мы изучили три события с различными сценариями развития особенностей циркуляции на территории, охватывающей Сибирь, Монголию и Дальний Восток. Первый процесс развивался в июле 1982 г.; второй – во второй половине июля и августе 1998 г.; третий – в июле 2013 г. Общей особенностью этих событий являлось наличие блокинга над Западной Сибирью на этапе, принятом нами в качестве начального. В дальнейшем все три события развивались по-разному. Для нас представляло интерес изучить какой эффект оказывает каждое из этих событий на режим осадков в бассейне Селенги.

Комплексный анализ каждого из событий позволил нам изучить сценарии их развития и выделить несколько стадий. 1. Начальная стадия – гребень (часто блокирующий) над Западной Сибирью. 2. Заток холода по восточной периферии этого гребня, активизация фронта Восточно-Азиатского летнего муссона и формирование циклона восточнее озера Байкал, в систему которого активно начинает вовлекаться муссонный воздух. Такие муссонные циклоны, как правило, являются глубокими долгоживущими образованиями и приносят обильные осадки. 3 Формирование гребня или антициклона (часто блокирующего) к востоку от муссонного циклона, обусловленное адвекцией того же муссонного потока, часть которого вовлекается в систему циклона. 4. Финальная стадия. Имеет различия, приводящие к локализации фронта, либо над бассейном Селенги (Монголия, северный Китай) как в 1998 г. (регион 1), либо над Забайкальем и дальним Востоком, как в 1982 и 2013 гг. (регион 2). Различия в локализации фронта обусловлены различиями в динамике исходного западносибирского гребня (блокинга) и особенностями подкачки муссона в циклон и антициклон к востоку от него. В случае выпадения осадков над регионом 1 блокинг с Западной Сибири свободно смещается на территорию Восточной Сибири. Муссонный поток хоть и формирует одновре-

менно циклон и антициклон, но не формирует ярко выраженного блокирования над Тихим океаном. В случае выпадения осадков над регионом 2 над Западной Сибирью идентифицируется интенсивное блокирование без смещения на Восточную Сибирь. Муссонный поток также формирует циклон и антициклон. И при этом выявляется выраженное блокирование над Тихим океаном.

Таким образом, на основе изученных событий можно сделать вывод, что динамика исходного западносибирского гребня (блокинга) является определяющей. Осадки стремятся выпасть над бассейном Селенги при его смещении (опрокидывании) на Восточную Сибирь. Осадки выпадают на Дальнем Востоке, а бассейн Селенги при этом оказывается в зоне засухи, если западносибирский блокинг развивается без смещения (опрокидывания) на восток. Влияние Восточно-Азиатского летнего муссона во всех событиях сводится к эффектам регенерации и усиления развивающихся циркуляционных систем.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда проект № 17-77-10035

Список литературы

1. Атмосферные блокинги в Западной Сибири. Часть 1. Особенности обнаружения, объективные критерии и их сравнение / О. Ю. Антохина, П. Н. Антохин, О. С. Зоркальцева, Е. В. Девятова // Метеорология и гидрология. 2017. № 10. С. 34–45.

2. Афанасьев А. Н. Водные ресурсы и водный баланс бассейна оз. Байкал. Новосибирск : Наука, 1976. 238 с.

3. Булыгина О. Н., Разуваев В. Н., Александрова Т. М. Описание массива суточной температуры воздуха и количества осадков на метеорологических станциях России и бывшего СССР (TTTR) [Электронный ресурс]. URL:http://aisori.meteo.ru/ClimateR.

4. Возможные изменения гидрологических характеристик в связи с регулированием стока в бассейне реки Селенги / И. В. Бычков, В. М. Никитин, Н. В. Абасов, Т. В. Бережных, И. И. Максимова, Е. Н. Осипчук // География и природные ресурсы. 2017. № 3. С. 75–86.

5. Ильичева Е. А., Корытный Л. М., Павлов М. В. Русловая сеть дельты р. Селенги на современном этапе // Вестн. Том. гос. ун-та. 2014. № 380. С. 190–194.

6. Марченко О. Ю., Мордвинов В. И., Антохин П. Н. Условия формирования и долговременная изменчивость атмосферных осадков летнего периода в бассейне р. Селенги // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25, № 12. С. 1084–1090.

7. Мохов И. И., Семенов В. А. Погодно-климатические аномалии в российских регионах в связи с глобальными изменениями климата // Метеорология и гидрология. 2016. № 2. С. 16–26.

8. Ресурсы поверхностных вод СССР. Л. : Гидрометеоиздат, 1973. Т. 16, вып. 3. 400 с.

9. Сутырина Е. Н. Реакция стока р. Селенги на изменение интенсивности осадков и состояния водосборного бассейна // Изв. Иркут. гос. ун-та. Сер. Науки о Земле. 2015. Т. 13. С. 120–130.

10. Хромов С. П. Муссоны в системе общей циркуляции атмосферы // А. И. Воейков и современные проблемы климатологии. Л. : Гидрометиздат, 1956. С. 84–108.

11. Summer circulation of the Northern Hemisphere atmosphere in periods of strong and weak East Asian monsoon / O. Y. Antokhina [et al.] // Atmospheric and Oceanic Optics. 2015. Vol. 28, N 3. P. 258–264.

12. The impact of atmospheric blocking on the spatial distribution of atmospheric summertime precipitation over Eurasia / O. Yu. Antokhina, P. N. Antokhin, Yu. V. Martynova, V. I. Mordvinov // IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci. 2016. P. 012035.

13. Austin J. F. The blocking of mid-latitude westerly wind by planetary waves // Quart. J. Roy. Meteor. Soc. 1980. Vol. 106. P. 327–350.

14. A climatology of Northern Hemisphere blocking / D. Barriopedro, R. García-Herrera, A. R. Lupo, E. Hernandez // Journal of Climate. 2006. Vol. 19. P. 1042–1063.

15. Changes in the summertime atmospheric circulation over East Asia and formation of long-lasting low-water periods within the Selenga river basin / T. V. Berezhnykh, O. Yu. Marchenko, V. I. Mordvinov, N. V. Abasov // Geography and Natural Resources. 2012. Vol. 33, N 3. P. 223–229.

16. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system / D. P. Dee [et al.] // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2011. Vol. 137, N 656. P. 553–597.

17. Ding Yi. H., Chan C. L. The East Asian Summer monsoon: an overview // Meteor. Atoms Phys. 2005. Vol. 89. P. 117–142.

18. Ding Y., Wang Z., Sun Y. Inter-decadal variation of the summer precipitation in East China and its association with decreasing Asian summer monsoon. Part I: Observed evidences // International Journal of Climatology. 2008. Vol. 28, N 9. P. 1139–1161.

19. Hoskins B. J. Towards a PV-θ view of the general circulation // Tellus B: Chemical and Physical Meteorology. 1991. Vol. 43. P. 27–35.

20. Hoskins B. J., Mcintyre M. E., Robertson A. W. On the use and significance of isentropic potential vorticity maps // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2007. Vol. 111. P. 877–946.

21. Визуализация и скачивание The Global Precipitation Climatology Centre (GPCC) данных [Электронный ресурс]. URL: ftp://ftp-anon.dwd.de/pub/data/gpcc/html/download_gate.html.

22. Lejenäs H., Øakland H. Characteristics of Northern Hemisphere blocking as determined from long time series of observational data // Tellus. 1983. 35A. P. 350–362.

23. Summer monsoon moisture variability over China and Mongolia during the past four centuries / Li J. [et al.] // Geophys. Res. Lett. 2009. Vol. 36. L22705.

24. GPCC's new land surface precipitation climatology based on quality-controlled in situ data and its role in quantifying the global water cycle / U. Schneider [et al.] // Theoretical and Applied Climatology. 2013. Vol. 115, N 1–2. P. 15–40.

25. Tibaldi S., Molteni F. On the operational predictability of blocking // Tellus A. 1990. Vol. 42, N 3. P. 343–365.

26. Recent weakening of northern East Asian summer monsoon: A possible response to global warming / C. Zhu, B. Wang, W. Qian, B. Zhang // Geophys. Res. Lett. 2012. Vol. 39. L09701.

УДК 551.515.2(571.53)

Южные циклоны и их влияние на погодные условия территории Иркутской области

Н. В. Астафьева[1,2] (nadezhdaastafeva@ya.ru),
И. В. Латышева [1] (ababab1967@mail.ru)

[1] Иркутский государственный университет, Иркутск
[2] Иркутское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, Иркутск

Аннотация. По данным приземных и высотных синоптических карт за 2009–2016 гг. проанализированы характеристики южных циклонов, смещающихся на территорию Иркутской области с районов Монголии. Рассчитана повторяемость опасных явлений погоды, связанных с выходами южных циклонов на исследуемую территорию. Проанализированы циркуляционные факторы и синоптические процессы в годы, различающиеся по повторяемости южных циклонов в летние месяцы, которые можно использовать при прогнозировании влажных и засушливых летних периодов в Иркутской области.

Ключевые слова: южный циклон, атмосферные осадки, блокирующие процессы, Иркутская область.

Введение

Крупномасштабные формы атмосферной циркуляции обусловлены положением и состоянием планетарной высотной фронтальной зоны и деятельностью центров действия атмосферы, а также развитием и повторяемостью основных (зональной и меридиональной) форм атмосферной циркуляции [3]. Под влиянием орографии на фоне крупномасштабных процессов формируются различия региональных синоптических процессов [2].

На территории Иркутской области резкие изменения погодных условий чаще всего связаны с прохождением атмосферных фронтов, связанных со смещением циклонов с юго-запада и юга («южные» циклоны) либо с севера и северо-запада («ныряющие» циклоны) [7].

Под южными процессами для региона Восточной Сибири понимают синоптические процессы, при которых осуществляется выход циклона с юга (рис.1) на фоне интенсивной адвекции холода в более высокие широты (выше 50° с. ш.). Такие циклоны получили название «южных» [6; 8].

Южные циклоны образуются на полярном фронте при интенсивной адвекции холода в тыловую часть тропосферной ложбины. Их районы образования и траектории различны. Это объясняется различиями термодинамических условий в средней тропосфере, что заставляет рассматривать эти процессы более детально [1; 4; 5; 9].

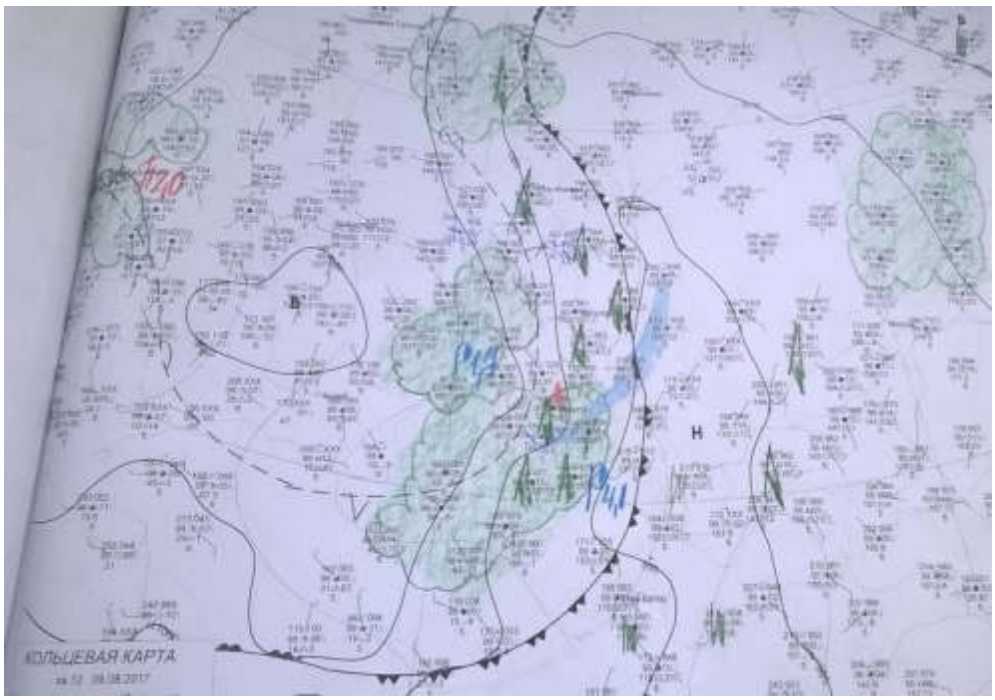


Рис. 1. Приземная синоптическая карта при смещении южного циклона на территорию Иркутской области 09.08.2017 г.

Необходимым условием для смещения южных циклонов на территорию Иркутской области является наличие глубокой меридиональной ложбины в тропосфере (рис. 2). Южные циклоны, как правило, перемещаются в одиночку. Однако не исключаются и их последовательные выходы (до 2-3 циклонов) при резком и устойчивом во времени обострении полярного фронта [7].

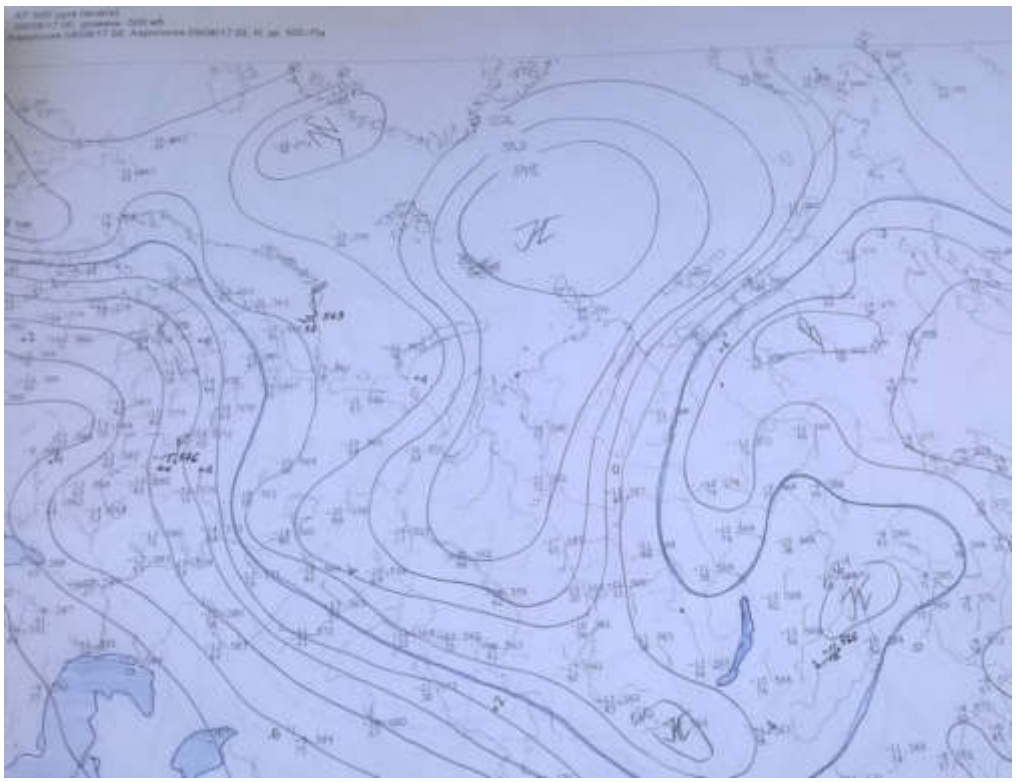


Рис. 2 Высотная карта при смещении южного циклона на территорию Иркутской области 09.08.2017 г.

Обсуждение результатов

В работе проанализированы характеристики южных циклонов, смещавшихся на территорию Иркутской области в 2009–2016 гг. В качестве исходной информации использованы данные ежедневных синоптических карт (приземных и высотных), предоставленные Иркутским управлением по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Было установлено, что в годовом распределении отчетливо выделяется увеличение количества монгольских циклонов в период с мая по сентябрь и минимум, который наблюдается в декабре (рис. 3). Можно сказать, что годовое распределение южных циклонов неплохо согласуется с сезонным характером температурного режима подстилающей поверхности и приземного слоя атмосферы. В среднем за месяц обычно отмечается 1-2 выхода южных циклонов на территорию Иркутской области. В межгодовой динамике их число варьирует от 13 до 21.

Установлено, что с прохождением южных циклонов в районе г. Иркутска в 2009–2016 гг. чаще всего отмечалось усиление ветра до штормового (≥ 15 м/с), с равной вероятностью (11 %) наблюдались такие опасные явления погоды, как ухудшение видимости при выпадении обложного и ливневого снега, гроза, реже всего отмечался туман (3 %) (рис. 4). Также довольно высокий процент (16 %) приходится на те случаи смещения южных циклонов, которые не сопровождались ухудшением погодных условий и были выражены только в натекании облаков верхнего и среднего ярусов.

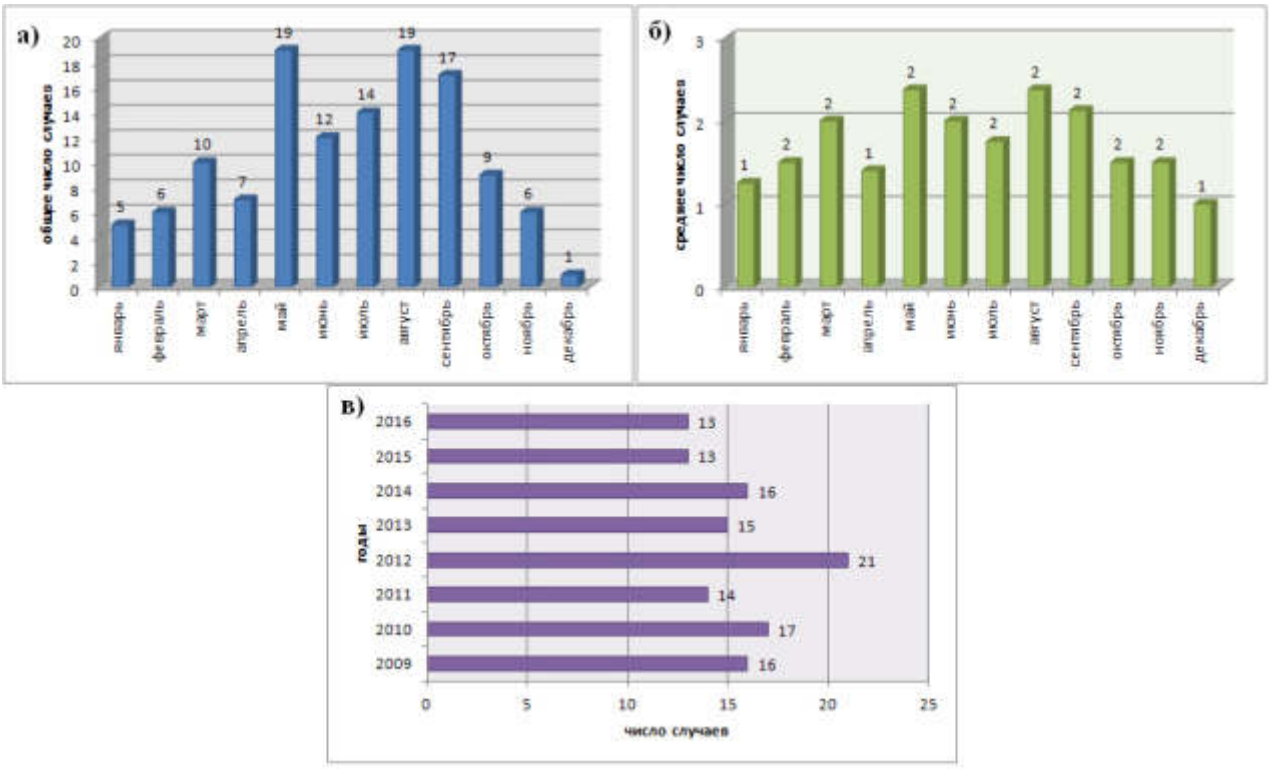


Рис. 3. Общее количество (а), среднее число (б) и межгодовая динамика (в) южных (монгольских) циклонов на территории Иркутской области в 2009–2016 гг.

Установлено, что с прохождением южных циклонов в районе г. Иркутска в 2009–2016 гг. чаще всего отмечалось усиление ветра до штормового (≥ 15 м/с), с равной вероятностью (11 %) наблюдались такие опасные явления погоды, как ухудшение видимости при выпадении обложного и ливневого снега, гроза, реже всего отмечался туман (3 %) (рис. 4). Также довольно высокий процент (16 %) приходится на те случаи смещения южных циклонов, которые не сопровождались ухудшением погодных условий и были выражены только в натекании облаков верхнего и среднего ярусов.

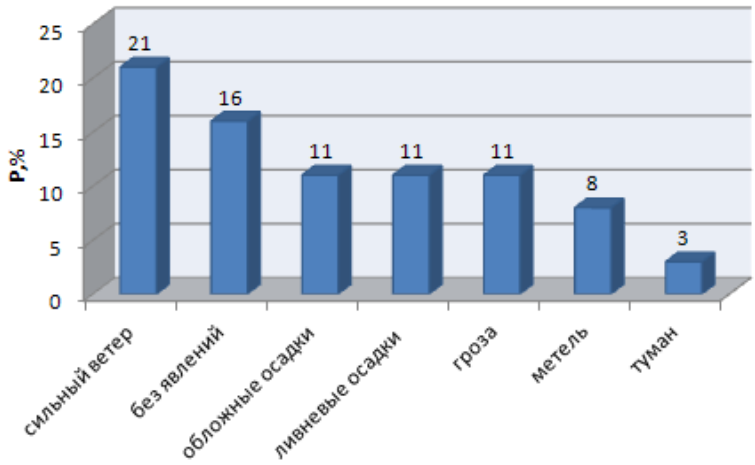


Рис. 4. Средняя повторяемость (%) явлений погоды при смещении южных (монгольских) циклонов на территорию Иркутской области в 2009–2016 гг.

В таблице 1 представлены характеристики южных циклонов в исследуемый нами период. Интересно, что перепады давления в центре южного циклона достигали 62 гПа, а средние значения скорости ветра и количество выпавших осадков практически не различались при прохождении южного циклона через территорию Иркутской области в дневные и ночные часы суток.

Таблица 1

Средние значения метеорологических величин при смещении южных (монгольских) циклонов на территорию Иркутской области в 2009–2016 гг.

Параметры	Давление в центре, гПа	ночь		день	
		осадки, мм	скорость, м/с	осадки, мм	скорость, м/с
Среднее значение	999	4	8	4	9
Максимум	1032	48	19	32	17
Минимум	970	0	3	0	1

Анализ метеорологических параметров в исследуемые годы, различающиеся по количеству атмосферных осадков в г. Иркутске, не показал существенных различий, что наглядно видно по средним значениям метеорологических величин (табл. 2).

Таблица 2

Средние значения метеорологических величин в южных (монгольских) циклонах на территории Иркутской области в период с июня по август

Характеристика	Годы			
	1971	2016	2003	2015
сумма осадков, мм	489	387	278	183
давление, гПа	954	956	955	956
температура, °С	15,7	18,2	16,8	19,1
скорость ветра, м/с	9,7	8,2	7,8	8,7

Для оценки вклада крупномасштабных факторов в образование южных циклонов на территории Иркутской области сравнивались годы, когда в летние месяцы отмечались частые выходы южных циклонов, которые сопровождались выпадением интенсивных осадков, и когда число выходов южных циклонов в летний период было минимальным, что отразилось в уменьшении количества атмосферных осадков. В качестве примеров были выбраны летние месяцы (VI–VIII) 1971 г. и 2016 г., когда по данным метеорологической станции Иркутск количество выпавших осадков в 2 раза превысило норму, причем в период с 18 по 20 июля 1971 г. и с 10 по 12 августа 2016 г. только за 3 дня в г. Иркутске выпало 2 месячных нормы осадков. Летние месяцы 2003 г. и 2015 г. отличались тем, что в первую половину лета

2003 г. выпало всего 37 % нормы осадков, а во вторую половину лета 2015 г. 68 % месячной нормы (рис. 5).

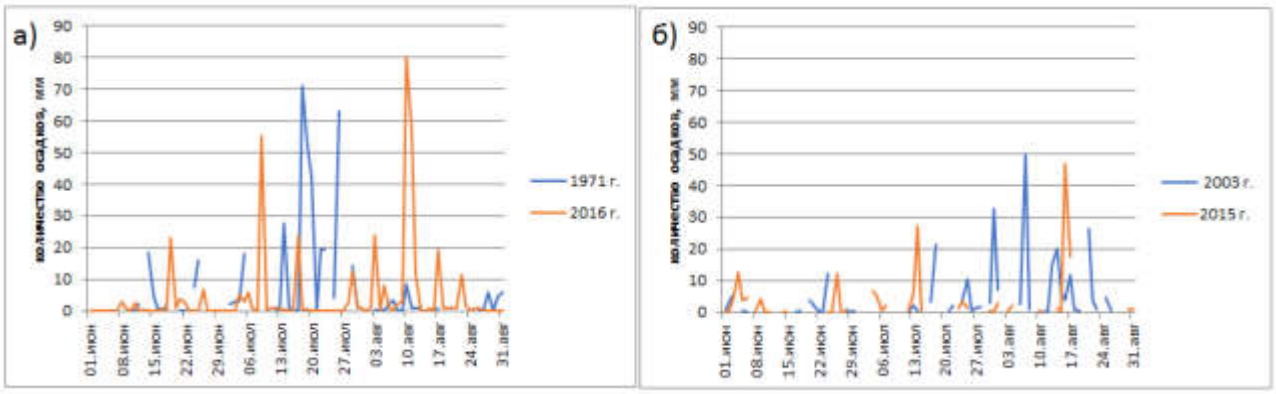


Рис. 5. Количество атмосферных осадков (мм), выпавших в г. Иркутске в летние месяцы 1971 и 2016 гг. (а) и 2003 и 2015 гг. (б)

Анализ метеорологических параметров в исследуемые годы, различающиеся по количеству атмосферных осадков в г. Иркутске, не показал существенных различий, что наглядно видно по средним значениям метеорологических величин (табл. 2).

Таблица 2

Средние значения метеорологических величин в южных (монгольских) циклонах на территории Иркутской области в период с июня по август

Характеристика	Годы			
	1971	2016	2003	2015
сумма осадков, мм	489	387	278	183
давление, гПа	954	956	955	956
температура, °С	15,7	18,2	16,8	19,1
скорость ветра, м/с	9,7	8,2	7,8	8,7

Более выражены различия в характеристиках приземных и высотных барических полей. В более влажные летние месяцы 1971 и 2016 гг. повторяемость южных (монгольских) циклонов составила 30 и 35 % соответственно, тогда как в более «сухие» летние месяцы 2003 и 2015 гг. 18 % и 10 % (рис.6). Кроме того, выявлены различия в количестве блокирующих процессов, когда на территории Иркутской области в течение не менее 5 дней стационировал высокий блокирующий антициклон. В летние месяцы 1971 г. наблюдался один блокирующий процесс, в 2016 г. блокирующие процессы отсутствовали, их количество в летние месяцы 2003 г. составило 3, а в 2015 г. – 5.

Анализ крупномасштабных потоков на АТ-500 гПа показал, что при выпадении большого количества атмосферных осадков в июле 1971 г. и августе 2016 г. ось крупномасштабной высотной ложбины была ориентирована на восточные районы России (рис. 7, *а*, *б*). Районы Монголии, где происходит образование южных циклонов, оказывались под влиянием адвекции холода, циклонального вихря скорости и динамических факторов падения давления, что способствовало образованию южных циклонов, которые возникают преимущественно в ложбине, ориентированной с северо-запада и при прохождении ныряющих циклонов по более северным траекториям. В засушливые летние месяцы – июль 2003 г. и август 2015 г. ось высотной ложбины была ориентирована на районы Казахстана, а на территории Монголии получал развитие барический гребень и осуществлялась адвекция теплых сухих воздушных масс с юго-запада (рис. 7 *в*, *г*).

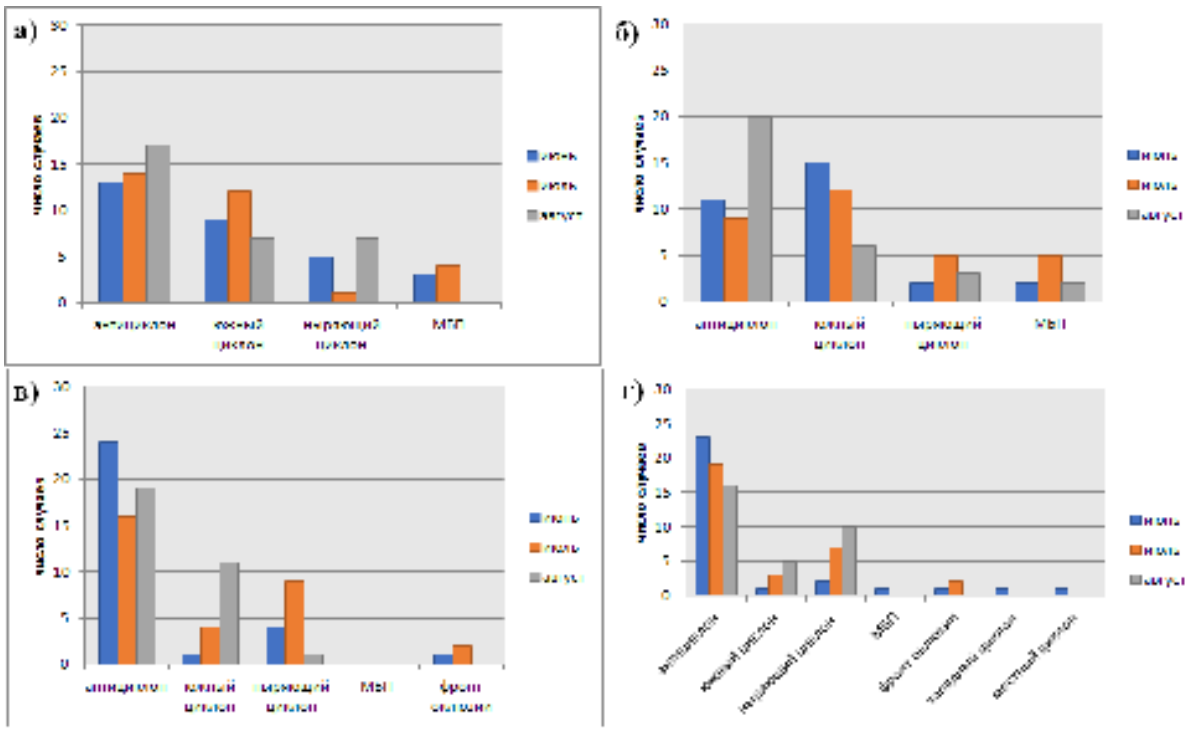


Рис. 6. Количество различных типов высотных барических образований в районе г. Иркутска в летние месяцы 1971 и 2016 гг. (а) и 2003 и 2015 гг. (б)

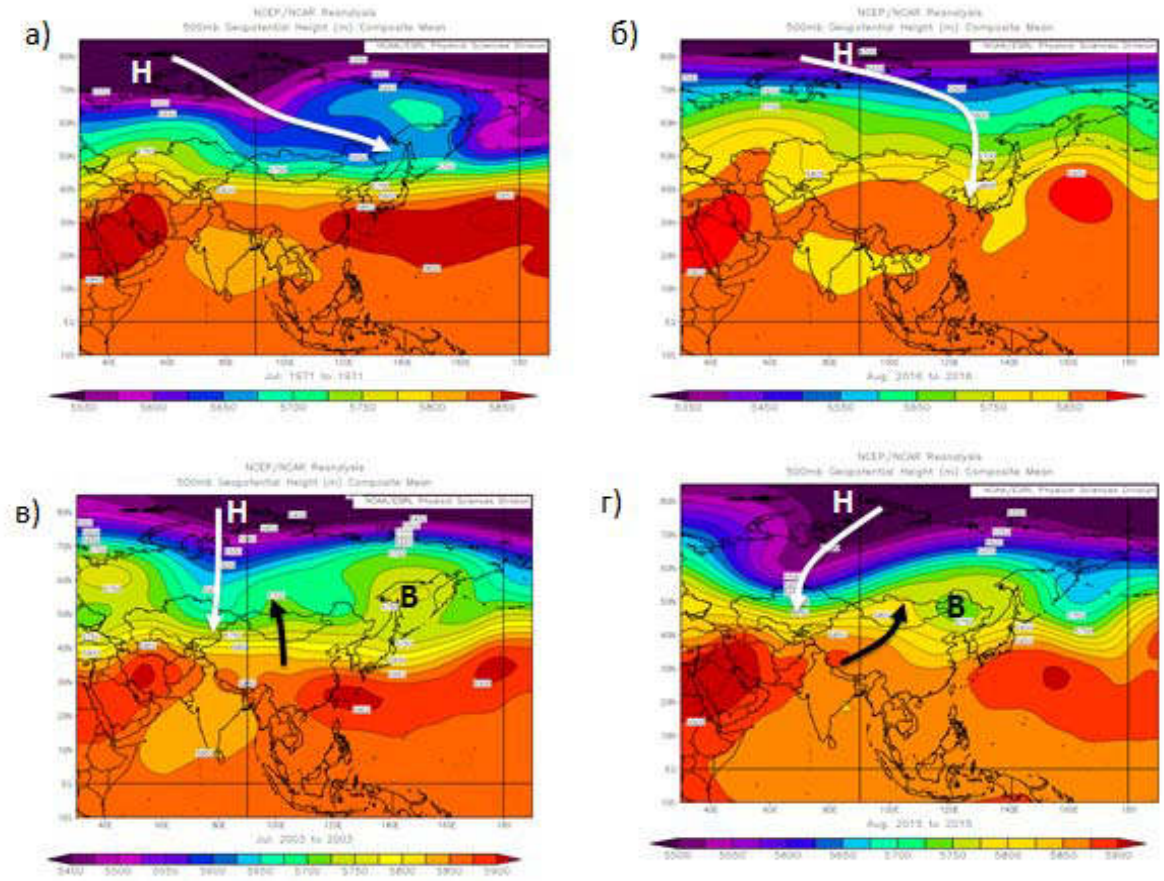


Рис. 7. Высотное барическое поле АТ-500 гПа в летние месяцы 1971 г. (а), 2016 г. (б), 2003 г. (в) и 2015 г. (г)

Кроме того, существенные различия выявлены в интенсивности и расположении осей высотных фронтальных зон и связанных с ними струйных течений. В июле 1971 г. и августе 2016 г., когда атмосферные осадки значительно превышали месячную норму, был усилен зональный перенос над Евразией, над районами формирования монгольских циклонов проходила ось полярной высотной фронтальной зоны и зоны струйных течений, что наглядно видно из рис. 8, *а*, *б*. В засушливые летние месяцы 2003 г. и 2015 г. ось высотной фронтальной зоны и струйного течения была смещена к югу, а скорости ветра на высотах были значительно ниже (рис. 8, *в*, *г*).

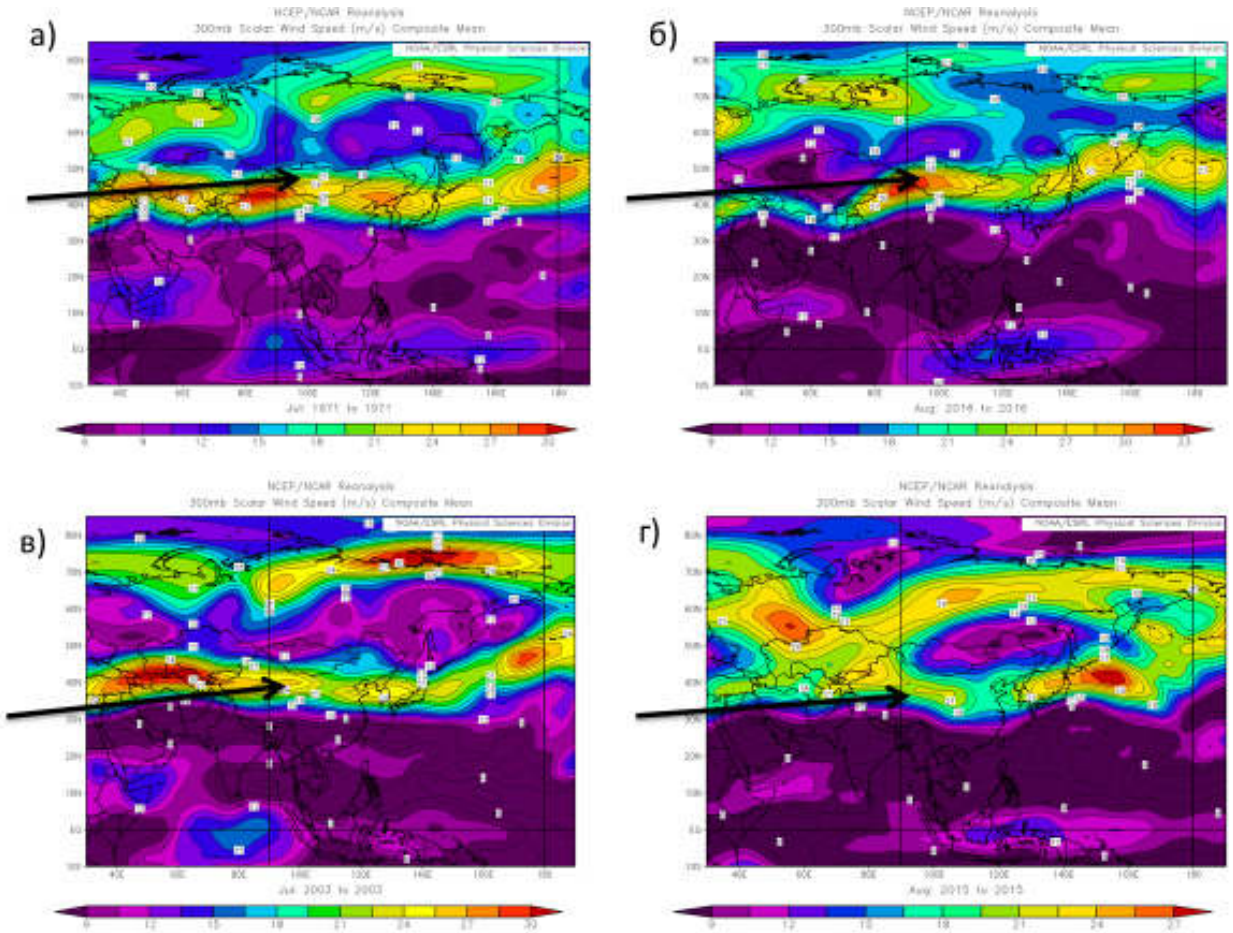


Рис. 8. Высотное барическое поле АТ-300 гПа в летние месяцы 1971 г. (а), 2016 г. (б), 2003 г. (в) и 2015 г. (г)

Выводы

Таким образом, южные циклоны оказывают существенное влияние на режим увлажнения территории Иркутской области, особенно в летние месяцы. Годовое распределение количества южных циклонов неплохо согласуется с сезонным характером температурного режима и указывает на то, что наиболее благоприятные условия для их образования отмечаются на фоне более выраженной адвекции холода на прогретую подстилающую поверхность в период с мая по август. В среднем в 16 % случаев прохождение южных циклонов по территории Иркутской области не сопровождается ухудшением погодных условий. Среди опасных явлений погоды чаще всего с южными циклонами связано усиление ветра, реже всего отмечается туман. Сравнительный анализ приземных и высотных барических полей показал, что благоприятными условиями для выходов южных циклонов на территорию Иркутской области является усиление зонального переноса, полярной высотной фронтальной зоны и струйного течения над Монголией в условиях ориентации оси высотной ложбины на восточные районы Евразии, что способствует адвекции холода, циклонального вихря скорости и обра-

зованию монгольских циклонов. Очевидно, в условиях усиления струйных течений существуют и более благоприятные условия для поступления более влажных воздушных масс с районов Атлантики. В засушливые летние периоды преобладает адвекция тепла под передней частью высотного гребня, в результате чего получают развитие процессы блокирования, которые в засушливые летние месяцы 2003 г. и 2015 г. наблюдались от 3 до 5 раз в месяц. При прогнозировании монгольских циклонов следует учитывать прогностические поля геопотенциала и струйных течений, как важных индикаторов цикло- и антициклогенеза.

Список литературы

1. Типы атмосферного блокирования, обуславливающие дипольное колебание осадков Монголия – Восточная Сибирь в летний период / О. Ю. Антохина, П. Н. Антохин, Е. В. Девятова, В. И. Мордвинов // Двенадцатое Сибирское совещание и школа молодых ученых по климато-экологическому мониторингу : тез. докл. рос. конф. / под ред. М. В. Кабанова. Томск : Офсет центр, 2017. 241 с.

2. Байдал М. Х. Долгосрочные прогнозы погоды и колебания климата Казахстана. Ч. 1, 2. Л. : ГИМИЗ, 1964. 369 с.

3. Вангенгейм Г. Я. О колебаниях атмосферной циркуляции над верным полушарием // Изв. АН СССР. Сер. География и геофизика. 1948. № 3. С. 36–42.

4. Дмитриева В. Т., Напрасников А. Т. Геотопологические системы увлажнения и теплообеспеченности Байкальского региона и Монголии // Вестн. МГПУ. Сер. Естеств. науки. 2011. № 1 (7). С. 35–45.

5. Егорина А. В. Режим атмосферной циркуляции над Евразией // Междунар. журн. приклад. и фундамент. исслед. 2015. № 6. С.265–268.

6. Кошинский С. Д., Дробышева А. Д. Опасные явления погоды на территории Сибири и Урала. Л. : Гидрометеоиздат, 1987. Ч. 5. 216 с.

7. Латышева И. В., Белоусова Е. П., Иванова А. С. Аэросиноптические условия выхода южных циклонов на южные районы Предбайкалья и их влияние на деятельность авиации // Метеоспектр. 2006. № 1. С. 111–115.

8. Хуторянская Д. Ф. Региональные особенности синоптических процессов над Восточной Сибирью : учеб. пособие. Иркутск : Изд-во ИГУ, 2012. 162 с.

9. Пространственно-временная оценка изменения растительного покрова засушливых климатических зон по Байкало-Гобийскому трансекту / Б. З. Цыдыпов, Е. Ж. Гармаев, Ж. Б. Алымбаева, Э. А. Батоцыренов, А. А. Аюржанаев, Д. О. Саяпина, М. А. Жарникова, Б. В. Содномов, А. К. Тулохонов // Науч. обозрение. 2016. № 5. С. 8–16.

УДК 551.51:504.054(571.53)

Мезомасштабные факторы загрязнения атмосферного воздуха на территории Иркутской области и Забайкалья

С. Ж. Вологжина [1] (svologzhina@gmail.com), В. Л. Макухин [1,2] (aerosol@lin.irk.ru), Л. В. Голубева [1] (tatun0203@yandex.ru)

[1] Иркутский государственный университет, Иркутск
[2] Лимнологический институт СО РАН, Иркутск

Аннотация. Для исследования процессов переноса примесей на Байкал от городов центральной зоны были проведены численные расчёты с использованием математической модели распространения и трансформации примесей. Результаты расчётов по модели качественно и количественно совпадают с данными полевых измерений. При слабо выраженных турбулентных процессах в атмосфере выбросы предприятий городов, расположенных в долинах рек Ангара и Селенга, могут распространяться узкой полосой на Южный Байкал с соответствующими воздушными потоками. Модельные оценки подтверждают также возможность застоя и накопления выбросов Байкальска, Каменска и Селенгинска на склонах окружающих хребтов и в орографически замкнутых котловинах.

Ключевые слова: озеро Байкал, атмосферные загрязнения, диоксид серы, численная модель.

Введение

В последние десятилетия проблема загрязнения окружающей среды становится всё более актуальной. В результате развития промышленности и увеличения парка автотранспорта в атмосферу выбрасывается огромное количество загрязняющих примесей. К основ-

ным загрязнителям атмосферы, оказывающим вредное воздействие на здоровье человека и окружающую среду, относятся диоксид серы и оксиды азота. Участвуя в фотохимических реакциях с кислородом и углеводородами, эти вещества генерируют другие загрязнители, такие как пероксиацетилнитраты, озон и др. Диоксиды серы и азота, будучи выброшены в атмосферу, участвуют в образовании кислот и солей кислот, т. е. сульфатов и нитратов. Вместе с воздушными массами эти вещества могут переноситься на десятки, сотни, а иногда и тысячи километров и, осаждаясь под действием гравитации и выпадая с осадками в виде кислотных дождей, увеличивают кислотность почв, воды в водоёмах и водотоках, что приводит к угнетению и гибели растений и водных обитателей, животных, вызывает различные заболевания у человека.

Уровень сегодняшних требований к системе контроля состояния атмосферы подразумевает не только предоставление информации о концентрациях отдельных компонентов в отдельных точках, но и всестороннее и количественное описание процессов выбросов и образования в атмосфере загрязняющих веществ на больших пространствах, их трансформации, переноса и удаления. Исследование таких процессов требует комплексного подхода, сочетающего анализ данных инструментальных измерений и результатов математического моделирования.

Математическим моделированием процессов распространения, трансформации и осаждения загрязняющих веществ в атмосфере занимаются многие учёные и группы исследователей. На основе ансамблевой траекторной модели выполнена пространственная локализация наиболее значимых для станции атмосферного мониторинга ZOTTO источников эмиссий CO [19]. В работе [15] предложена численная эйлерова глобальная транспортно-химическая модель состава атмосферы GEOS-Chem, учитывающая все основные природные и антропогенные источники и стоки химически активных газов и аэрозолей. Метеорологические поля и данные о подстилающей поверхности с временным разрешением 3 и 6 часов берутся из системы глобальной ассимиляции данных GEOS-GMAO и проецируются на расчётную сетку модели. В модели предусмотрено задание следующих основных типов эмиссий: антропогенных, биогенных, от горения биомассы. Модель учитывает основные механизмы переноса и трансформации примесей в атмосфере: горизонтальный и вертикальный перенос, эмиссию, осаждение и химические превращения, а также кинетические процессы формирования и эволюции аэрозолей. Результатом моделирования является распределение содержания атмосферных примесей в пространстве и времени.

В последние десятилетия разработаны и активно используются различные трёхмерные численные модели газового состава атмосферы ССМ, позволяющие моделировать пространственно-временные вариации климатически важных малых газовых составляющих атмосферы, а также прогнозировать их изменения [16]. Важное значение имеют валидация, т. е. обоснование того, что процесс приведёт к получению достоверных результатов, и усовершенствование моделей на основе сопоставления с экспериментальными данными для разных регионов земного шара. В частности, валидации ряда разработанных моделей был посвящён специальный международный проект [18]. Достаточно подробный обзор по моделированию атмосферных процессов в регионе Байкала и прилегающих территорий предложен в работе [8].

Цель и методы исследования

Целью данной работы являлось исследование процессов распространения и трансформации примесей с помощью математической модели, основанной на численном решении трёхмерного нелинейного нестационарного полуэмпирического уравнения турбулентной диффузии примесей [6; 7]. Кроме процессов адвективного и конвективного переноса и турбулентной диффузии модель учитывает трансформацию малых газовых составляющих атмосферы. Модель успешно применялась ранее при изучении процессов распространения и трансформации аэрозолей и газовых примесей в регионе Южного Байкала [3; 9–14]. Информация об интенсивности источников выбросов была взята из работы [17].

Обсуждение результатов

Первая серия численных экспериментов проводилась с целью исследования влияния метеорологических условий на распространение твёрдых взвесей и, как следствие, на форму дымовых факелов от источников. Моделирование процессов распространения примесей проводилось в области площадью 10×2 км^2 и высотой 2 км над горизонтальной подстилающей поверхностью. Шаги по времени и пространству составляли соответственно 3 с и 20 м. Коэффициенты турбулентной диффузии рассчитывались с использованием соотношений полуэмпирической теории турбулентности. Интенсивность выбросов твёрдых взвесей составила 7119,2 т/год. Высота источников выбросов составляла 180 и 250 м.

На рис.1, *а* приведён результат расчёта при сильной конвекции, когда из-за значительных скоростей подъёма воздуха в термиках (струях и пузырях тёплого воздуха) создаются условия для проникновения частиц примеси до нижней кромки облаков. Наблюдается волнообразная форма факела. При слабой конвекции, характерной для слабо неустойчивой или безразличной стратификации атмосферы, наблюдается конусообразный факел (рис. 1, *б*). Если источник выбросов расположен в инверсионном слое, дымовой факел узкий, линейный (рис. 1, *в*). Такая ситуация характерна в ясные ночи, когда земля охлаждается, излучая тепло.

Если источник расположен примерно на уровне верхней границы инверсии, факел приподнятый, срезанный снизу (рис. 1, *г*). Приподнятый факел появляется в то время, когда слой инверсии (аномальное изменение температуры) находится ниже промышленных выбросов. Он формируется в полдень и на рассвете при ясном небе. В течение суток под действием солнечных лучей отрицательный температурный градиент развивается во всем нижнем слое атмосферы. Тепло, излучаемое поверхностью земли после полудня, способствует образованию приземной инверсии. Когда слой инверсии углубляется, приподнятая струя газовоздушной смеси переходит в нитевидный факел. При таких условиях загрязнения рассеиваются во время перемещения примесей в направлении ветра и значительной приземной концентрации не наблюдается. В случае расположения инверсионного слоя выше источника выбросов дымовой факел, срезанный сверху, задымляет приземный слой (рис. 1, *д*).

Процессы распределения твердых выбросов в атмосфере качественно и количественно подтверждаются результатами других исследователей [4]. Таким образом, модель правильно описывает достаточно сложные атмосферные процессы. Результаты расчётов свидетельствуют, что наибольшее загрязнение акватории оз. Байкал твёрдыми взвесями происходит в случае расположения инверсионного слоя выше источника выбросов. Наличие задерживающего слоя с ослабленной турбулентностью приводит к увеличению приземной концентрации в 1,5–2 раза, а иногда и больше.

Результаты этих расчётов могут быть использованы для типизации метеорологических условий загрязнения воздуха и соответствующих им форм дымовых факелов при различной стратификации атмосферы.

Вторая серия численных экспериментов была проведена для исследования распространения выбросов от предприятий Каменска и Селенгинска. Моделирование процессов распространения примесей проводилось в области площадью 100×60 км^2 и высотой 4 км над поверхностью оз. Байкал. Шаг по вертикали задавался следующим образом: до высоты 350 м он равнялся 50 м, далее – 150 м, 500, 1000 и 2000 м. Шаги по времени и горизонтали составляли 300 с и 1000 м соответственно. Коэффициенты турбулентной диффузии рассчитывались с использованием соотношений полуэмпирической теории турбулентности [15; 19]. Интенсивность источников выбросов задавалась по данным работ [18; 19]. Высота источников выбросов составляла 100 м от поверхности земли.

На рисунке 2, *а*, *б* представлены распределения рассчитанных с помощью модели [15; 19] значений концентраций диоксидов серы и азота в долине р. Селенга при характерном для периода ноябрь – январь ветровом потоке восток-северо-восточного направления скоростью 2 м/с. Горизонтальные коэффициенты турбулентной диффузии примесей не превышали 1100 м^2/с, вертикальный – 8 м^2/с.

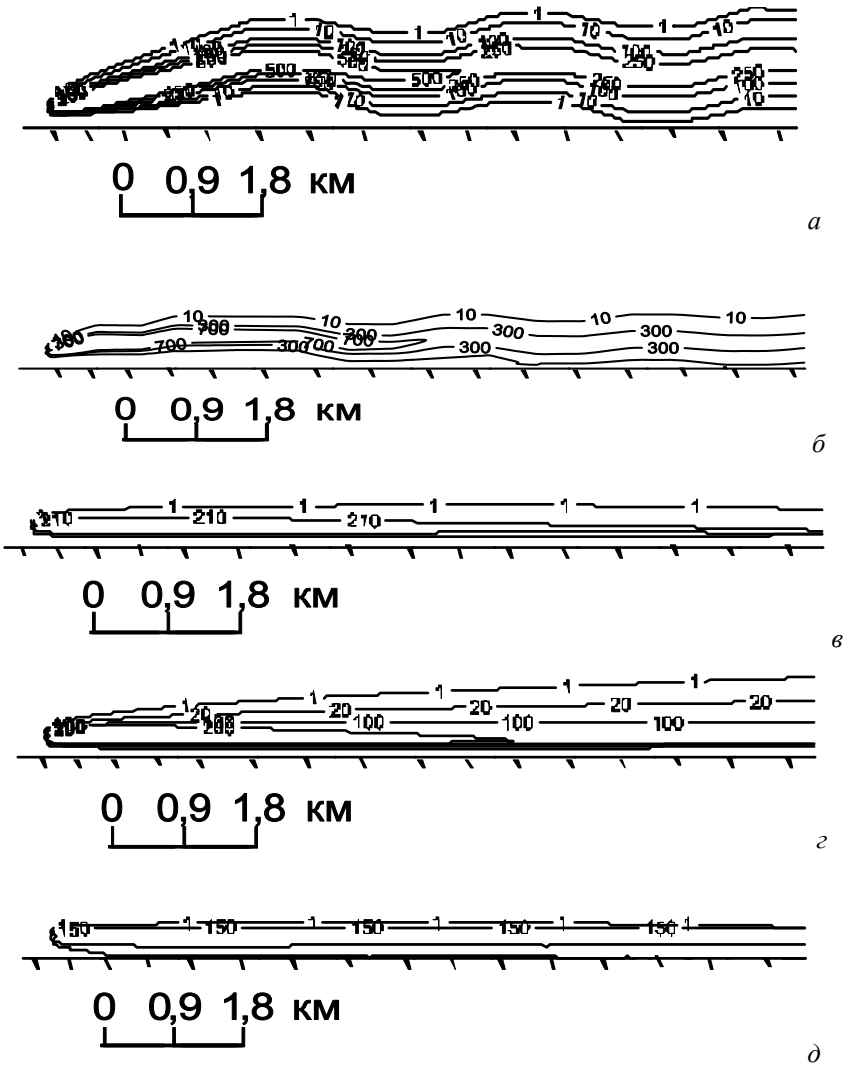


Рис. 1. Изолинии рассчитанных значений концентраций твёрдых взвесей (в мкг/м^3) при сильной конвекции (*а*), слабой конвекции (*б*), расположении источника в инверсионном слое (*в*), расположении источника на верхней границе инверсии (*г*), расположении источника ниже слоя инверсии (*д*)

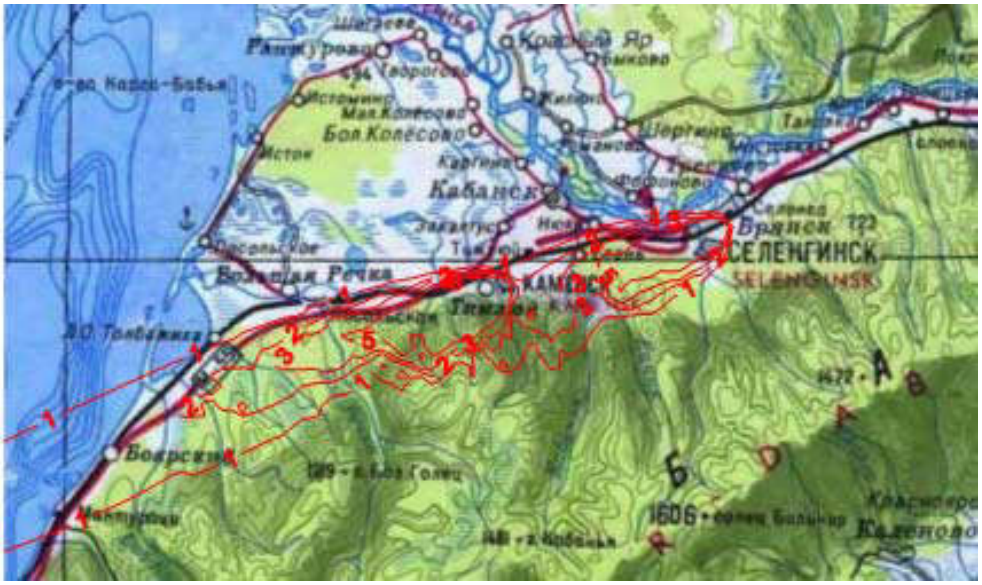


Рис. 2, а. Изолинии рассчитанных приземных концентраций диоксида серы на восточном побережье Байкала при восток-северо-восточном ветре скоростью 2 м/с, в мкг/м^3

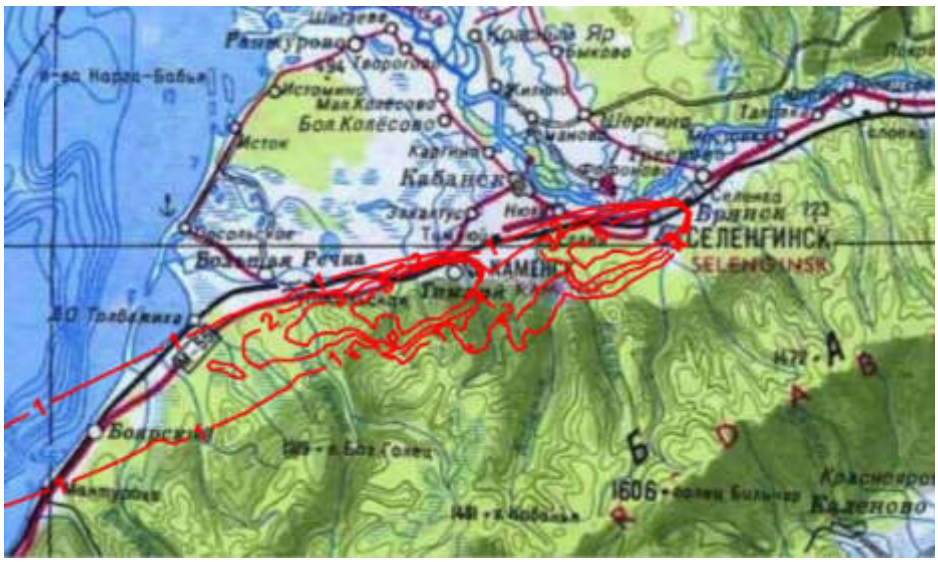


Рис. 2, б. Изолинии рассчитанных приземных концентраций диоксида серы на восточном побережье Байкала при восток-северо-восточном ветре скоростью 1 м/с, в мкг/м^3

Следующие численные эксперименты проводились при значении вертикального коэффициента турбулентности 3 м^2/с. Шаг по времени составлял 60 с. Шаг по вертикали задавался следующим образом: до высоты 100 м он равнялся 20 м, до высоты 350 м – 50 м, далее – 150 м, 500, 1000 и 2000 м. Высота источников выбросов составляла 20 м от поверхности земли. Рисунок 2, *г* иллюстрирует распределение значений концентраций SO_2 при том же направлении ветрового потока. Значения приземных концентраций на одинаковом расстоянии от источника выбросов больше, чем в предыдущем случае (рис. 2, *в*).

На рисунок 2, *д* показано распределение концентраций диоксида серы при восток-северо-восточном ветре при отсутствии рельефа. Над горизонтально однородной поверхностью примесь распространяется на большее расстояние от источника выбросов.

Третья серия численных экспериментов была проведена для исследования распространения выбросов от предприятий Иркутско-Черемховского промышленного узла, городов Слюдянка, Байкальск, Каменск и Селенгинск.

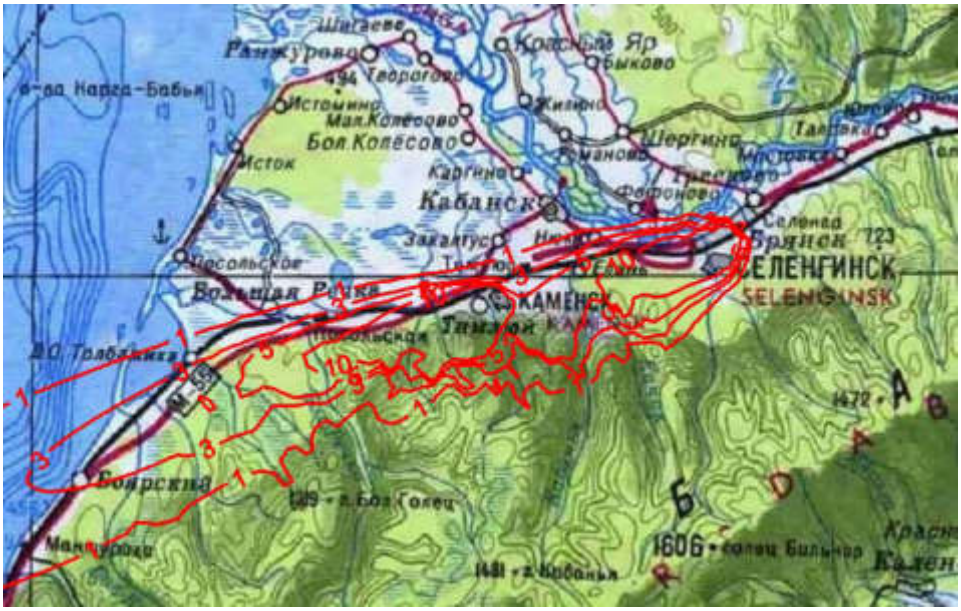


Рис. 2, в. Изолинии рассчитанных приземных концентраций диоксида азота на восточном побережье Байкала при восток-северо-восточном ветре скоростью 2 м/с, в мкг/м^3

Следующие численные эксперименты проводились при значении вертикального коэффициента турбулентности 3 м^2/с. Шаг по времени составлял 60 с. Шаг по вертикали задавался следующим образом: до высоты 100 м он равнялся 20 м, до высоты 350 м – 50 м, далее – 150 м, 500, 1000 и 2000 м. Высота источников выбросов составляла 20 м от поверхности земли. Рисунок 2, *г* иллюстрирует распределение значений концентраций SO2 при том же направлении ветрового потока. Значения приземных концентраций на одинаковом расстоянии от источника выбросов больше, чем в предыдущем случае (рис. 2, *в*).

На рисунке 2, *д* показано распределение концентраций диоксида серы при восток-северо-восточном ветре при отсутствии рельефа. Над горизонтально однородной поверхностью примесь распространяется на большее расстояние от источника выбросов.

Третья серия численных экспериментов была проведена для исследования распространения выбросов от предприятий Иркутско-Черемховского промышленного узла, городов Слюдянка, Байкальск, Каменск и Селенгинск.

Моделирование процессов распространения примесей проводилось в области площадью 350×200 км^2 и высотой 4 км над поверхностью оз. Байкал. Шаг по вертикали задавался следующим образом: до высоты 200 м он равнялся 50 м, далее до высоты 500 м – 100 м, далее – 500 м, 1000 и 2000 м. Шаги по времени и горизонтали изменялись от 60 до 150 с и от 500 до 1000 м соответственно. Коэффициенты турбулентной диффузии рассчитывались с использованием соотношений полуэмпирической теории турбулентности [1].

На рисунке 3, *а* представлено распределение рассчитанных с помощью модели [1; 2] значений концентраций диоксида серы в регионе Южного Байкала при характерном для весеннего периода ветровом потоке запад-северо-западного направления скоростью 5 м/с. Горизонтальные коэффициенты турбулентной диффузии примесей не превышали 2300 м^2/с. Рисунок 3, *б* иллюстрируют распределения рассчитанных значений концентраций диоксида серы при северо-западном ветре в долине Ангары и юго-западном – в Забайкалье.

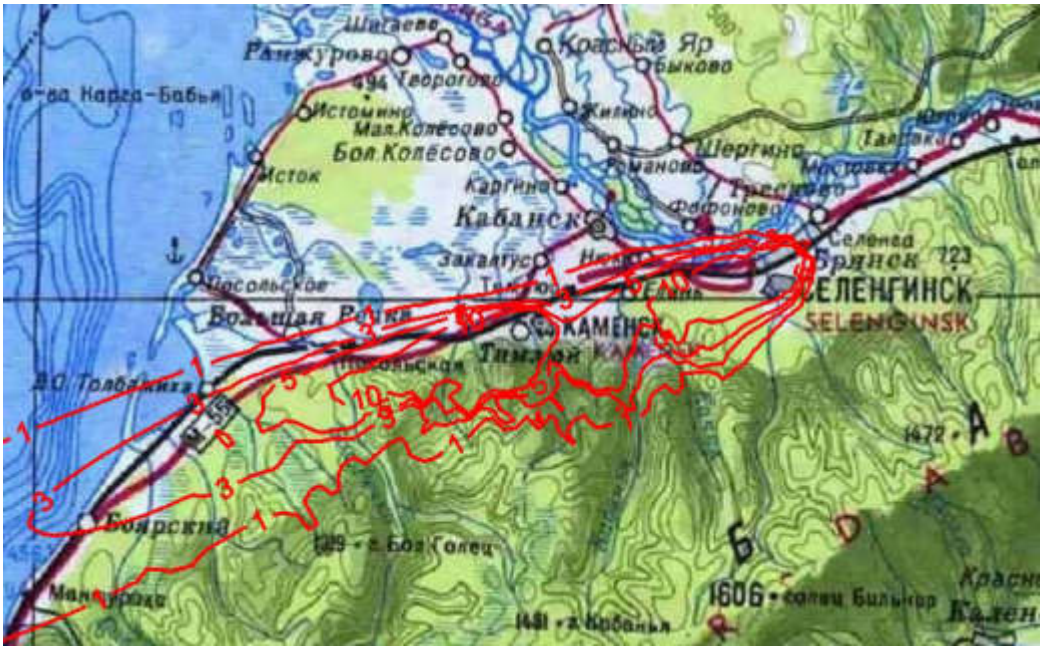


Рис. 2, г. Изолинии рассчитанных приземных концентраций диоксида серы на восточном побережье Байкала при восток-северо-восточном ветре скоростью 1 м/с, в мкг/м^3. Источники выбросов расположены на высоте 20 м

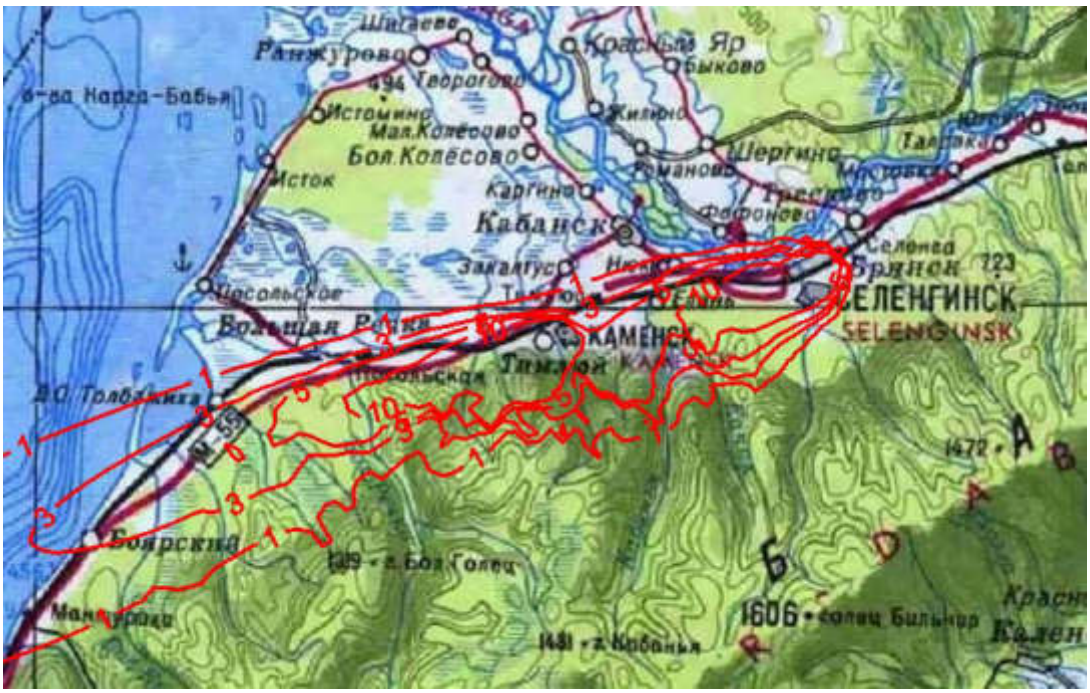


Рис. 2, д. Изолинии рассчитанных приземных концентраций диоксида серы на восточном побережье Байкала при восток-северо-восточном ветре скоростью 1 м/с, в мкг/м^3. Источники выбросов расположены на высоте 20 м. Рельеф отсутствует

На рисунке 3, *в* приведены рассчитанные значения концентраций диоксида серы при запад-северо-западном ветре в долине Ангары и запад-юго-западном – в Забайкалье скоростью 5 м/с. Рисунки 3, *г* и *д* иллюстрируют распределения рассчитанных значений концентраций диоксида серы при запад-северо-западном ветре в долине Ангары и юго-юго-западном – в Забайкалье скоростью также 5 м/с при различных значениях горизонтального коэффициента турбулентной диффузии.



Рис. 3, а. Изолинии рассчитанных приземных концентраций диоксида серы в регионе Южного Байкала при запад-северо-западном ветре скоростью 5 м/с, в мкг/м^3

Результаты численных экспериментов показали, что метеорологические условия оказывают существенное воздействие на процессы переноса, диффузии и трансформации загрязняющих веществ в атмосфере.

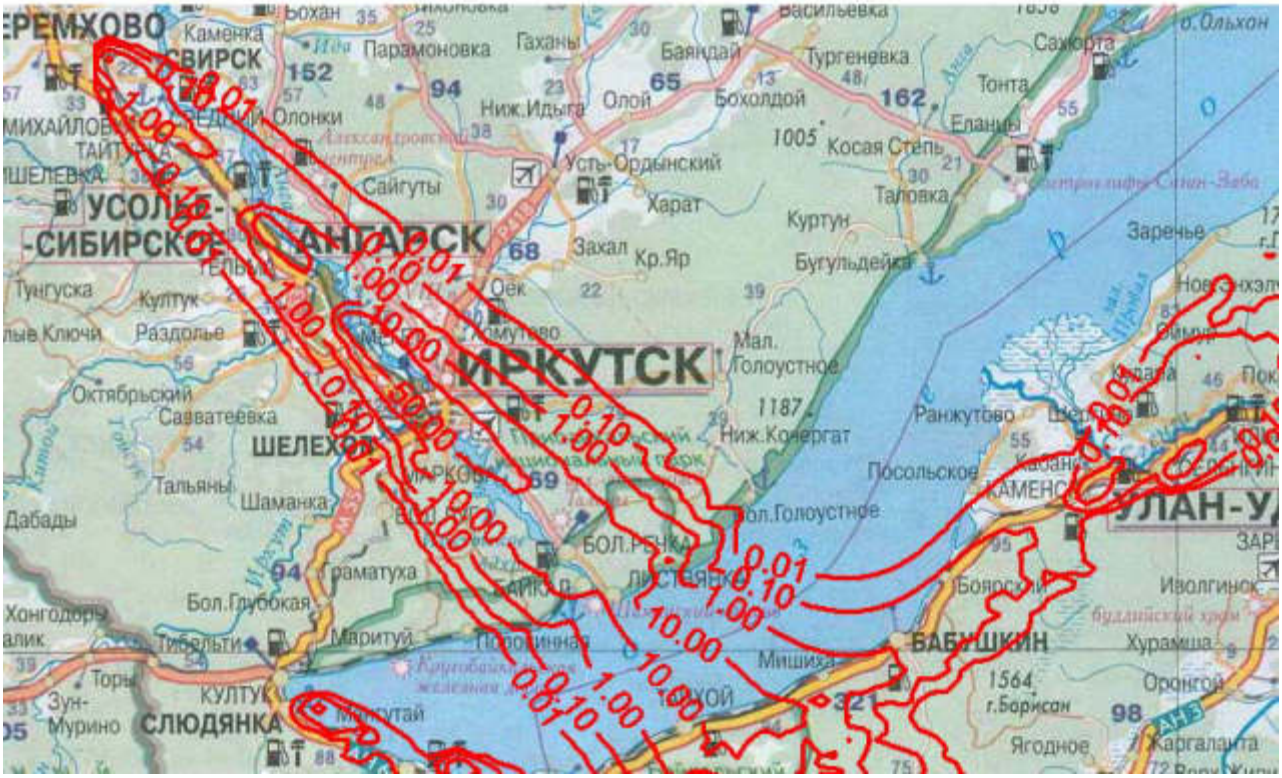


Рис. 3, б. Изолинии рассчитанных приземных концентраций диоксида серы в регионе Южного Байкала при северо-западном ветре скоростью 5 м/с в долине Ангары и юго-западном (5 м/с) в Забайкалье, в мкг/м^3



Рис. 3, в. Изолинии рассчитанных приземных концентраций диоксида серы в регионе Южного Байкала при запад-северо-западном ветре скоростью 5 м/с в долине Ангары и запад-юго-западном (5 м/с) в Забайкалье, в мкг/м^3

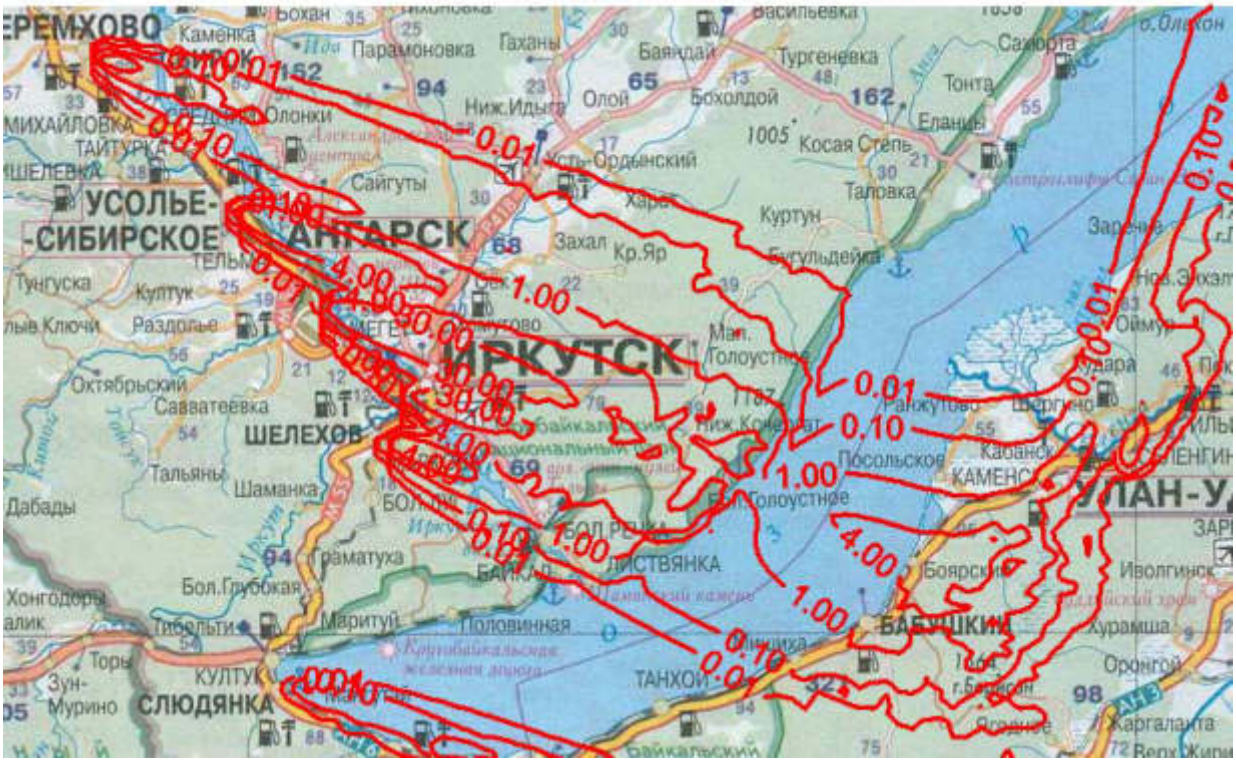


Рис. 3, г. Изолинии рассчитанных приземных концентраций диоксида серы в регионе Южного Байкала при запад-северо-западном ветре скоростью 5 м/с в долине Ангары и юго-юго-западном (5 м/с) в Забайкалье, в мкг/м^3



Рисунок 3д – Изолинии рассчитанных приземных концентраций диоксида серы в регионе Южного Байкала при запад-северо-западном ветре скоростью 5 м/с в долине Ангары и юго-юго-западном (5 м/с) в Забайкалье, в мкг/м^3.

Следующие численные эксперименты проводились при запад-северо-западном ветре в долине Ангары и северном, север-северо-восточном и северо-восточном ветрах – в Забайкалье скоростью 5 м/с. Результаты представлены на рис. 3е, ж, з.

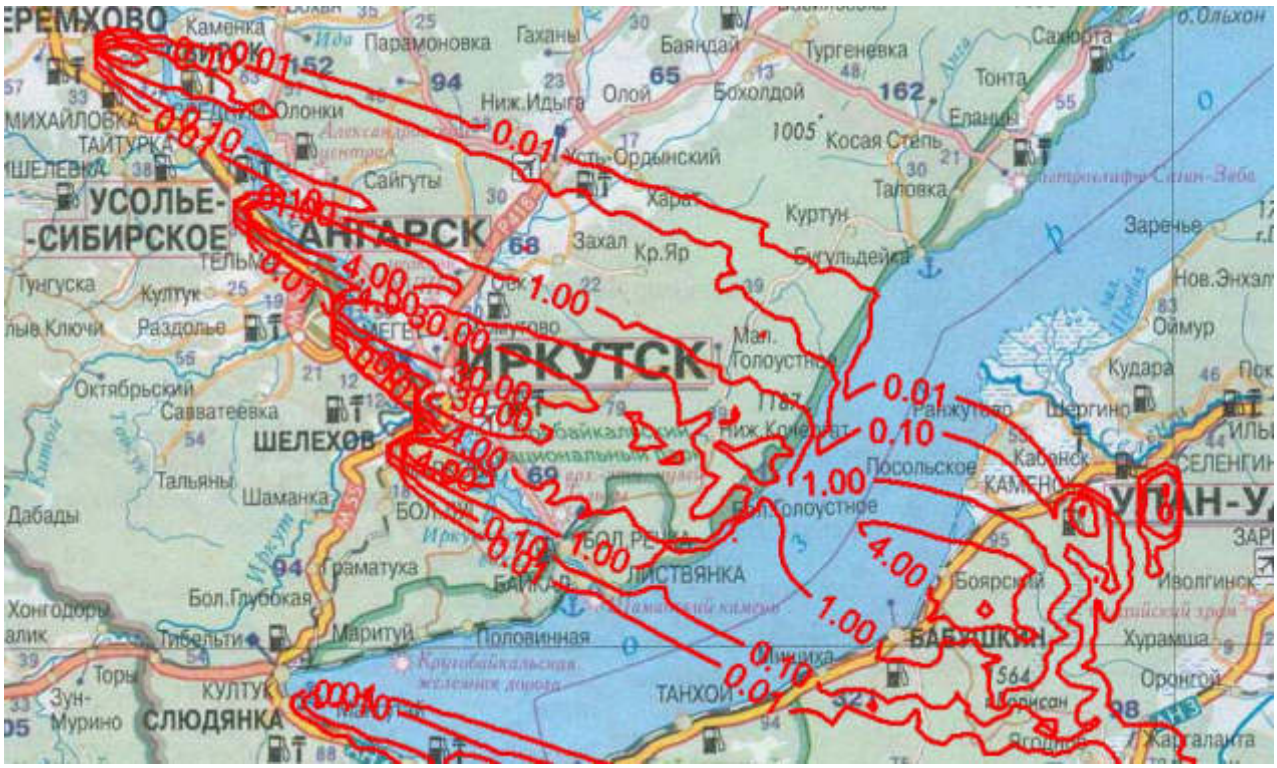


Рис. 3, е. Изолинии рассчитанных приземных концентраций диоксида серы в регионе Южного Байкала при запад-северо-западном ветре скоростью 5 м/с в долине Ангары и северном (5 м/с) в Забайкалье, в мкг/м^3

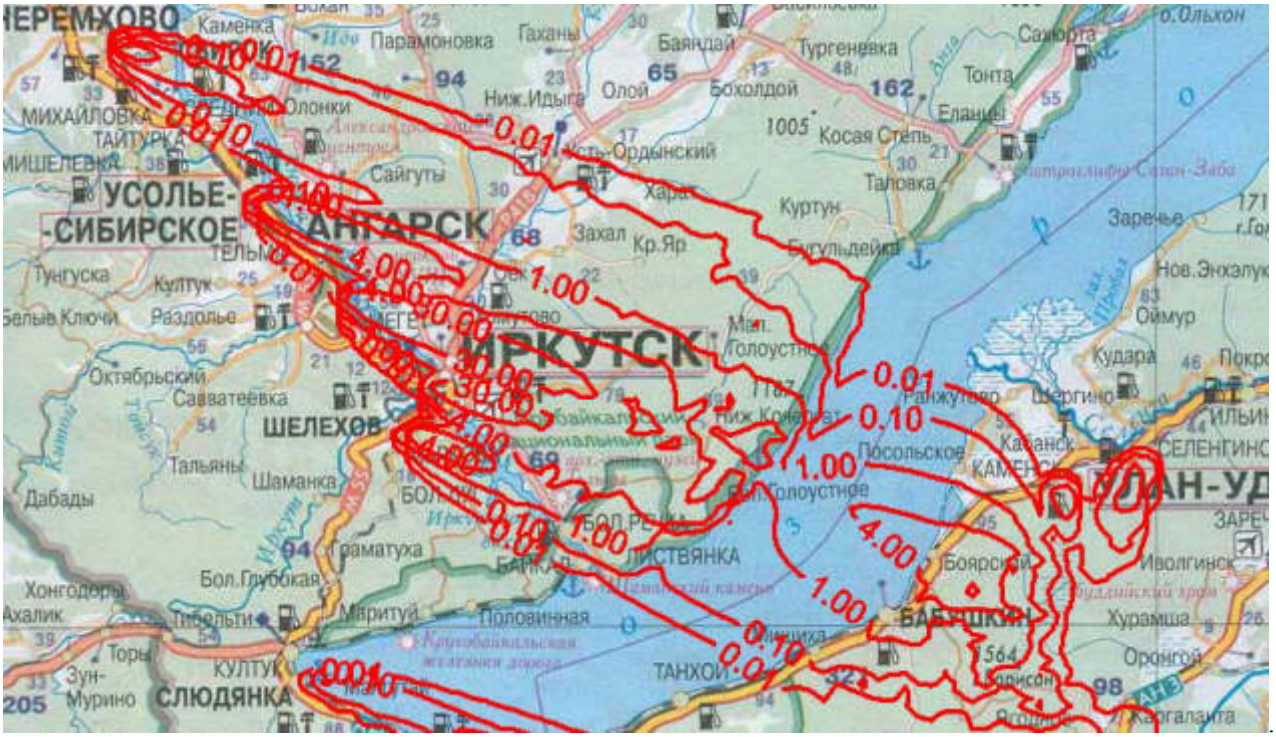


Рис. 3, ж. Изолинии рассчитанных приземных концентраций диоксида серы в регионе Южного Байкала при запад-северо-западном ветре скоростью 5 м/с в долине Ангары и север-северо-восточном (5 м/с) в Забайкалье, в мкг/м^3

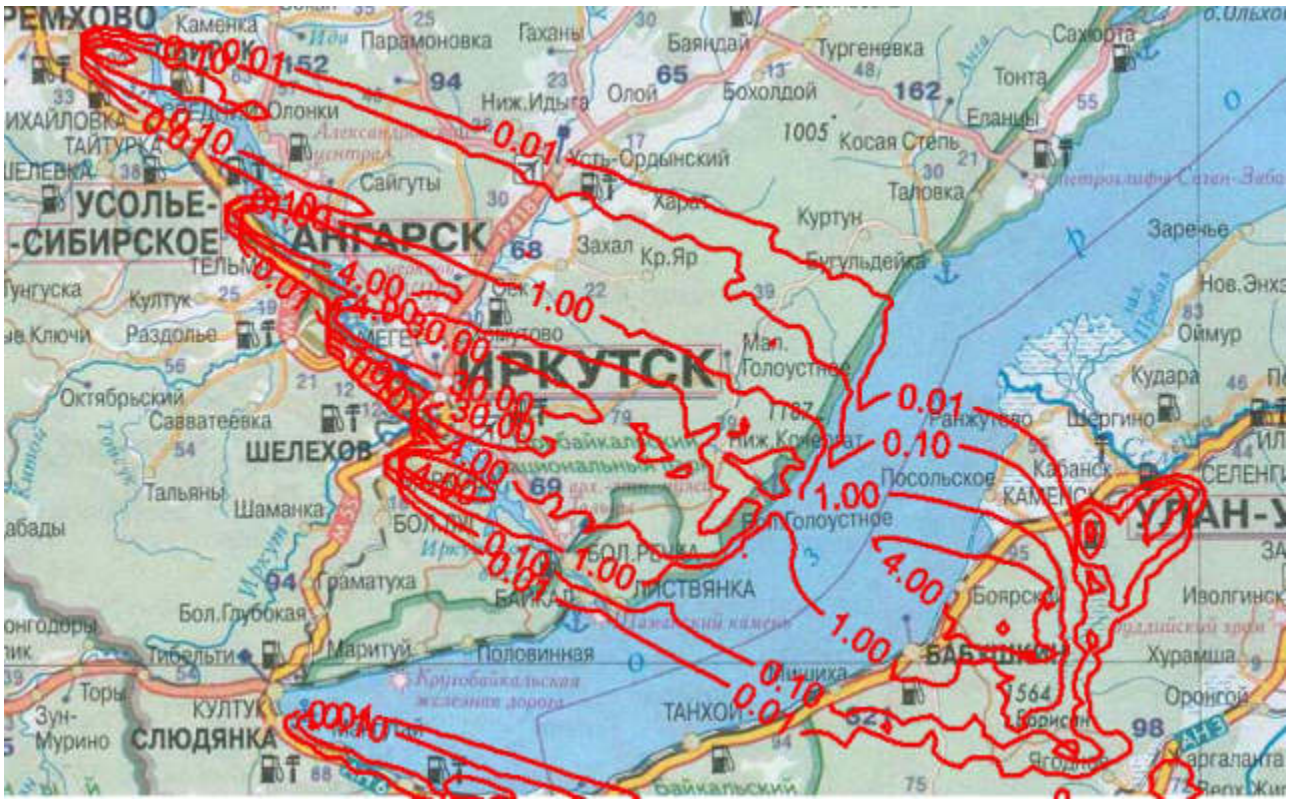


Рис. 3, з. Изолинии рассчитанных приземных концентраций диоксида серы в регионе Южного Байкала при запад-северо-западном ветре скоростью 5 м/с в долине Ангары и северо-восточном (5 м/с) в Забайкалье, в мкг/м^3

На рисунке 3, *и* показано распределение концентраций диоксида серы при метеорологической ситуации, характерной для декабря, когда ветровые потоки направлены с холодной суши на тёплое озеро.

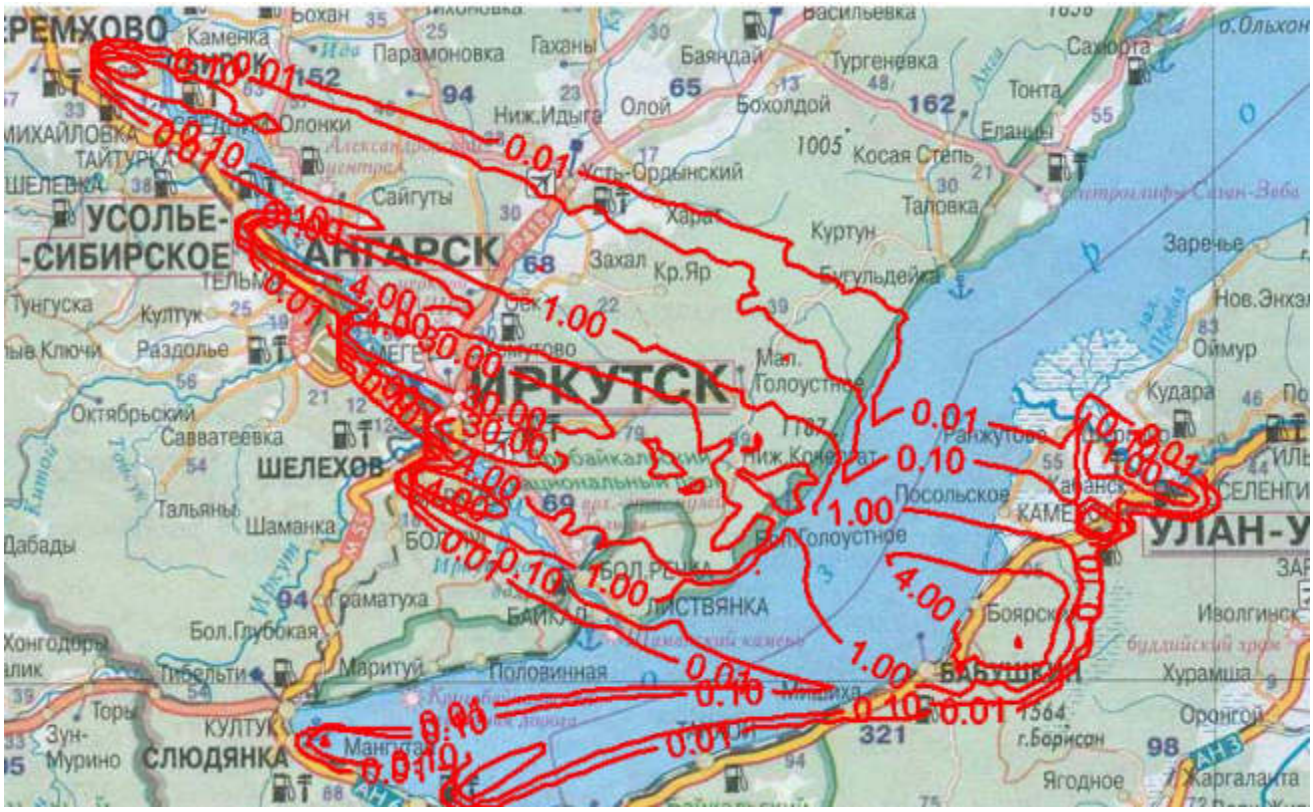


Рис. 3, и. Изолинии рассчитанных приземных концентраций диоксида серы в регионе Южного Байкала в декабре, в мкг/м^3. Скорость ветра 5 м/с

Выводы

Результаты расчётов по модели качественно и количественно совпадают с данными полевых измерений. При слабо выраженных турбулентных процессах в атмосфере выбросы предприятий городов, расположенных в долинах рек Ангара и Селенга, могут распространяться узкой полосой на Южный Байкал с соответствующими воздушными потоками. Модельные оценки подтверждают также возможность застоя и накопления выбросов Байкальска, Каменска и Селенгинска на склонах окружающих хребтов и в орографически замкнутых котловинах.

Результаты расчётов могут быть полезны для типизации метеорологических условий загрязнения воздуха и соответствующих им форм дымовых факелов при различной стратификации атмосферы.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке концепций эффективной эксплуатации рекреационных ресурсов региона озера Байкал.

Список литературы

1. Аргучинцев В. К., Аргучинцева А. В. Моделирование мезомасштабных гидротермодинамических процессов и переноса антропогенных примесей в атмосфере и гидросфере региона оз. Байкал. Иркутск : Изд-во ИГУ, 2007. 255 с.

2. Аргучинцев В. К., Макухин В. Л. Математическое моделирование распространения аэрозолей и газовых примесей в пограничном слое атмосферы // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9, № 6. С. 804–814.

3. Исследование распределения соединений серы и азота в приводном слое оз. Байкал / В. К. Аргучинцев, В. Л. Макухин, В. А. Оболкин, В. Л. Потемкин, Т. В. Ходжер // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9, № 6. С. 748–754.

4. Берлянд М. Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы Л. : Гидрометеоиздат, 1985. 272 с.

5. О состоянии и об охране окружающей среды Иркутской области в 2012 г. : гос. докл. Иркутск : ИГ им. В. Б. Сочавы СО РАН, 2013. 337 с.

6. О состоянии и охране окружающей среды Республики Бурятия в 2015 г. гос. докл. Улан-Удэ : М-во природ. ресурсов Респ. Бурятия, 2016. 249 с.

7. О состоянии и охране окружающей среды Республики Бурятия в 2011 г. : гос. докл. Улан-Удэ : М-во природ. ресурсов Респ. Бурятия, 2012. 136 с.

8. Макухин В. Л., Потемкин В. Л. Моделирование переноса и трансформации загрязняющих примесей, в том числе ртути, на акватории оз. Байкал // Биосфера. 2012. Т. 4, № 3. С. 286–292.

9. Дальний перенос шлейфов атмосферных выбросов региональных угольных ТЭЦ на акваторию Южного Байкала / В. А. Оболкин, В. Л. Потемкин, В. Л. Макухин, Т. В. Ходжер, Е. В. Чипанина // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30, № 1. С. 60–65.

10. Особенности пространственного распределения диоксида серы в Прибайкалье по данным маршрутных измерений и численных экспериментов / В. А. Оболкин, В. Л. Потемкин, В. Л. Макухин, Е. В. Чипанина, И. И. Маринайте // Метеорология и гидрология. 2014. № 12. С. 35–41.

11. Динамика серосодержащих примесей в атмосфере вокруг точечного источника – Байкальского целлюлозно-бумажного комбината (юго-восточное побережье оз. Байкал) / В. А. Оболкин, В. Л. Потемкин, Т. В. Ходжер, Л. П. Голобокова, У. Г. Филиппова, В. Л. Макухин, К. Тода, М. Такеучи, Т. Обата, К. Хирота // Оптика атмосферы и океана. 2009. Т. 22, № 9. С. 853–858.

12. Потемкин В. Л., Макухин В. Л. Исследование динамики малых газовых примесей в атмосфере Байкальского региона // Оптика атмосферы и океана. 2008. Т. 21, № 2. С. 154–157.

13. Потемкин В. Л., Макухин В. Л. Распределение малых газовых примесей в атмосфере над озером Байкал // География и природные ресурсы. 2008. № 2. С. 80–84.

14. Arguchintsev V. K., Makukhin V. L. Simulation of the spreading and transformation of sulphur and nitrogen compounds in the atmosphere of the southern region around Lake Baikal // Proceedings of SPIE. 2000. N 4341. P. 593–599.

15. Global modeling of tropospheric chemistry with assimilated meteorology: Model description and evaluation / I. Bey, D. J. Jacob, R. M. Yantosca, J. A. Logan, B. D. Field, A. M. Fiore, Q. Li, H. Y. Liu, L. J. Mickley, M. Schultz // J. Geophys. Res. 2001. Vol. 106(D19). P. 23073–23096.

16. A Strategy for Process-Oriented Validation of Coupled Chemistry-Climate Models / V. Eyring [et al.] // Bull. Am. Meteorol. Soc. 2005. Vol. 86, N 13. P. 1117–1133.

17. Low-level atmospheric jets as main mechanism of long-range transport of power plant plumes in the Lake Baikal Region / V. A. Obolkin, V. L. Potemkin, V. L. Makukhin, Y. V. Chipanina, I. I. Marinayte // International Journal of Environmental Studies. 2014. Vol. 71, Is. 3. P. 391–397.

18. SPARC Report on the Evaluation of Chemistry-Climate Models / Ed. by V. Eyring, T. G. Shepherd, D. W. Waugh. SPARC Report N 5, WCRP-132, WMO/TD-No. 1526. 425 p. http://www.atmosp.physics.utoronto.ca/SPARC.

19. Assessment of the regional atmospheric impact of wildfire emissions based. on CO observations at the ZOTTO tall tower station in central Siberia / A. V. Vasileva, K. B. Moiseenko, J.-C. Mayer, N. Jürgens, A. Panov, M. Heimann, M. O. Andreae // J. Geophys. Res. 2011. Vol. 116. D07301. doi:10.1029/2010JD014571.

УДК 551.515.2(571.53)

Исследование ныряющих циклонов по данным Реанализа и глобальной прогностической модели GFS

С. А. Гаращук (svetlanchik.g@rambler.ru)

АМЦ Иркутск Иркутского филиала ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета»

Аннотация. Проведено исследование траекторий циклонов, оказывавших влияние на территорию Иркутской области в апреле 2017 г. Впервые проанализированы условия регенерации циклонов, количественные значения потенциальной энергии конвективной неустойчивости в различных частях циклона на разных стадиях его развития. Особое внимание уделено сравнительному анализу погодных условий в районе г. Иркутска при смещении циклонов по различным траекториям.

Ключевые слова: ныряющие циклоны, траектория смещения, давление, потенциальная энергия.

Введение

Мощные циклоны являются причиной опасных явлений погоды. Согласно последним исследованиям зарубежных авторов в арктическом бассейне Северной Атлантики выявлена тенденция увеличения экстремальных циклонов в ноябре и декабре, а в районе морей Баренцева и Карского наоборот их уменьшение в декабре и январе.

В то же время по данным ансамблевого прогноза предполагается, что потепление климата может подавить деятельность внетропических циклонов за счёт снижения бароклинности в нижнем слое тропосферы. По данным Мохова И. И. и Акперова М. Г., к концу XXI в. число внетропических циклонов может сократиться приблизительно на 8 % по сравнению с современными данными.

В этой связи важно проводить исследование энергетики и динамики внетропических циклонов, для того, чтобы иметь представление о запасах доступной потенциальной энергии, которые реализуются в кинетическую и определяют интенсивность процессов развития таких опасных явлений, как образование гроз, шквала, сильного ветра и других. В данной работе проведено исследование ныряющих циклонов, которые оказывали влияние на погодные условия в Иркутске в апреле 2017 г. Отличительной особенностью данного исследования является то, что оно выполнено на основе выходных данных гидродинамического моделирования при помощи мезомасштабной модели GFS с шагом сетки порядка 33 км. В качестве характеристик циклонов рассматривались: давление в его центре, направление и скорость ветра в циклоне, общее содержание влаги в облаках и потенциальная энергия конвективной неустойчивости в зоне холодного и теплого фронта.

Обсуждение результатов

На рисунке 1 показаны характеристики циклонов в момент смещения на районы г. Иркутска. Видно, что давление в их центре изменялось от 984 до 1008 гПа, т. е. перепад давления составил 24 гПа. Средняя скорость ветра изменялась от 3 до 13 м/с, влагосодержание облаков достигало в зоне теплого фронта 1,7 кг/м^2, а потенциальная энергия конвективной неустойчивости 260 Дж/кг.

Филипинских островов и имели жизненный цикл более месяца, обогнув практически весь земной шар, они достигли территории Иркутской области. Наибольшие ухудшения погодных условий в г. Иркутске вызвал циклон, наблюдавшийся 3 апреля 2017 г. С ним было связано выпадение сильного ливневого снега с видимостью от 700 до 1400 м продолжительностью около 6 часов. Как видно из рис.3, на момент смещения в районы г. Иркутска в зоне холодного фронта значительно возросла энергия конвективной неустойчивости.

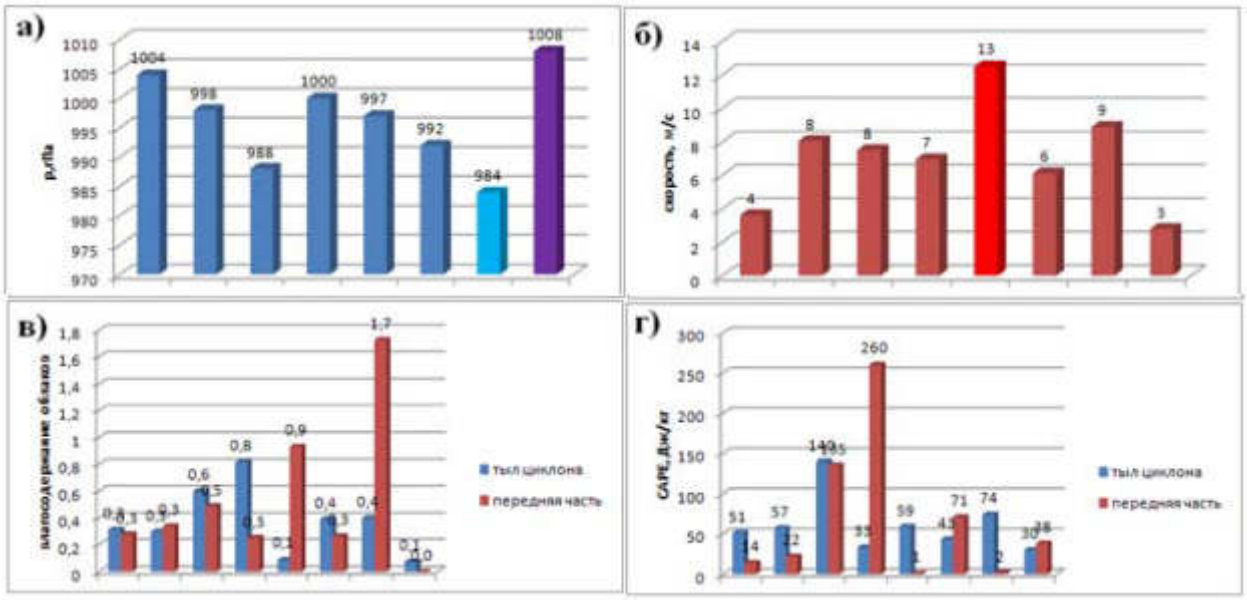


Рис. 1. Характеристики ныряющих циклонов, которые оказывали влияние на погодные условия Иркутской области в апреле 2017 г.: глубина циклона (а), средняя скорость ветра (б), влагосодержание облаков (в) и потенциальная энергия конвективной неустойчивости (г)

На рисунке 2 показаны траектории смещения циклонов, которые оказывали влияние на погоду в Иркутске в апреле 2017 г. Всего за месяц было зафиксировано 8 выходов ныряющих циклонов.

Следует отметить, три циклона сформировались в Тихом океане севернее.

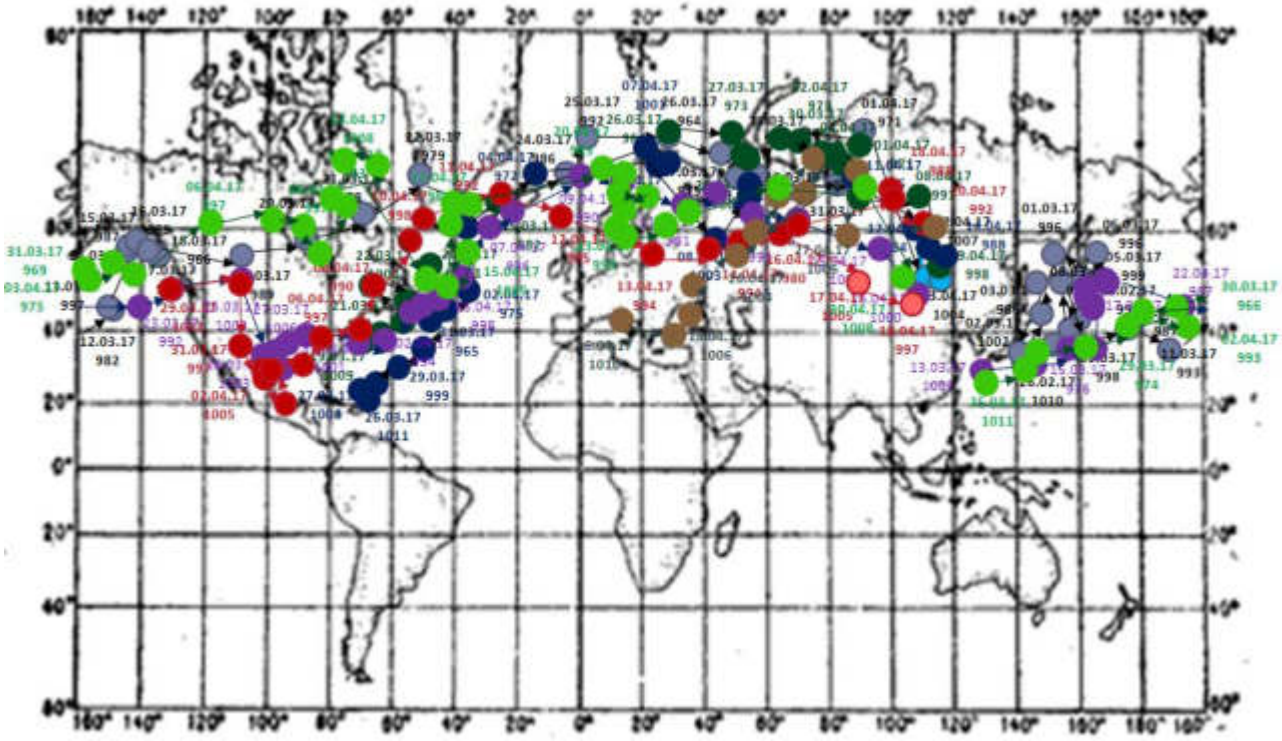


Рис. 2. Траектории циклонов, которые оказывали влияние на погодные условия Иркутской области в апреле 2017 г.

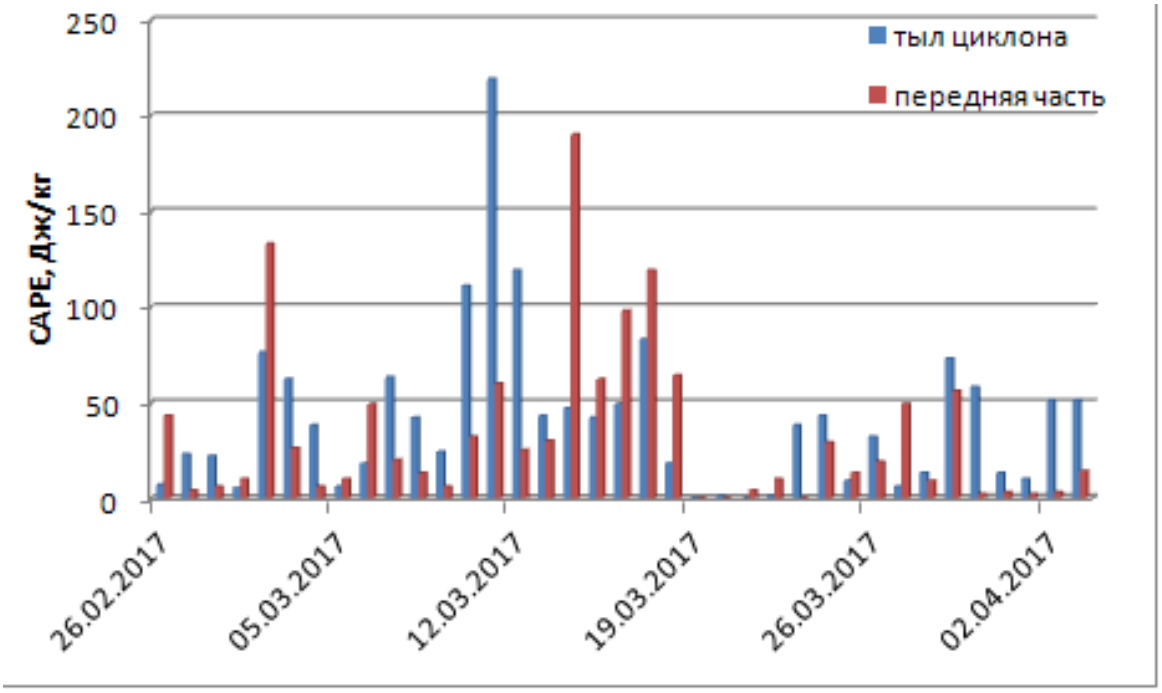


Рис. 3. Изменение значений потенциальной энергии конвективной неустойчивости циклона, который оказывал влияние на погодные условия Иркутской области 3.04.2017 г.

Два циклона сформировались около восточного побережья Северной Америки в районе Бермудских островов. Продолжительность жизни этих циклонов от 17 до 21 дней. Они были менее выражены в погодных условиях, чем циклоны, имеющие тихоокеаническое происхождение. В тыловой части циклонов наблюдался ветер до 14 м/с и либо отсутствие осадков, либо кратковременные осадки в виде слабого ливневого дождя. Была выявлена интересная особенность в динамике этих циклонов. Образовавшись вблизи восточного побережья Северной Америки и смещаясь в Атлантическом океане с юго-востока на северо-запад, их максимальное углубление наблюдалось в районе острова Ньюфаундленд. Можно предположить, что это одна из бароклинно активных зон Северного полушария.

Следует выделить случай образования циклона 29 марта 2017 г. вблизи западного побережья Северной Америки в Тихом океане в районе острова Ванкувер, который также углубился вблизи острова Ньюфаундленд, но смещался на территории Евразии с запада на восток. 16 апреля 2017 г., перевалив Уральские горы, циклон максимально углубился за весь свой жизненный период (до 980 гПа), а в его ложбине на границе России с Монголией образовался новый циклон, который впоследствии смещался на районы г. Иркутска и 18 апреля 2017 г. вызывал усиление северо-западного ветра до 17 м/с и сильный ливневый снег продолжительностью около 4 часов.

Последний циклон образовался вблизи западного побережья Евразии около Средиземного моря и сместился на районы Иркутской области 28 апреля 2017 г. Продолжительность жизни составила 12 дней, его траектория первоначально была ориентирована с юго-запада на северо-восток до Обской губы и оттуда на север Иркутской области.

Выводы

Применение современных методов исследований в метеорологии существенно расширяет представление о динамике и характеристиках различных типов циклонов. Для прогноза опасных явлений погоды на территории Иркутской области важно знать, с какими характеристиками смещаются циклоны в наш регион, каковы накопленные запасы влаги в зонах холодного и тёплого фронтов, каковы запасы потенциальной энергии неустойчивости, с которой связано усиление ветра и развитие конвекции. В дальнейшем необходимо исследовать сезонные особенности циклогенеза на территории Иркутской области и выделить прогностические признаки возникновения опасных явлений погоды.

Список литературы

1. Акперов М. Г. Сравнительный анализ методов идентификации внетропических циклонов // Изв. РАН. ФАО. 2010. Т. 46, № 5. С. 620–637.
2. Ветров А. Л. Трансформация доступной потенциальной энергии в циклонах вследствие фазовых переходов воды. Пермь, 2007. 100 с.
3. Калинин Н. А. Энергетика циклонов умеренных широт. Пермь : Изд. ПГУ, 1999. 192 с.
4. URL: https://earth.nullschool.net/ (дата обращения 12.10.2017).

УДК 551.515.14

Динамика Азиатского антициклона

О. В. Куприянович [1,2] (okupr@inbox.ru), К. А. Лощенко[1] (loshchenko@bk.ru)

[1] Иркутский государственный университет, Иркутск
[2] АМЦ Иркутск Иркутского филиала ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета», Иркутск

Аннотация. Проанализированы характеристики Азиатского антициклона по выходным данным Реанализа NCEP/NCAR и прогностической модели GFS. Отличительной особенностью динамики Азиатского антициклона в начале XXI в. является его ослабление в зимние месяцы. В качестве причины его ослабления рассматривается усиление адвекции тепла при увеличении повторяемости ветров южной четверти и вовлечение в северную периферию антициклона более теплого воздуха по сравнению со второй половиной XX в., где доминирующими были адвективно-динамические факторы роста давления при господствующих более холодных потоках арктического происхождения.

Ключевые слова: Азиатский антициклон, адвекция, циркуляция, сдвиг ветра.

Введение

Погодные и климатические условия в холодный период года на достаточно большой территории Северного полушария тесно связаны с изменениями интенсивности Азиатского антициклона – обширной области повышенного атмосферного давления с центром над Монголией, реже Якутией, Восточной и Западной Сибирью. Изучением природы Азиатского антициклона занимались многие метеорологи, но статистические характеристики и динамика антициклона до сих пор изучены слабо [1–3]. Особый интерес представляют современные тенденции изменения давления в Азиатском антициклоне на фоне возросших темпов изменений климата.

Впервые эффект радиационного выхолаживания у земной поверхности как фактор повышения давления в антициклоне описал Векслер в 1937 г., а в 1987 г. J.Curry на основе численной модели продемонстрировал рост атмосферного давления у земной поверхности в антициклоне при усилении выхолаживания на большом горизонтальном пространстве в высоких широтах [4]. Эта модель также показала деформацию волн Россби при их радиусе менее 1000 км. Установлено, что выхолаживание у земной поверхности способствует не только росту давления, но может привести к образованию инерционно-гравитационной волны, которая возникает в условиях горизонтального перераспределения воздушных масс. Однако не смотря на достигнутые результаты, сложные термодинамические процессы, связанные с антициклогенезом, в том числе радиационное охлаждение, не до конца поняты и требуют дальнейшего изучения [5].

Предполагается, что наряду с радиационными факторами большее значение для развития антициклона имеют динамические факторы. Еще в 1945 г. J. Namias сосредоточил внимание на исследовании взаимосвязи между холодным антициклоном и вариациями зонального индекса и заметил, что антициклоны чаще отмечались в периоды низкого зонального индекса, связанные с развитием гребня в верхней тропосфере [7]. В работе [6] доказано, что аномальное развитие волн на высотах возникало над севером Атлантики еще за 7 дней до наблюдаемого похолодания в Восточной Азии. Первоначально это были признаки баротропности у земной поверхности в антициклоне, которые затем сопровождались распространени-

ем бароклинных волн в нижние слои тропосферы. K. Takaya и H. Nakamura определили, что внутрисезонное усиление Сибирского максимума происходит в сочетании с волнами Россби, которые распространяются от Атлантического бассейна к Азиатскому континенту. Формирование этих блокирующих процессов в тропосфере имеет очевидные динамические последствия синоптического масштаба, и как следствие приводит к росту давления в антициклоне у земной поверхности [8].

Таким образом, радиационные и динамические факторы играют значительную роль в формировании устойчивых антициклонов. Радиационное воздействие приводит к медленному, но устойчивому увеличению атмосферного давления, поскольку воздушная масса охлаждается в течение нескольких дней или недель. Динамические факторы связаны с переходными синоптическими периодами и могут сопровождаться значительным увеличением приземного давления на более коротких временных интервалах, как правило, начиная от одного дня и до нескольких дней.

Методика исследования

Давление уровня моря (SLP) является общей характеристикой, используемой для идентификации и отслеживания циклонов и антициклонов у земной поверхности. В период ноябрь-март 1957–2002 гг. максимальная годовая частота значений SLP ≥ 1050 гПа в Северном полушарии расположена вдоль северо-запада территории Монголии, к западу и юго-западу от оз. Байкал (рис. 1). Таким образом, влияние на погодные условия территории Иркутской области Азиатский антициклон оказывает с момента его формирования до разрушения.

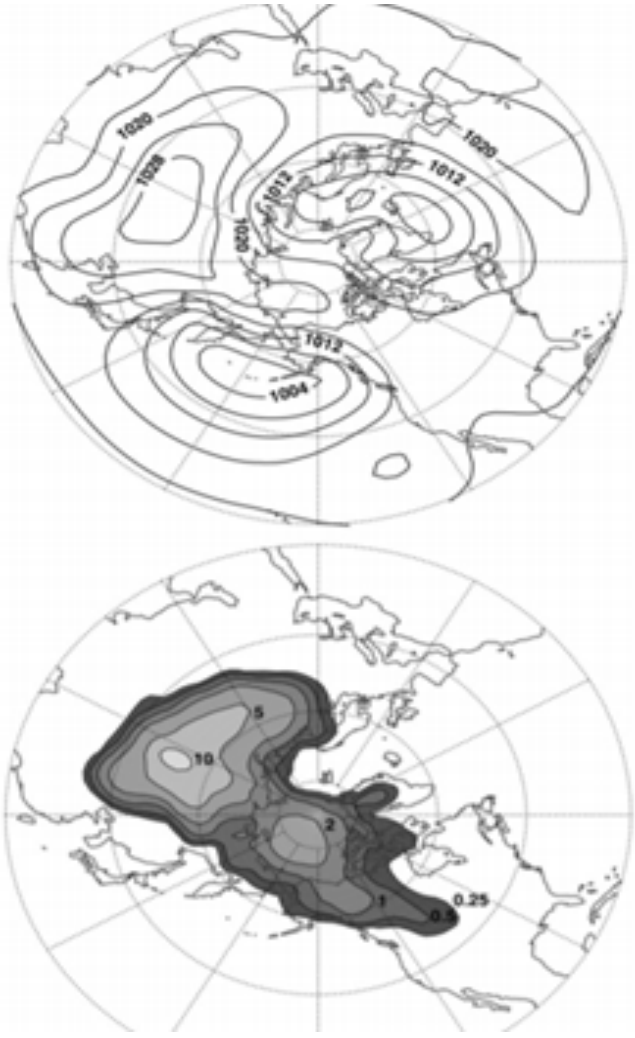


Рис. 1. Приземное давление за ноябрь-март 1957–2002 гг. (верхний рисунок)
и средняя годовая повторяемость значений SLP ≥ 1050 гПа (нижний рисунок)

В этой связи для исследования циркуляционных причин современных изменений климата на территории Иркутской области важно знать динамику Азиатского антициклона. В работе по данным NCEP/NCAR Реанализа были проанализированы современные тенденции изменения давления в центре Азиатского антициклона в период сентябрь-апрель с 2001 по 2016 г. Для оценки типа воздушных масс, формирующих Азиатский антициклон, рассчитывались характеристики ветра и аномалии температуры воздуха на уровне АТ-500 гПа (5 км). Впервые по данным численной модели GFS оценивалось тепло- и влагосодержание в области Азиатского антициклона в холодный период (X–III) 2016 и 2017 г. Для исследования крупномасштабных циркуляционных факторов изменения интенсивности Азиатского антициклона проведён корреляционный анализ изменения давления в центре Азиатского антициклона и климатических индексов: (AO) – арктическое колебание; (NPI) – северотихоокеанский; SOI – индекс южного колебания.

Обсуждение результатов

Современные тенденции изменения давления в центре Азиатского антициклона в период с сентября по апрель 2000–2016 гг. характеризуются ростом давления в периоды формирования и разрушения Азиатского антициклона, тогда как в зимние месяцы, когда антициклон достигает максимального развития, происходит его ослабление (рис. 2).

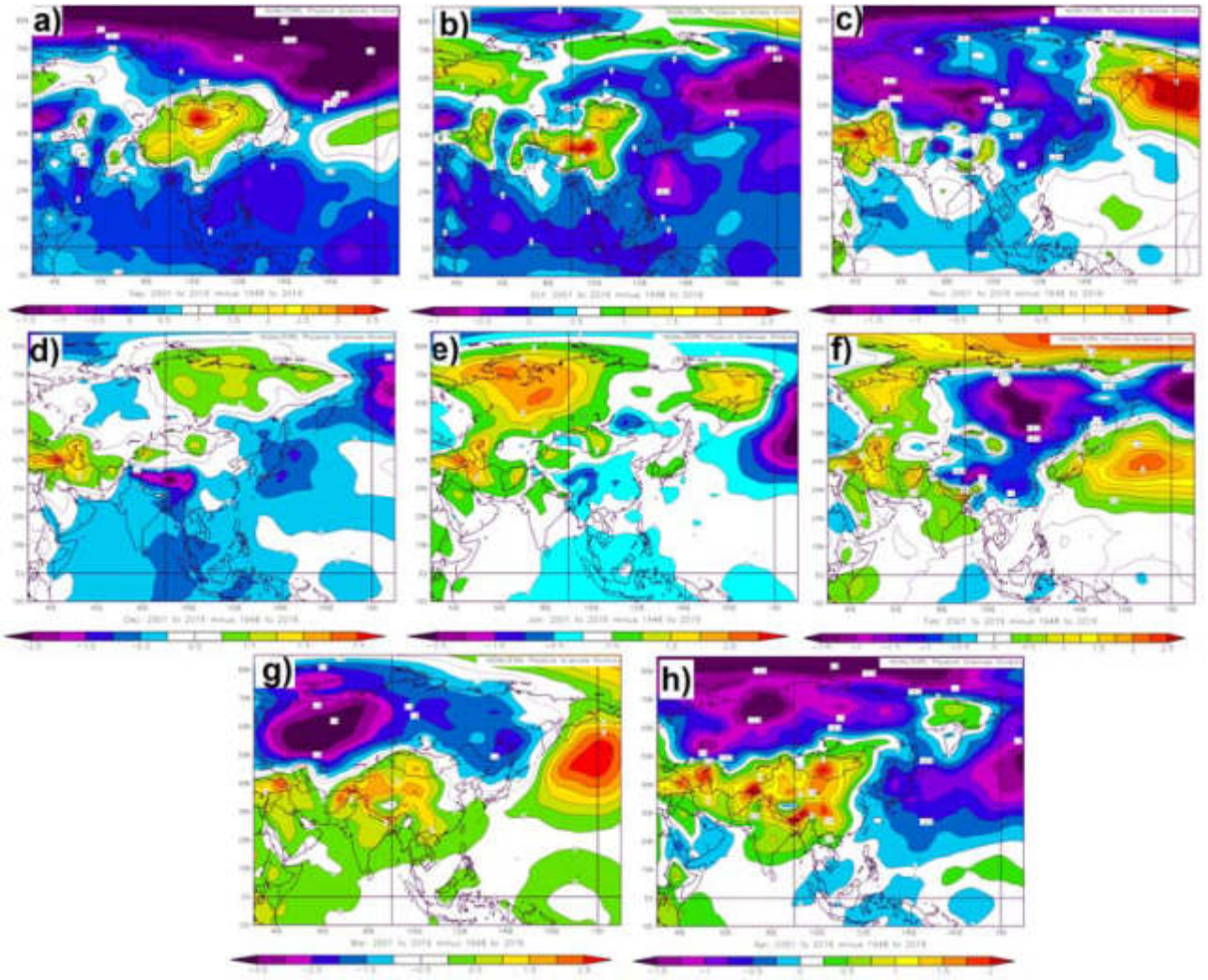


Рис. 2. Карты отклонений среднего месячного давления в 2001–2016 гг. от средних значений за 1948–2016 гг. в сентябре (a), октябре (b), ноябре (c), декабре (d), январе (e), феврале (f), марте(g) и апреле (h)

По ежедневным выходным данным модели GFS в холодный период (X–III) 2016 и 2017 гг. давление в центре Азиатского антициклона изменялось от 1000 до 1065 гПа при средних значениях 1037 гПа. Чаще всего центр антициклона находился в районе 53°с. ш., 85°в. д. Температура воздуха в центре антициклона варьировала от минус 50 °С до 18 °С. Средние значения скорости ветра составляли 1,4 м/с. В 54 % случаев в центре Азиатского антициклона наблюдались штили. Между вариациями температуры воздуха и давления в центре Азиатского антициклона прослеживается устойчивая отрицательная корреляционная связь (r = -0,32). Влагосодержание атмосферы в антициклоне в среднем составляло 0,014 кг/м2, максимальные значения достигали 0,301 кг/м3 (13.12.2016). По рассчитанным значениям вертикальных сдвигов направления ветра в слое Земля – 3 км выявлена преобладающая адвекция тепла в слое при правом повороте ветра с высотой, на долю которой приходится 86 % случаев.

Для оценки типа воздушных масс, формирующих Азиатский антициклон, рассчитывались аномалии характеристик ветра и температуры воздуха на уровне АТ-500 гПа (5 км). Выявлено, что в январе 1948–1999 г. динамика Азиатского антициклона определялась господствующим влиянием холодных арктических воздушных масс с северо-западной составляющей (рис. 3, *a*), тогда как современная динамика антициклона (2000–2016 гг.) определяется влиянием более тёплых воздушных масс с юга (рис. 3, *b*). Кроме того при потеплении из более высоких широт в северную периферию Азиатского антициклона также вовлекается более тёплый воздух.

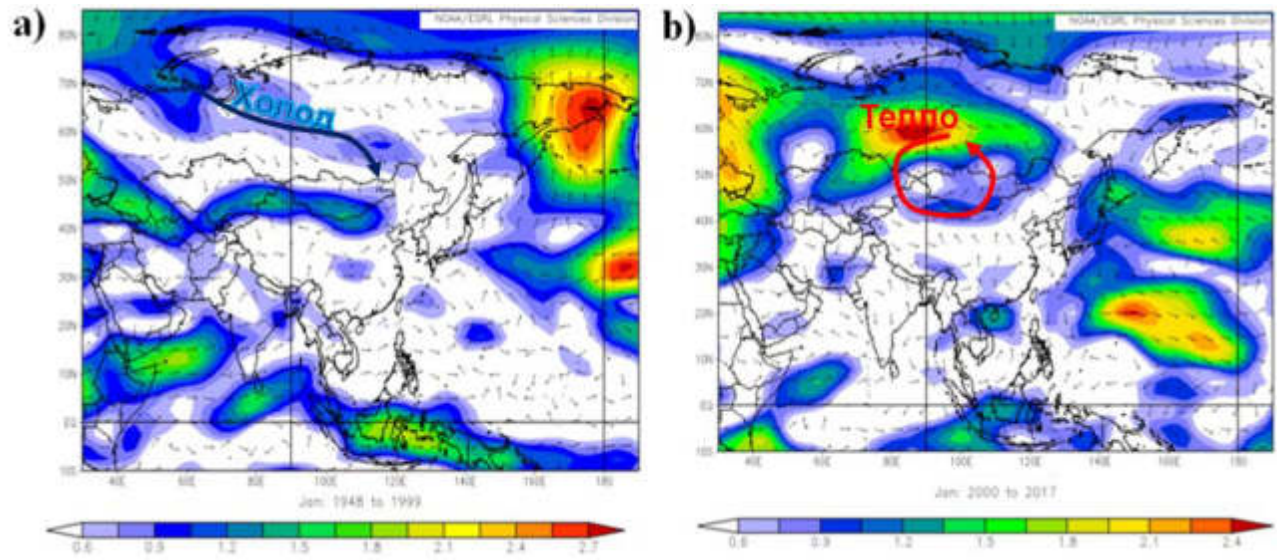


Рис. 3. Господствующие потоки и аномалии температуры воздуха на АТ-500 гПа (5 км) в январе 1948–1999 гг. (a) и 2000–2017 гг. (b) (по отношению к климатическим значениям 1948–2016 гг.)

Корреляционный анализ изменения давления в центре Азиатского антициклона и климатических индексов: (AO) – арктическое колебание; (NPI) – северо-тихоокеанский; SOI – индекс южного колебания показал, что в 2001–2017 гг. по сравнению с более ранними периодами существенно снизился уровень корреляционной связи полей давления в Азиатском антициклоне с циркуляционными процессами в высоких и низких широтах, включая крупномасштабные процессы, протекающие в тропической зоне Тихого океана. Возможно, в последние десятилетия происходит перестройка крупномасштабных форм циркуляции на фоне усиления неустойчивости атмосферы либо в динамике Азиатского антициклона выделилась роль других, не изученных ранее факторов.

Выводы

Современные тенденции изменения динамики Азиатского антициклона характеризуются усилением в периоды его становления и разрушения и ослаблением при максимальном развитии в зимние месяцы. Циркуляционным фактором ослабления Азиатского антициклона в зимние месяцы в начале XXI в., на наш взгляд, является изменение направленности крупномасштабных потоков над Евразией. На фоне повышения глобальных и региональных температур в зимние месяцы и увеличения повторяемости южной составляющей ветра и адвекции тепла в нижней и средней тропосфере адвективно-динамические факторы роста давления в Азиатском антициклоне все чаще сменяются адвективно-динамическими факторами падения давления. Это подтверждается фактическими значениями вертикальных сдвигов направления ветра в слое Земля – 3 км, где по ежедневным данным за 2016–2017 г. процентный вклад адвекции тепла достигает 86 % случаев. В свою очередь ослабление Азиатского антициклона сопровождается более слабым радиационным выхолаживанием подстилающей поверхности и способствует формированию крупных аномалий зимних температур.

Список литературы

1. Архангельский В. Л. Пути и скорости перемещения циклонов и антициклонов в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке / Тр. ДВНИГМИ, 1956. Вып. 1. С. 14–23.

2. Барашкова Н. К., Волкова М. А., Кужевская И. В. Оценка термического режима воздуха и тенденций процессов антициклогенеза на юге Западной Сибири в прикладных целях // Вестн. Том. гос. ун-та. 2014. № 387. С. 225–232.

3. Мохов И. И., Хон В. Ч. Межгодовая изменчивость и долгопериодные тенденции изменения центров действия атмосферы Северного полушария // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2005. Т. 41, № 6. С. 723–732.

4. Curry J. The contribution of radiative cooling to the formation of cold-core anticyclones // J. Atmos. 1987. Vol. 44. P. 2575–2592.

5. Emanuel K. Back to Norway: An essay. Synoptic-Dynamic Meteorology and Weather Analysis and Forecasting: A Tribute to Fred Sanders // Meteor. Monogr., Amer. Meteor. Soc. 2008. Vol. 55. 440 p.

6. Joung C. H., Hitchman M. H. On the role of successive downstream development in East Asian polar air outbreaks // Mon. Wea. Rev. 1982. Vol. 110. P. 1224–1237.

7. Namias J. Investigation of polar anticyclogenesis and associated variation of the zonal index // Weather Bureau Research Paper. 1945. Vol. 24. 22 p.

8. Takaya K., Nakamura H. Mechanisms of intraseasonal amplification of the cold Siberian high // J. Atmos. Sci. 2012. Vol. 62. P. 4423–4440.

УДК 551.577.38(571.53)

Циркуляционные факторы засушливости на территории Иркутской области

Е. В. Максютова[1] (emaksyutova@yandex.ru),
И. В. Латышева[2] (abababl1967@mail.ru)

[1] Институт географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, Иркутск
[2] Иркутский государственный университет, Иркутск

Аннотация. Выполнен анализ пространственно-временных особенностей формирования засушливых периодов на территории Иркутской области на основе количественного расчёта индекса засух по данным 18 метеорологических станций и выходным данным Реанализа NCEP/NCAR. Синоптический анализ ежедневных приземных и высотных барических карт позволил выделить господствующее влияние адвективно-динамических факторов роста атмосферного давления на фоне усиления меридиональности процессов над исследуемой территорией при усилении адвекции тепла с юга и развитии подвижного циклогенеза над Средней Азией и Казахстаном.

Ключевые слова: засуха, Иркутская область, блокирование, антициклон, адвекция.

Введение

В современных условиях наблюдаемого изменения климата проблема атмосферного блокирования привлекает к себе внимание исследователей не только вследствие практической значимости, но и вследствие развития подходов к ее исследованию [3; 4; 10; 12; 14].

С явлениями атмосферного блокирования связано формирование продолжительных (более двух недель) аномалий циркуляционного, термического и гидрологического режимов, сопровождающихся засухами с пожарами летом или сильными морозами зимой. Ситуации блокирования связаны с меридиональными формами циркуляции, повторяемость которых в последние годы увеличивается, как и повторяемость блокирующих процессов [2; 5; 8], в том числе и над Азией [12].

Ситуации атмосферного блокирования для разных регионов могут иметь свои особенности. Атмосферные блокинги в Западной Сибири на основе данных реанализа рассмотрены в работе [1]. Критериями блокирования здесь являются вычисленные градиенты геопотенциала изобарической поверхности 500 гПа и потенциальной температуры вблизи динамической тропопаузы.

Как правило, обширные засухи связаны с формированием крупномасштабных стационарных антициклонов, блокирующих зональный поток – «блокингов». Длительное атмосферное блокирование, наблюдавшееся летом 2010 г. над центром ЕЧР и Поволжьем в течение 55 дней, связывают с установлением рекордной за все время инструментальных наблюдений жары «как по наблюдавшимся температурам, так и по продолжительности периода с температурой 30 °С и выше» [7]. Экстремальные засухи 1972 г. и 2010 г. на ЕЧР наблюдались в период повышенной суммарной годовой продолжительности меридиональной циркуляции в Северном полушарии [9].

По данным наблюдений на метеорологических станциях России [11] вегетационный период 2002 г. отличался значительными аномалиями атмосферных осадков и температуры воздуха, как на Европейской, так и на Азиатской территории. На большей части Азиатской территории май был теплым, среднемесячная температура воздуха на 2−4 °С выше нормы. Из-за дефицита осадков в отдельных районах Европейской территории, в Иркутской и Читинской областях в мае-июне наблюдались чрезвычайная пожароопасность и засуха.

В июле и августе на Европейской территории России отмечался значительный дефицит осадков, что привело к формированию в большинстве областей региона почвенной и атмосферной засух, возникновению пожароопасной обстановки. На Азиатской территории России летние засухи отмечались в Читинской области. В течение 10 дней (21−30 июля) в г. Чите максимальная температура воздуха поднималась до 30 °С и выше, самая высокая тем-

пература воздуха (38 °С) зафиксирована 26 июля. За последние 50 лет такие высокие температуры воздуха в сочетании с длительным отсутствием осадков наблюдались впервые.

Постановка задачи

В условиях продолжающегося изменения климата проблема мониторинга и оценки засушливых явлений, а также определение тенденций их изменения во времени и пространстве вызывает научный и практический интерес. Засуха – очень сложное природное явление и его изучение происходит в направлении исследования его отдельных особенностей, касающихся атмосферных, почвенных и атмосферно-почвенных засух. Нами рассматривается атмосферная засуха, когда происходит процесс активного прогревания и относительного иссушения воздуха при отсутствии атмосферных осадков и большом радиационном притоке тепла. Климатические аномалии напрямую связаны с колебаниями атмосферной циркуляции.

В работе [6] было выявлено, что при оценке гидротермических условий (индекс Педя (Si)) за период 1961–2010 гг. наиболее засушливыми в Предбайкалье являются май–июнь и последние два десятилетия (1991–2000 гг. и 2001–2010 гг.), при $Si > 0$. Начиная с 1986 г. зафиксированы непрерывные засушливые периоды длительностью 3 месяца и более.

Цель работы – исследование циркуляционных и климатических факторов атмосферных засух на территории Иркутской области. При оценке гидротермических условий были использованы значения средней месячной температуры воздуха и месячных сумм атмосферных осадков на 18 гидрометеорологических станциях (ГМС) Иркутского УГМС за период 1961–2010 гг. Расчет индекса Педя проводился по данным метеорологических станций: Иркутск, Патроны, Черемхово, Хомутово, Бохан, Усть-Ордынский, Баяндай, Большое Голоустное, Байкальск, Исток Ангары, Сарма, Солнечная, Узур, Хамар-Дабан, Казачинское, Тырка, Карам и Качуг. Проводился сравнительный анализ численных значений индекса Педя с расчетными значениями индекса засушливости, предложенного Палмером (PDSI) и полученными по данным Реанализа NCEP/NCAR. Исследование циркуляционных факторов и синоптических условий формирования продолжительных засух в Иркутской области выполнено по выходным данным Реанализа и ежедневных синоптических карт архива Иркутского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды.

Обсуждение полученных результатов

Как отмечается в работе [6] в 1961–2010 гг. изменились пространственно-временные характеристики распространения засушливых явлений на территории Иркутской области. Если до 1986 г. согласно данным табл.1 засушливые условия охватывали более 60 % территории, но отмечались в отдельные месяцы вегетационного периода или непрерывно в течение двух (редко трех) месяцев на отдельных станциях, то после 1986 г. возрастает повторяемость непрерывных засушливых периодов длительностью 3 месяца и более (июль – сентябрь 1986 г., май – июль 2003 г. и июль – сентябрь 2007 г.). Особо следует выделить 2002 г., когда во все месяцы вегетационного периода засухи охватывали от 60 до 100 % территории.

В многолетней динамике численных значений индекса засух по Палмеру, осредненного по территории Иркутской области, прослеживается хорошо выраженная тенденция к усилению засушливости климата, которая проявляется в изменениях от влажных условий в начале 1950-х гг. к засушливым в начале 1990-х и критериям чрезвычайной засухи в отдельные годы 2000-х гг. (рис. 1).

Особый интерес представляет исследование синоптических условий и особенностей крупномасштабных циркуляционных факторов в годы, когда практически вся площадь территории Иркутской области подвержена влиянию атмосферной засухи, что представляет серьезную угрозу для сельского хозяйства и несёт потенциальную опасность возникновения и распространения лесных пожаров, численность которых в последние годы в исследуемом регионе существенно возросла. В работе исследован теплый период 2002 г., во все месяцы которого в Иркутской области наблюдались засушливые условия, а по критерию Палмера отмечалась чрезвычайная засуха.

Таблица 1

Процентное соотношение территории Иркутской области (%), охваченной засухой в 1961–2010 гг.
(по данным 18 метеорологических станций)

Годы	Месяцы				
	V	VI	VII	VIII	IX
1964			78		
1966					72
1968	61				
1969		78			
1970			61		
1974				94	
1979		100			
1986			78	76	100
1990	100				
1992	94				
1993		61	89		
1995			69		
1996			69		
1997	78				
1998				89	
1999	94				
2000	89	100			89
2001		94		78	
2002	89	63	94	100	89
2003	67	82	67		
2005			100		67
2006					61
2007			89	100	89

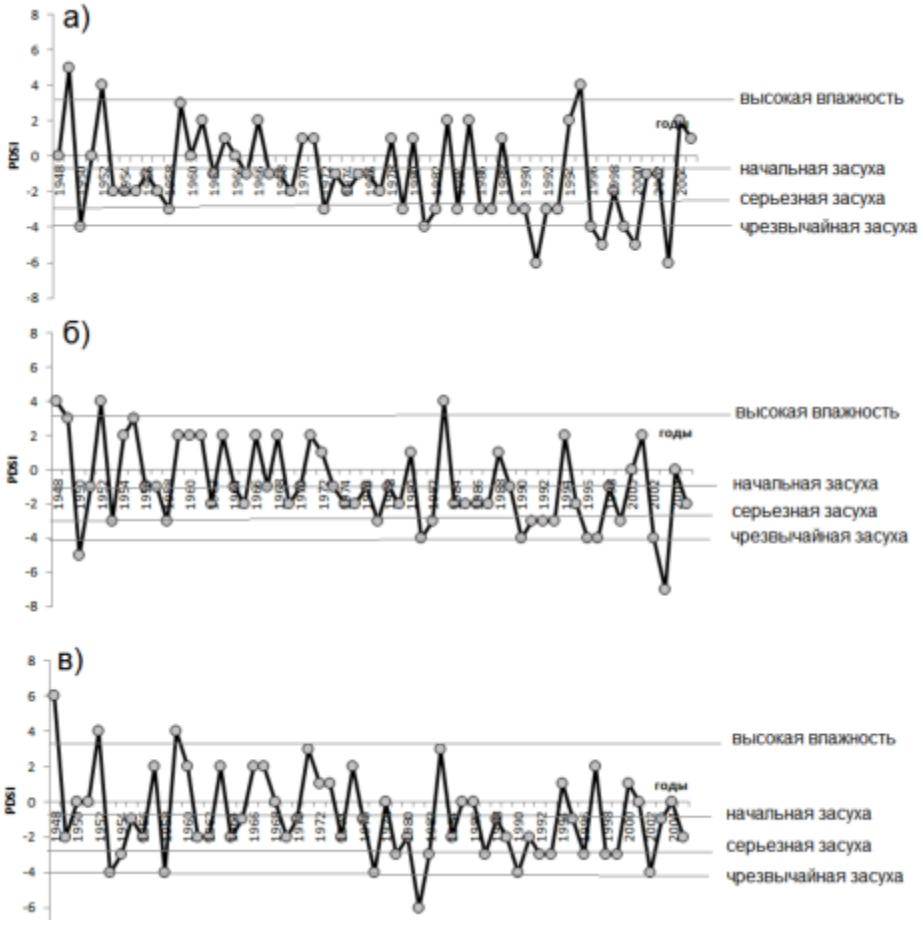


Рис. 1. Изменения индекса засухи PDSI на территории Иркутской области в 1948–2008 гг.
по данным Реанализа NCEP/NCAR

По данным метеорологической ст. Иркутск, расположенной в южном, наиболее засушливом районе Иркутской области, во все месяцы теплого периода 2002 г. месячные суммы атмосферных осадков не достигали критерия климатической нормы (рис. 2). Интересно, что в период с июня по сентябрь 2002 г. засушливые условия отмечались на довольно большой площади территории Северного полушария. Например, засуха, сопровождаемая лесными пожарами и сильной задымленностью, отмечалась в 2002 г. в центральной части Европейской территории России, сильнейшая засуха была в западной части США, недостаток осадков во время сезонов муссона в Индии.

Синоптический анализ приземных карт (рис. 3) показал, что в теплый засушливый период 2002 г. на территории Иркутской области как преобладающие выделяются синоптические типы: «антициклон», «тёплый сектор циклона» и «тёплый фронт» (рис. 4). Согласно выполненным расчётам межсуточной изменчивости температур в 80 % случаев на территории Иркутской области отмечалась адвекция теплых, преимущественно сухих воздушных масс. В распределении высотных барических полей по данным рис. 5 выделяется господствующее влияние таких синоптических типов, как «ось гребня», «антициклон», «передняя часть гребня», где преобладают теплые и сухие воздушные массы.

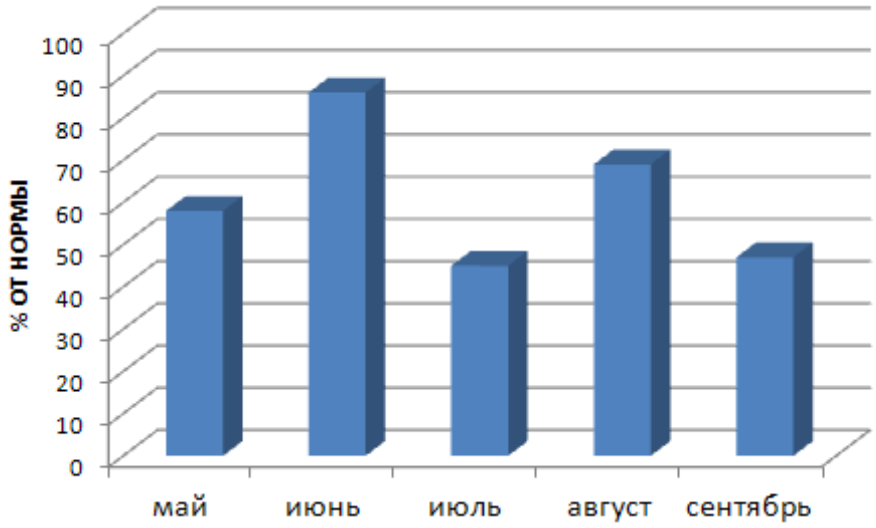


Рис. 2. Отклонения (%) месячных сумм атмосферных осадков от климатической нормы по данным метеорологической станции Иркутск в теплый период 2002 г.

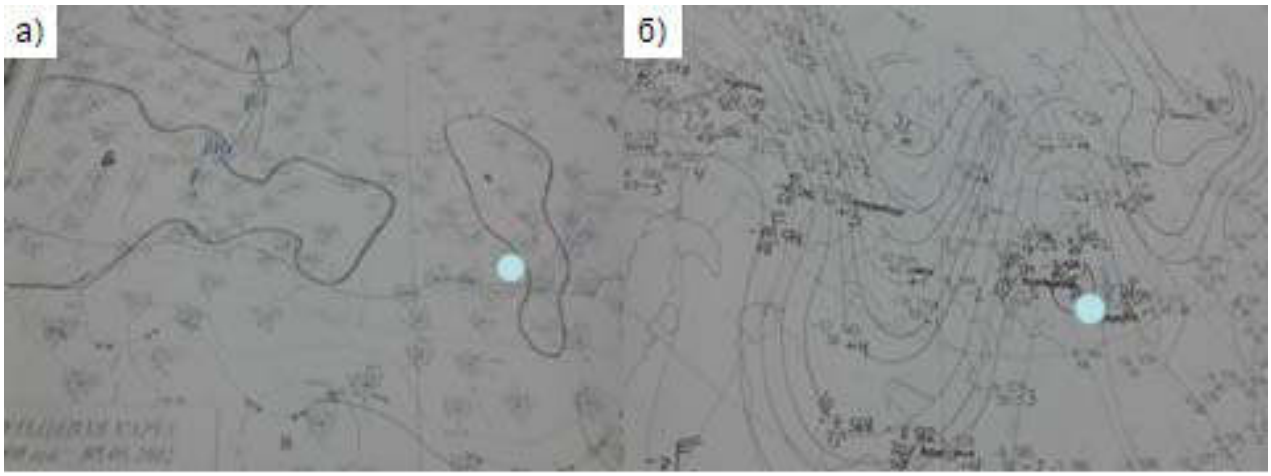


Рис. 3. Пример преобладающих типов приземного (а) и высотного (б) барических полей на территории Иркутской области в теплый период 2002 г. (точкой показан г. Иркутск)

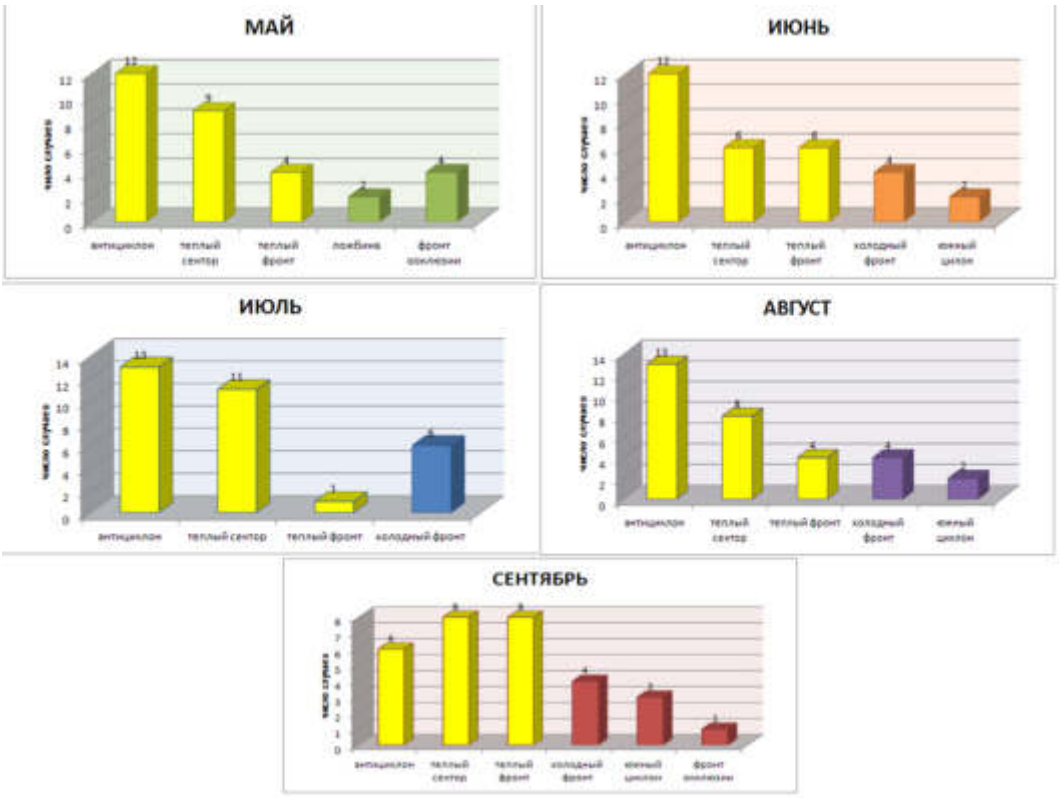


Рис. 4. Повторяемость (%) приземных барических полей в различные месяцы теплого периода 2002 г. на территории Иркутской области

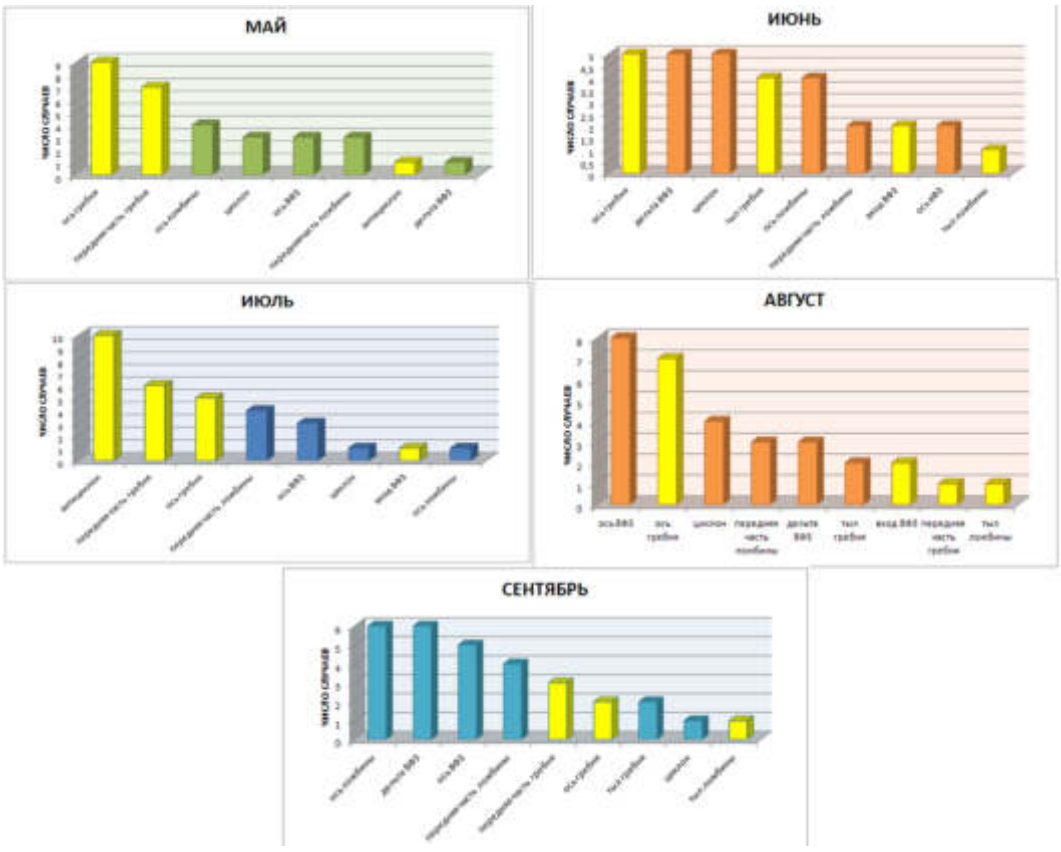


Рис. 5. Повторяемость (%) высотных барических полей в различные месяцы теплого периода 2002 г. на территории Иркутской области

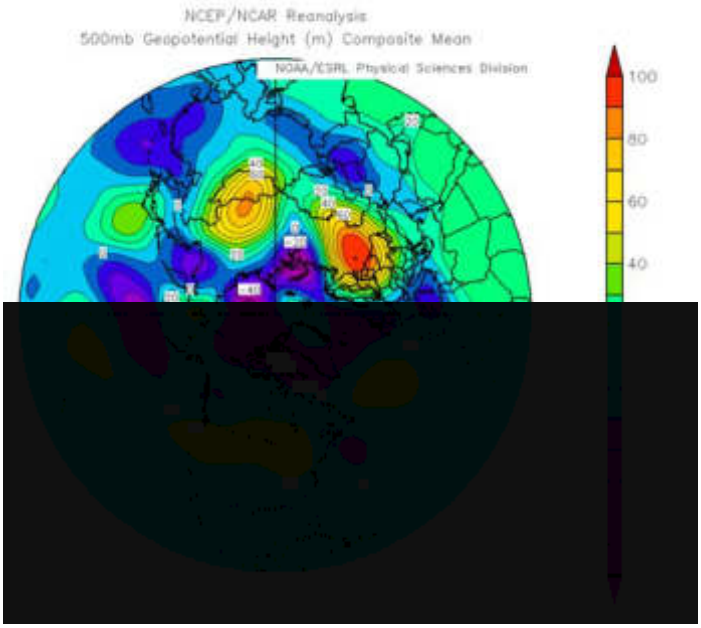


Рис. 6. Аномалии высот геопотенциальной поверхности АТ-500 гПа, рассчитанные по отношению к периоду 1948–2017 гг. в июле 2002 г. по данным Реанализа NCEP/NCAR

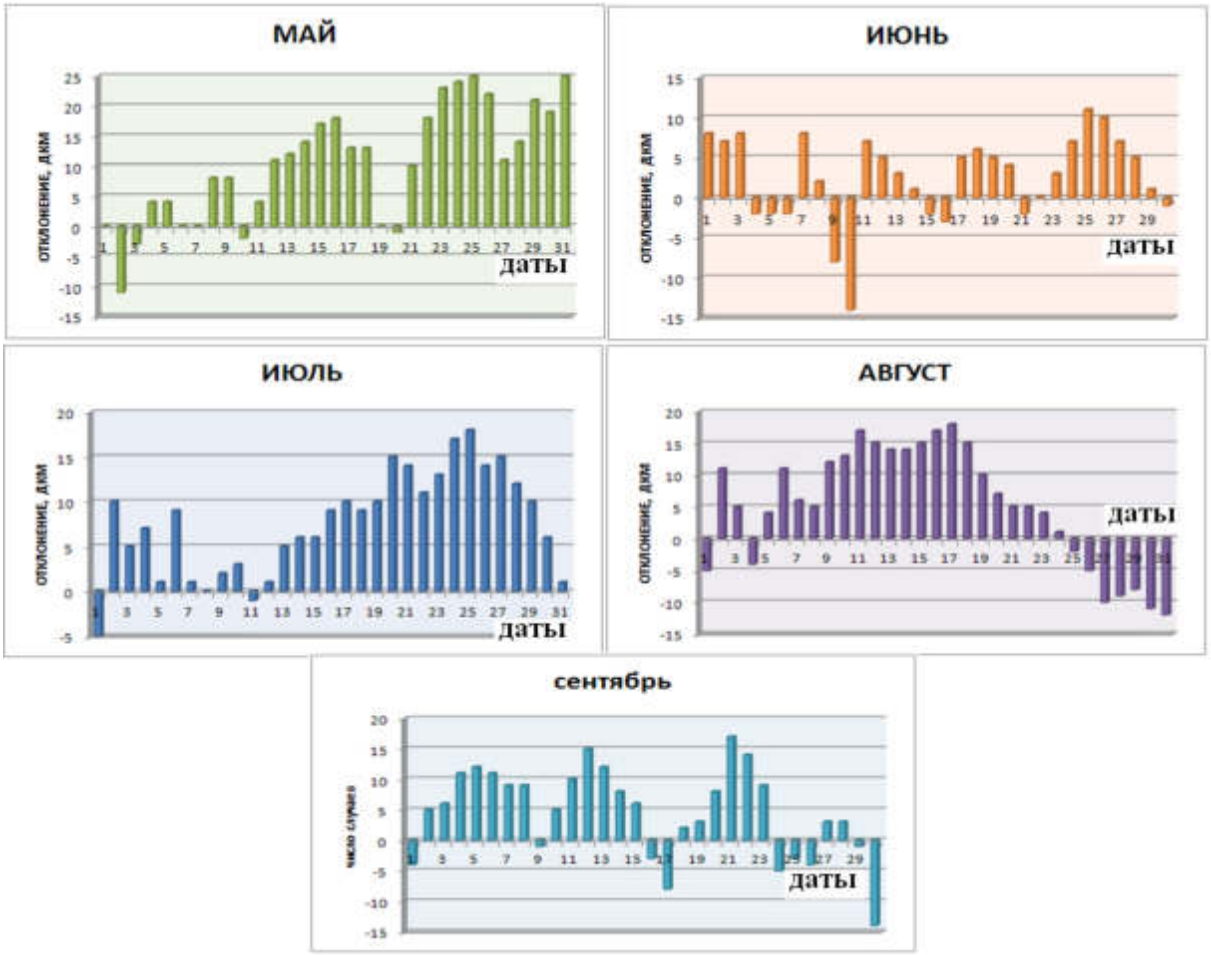


Рис. 7. Отклонения высот геопотенциальной поверхности АТ-500 гПа от средних значений осевой изогипсы в районе г. Иркутска в теплый период 2002 г. по данным ежедневных синоптических карт Иркутского УГМС

Более детальный анализ показал преобладающее влияние на территории Иркутской области в теплый период 2002 г. адвективно-динамических факторов роста атмосферного давления, что способствовало антициклогенезу, и, как следствие, длительному сохранению влияния теплой и сухой воздушной массы в значительной тоще тропосферы. Наглядно это видно на рис. 6, где показаны аномалии геопотенциальных высот изобарической поверхности АТ-500 гПа (5 км), где на территории Иркутской области хорошо видны положительные аномалии, достигающие в июле 2002 г. +85 г. п. м.

Одним из факторов длительного отсутствия атмосферных осадков в Иркутской области в теплый период 2002 г. явилось смещение к северу оси высотной фронтальной зоны, где происходит образование южных монгольских циклонов – основных поставщиков влаги в наш регион в летние месяцы, когда выпадает максимум осадков в годовом распределении. Это подтверждается отклонениями от средних многолетних значений осевой изогипсы, представленными на рис. 7. Кроме того, при усилении адвекции тепла с юга происходит смещение к северу и зон струйных течений, как факторов, благоприятствующих усилению подвижного тропосферного циклогенеза при наличии связанных с ними динамически значимых высотных фронтальных зон (рис. 8).

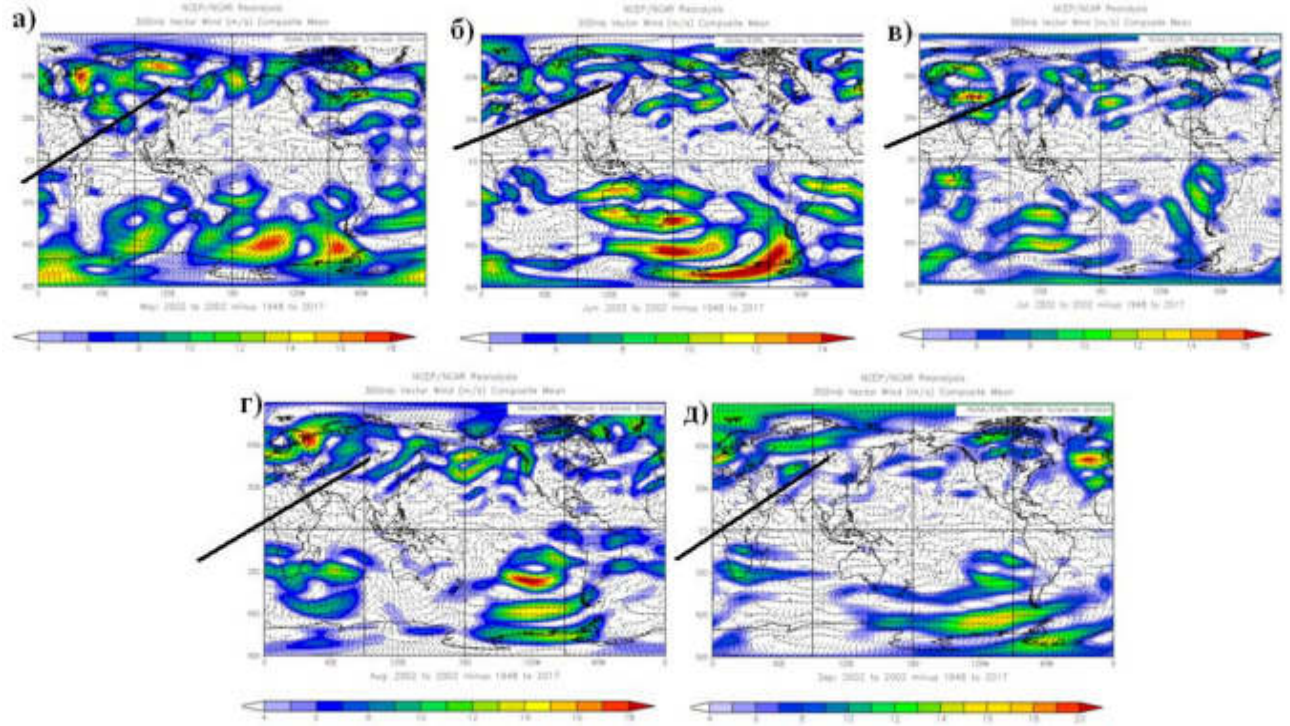


Рис. 8. Отклонения характеристик ветра на геопотенциальной поверхности АТ-300 гПа от средних значений за 1948–2017 гг. в мае (а), июне (б), июле (в), августе (г) и сентябре (д) 2002 г . по данным NCEP/NCAR Реанализа

Выводы

1. Современные тенденции изменения климата в Иркутской области сопровождаются увеличением повторяемости более интенсивных и продолжительных засух, занимающих значительную часть основной сельскохозяйственной зоны.

2. Выделены преобладающие типы синоптических процессов у поверхности Земли, способствующие формированию засух – «антициклон», «тёплый сектор» и «теплый» (~80 %), в средней тропосфере «ось гребня» и «передняя часть гребня».

3. Длительному сохранению засушливых условий в Иркутской области в 2002 г. способствовало усиление меридиональности потоков при увеличении амплитуды крупномасштабных волн, возможным источником деформации которых являются процессы, связанные с активизацией потоков тепла в период развития Эль-Ниньо.

4. В качестве синоптических факторов развития процессов блокирования можно рассматривать усиление подвижного циклогенеза над Средней Азией и Казахстаном, с которыми связаны выносы теплого воздуха на западную периферию антициклона и в тыловую часть высотного гребня, определяющие длительные периоды блокирования над территорией Иркутской области.

Список литературы

1. Атмосферные блокинги в западной Сибири. Ч. 1: Особенности обнаружения, объективные критерии и сравнение / О. Ю. Антохина, П. Н. Антохин, О. С. Зоркальцева, Е. В. Девятова // Метеорология и гидрология. 2017. № 10. С. 34–45.

2. Второй оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. М. : Росгидромет, 2014. 59 с.

3. Груза Г. В., Коровкина Л. В. Климатический мониторинг процессов блокирования западного переноса в Северном полушарии // Метеорология и гидрология. 1991. № 8. С. 11−18.

4. Груза Г. В., Коровкина Л. В. Сезонные особенности пространственного распределения индексов блокирования в Северном полушарии // Метеорология и гидрология. 1991. № 3. С. 108−110.

5. Кононова Н. К. Флуктуации глобальной циркуляции атмосферы в XX–XXI вв. // Сложные системы. 2016. № 1 (18). С. 22–37.

6. Максютова Е. В., Воропай Н. Н. Изменения гидротермических условий вегетационного периода на Байкальской природной территории // География и природные ресурсы. 2016. № 5. С. 20−28.

7. Мохов И. И. Особенности формирования летней жары 2010 г. на Европейской территории России в контексте общих изменений климата и его аномалий // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2011. № 6. С. 709−716.

8. Мохов И. И., Петухов В. К. Блокинги и тенденции их изменения // ДАН. 1997. Т. 337, № 5. С. 687–689.

9. Черенкова Е. А., Кононова Н. К. Анализ опасных атмосферных засух 1972 и 2010 гг. и макроциркуляционных условий их формирования на территории европейской части России // Тр. ГГО. 2012. Вып. 565. С. 165−187.

10. Шакина Н. П., Иванова А. Р. Блокирующие антициклоны: современное состояние исследований и прогнозирования // Метеорология и гидрология. 2010. № 11. С. 5−18.

11. Обзор погодных условий на территории России в 2002 г. [Электронный ресурс]. URL: http://meteo.ru/data/93-klimaticheskie-usloviya/180-2002.

12. Masato G., Woollings T., Hoskins B. Winter and Summer Northern Hemisphere Bloking in GMIP5 Models // J. Geoph. RES. 2013. Vol. 118, N 3. P. 1179−1188.

13. Pelly J. L., Hoskins B. J. A new perspective on blocking // J. Atmos. Sci. 2003. Vol. 60, N 3. P. 743−755.

14. The climatology of blocking anticyclones for the Northern and Southern Hemispheres: Block intensity as a diagnostic / J. M. Wiedenmann [et al.] // J. Climate. 2002. Vol. 15, N 23. P. 3459–3473.

УДК 551.515.7

Изменения суммарной продолжительности существования летом антициклонов над южными регионами Сибири в период с 1948 по 2017 г.

А. В. Холопцев (kholoptsev@mail.ru)

Севастопольское отделение ФГБУ «Государственный океанографический институт им. Н. Н. Зубова», Севастополь

Аннотация. Для территорий всех субъектов Сибирского федерального округа России, которые расположены к югу от параллели 60° с. ш., изучены особенности изменений за 1948–2017 гг. суммарной продолжительности существования над ними в летние месяцы антициклонов, длительность которых составляет не менее 3 суток. Оценены тенденции этих процессов, которые проявились в 1998–2017 гг. Выявлены регионы, где в ближайшие годы вероятно повышение рисков возникновения засух и природных пожаров.

Ключевые слова: антициклон, суммарная продолжительность существования, тренд, субъект Сибирского Федерального округа, засуха, пожароопасность.

Увеличение суммарной продолжительности антициклонов (далее – СПА), которые существуют над некоторой территорией в летние месяцы, как правило, приводит к уменьшению средней интенсивности выпадающих на ней атмосферных осадков и ощутимому повышению температур воздуха, что способствует увеличению рисков возникновения засухи, а также возникновения пожаров в природных экосистемах [1]. Поэтому выявление современных тенденций изменения СПА для летних месяцев в тех или иных регионах Мира является актуальной проблемой не только метеорологии и климатологии, но также экологической безопасности и предотвращения чрезвычайных ситуаций.

Наибольший интерес решение данной проблемы представляет для территорий, где в последние годы засуха и пожары в природных экосистемах возникают все чаще, нанося все больший ущерб их населению и экономике. В России к ним относятся территории некоторых ее южных регионов: республик Алтай, Бурятия, Тыва, Хакассия; краев: Алтайского, Забайкальского, Красноярского, а также областей: Иркутской, Кемеровской, Новосибирской, Омской и Томской [2; 3].

Современные тенденции изменения СПА на территориях указанных субъектов Сибирского федерального округа (далее СФО) во многом определяют вероятную динамику в них метеорологических факторов пожароопасности [3; 4], а значит и рисков возникновения соответствующих чрезвычайных ситуаций в ближайшие годы. Следовательно, их необходимо учитывать при планировании их социально-экономического развития.

Немалый интерес представляет также выявление их районов, где возрастание этого показателя (а значит и рисков возникновения соответствующих чрезвычайных ситуаций природного характера) происходит наиболее быстрыми темпами. Тем не менее, ныне современные тенденции изменения СПА на указанных территориях изучены недостаточно. Поэтому развитие представлений о них представляет не только теоретический, но и существенный практический интерес.

Учитывая изложенное, целью данной работы является выявление участков территории СФО, где в современном периоде происходит наиболее быстрое увеличение СПА в те или иные летние месяцы, а также его субъектов, где в XXI в. риски возникновения засух и природных пожаров увеличивались наиболее быстрыми темпами.

Для достижения указанной цели решены следующие задачи.

1. Формирование и оценка адекватности фактического материала.

2. Оценка тенденций изменения СПА в различные летние месяцы, которые в современном периоде соответствуют территории каждого субъекта СФО, а также выявление регионов, где увеличение СПА в том или ином месяце происходит наиболее быстрыми темпами.

Материалы и методы

Значение СПА, которое соответствует некоторому месяцу и некоторой территории, в данной работе определяется как количество относящихся к нему суток, в течение которых среднее по всей этой территории, приведенное к уровню моря, среднесуточное значение атмосферного давления превосходит уровень 1015 гПа. При этом учитываются лишь те антициклоны, при которых подобное превышение выявлено на протяжении не менее чем для трех последовательных суток.

Поскольку при такой методике оценки СПА не учитываются ситуации, когда антициклон располагается лишь над некоторой частью рассматриваемой территории, либо существует менее трех суток, установленное таким образом значение этого показателя фактически является оценкой снизу продолжительности периода времени, в котором метеоусловия над ней определяются влиянием данного атмосферного процесса. Несмотря на это указанной методике отдано предпочтение, так как прекращение на некоторой территории атмосферных осадков всего лишь на одни – двое суток существенного влияния на состояние ее экосистем не оказывает. Следовательно, методика оценки СПА, основанная на ограничении учитываемых процессов по их длительности, представляется в большей мере соответствующей потребностям практики.

На территориях всех субъектов СФО режимные наблюдения за изменениями атмосферного давления в течение уже многих десятилетий осуществляют метеостанции Гидрометслужбы СССР, а ныне Росгидромета [5].

Информация об изменениях за период 01.01.1948–31.10.2017 гг. оценок приведенного к уровню моря, среднесуточного значения атмосферного давления в различных узлах координатной сетки, с шагом 2,5°×2,5°, которая «накрывает» всю поверхность нашей планеты, в том числе и рассматриваемые территории, может быть получена также из результатов реанализа [6]. Поскольку упомянутые результаты реанализа изучаемых показателей могут несколько отличаться от данных их фактических измерений, при формировании фактического материала, применена методика, на первом этапе которой производится оценка адекватность оценок СПА по таким результатам. При этом реанализа сопоставлены с фактическими данными, которые получены на репрезентативных метеостанциях.

В качестве репрезентативных выбраны метеостанции Росгидромета, которые расположены на территориях всех рассматриваемых субъектов СФО. В пункты с координатами репрезентативных метеостанций осуществлена интерполяция оценок (по результатам реанализа) среднесуточных значений атмосферного давления в узлах координатной сетки, которые расположены в пределах всей территории СФО, южнее параллели 60 ° с. ш. При интерполяции использован и метод полинома Лагранжа [7].

Для каждого репрезентативного пункта и каждых суток, относящихся к летним месяцам и периоду 1948–2017 гг., вычислено значение разности приведенного к уровню моря среднесуточного атмосферного давления, оцененного по результатам реанализа, а также вычисленного по результатам фактических измерений. Систематическая погрешность результатов реанализа для того или иного месяца определена как среднее арифметическое вычисленных таким образом значений этой разности за весь указанный период.

Установлено, что для каждого репрезентативного пункта и всех летних месяцев систематическая погрешность оценки среднесуточного атмосферного давления, которая получена по результатам реанализа, не превышает 2 % от максимальной для него амплитуды фактических изменений этого показателя в течение года. Последнее позволяет рассматривать оценки среднесуточного атмосферного давления в любом пункте рассматриваемой части СФО, полученные по результатам реанализа, как адекватные для использования при решении первой задачи.

Для определения среднего по территории некоторого субъекта СФО среднесуточного атмосферного давления, которое соответствует тем или иным суткам в рассматриваемый период, на его территории по методу Монте-Карло [8] выбрано 100 пунктов. В каждый из этих пунктов осуществлена интерполяция значений изучаемого показателя во всех узлах коорди-

натной сетки, расположенных на рассматриваемой, южной части территории СФО. Среднее для данного субъекта СФО среднесуточное значение атмосферного давления вычислялось как среднее арифметическое значений соответствующих показателей в каждом из этих 100 пунктов.

Если антициклон начинался в одном месяце, а завершался в другом, вся его длительность учитывалась при оценке СПА для того месяца, к которому относилась большая часть периода его существования. Таким образом, из вычисленных для каждого изучаемого субъекта СФО средних значений СПА сформированы временные ряды значений этого показателя, которые соответствуют каждому летнему месяцу.

Как количественная мера тенденции каждого изучаемого процесса принято значение углового коэффициента линейного тренда [9] соответствующего участка его временного ряда. При оценке значений этой меры для каждого региона СФО и современного периода использованы фрагменты соответствующих временных рядов для периода 1998–2017 гг.

При отображении распределений вычисленных значений данной меры по территории СФО использован метод триангуляции Делоне [10].

Результаты исследования и их анализ

В соответствии с изложенной методикой сформированы временные ряды значений СПА для каждого региона СФО и каждого летнего месяца. В качестве примера, на рис. 1 приведены зависимости от времени СПА в августе, которые соответствуют Омской области и Республике Хакассия.

Как видно из рис. 1, изменения августовских значений СПА для Омской области и Республике Хакассия носят характер сложных колебаний. Несмотря на то, что географические положения рассматриваемых регионов различны, годы, соответствующие максимумам и минимумам данных процессов, практически совпадают. Из этого следует, что изменчивость данных показателей в разных регионах СФО, на ее межгодовом интервале в значительной мере обусловлена единым крупномасштабным процессом с характерным периодом 3–5 лет.

Следует отметить, что абсолютные значения экстремумов рассматриваемых зависимостей для разных регионов существенно различаются и зависят от их географического положения. Аналогичные особенности свойственны также прочим регионам СФО и другим летним месяцам.



Рис. 1. Зависимости от времени СПА в августе, которые соответствуют Омской области и Республике Хакассия

Установлено, что в большинстве изучаемых регионах России наибольшие значения СПА (D) были зафиксированы в августе 2016 г. Соответствующие этому году, а также вклю-

чающему его циклу изменчивости СПА распределения по рассматриваемой территории СФО августовских средних значений этого показателя показано на рис. 2.

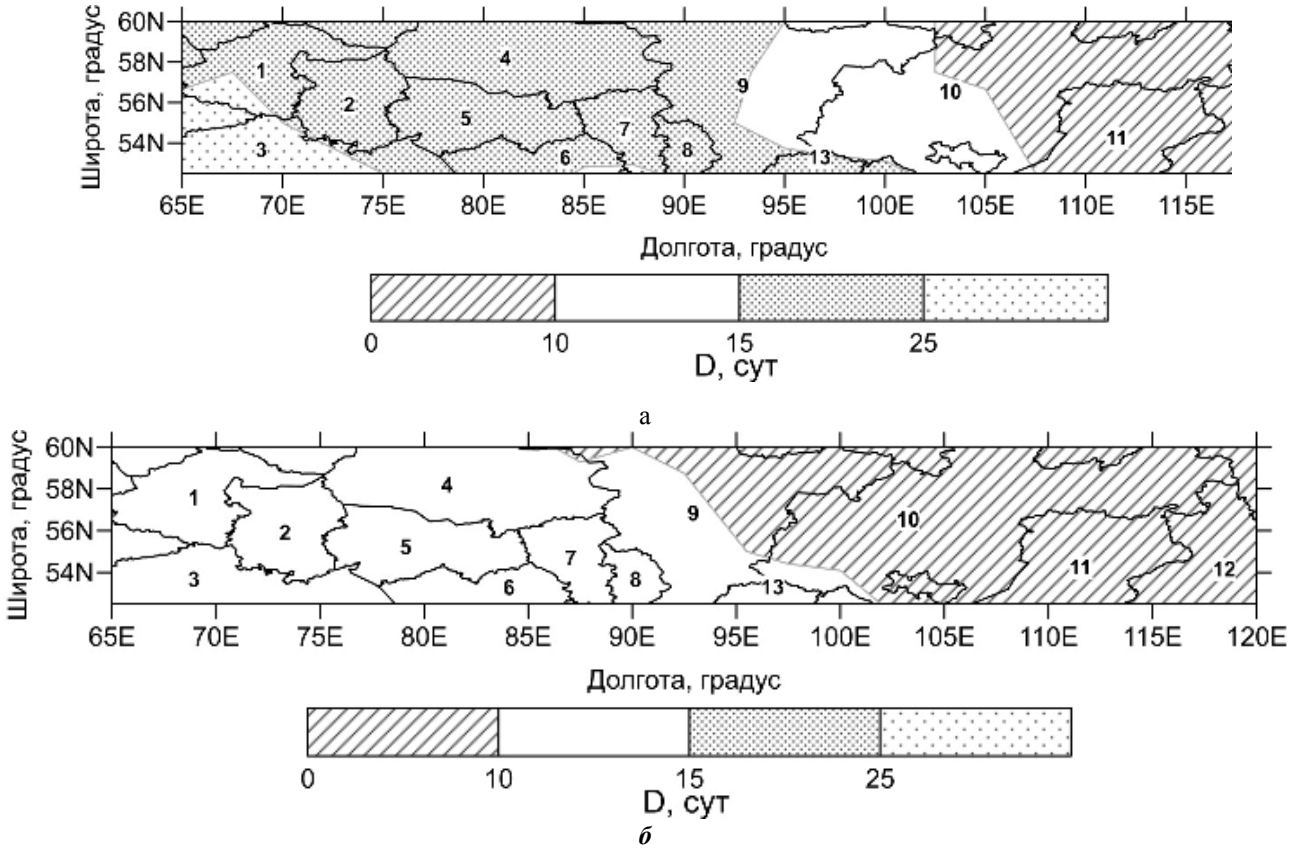


Рис. 2. Распределение по рассматриваемой территории СФО августовских значений СПА, соответствующих: *а* – 2016 г.; *б* – среднее за цикл 2014–2017 гг.

1 – Тюменская область (Уральский федеральный округ); *2* – Омская область; *3* – Казахстан; *4* – Томская область; *5* – Новосибирская область; *6* – Алтайский край; *7* – Кемеровская область; *8* – Республика Хакассия; *9* – Красноярский край; *10* – Иркутская область; *11* – Республика Бурятия; *12* – Забайкальский край; *13* – Республика Тыва.

Из рисунка 2, *а* следует, что наибольшие значения СПА в августе 2016 г. соответствовали территориям субъектов СФО, которые расположены к западу от меридиана 75° в. д. Здесь максимальные значения СПА в отдельных районах приближались к 30 суткам (из 31 возможных в августе). Это привело к существенному уменьшению на их территориях интенсивности атмосферных осадков, а также создало условия для возникновения в них засухи и многочисленных пожаров в природных экосистемах.

Из рисунка 2, *б* видно, что наибольшие средние значения СПА, оцененные за цикл 2014–2017 гг., имели место на территориях субъектов СФО, находящихся западнее меридиана 102° в. д. и включающих ту же область максимальных СПА для 2016 г.

Анализ рассматриваемых временных рядов показал, что их огибающие, соответствующие различным регионам, обладают существенным подобием. Как подтверждение этому, на рис. 3 приведены зависимости от года начала скользящего окна длиной 10 лет соответствующих ему суммарных значений СПА за июнь, июль и август для территорий таких субъектов СФО, как Республика Хакассия, Омская и Иркутская область.

Из рисунка 3, *а* следует, что в июне расположения максимумов рассматриваемых зависимости существенно различаются. В изменениях изучаемых показателей, соответствующих Омской области (как и для прочих регионов СФО, относящихся к его западной части) присутствует квазигармоническая составляющая с периодом 35 лет. Для Республики Хакассия и Иркутской области (а также Забайкальского и Алтайского края, республик Тыва и Бу-

рятия) характер аналогичных зависимостей заметно отличается. Предположительно присутствующая в них квазигармоническая составляющая имеет период около 60 лет.

Рисунок 3, *б* показывает, что в июле рассматриваемые зависимости обладают некоторым подобием. При этом абсолютные значения рассматриваемых показателей существенно меньше, чем в июне, а в их изменениях за период 1998–2017 гг. присутствуют убывающие тренды. Такие же особенности свойственны и для территорий прочих субъектов СФО.

Как видно из рис. 3, *в*, изменения сумм СПА, рассчитанных в скользящем окне 10 лет для всех рассматриваемых регионов практически подобны, различаясь лишь своим средним уровнем. В период после 1994 г. в изменениях соответствующих им значений данного показателя присутствуют возрастающие тренды. Такие же особенности свойственны и для прочих регионов СФО, которые расположены в его юго-западной части. Тренды, соответствующие регионам восточной и северной части СФО, напротив, являются убывающими.

Важной особенностью данных зависимостей для всех регионов СФО в августе является присутствие в них квазигармонической составляющей с периодом 40 лет. Последнее позволяет предположить, что в ближайшие 4–5 лет значения рассматриваемых показателей будут оставаться, близкими к уровню, достигнутому в 2017 г. (а с ними и риски возникновения засухи, а также пожаров в природных экосистемах), и лишь после этого проявятся противоположные тенденции.

Из рисунка 4 следует, что в период 1998–2017 гг. тенденции к увеличению значений СПА выявлены на территориях СФО, расположенных в основном южнее параллели 56° с. ш. и западнее меридиана 95° в. д. Абсолютный максимум скорости роста СПА соответствует территориям административных районов южной части Новосибирской области, как: Чистоозёрный, Купинский, Здвинский, Баганский, Карасукский, Убинский, Каргатский, Доволенский, Краснозёрский, Кочковский, Чулымский, Колыванский, Коченёвский, Ордынский, Сузунский, Искитимский, Черепановский и Маслянинский.

Сопоставление рис. 4 и 3, *в* свидетельствует о том, что на многих территориях СФО, где средние за цикл 2014–2017 гг. значения СПА в августе были максимальными, ныне преобладают тенденции к дальнейшему повышению уровня этого показателя. Из этого следует, что в ближайшие годы августовские значения СПА на таких территориях могут превысить их современные уровни, что приведет к росту рисков возникновения на них засухи, а также пожаров. Подобные неблагоприятные сценарии будущего (в том числе и августа 2018 г.) наиболее вероятны для административных районов, расположенных в южных частях территорий Омской, Новосибирской и Кемеровской областей, а также республик Алтай и Хакассия.



а



б



в

Рис. 3. Зависимости от года начала скользящего окна длиной 10 лет соответствующих ему суммарных значений СПА для территорий некоторых субъектов СФО
а – июнь, б – июль, в – август

На рисунке 4 представлены распределения по территории СФО значений углового коэффициента линейного тренда межгодовых изменений СПА в августе, оцененных для периода 1998–2017 гг.

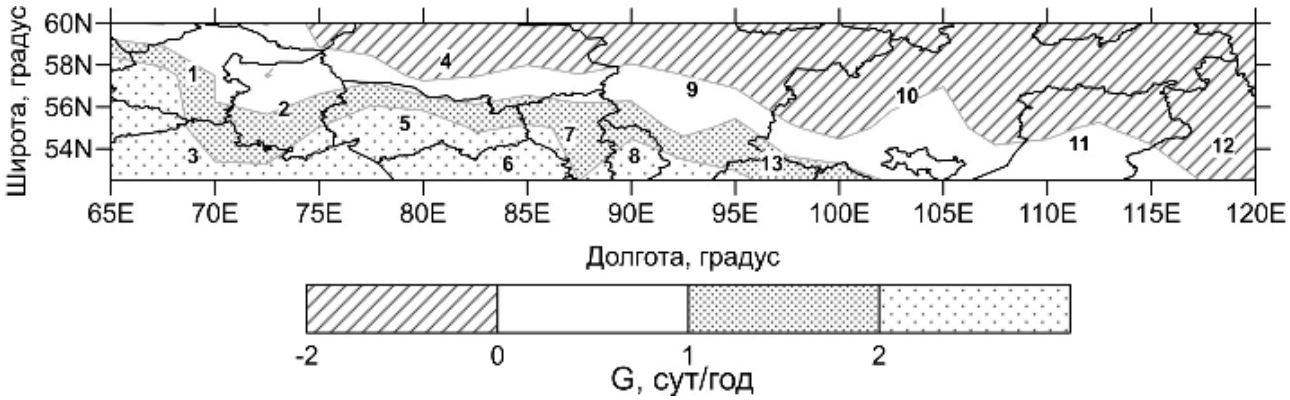


Рис. 4. Распределения по территории СФО значений углового коэффициента линейного тренда межгодовых изменений СПА в августе, оцененных для периода 1998–2017гг. Здесь цифрами обозначены территории тех же субъектов СФО, что и на рис. 2

Выводы

Таким образом, установлено, что в ближайшие годы на территориях многих административных районов республик Алтай и Хакассия, а также Омской, Новосибирской и Кемеровской областей СФО в августе значения СПА будут увеличиваться, превышая современные уровни, при которых на них возникает засуха и многочисленные природные пожары. Следовательно, риски появления на них указанных опасных природных явлений будут увеличиваться.

Для уменьшения ущерба, который они могут причинять, необходимо адекватно наращивать в данном регионе группировки МЧС, а также ресурсы, позволяющие эффективно и оперативно бороться с очагами пожаров.

Характер межесятилетней изменчивости августовских значений СПА на рассматриваемых территориях позволяет предположить, что эти неблагоприятные тенденции сохранятся еще как минимум 3–5 лет, после чего уровни данных показателей начнут снижаться.

Список литературы

1. Холопцев А. В., Кононова Н. К. Суммарная продолжительность макроциркуляционных процессов, способствующих росту пожароопасности на Европейской территории России и оценка возможностей ее прогнозирования // Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций : сб. тр. XVI Всерос. науч.-практ. конф. (27–28 сент. 2017. г.). М., 2017. С. 90–100.

2. Шерстюков Б. Г., Шерстюков А. Б. Оценки опасности лесных пожаров на территории России при потеплении климата в XXI в. // Тр. ВНИИГМИ-МЦД. 2014. Вып. 178.

3. Катцов В. М., Говоркова В. А. Ожидаемые изменения приземной температуры воздуха, осадков и годового стока на территории России в XXI в.: результаты расчетов с помощью ансамбля глобальных климатических моделей (CMIP5) // Тр. ГГО. 2013. Т. 569. С. 75–97.

4. Лесные пожары в Российской Федерации (статистический справочник) / А. Д. Думнов, Ю. И. Максимов, Ю. В. Рощупкина, О. А. Аксенова / под ред. А. Д. Думнова, Н. Г. Рыбальского. М. : НИА-Природа, 2005. 229 с.

5. Дубинин М., Поспелов И. Источники метеорологических данных на территорию РФ по станциям [Электронный ресурс]. URL: http://gis-lab.info/ga/meteo-station-soursis.html.

6. База данных. Результаты реанализа среднесуточных значений атмосферного давления. [Электронный ресурс]. URL: ftp://ftp.cdc.noaa.gov/Datasets/ncep.reanalisis.dailyavgs/levelsea.

7. Калиткин Н. Н. Численные методы. М. : Наука, 1978. 512 с.

8. Fishman G. S. Monte Carlo: concepts, algorithms, and applications. Springer, 1996. 698 p.

9. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика : справ. для инженеров и науч. работников. М. : Физматлит, 2006. 816 с.

10. Скворцов А. В. Триангуляция Делоне и ее применение. Томск : Изд-во Том. гос. ун-та, 2002. 128 с.

Секция

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ

УДК 550.388

Дистанционная диагностика состояния объектов суши в коротковолновом диапазоне радиоволн с использованием аппаратуры когерентного приёма

С. Ю. Белов (Belov_Sergej@Mail.Ru)

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва

Аннотация. Мониторинг поверхности земли методом дистанционного зондирования в коротковолновом диапазоне радиоволн может позволить оперативно выявлять некоторые геофизические параметры состояния объектов суши. В работе рассматривается задача дистанционной диагностики «шероховатой» земной поверхности и диэлектрических подповерхностных структур в КВ-диапазоне. Выбор КВ-диапазона позволяет учитывать и подповерхностный слой (толщины порядка длины волны падающего излучения), поскольку параметр рассеяния формируется также и неоднородностями диэлектрической проницаемости подповерхностных структур. При этом в качестве параметра, характеризующего рассеивающую способность радиоволн земной поверхности, используется соотношение сигнал/шум. Предложен новый некогерентный метод оценки параметра сигнал/шум. Выполнен сравнительный анализ и показано, что по аналитической (относительной) точности определения этого параметра новый метод на порядок превосходит широко используемый стандартный. Анализ аналитических погрешностей оценки параметра сигнал/шум позволил рекомендовать метод $R4$ вместо стандартного $R2$. При этом достаточно высокая аналитическая (относительная) точность оценки этого параметра может быть достигнута с помощью некогерентной аппаратуры, используя новый метод $R4$. В работе представлена разработанная и сконструированная автором экспериментальная аппаратура наземного измерительного комплекса установки когерентного зондирования рассеивающей способности земной поверхности в коротковолновом диапазоне радиоволн для оценки параметра сигнал/шум.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, КВ-диапазон, параметр рассеяния сигнал/шум, Ионосфера.

Введение

В работе рассматривается задача дистанционной диагностики «шероховатой» земной поверхности и диэлектрических подповерхностных структур в коротковолновом диапазоне радиоволн [3]. Предложен новый некогерентный метод оценки параметра сигнал/шум β [5]. Конкретизация осуществлена для ионосферного случая [22]. Данный диапазон позволяет диагностировать и подповерхностный слой земли [17], поскольку параметр рассеяния формируется также и неоднородностями диэлектрической проницаемости подповерхностных структур [23]. Данным методом при организации мониторингового зондирования [6], возможно выявлять области изменения этих сред, например, для оценки характеристик среды [7], для развития системы автоматизированных дистанционных исследований [8], контроля и прогнозирования изменения экосистем [16], а также некоторых экстремальных событий техногенного характера [21]. Также эти методики могут использоваться для развития системы мониторинга [25], контроля и прогнозирования чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера [26], а также для оценки рисков возникновения чрезвычайных ситуаций [11].

Идея метода определения этого параметра заключается в том, что, располагая синхронной информацией [10] о волне, отражённой от ионосферы и о волне, отражённой от земли и ионосферы (или прошедшей ионосферу дважды при зондировании со спутника), возможно извлекать информацию о параметре рассеяния [18].

1. Методы расчёта (когерентный и некогерентный)

В фиксированной точке приёма на поверхности земли (в скалярном приближении) ионосферный сигнал, узкополосный случайный процесс $\mathcal{E}(t)$ представляет собой суперпозицию «зеркальной» $\mathcal{E}_0(t)$ и рассеянной $\mathcal{E}_P(t)$ по нормальному закону компонент [1]:

$$\begin{aligned}\mathcal{E}(t) = \mathcal{E}_0(t) \;+\; \mathcal{E}_P(t) \;&= E_{00}\cdot e^{i\cdot\left(\omega_0\cdot t-\varphi(t)\right)} + \mathcal{E}_P(t) = \\ &= R(t)\cdot e^{i\cdot\left(\omega_0\cdot t-\Phi(t)\right)} = \left[E_C(t)+i\cdot E_S(t)\right]\cdot e^{i\cdot\omega_0\cdot t},\end{aligned} \tag{1}$$

где $\varphi(t)$, $\Phi(t)$, $R(t)$, $E_m(t)$, $m = c,s$ – медленные на периоде $T=\dfrac{2\cdot\pi}{\omega_0}$ случайные процессы; E_{00} = const.

Параметр рассеяния определяется отношением [1]:

$$\beta_k^2 = \frac{\text{мощность зеркальной компоненты}}{\text{мощность рассеянной компоненты}} = \frac{E_{00}^2}{2\cdot\overline{\mathcal{E}_P^2}}. \tag{2}$$

Здесь и ниже черта «–» означает статистическое усреднение. $E_C(t) = R(t)\cdot\cos\Phi(t)$ и $E_S(t) = R(t)\cdot\sin\Phi(t)$ – низкочастотные квадратуры ионосферного сигнала, $R(t)$ – огибающая, $\Phi(t)$ – суммарная фаза.

При этом индекс $K = E4, R2, R4$ означает экспериментально регистрируемые первичные случайные процессы и соответствующий метод их регистрации: $E4$ – когерентный; $R2$, $R4$ – некогерентные амплитудные.

Достаточно широко используется для оценки β_K (2) стандартный некогерентный $R2$-метод, основанный на соотношении [1]:

$$\frac{\overline{R^2}}{\left(\overline{R}\right)^2} = f\left(\beta_{R2}\right) = \frac{4}{\pi}\cdot\frac{\left(1+\beta_{R2}^2\right)\cdot\exp\left(\beta_{R2}^2\right)}{\left[\left(1+\beta_{R2}^2\right)\cdot I_0\left(\beta_{R2}^2/2\right)+\beta_{R2}^2\cdot I_1\left(\beta_{R2}^2/2\right)\right]^2},\ \text{при}\ 1<\frac{\overline{R^2}}{\left(\overline{R}\right)^2}\le\frac{4}{\pi} \tag{3}$$

$I_n(x)$ – функция Бесселя n-го порядка от чисто мнимого аргумента.

Используя когерентный $E4$-метод, β_{E4} оценивается по эксцессу γ_{E4} квадратур:

$$\gamma_{E4}\left(\beta_{E4}\right) = \frac{\overline{E_m^4}}{\left(\overline{E_m^2}\right)^2} - 3 = -\frac{3}{2}\cdot\frac{\beta_{E4}^4}{\left(1+\beta_{E4}^2\right)^2};\quad m = c,s,\quad \text{при}\quad \frac{3}{2}<\frac{\overline{E_m^4}}{\left(\overline{E_m^2}\right)^2}\le 3. \tag{4}$$

Следует заметить, что измеряемыми первичными параметрами являются отношения моментов $\overline{R^2}\Big/\left(\overline{R}\right)^2$, $\overline{E_m^4}\Big/\left(\overline{E_m^2}\right)^2$ соответственно. Соотношения (3), (4) получены с учётом определённых моделей структуры ионосферного сигнала. Исследования показали, что вероятностные свойства ионосферного сигнала (1) отражений первой кратности достаточно хорошо описываются моделью Райса со смещённым спектром (РС-модель), на основе которой получены выражения (3), (4). Выражение (4) когерентной методики $E4$ обеспечивает на порядок более высокую относительную аналитическую точность оценки параметра β_K [19].

В настоящей работе предлагается новый некогерентный $R4$-метод определения β_{R4} по эксцессу γ_{R4} огибающей для РС-модели:

$$\gamma_{R4}\left(\beta_{R4}\right) = \frac{\overline{R^4}}{\left(\overline{R^2}\right)^2} - 3 = -1 - \frac{\beta_{R4}^4}{\left(1+\beta_{R4}^2\right)^2}\quad \text{при}\quad 1<\frac{\overline{R^4}}{\left(\overline{R^2}\right)^2}\le 2. \tag{5}$$

Для сопоставления приведённых методов в смысле относительных погрешностей, допускаемых при вычислении β_K, обусловленных видом функциональных зависимостей $G_K = f(\beta)$, $\gamma_{E4}(\beta)$, $\gamma_{R4}(\beta)$, ($K = R2, E4, R4$), получим выражения (6):

$$\varepsilon_k = \left|\frac{\Delta\beta_K}{\beta_K}\right| = \left|\frac{1}{\beta_K}\cdot\frac{dG_K}{dZ_K}\cdot\Delta(Z_K)\right|,\ Z_K = \frac{\overline{R^2}}{\left(\overline{R}\right)^2},\ \frac{\overline{E_m^4}}{\left(\overline{E_m^2}\right)^2},\ \frac{\overline{R^4}}{\left(\overline{R^2}\right)^2}, \tag{6}$$

где $\Delta(Z_K)$ – абсолютные статистические ошибки измеряемых величин.

Погрешности (включая статистические) для разных методик определения β_K:

$$\varepsilon_{R2}(\beta) = \frac{\pi}{8}\cdot\frac{\left[\left(1+\beta^2\right)\cdot I_0\left(\beta^2/2\right)+\beta^2\cdot I_1\left(\beta^2/2\right)\right]^3}{\beta^2\cdot\exp\left(\beta^2\right)\cdot I_1\left(\beta^2/2\right)}\cdot\Delta\left(Z_{R2}\right);$$

$$\varepsilon_{E4}(\beta) = \frac{\left(1+\beta^2\right)^3}{6\cdot\beta^4}\cdot\Delta\left(Z_{E4}\right);\ \varepsilon_{R4}(\beta) = \frac{\left(1+\beta^2\right)^3}{4\cdot\beta^4}\cdot\Delta\left(Z_{R4}\right). \tag{7}$$

Статистическая ошибка $\Delta(Z_K)$ зависит от объёма выборки N и при одинаковых объёмах выборки может быть разной для каждого из способов. Чтобы акцентировать внимание на погрешностях за счёт различия функциональных зависимостей (3)–(5), нормируем (7) на $\Delta(Z_K)$.

Графики зависимостей $\varepsilon_K^* = \dfrac{\varepsilon_K}{\Delta(Z_K)}$ для β_{R2}, β_{E4} и β_{R4} приведены на рис. 1. ε_K^* будем ниже называть аналитической (относительной) погрешностью метода.

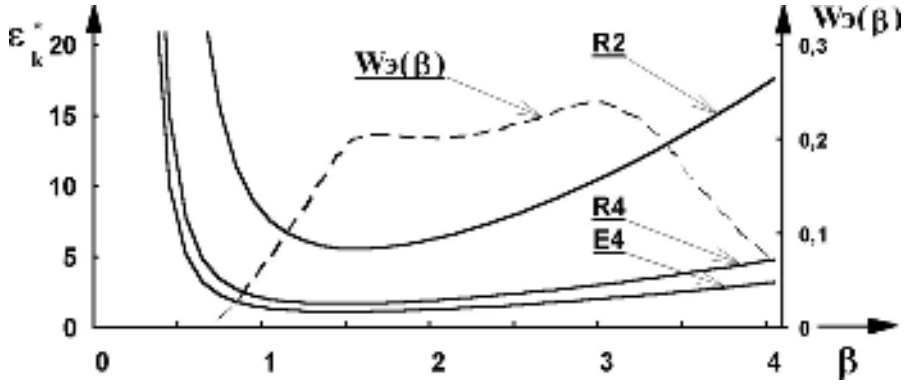


Рис. 1. Графики зависимостей ε_K^*, $K = R2, R4, E4$ (сплошные линии) и экспериментальное распределение $W_Э(\beta)$ (пунктир) (слой $F2$, 4,5–9,5 МГц, единичный сигнал)

Экспериментальное распределение $W_Э(\beta)$ определяет диапазон изменения β.

Из выражений (4) и (5) видно, что $\varepsilon_{E4}^* = \frac{2}{3}\cdot\varepsilon_{R4}^*$ – одного порядка и существенно (на порядок) превосходят точность измерения стандартной $R2$-методики. В итоге, анализ аналитических погрешностей оценки параметра β_K позволил рекомендовать метод $R4$ вместо стандартного $R2$. При этом достаточно высокая аналитическая (относительная) точность оценки параметра β_K может быть достигнута с помощью некогерентной аппаратуры, используя выражение (5) метода $R4$. Отметим, что за когерентной методикой $E4$ остаётся возможность оптимизации статистической ошибки путём соответствующей специальной цифровой обработки ионосферного сигнала [2].

Для отражений кратности выше первой ($n > 1$) стандартные методы в вариантах (3), (4) и (5) не применимы, поскольку статистика сигнала кратности $n > 1$ не описывается РС-моделью. Для этого случая используется статистическая мультипликативная модель кратных отражений (СМ-модель).

Согласно положений СМ-модели комплексная амплитуда поля $E_2(t)$ радиосигнала, двукратно отражённого от ионосферного и однократно от земного экранов, у поверхности земли может быть представлена в виде вероятностного мультипликативного соотношения:

$$\mathbf{E}_2(t) = \frac{\mathrm{E}_{11}(t)\cdot \mathrm{E}_{1зем.}(t)\cdot \mathrm{E}_{12}(t)}{\mathrm{A}^2}, \qquad (8)$$

где A – нормировочная константа (амплитуда плоской волны), а $E_{11}(t)$, $E_{1зем.}(t)$, $E_{12}(t)$ – комплексные амплитуды однократно отражённых случайный полей на j-ом скачке (j = 1, «зем.», 2; $E_1(t) \equiv E_{11}(t)$) при падении на соответствующий экран пробной волны: $\mathrm{A}\cdot\exp\left(i\cdot\vec{k}\cdot\vec{r}-i\cdot\omega_0\cdot t\right)$. Эти амплитуды в вероятностном смысле адекватны функциям модуляции соответствующих случайных дифракционных экранов [12]. В используемых обозначениях первый индекс указывает, что данная величина относится к одному скачку, а второй – порядковый номер скачка при кратном отражении (рис. 2).

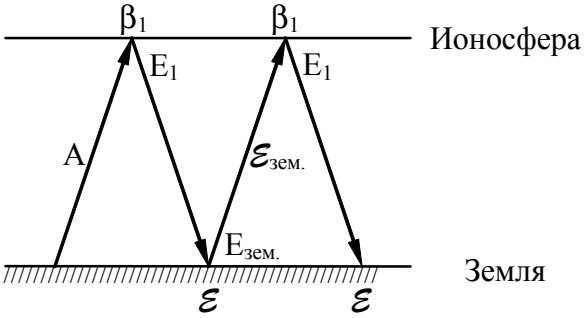


Рис. 2. Схема формирования кратных отражений

При известных статистиках и независимости процессов $E_{1j}(t)$ (а, следовательно, квадратур $E_{1jm}(t)$, $m = c,s$ и огибающих $R_{1j}(t)$, j = 1, «зем.», 2) СМ-модель позволяет определять статистические характеристики процессов $E_{2m}(t)$; $R_2(t)$; $\Phi_2(t)$ для двукратно отражённых сигналов. Очевидно, что моменты огибающих $R_{nj}(t)$ и квадратурных компонент $E_{njm}(t)$ (n = 1,2; j = 1, «зем.», 2; $m = c,s$) подчиняются соотношениям (9):

$$\overline{\mathrm{R}_2^n} = \frac{\overline{\mathrm{R}_{11}^n}\cdot\overline{\mathrm{R}_{1зем.}^n}\cdot\overline{\mathrm{R}_{12}^n}}{\mathrm{A}^2}; \quad \overline{\mathrm{E}_{2m}^n} = \frac{\overline{\mathrm{E}_{11m}^n}\cdot\overline{\mathrm{E}_{1зем.m}^n}\cdot\overline{\mathrm{E}_{12m}^n}}{\mathrm{A}^2}; \quad m = c,s; \quad n = 1, 2, 3, \ldots . \qquad (9)$$

В результате, регистрируя флуктуации полей $E_1(t)$ и $E_2(t)$ и предполагая, что в условиях вертикального зондирования области формирования отражений различной кратности статистически эквивалентны ($\beta_{11} = \beta_{12} = \beta_1$), а к «шероховатому» земному экрану применима РС-модель (есть основания считать, что структура декаметрового радиосигнала, однократно рассеянного одной лишь земной поверхностью, также гауссового типа [1]), становится возможным извлекать искомый параметр рассеивающей способности земной поверхности $\beta_{зем.}$ на основе соотношений [9]:

а) по огибающей методом $R2$: $$f\left(\beta_{зем.R2}\right) = \frac{\overline{\mathrm{R}_2^2}}{\left(\overline{\mathrm{R}_2}\right)^2} \Big/ \left[\frac{\overline{\mathrm{R}_1^2}}{\left(\overline{\mathrm{R}_1}\right)^2}\right]^2;$$

б) по квадратурам методом $E4$: $$\gamma\left(\beta_{зем.E4}\right) + 3 = \frac{\overline{\mathrm{E}_{2m}^4}}{\left(\overline{\mathrm{E}_{2m}^2}\right)^2} \Big/ \left[\frac{\overline{\mathrm{E}_{1m}^4}}{\left(\overline{\mathrm{E}_{1m}^2}\right)^2}\right]^2; \quad m = c,s; \qquad (10)$$

в) по огибающей методом $R4$: $$\gamma_{R4}\left(\beta_{зем.R4}\right) + 3 = \frac{\overline{\mathrm{R}_2^4}}{\left(\overline{\mathrm{R}_2^2}\right)^2} \Big/ \left[\frac{\overline{\mathrm{R}_1^4}}{\left(\overline{\mathrm{R}_1^2}\right)^2}\right]^2.$$

Подчеркнём, что определение параметра $\beta_{зем.\,k}$ из (10) возможно только в том случае, когда правые части выражений (10) удовлетворяют неравенствам (3)–(5) соответственно [15]. В случае (10) можно использовать либо $m = c$, либо $m = s$, т. е. одну из квадратурных компонент, ибо они статистически эквивалентны [20].

2. Тестирование метода

Интерпретация получаемых данных производится на основе статистической мультипликативной модели сигнала. Тестирование метода получения «параметра рассеяния» сигнал/шум в указанной модели произведено на примере двукратного отражения зондирующего сигнала при его вертикальном распространении. В ходе работы рассматривались вопросы чувствительности модели по изучаемому параметру.

Для тестирования метода при изменении параметра рассеивающей «подложки» в типичных ионосферных условиях был выполнен численный эксперимент на ЭВМ, анализ данных которого показал, что:

1. Метод дистанционной диагностики в КВ-диапазоне чувствителен по исследуемому параметру. При объёме выборки $N \geq 240$ точность определения изучаемого параметра не хуже 5 %.

2. Чувствительность метода, его точностные характеристики сохраняются даже при существенном изменении параметров сред распространения.

3. Сопоставление данных численного и натурного экспериментов указывает, что для обеспечения оценки параметра рассеяния в условиях реального эксперимента с точностью сравнимой с аппаратурной погрешностью можно рекомендовать увеличивать длительность сеансов наблюдения до 8 ÷ 10 минут.

3. Экспериментальная установка Наземного измерительного комплекса для синхронной регистрации ионосферных сигналов различной кратности

Для получения необходимых экспериментальных данных используется импульсный метод когерентного приёма [18]. Этот метод позволяет регистрировать низкочастотные квадратурные составляющие ионосферного сигнала $E_{ke}(t)$, $E_s(t)$. По ним возможно определение огибающей $R(t)$ и фазы $\Phi(t)$, то есть функции модуляции сигнала. Для того чтобы применить аппаратуру когерентного приёма к исследованию кратных ионосферных отражений, необходимо было обеспечить возможность выделения и одновременной регистрации параметров, относящихся к сигналам разной кратности [13].

В установке используется схема регистрации низкочастотных квадратурных компонент ионосферного сигнала $E_c(t)$, $E_s(t)$. Модернизация обеспечила регистрацию на ЭВМ упомянутых параметров сигнала одновременно для сигналов различной кратности [4]. Это достигнуто применением специальной многоканальной системы стробирования и регистрации. На рисунке 3 представлена структурная схема установки со схемой регистрации и стробирования. Установка позволяет осуществлять одновременную регистрацию параметров кратных ионосферных отражений, причём даже с использованием ЭВМ с не очень высоким быстродействием за счёт применения оригинальных алгоритмов оптимизации: патент [2].

В работе представлены образцы регистрации квадратурных компонент сигнала с помощью наземного измерительного комплекса установки когерентного зондирования в коротковолновом диапазоне радиоволн на тестовом полигоне МГУ для первого и второго отражений на рис. 4, 5, соответственно.

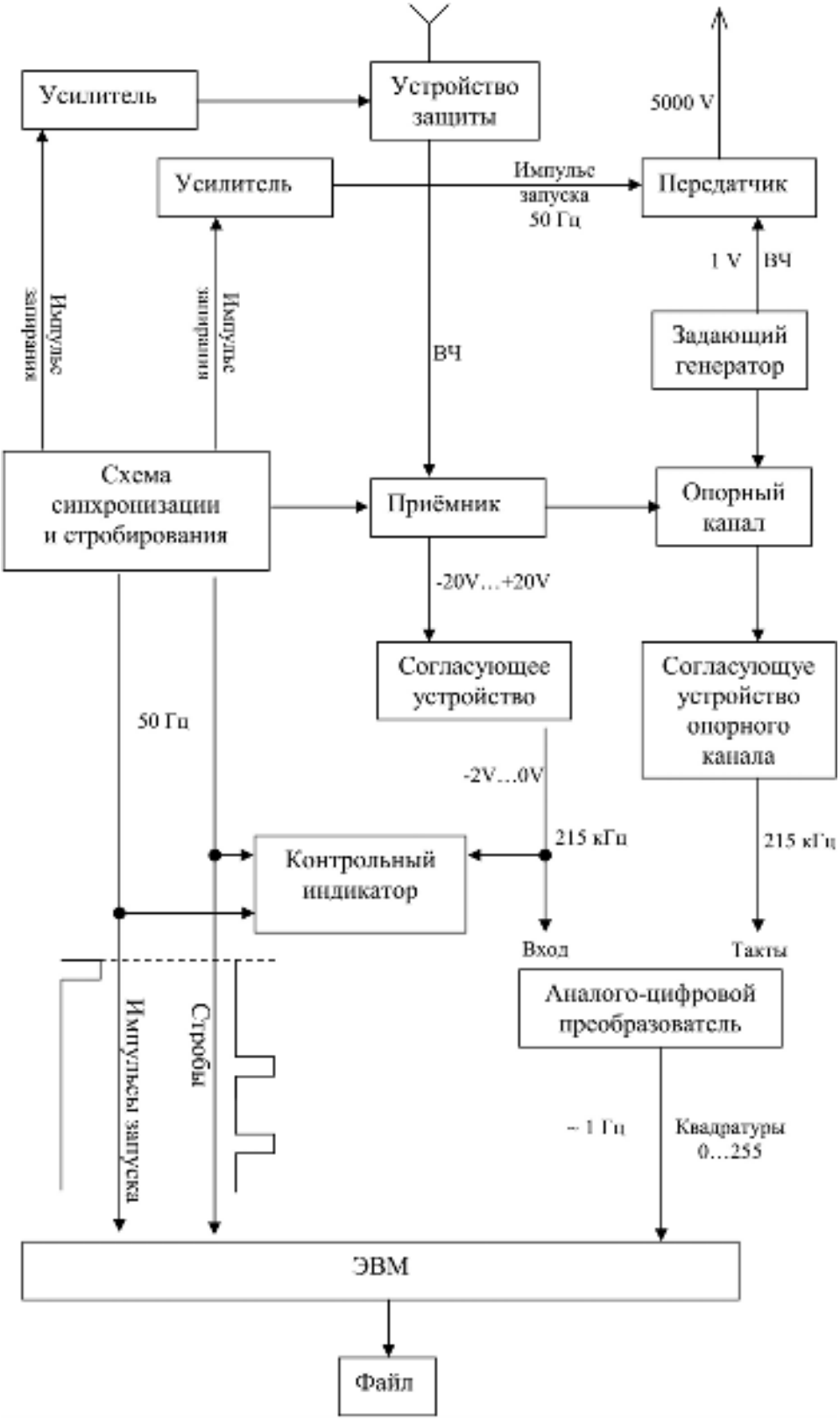


Рис. 3. Функциональная схема экспериментальной установки Наземного Измерительного Комплекса

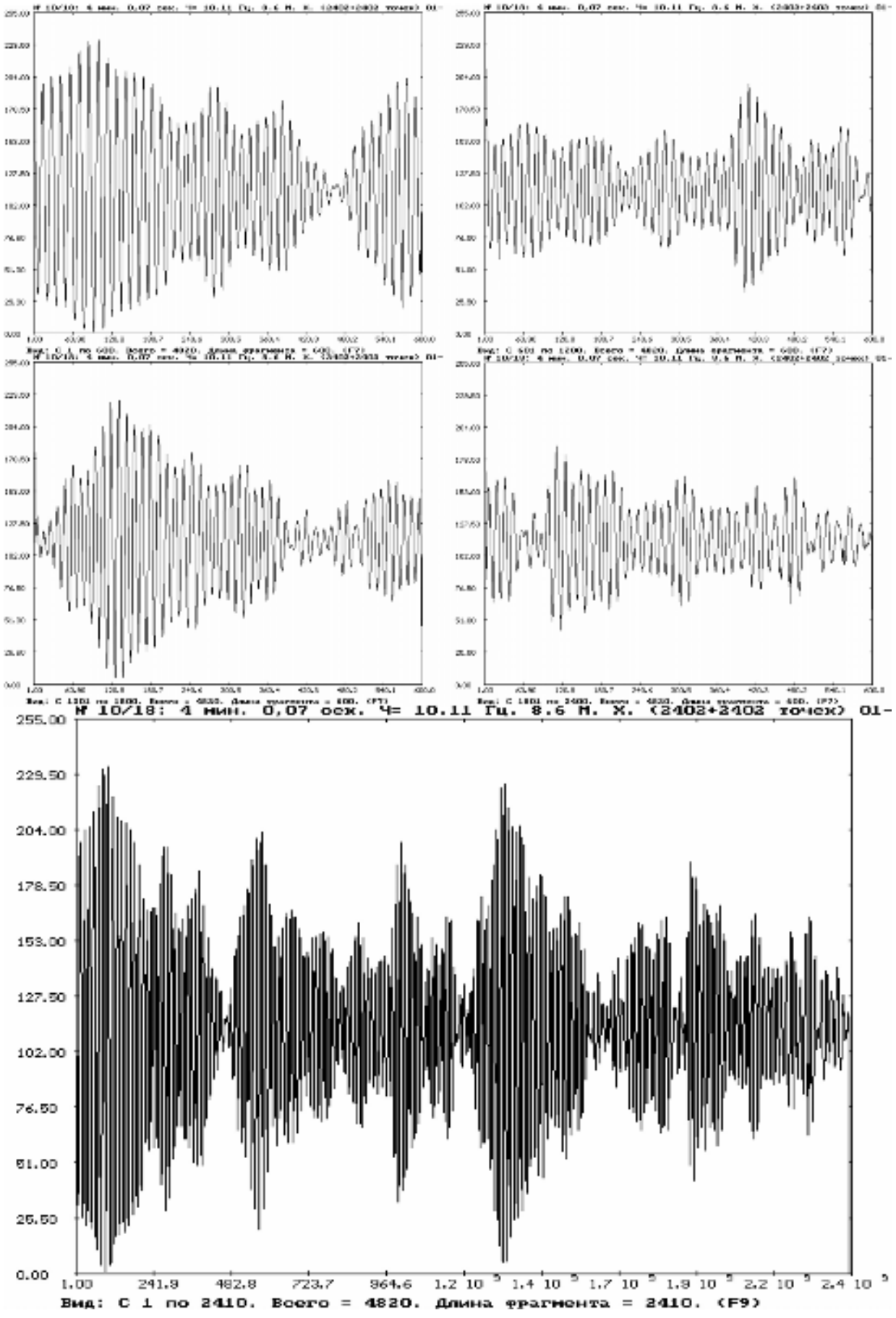


Рис. 4. Изменение со временем квадратурной компоненты ионосферного сигнала, однократно отражённого: 1-я, 2-я, 3-я, 4-я минуты и полный сеанс (слева направо сверху вниз)

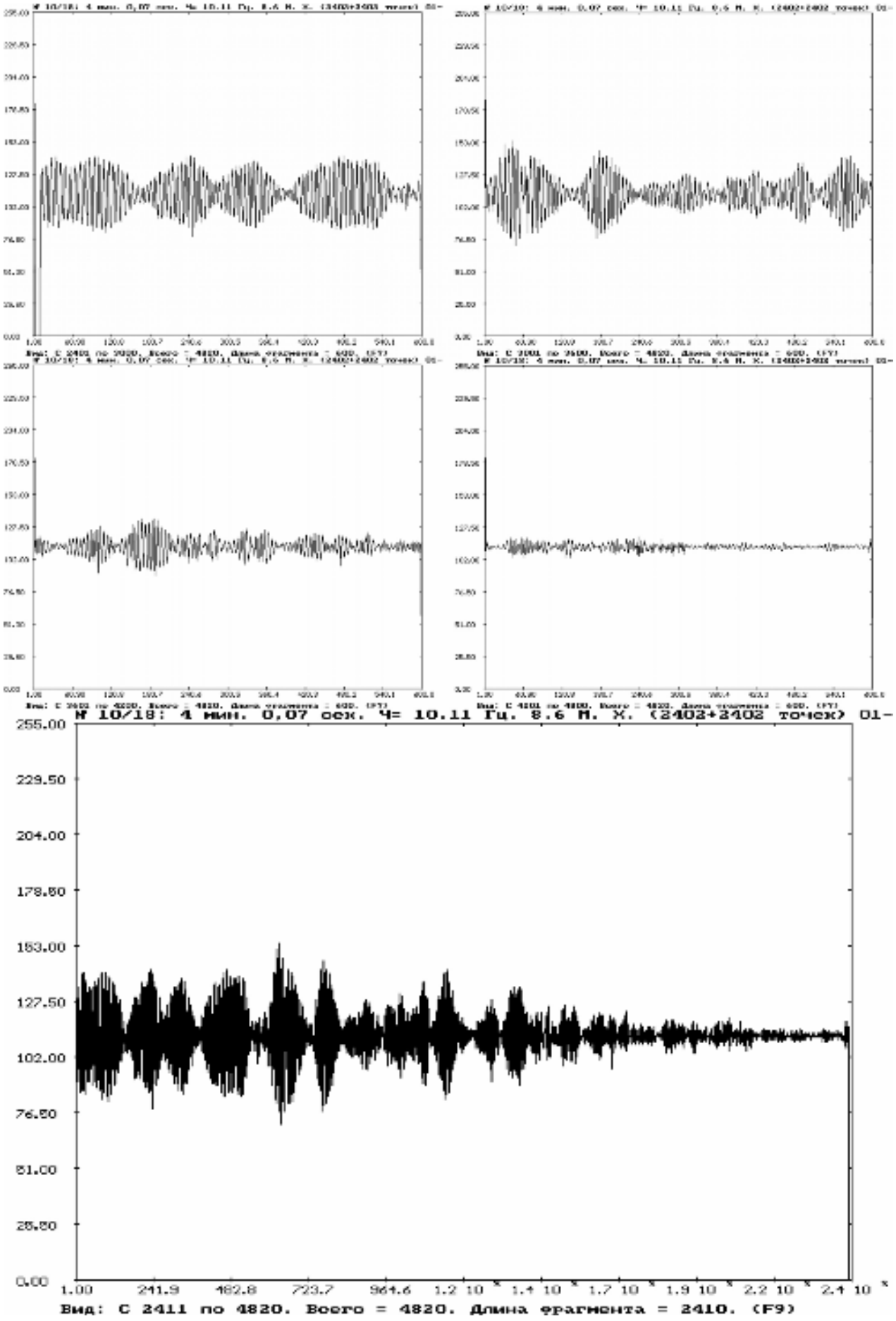


Рис. 5. Изменение со временем квадратурной компоненты ионосферного сигнала второго отражения: 1-я, 2-я, 3-я, 4-я минуты и полный сеанс (слева направо сверху вниз)

Заключение

В работе представлена разработанная и сконструированная автором экспериментальная аппаратура наземного измерительного комплекса установки когерентного зондирования рассеивающей способности земной поверхности в коротковолновом диапазоне радиоволн для оценки параметра сигнал/шум. Предложен новый некогерентный метод оценки параметра сигнал/шум. Выполнен сравнительный анализ и показано, что по аналитической (относительной) точности определения этого параметра новый метод на порядок превосходит широко используемый стандартный. Анализ аналитических погрешностей оценки параметра β_K позволил рекомендовать метод $R4$ вместо стандартного $R2$. При этом достаточно высокая аналитическая (относительная) точность оценки параметра β_K может быть достигнута с помощью некогерентной аппаратуры, используя метод $R4$.

Мониторинг поверхности земли методом дистанционного зондирования в коротковолновом диапазоне радиоволн может позволить оперативно выявлять некоторые геофизические параметры [14] состояния объектов суши, проводить диагностику [24] подповерхностных структур, выявлять области изменения этих сред [27]. Данный диапазон позволяет диагностировать и подповерхностный слой земли, поскольку параметр рассеяния формируется и неоднородностями диэлектрической проницаемости подповерхностных структур.

Список литературы

1. Альперт Я. Л. Распространение радиоволн в ионосфере. М. : АН СССР, 1960.
2. Белов С. Ю. Программа регистрации квадратурных компонент n-кратного отражённого от земной поверхности радиосигнала. Свидетельство о регистрации права на программное обеспечение № RU.2016612172 от 19.02.2016 г.
3. Белов С. Ю. Экспериментальное исследование характеристик когерентной и некогерентной обработки информации при дистанционном зондировании атмосферы и «шероховатой» земной поверхности в коротковолновом диапазоне радиоволн // Изв. вузов. Физика. Т. 59, № 12-3. С. 121–124.
4. Белов С. Ю. Результаты регистрации квадратурных компонент сигнала с помощью наземного измерительного комплекса установки когерентного зондирования в коротковолновом диапазоне радиоволн на тестовом полигоне МГУ // Учён. зап. физ. фак. Моск. ун-та. 2017. № 44. С. 1740701-1–1740701-9.
5. Белов С.Ю. Теоретическое и экспериментальное сопоставление когерентного и некогерентного методов определения параметра сигнал/шум в задачах распространения радиоволн коротковолнового диапазона // Учён. зап. физ. фак. Моск. ун-та. 2016. № 3. С. 163107-1–163107-6.
6. Белов С. Ю. Космический мониторинг характеристик прибрежных территорий для обеспечения экологической безопасности зондированием в коротковолновом диапазоне радиоволн // Экология. Экономика. Информатика. Азовское море, Керченский пролив и предпроливные зоны в Чёрном море: проблемы управления прибрежными территориями для обеспечения экологической безопасности и рационального природопользования. Ростов н/Д : Изд-во Юж. федер. ун-та, 2016. С. 27–41.
7. Белов С. Ю. О некоторых характеристиках рассеивающей способности земной поверхности при дистанционном зондировании в коротковолновом диапазоне радиоволн. // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли. Красноярск : СФУ, 2015. С. 101–104.
8. Белов С. Ю., Белова И. Н. Мониторинг поверхности земли методом дистанционного зондирования в КВ-радиодиапазоне // Экология-2015. Архангельск, 2015. С. 6–7.
9. Белов С. Ю. О способах определения параметра сигнал/шум при отражении радиоволн от границы раздела двух сред в КВ-диапазоне // Комплексные исследования морей России: оперативная океанография и экспедиционные исследования. Севастополь : ФГБУН МГИ, 2016. С. 528–533.
10. Белов С. Ю. Когерентный и некогерентный методы определения параметра сигнал/шум в задачах распространения радиосигнала коротковолнового диапазона радиоволн // Ломоносов-2016. М. : МГУ, 2016. Т. 1. С. 171–173.
11. Белов С. Ю. Дистанционные методы наблюдений и технологии мониторинга природно-техногенных опасных процессов в коротковолновом диапазоне радиоволн // Природные катастрофы: изучение, мониторинг, прогноз. Южно-Сахалинск : ИМГиГ ДВО РАН, 2016. С. 172–175.
12. Белов С. Ю., Белова И. Н. Математические методы определения характеристик рассеивающей способности отражающего экрана когерентным и некогерентным способами // Математика, физика, информатика и их приложения в науке и образовании. М. : МТУ. С. 155–157.
13. Белов С. Ю. Программно-аппаратный комплекс наземной измерительной установки когерентного приёма по исследованию рассеивающей способности земной поверхности в коротковолновом диапазоне радиоволн // Ломоносов-2017. М. : МГУ, 2017. С. 502–504.

14. Белов С. Ю. О прикладных аспектах геологических исследований методами дистанционного зондирования в коротковолновом диапазоне радиоволн // Актуальные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии. СПб. : Изд-во ВВМ, 2017. С. 17–21.

15. Белов С. Ю. Математические методы обработки результатов экспериментов по дистанционному зондированию атмосферы и «шероховатой» земной поверхности в коротковолновом диапазоне радиоволн для рационального природопользования // Прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий. Майкоп : Изд-во ИП Кучеренко В. О., 2017. Ч. 1. С. 118–127.

16. Белов С. Ю. Инновационные методы мониторинга экосистем озёр дистанционным зондированием в коротковолновом диапазоне радиоволн / Озера Евразии: проблемы и пути их решения. Петрозаводск : Карел. науч. центр РАН, 2017. С. 29–34.

17. Белов С. Ю. Диагностика подповерхностных свойств земли дистанционным зондированием в коротковолновом диапазоне радиоволн // БелкамНефть. Ижевск : Ин-т компьютер. исслед., 2017. С. 65–70.

18. Белов С. Ю. Аппаратные средства дистанционной диагностики рассеивающей способности земной поверхности в коротковолновом диапазоне радиоволн // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли. Красноярск : СФУ, 2017. С. 82–85.

19. Белов С. Ю. Сравнительное исследование различных методов определения характеристик электромагнитной волны, отражённой от рассеивающего дифракционного экрана при распространении радиосигнала в канале Земля – Ионосфера в коротковолновом диапазоне радиоволн с использованием экспериментальной аппаратуры когерентного приёма наземного измерительного комплекса // Вестн. КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2017. № 4(20). С. 9–27. DOI: 10.18454/2079-6641-2017-20-4-9-27.

20. Belov S. Yu. Remote site investigation of the characteristics of the earth's surface in the short-wave range of radio waves // RSPSoc2017 Annual Conference Earth & Planets: making the most of our observations, 2017, Imperial College London. P. 46.

21. Belov S. Yu. Monitoring of parameters of coastal Arctic ecosystems for sustainability control by remote sensing in the short-wave range of radio waves // The Arctic Science Summit Week 2017. Prague, 2017. P. 161.

22. Belov S. Yu., Belova I. N. The analysis of methods of determination the scattering parameter of the inhomogeneous fluctuating ionospheric screen // Atmosphere, ionosphere, safety. Kaliningrad, 2016. P. 435–440.

23. Belov S. Yu., Belova I. N. Methods of obtaining data on the characteristics of superficial and subsurface structures of the earth by remote sensing in the short-wave range of radio waves // IGCP 610 project “From the Caspian to Mediterranean: Environmental Change and Human Response during the Quaternary” (2013–2017). GNAS Tbilisi, Georgia, 2016. P. 26–29.

24. Belov S. Yu., Belova I. N. Methods and equipment for conducting field research into surface layer characteristics by sounding in the short-wave range of radio waves in order to study environmental change // Proceedings of UNESCO-IUGS-IGCP 610 and INQUA IFG POCAS Joint Plenary Conference and Field Trip. Palermo, Italy. University of Palermo, 2017. P. 39–44.

25. Belov S. Yu. The analysis of monitoring data of the parameter scattering power the earth's surface in the short-wave range of radio waves // Data Intensive System Analysis for Geohazard Studies, Geoinformatics research papers, 2016. Vol. 4, N 2, BS4002. P. 50. DOI: 10.2205/2016BS08Sochi.

26. Belov S. Yu., Belova I. N., Falomeev S. D. Monitoring of coastal ecosystems by method of remote sensing in the short-wave range of radio waves // Managing Risks to Coastal Regions and Communities in a Changing World. St. Petersburg, 2016. DOI: 10.21610/conferencearticle_58b4316d2a67c.

27. Belov S. Yu., Belova I. N. Radiophysical methods of diagnostics the Earth's ionosphere and the underlying earth's surface by remote sensing in the short-wave range of radio waves // Proc. SPIE-The International Society for Optical Engineering. Bellingham, WA, United States. Vol. 10466. P. 104666V-1–104666V-9. DOI: 10.1117/12.2288609.

УДК 551.508.8

Аппаратно-программный комплекс для исследований пространственно-временной структуры турбулентных флуктуаций температуры и ветра

А. Я. Богушевич (bay@imces.ru), А. А. Азбукин (lep@imces.ru),
А. Е. Гондаренко (agondarenko@gmail.com), В. А. Корольков (kor@imces.ru),
И. М. Краснолобов (hardegor@imces.ru)[1]

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск

Аннотация. Приводится описание нового аппаратно-программного комплекса АМК-03-4, который может выполнять ультразвуковые измерения с частотой 80 Гц турбулентных флуктуаций температуры и компонент скорости ветра одновременно в четырех пространственных областях атмосферного воздуха диаметром в 7 см, разнесенных между собой на расстояния около 35 см. В этом приборе оцениваются не только параметры атмосферной турбулентности в каждой из используемых в нем локальных областей измерений, но и статистические характеристики пространственных производных турбулентных пульсаций температуры и ортогональных компонент скорости ветра вдоль каждой из осей декартовой системы координат. Последнее создает новые возможности для исследований пространственно-временной структуры атмосферной турбулентности.

Ключевые слова: атмосферная турбулентность, ультразвуковой термоанемометр, метеорологические параметры, измерение турбулентных флуктуаций.

Введение

Применение ультразвуковых методов для оценивания метеорологических параметров атмосферы и их флуктуаций началось еще в середине прошлого века в связи с тем, что используемым стандартным метеорологическим приборам присущи существенные инерционные и радиационные ограничения [4; 8; 9; 13–15]. Ультразвуковые методы в значительной степени свободны от этих недостатков, что оказалось особенно ценным для использования их в экспериментальных исследованиях атмосферной турбулентности в приземном слое. Интенсивное развитие в последующие годы цифровых интегральных микросхем, появление микропроцессоров и персональных компьютеров привело к разработке качественно новых ультразвуковых метеостанций, обладающих существенно лучшими техническими возможностями для оценивания параметров атмосферной турбулентности [1–3; 10; 12; 16; 17]. Современные устройства этого типа могут измерять мгновенные значения температуры воздуха и трех ортогональных компонент скорости ветра с наилучшими показателями для технических параметров, наиболее важных при оценивании параметров турбулентности. К этим показателям относятся (в скобках их типично достигаемые значения в ультразвуковых термоанемометрах) инерционность измерений χ (~10^{-3} с), пороговая чувствительность к пульсациям метеорологических параметров σ_ξ (~10^{-2} °С или м/с) и частота повторения измерений F_d (от 10 до 100 Гц и более). Первые два показателя определяют разрешающую способность прибора к турбулентным флуктуациям метеорологических параметров по амплитуде, а третий – значение верхней границы их разрешения в частотных спектрах. Программное обеспечение, разрабатываемое для этих устройств, позволяет автоматически сохранять результаты мгновенных измерений в компьютере в виде длинных временных рядов для каждой из метеорологической величины и, после математической обработки этих рядов, получать чрезвычайно многообразную информацию о состоянии приземного слоя атмосферы [5].

В ИМКЭС СО РАН на протяжении более 20 лет выполняются работы по созданию и развитию ультразвуковых метеостанций, имеющих с 2002 г. общее для всех модификаций наименование типа как АМК-03 [1–3; 11]. Метеостанции АМК-03 занесены в государственный реестр средств измерений (сертификат RU.C.28.007.A № 29530) и с 2006 г. выполняется их серийное промышленное изготовление (предприятием ООО «Сибналитприбор», г. Томск). Используя этот опыт, по заказу от ИОА СО РАН был создан аппаратно-

программный комплекс АМК-03-4, имеющий новые, более широкие, возможности для исследований атмосферной турбулентности.

Ниже приводится описание аппаратного состава данного комплекса, разработанного для него программного обеспечения и выходных данных его измерений.

1. Состав технические характеристики и работа комплекса АМК-03-4

Основными элементами комплекса являются специально разработанные под его задачи новые ультразвуковые термоанемометры УГИ-75, являющиеся малогабаритной модификацией серийно выпускаемых термоанемометров ДСВ-15 из состава метеостанций АМК-03. В отличие от ДСВ-15 в них:

– использованы более современные микросхемы и микропроцессор;

– применены новые датчик атмосферного давления с частотным выходным сигналом и 3-х координатный акселерометр для автоматического учета ориентации термоанемометра относительно вектора силы тяжести;

– примерно в два раза уменьшен (до 7 см) линейный размер рабочей области исследуемого атмосферного воздуха, т. е. расстояния S между используемыми парами ультразвуковых датчиков;

– ультразвуковые датчики вынесены на угол в 45 ° из плоскостей конструктивных колец для уменьшения влияния ветрового затенения на результаты измерений;

– частота кварцевого генератора $f_{кг}$, используемого для цифровых измерений времен прохождения акустических сигналов в воздухе, увеличена с 32 до 72 МГц;

– примерно в два раза уменьшено время всех ультразвуковых измерений, необходимых для вычисления мгновенных значений температуры воздуха и трех ортогональных компонент скорости ветра, т. е. значение параметра инерционности χ.

Термоанемометр УГИ-75 имеет метрологические характеристики, которые аналогичны заявляемым для АМК-03 (см. табл. 1, [1]).

Таблица 1

Диапазоны и погрешности измерений метеорологических параметров в УГИ-75

Измеряемая величина	Диапазон измерения	Погрешность
Температура воздуха T, °С	минус 50 … плюс 55	±0,3, при $T \le +30$ °С ±0,5, при $T > +30$ °С
Скорость горизонтального ветра V, м/с	0…40	±(0,1 + 0,02 V)
Направление горизонтального ветра, град	0…360	± 1,8
Скорость вертикального ветра V, м/с	–15…+15	±(0,1 + 0,02 V)
Относительная влажность воздуха, %	5…100	±2,5, при $T > 0$ °С; ±5, при $T \le 0$ °С
Атмосферное давление P, мм рт. ст.	560…800	±0,4

Отметим, что метрологические характеристики здесь нормируются только для усредненных (за интервал от 1 до 20 мин) вычисляемых значений метеорологических параметров. При этом указанные в табл. 1 погрешности измерений температуры, скорости и направления ветра более чем на порядок превышают достигаемые пороговые чувствительности σ_T и σ_V ультразвукового термоанемометра к их турбулентным флуктуациям, что обусловлено существенным превалированием в подобных устройствах систематических погрешностей над случайными ошибками измерений. В [7] приведены инженерные формулы для оценивания величин σ_T и σ_V:

$$\sigma_T \approx 10T^{3/2} / (S \cdot f_{КГ}) \text{ и } \sigma_V \approx 200T / (S \cdot f_{КГ}), \quad (1)$$

где величина $q = 1/ f_{кг}$ является единицей квантования измеряемых временных интервалов в ультразвуковых термоанемометрах (их цифрового разрешения), T – значение температуры воздуха в Кельвинах. Поскольку в УГИ-75 частота $f_{кг}$ увеличена в большей степени, чем уменьшены значения S, то это устройство имеет даже несколько лучшие характеристики пороговой чувствительности, чем стандартные термоанемометры, применяемые в АМК-03.

В комплектность поставки нового комплекса АМК-03-4 входят (см. рис. 1):

– 4 экземпляра описанных выше ультразвуковых термоанемометров УГИ-75;

– 4 экземпляра Windows-приложения «METEO 4.0» с индивидуальными настройками и значениями градуировочных параметров для каждого применяемого УГИ-75;

– контроллер сбора информации (КСИ);

– Windows-приложение «АМК-rotor» для работы с общими выходными данными комплекса (из КСИ);

– блок питания БППИ-01;

– комплект соединительных кабелей;

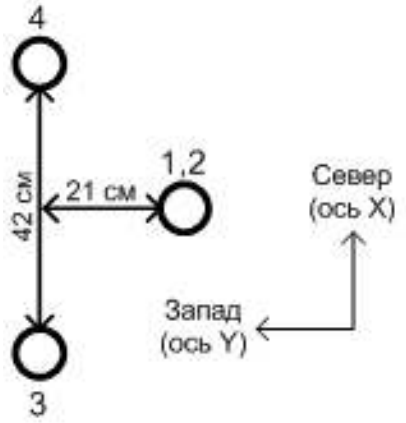
– специальная монтажная конструкция, предназначенная для фиксации взаимного пространственного размещения четырех УГИ-75 и их азимутальной ориентации относительно направления на север (см. рис. 1, *б*, *в*);

– метеомачта высотой 4 м;

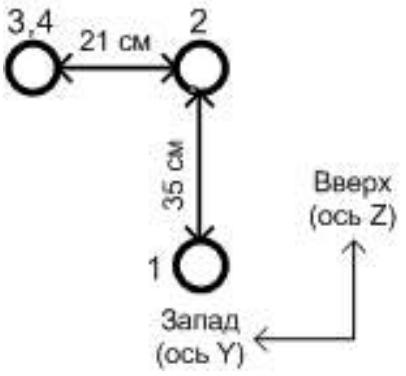
– транспортная тара.



а)



б)



в)

Рис. 1. Внешний вид (*а*) комплекса АМК-03-4 и схема пространственного размещения в нем ультразвуковых термоанемометров УГИ-75 с порядковыми номерами 1, 2, 3 и 4: *б*) – вид сверху; *в*) – вид сбоку в направлении на север

Монтажная конструкция с термоанемометрами УГИ-75 здесь устанавливается в самой верхней части метеомачты, а блок КСИ прикрепляется к ней же на высоте около 1,5 м. Блок питания БППИ-01 обычно размещается рядом с компьютером, на котором выполняется регистрация результатов измерений.

Структуру соединения составных частей комплекса АМК-03-4 и их функциональное взаимодействие можно рассмотреть на рис. 2. При включении блока питания БППИ-01 от стандартной электрической сети переменного напряжения (220 В, 50 Гц), он выдает постоянное напряжение 12 В на контроллер КСИ и далее от него на каждый из термоанемометров УГИ-75. При наличии питания термоанемометры УГИ-75 автоматически выполняют изме-

рения, необходимые для вычислений всех оцениваемых метеорологических параметров, повторяя их с частотой F_d = 80 Гц. Первичные данные их измерений с периодичностью во времени, равной $1/F_d$, поступают в контроллер как цифровые информационные пакеты в стандарте RS485 со скоростью 57 600 бит/с.

В этих пакетах объемом по 23 байта каждый первые 2 байта (AA 55) являются признаком его начала, 20 последующих байт содержат информацию об измеренных термоанемометром 10-и физических параметрах, а последний – контрольную сумму информативных байтов. Контроллер поочередно для каждого из подключенных к нему термоанемометра считывает по одному информационному пакету их данных и объединяет полученные при этом результаты в один общий пакет объемом в 83 байта аналогичной структуры. При этом если какой-либо термоанемометр, идентифицируемый по порядковому номеру используемого для него кабельного разъема, будет не подключен к КСИ, то в этом пакете вместо измеренных им физических параметров передаются нулевые значения. Также передается нулевое значение для каждого физического параметра в отдельности, если в термоанемометре оказывается неисправным датчик, который должен выполнять измерение этого параметра. Нулевые значения параметров, передаваемых в объединенном пакете, здесь предназначены для автоматического распознавания программным обеспечением ошибок подключения или функциональной работы аппаратной части комплекса АМК-03-4.

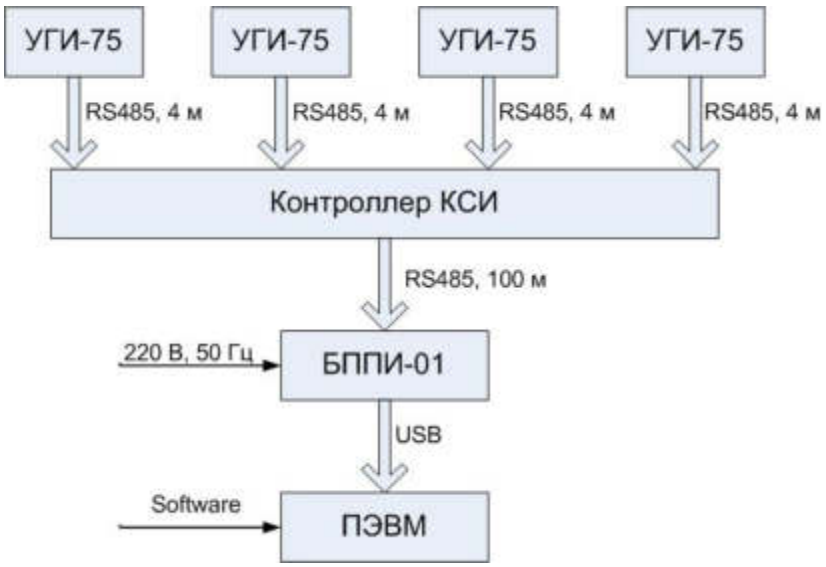


Рис. 2. Структурная схема комплекса АМК-03-04

Объединенные пакеты выдаются в БППИ-01, также с частотой повторения 80 Гц и в стандарте RS485, но уже на более высокой скорости 115 200 бит/с. В БППИ-01 они преобразуются таким образом, что уже могут считываться в компьютере через любой свободный порт USB. После установки необходимого драйвера этот порт распознается программным обеспечением как виртуальный порт COM.

2. Используемое программное обеспечение

Совместно с каждым термоанемометром УГИ-75 поставляется Windows-приложение «METEO 4.0», которое является новой, более развитой, версией программного обеспечения «METEO 3.0», ранее стандартно используемого в метеостанциях АМК-03 при подключении ультразвукового термоанемометра к компьютеру [6]. В нем расширен интерфейс пользователя, добавлены новые функции по вторичной математической обработке измеряемых метеорологических данных, и сохранены все ранее использовавшиеся рабочие функции «METEO 3.0». Непосредственно в описываемом комплексе АМК-03-4 «METEO 4.0» применяется только на этапах его изготовления и ремонта – для настройки, градуировки и метрологической поверки используемых здесь термоанемометров УГИ-75. Это программное обеспечение

также может использоваться для проведения метеорологических измерений и исследований атмосферной турбулентности совместно с каждым из 4-х термоанемометров в отдельности, если у потребителя возникнет необходимость разъединить комплекс АМК-03-4 на несколько автономных метеостанций. В этом случае контроллер КСИ не применяется, а каждый из используемых термоанемометров УГИ-75 подключается к своему блоку питания БППИ-01 (см. рис. 2).

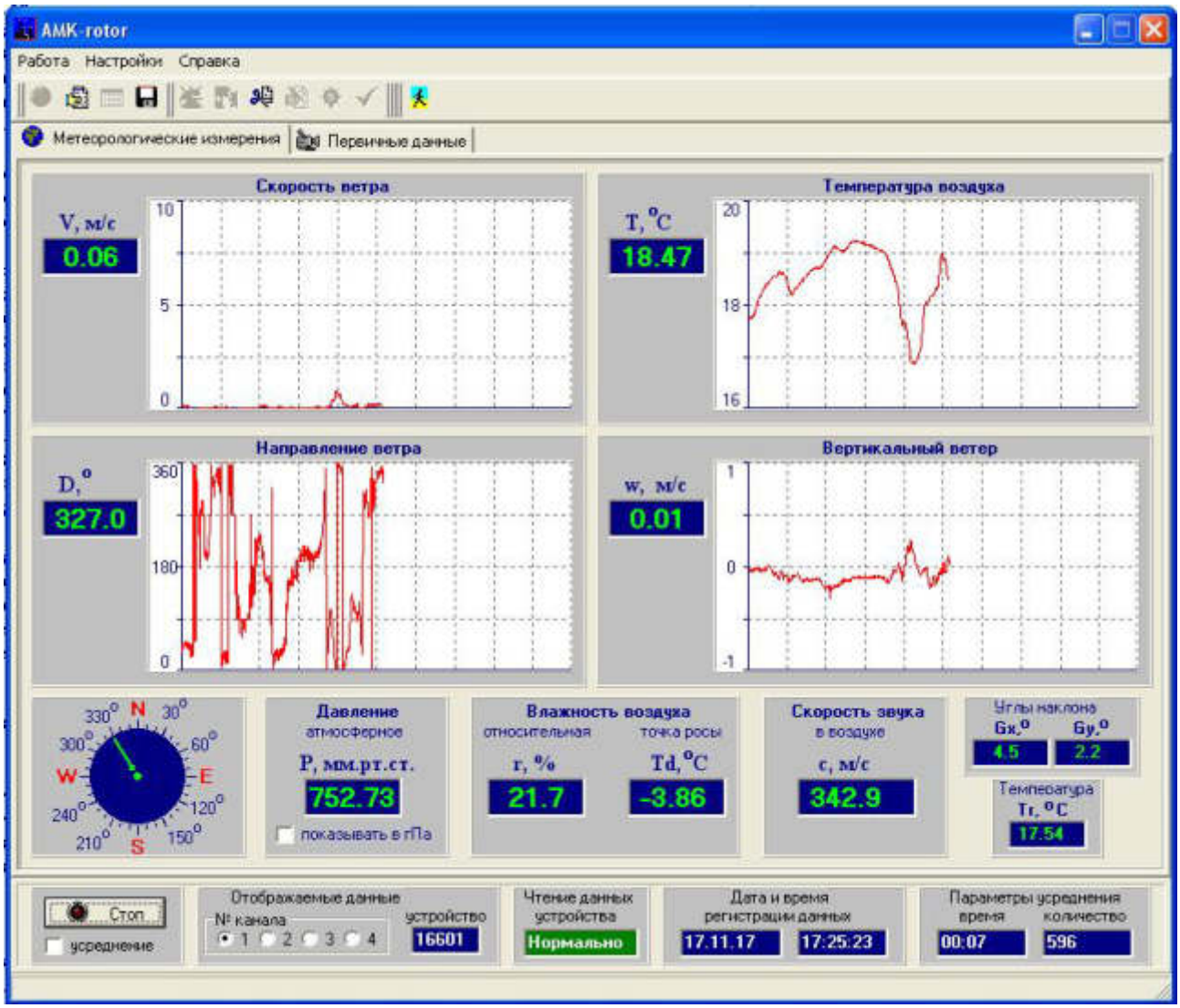


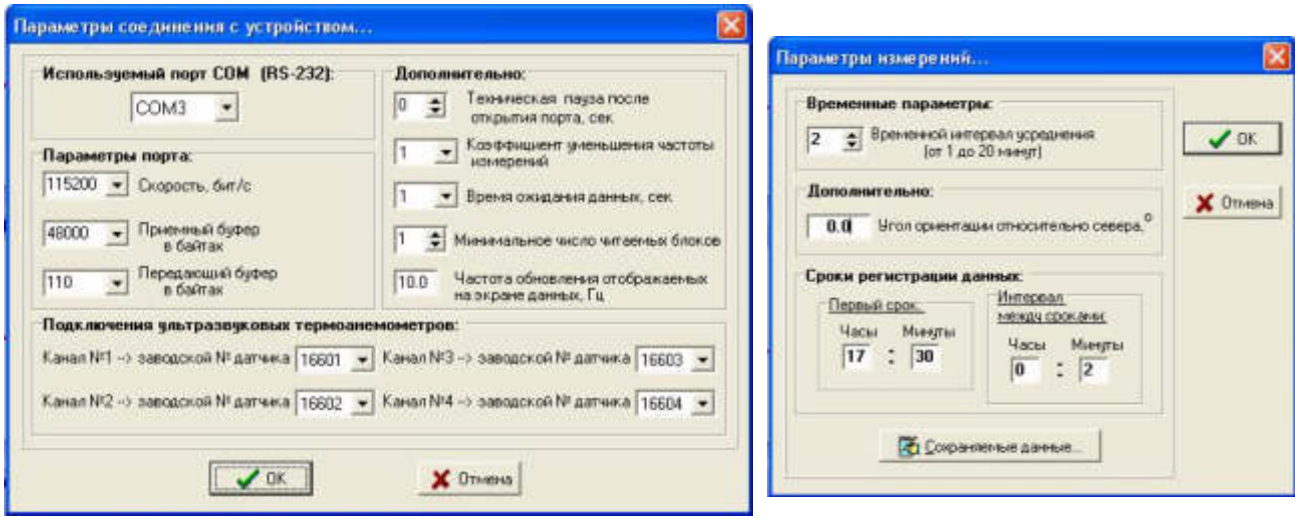
Рис. 3. Главное окно программы «AMK-rotor» во время проведения измерений в комплексе АМК-03-4

Для комплекса АМК-03-4 в целом как единой системы было разработано новое программное обеспечение, Windows-приложение «AMK-rotor» (см. внешний вид его главного окна на рис. 3). Основными функциональными задачами программы «AMK-rotor» являются:

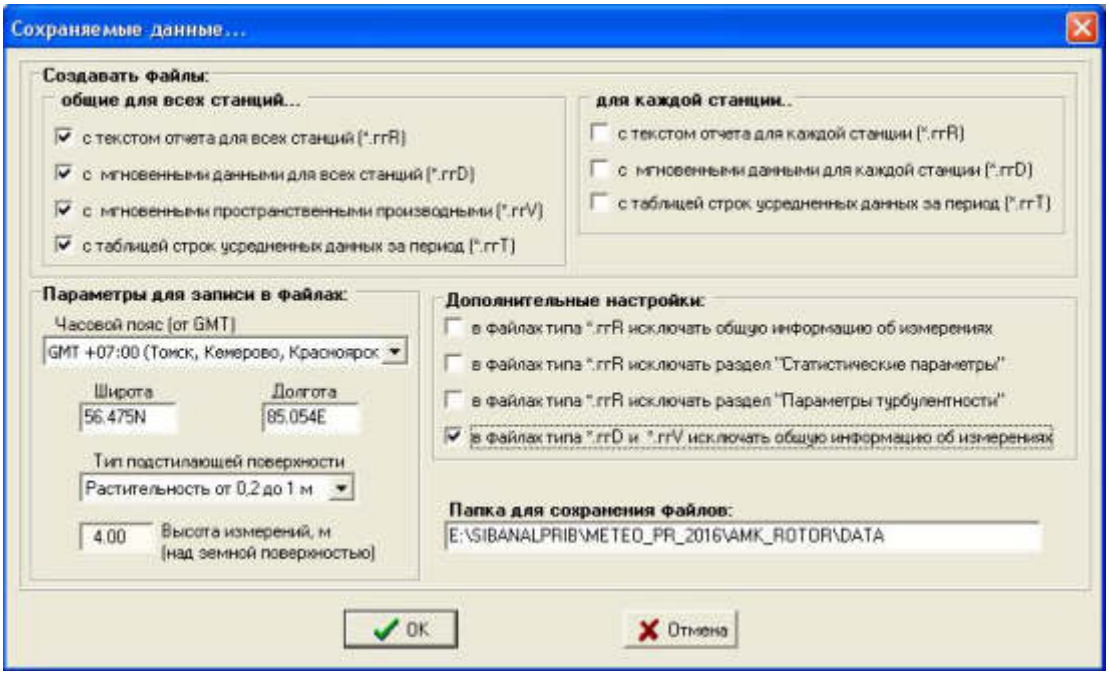
– считывание в компьютер первичных данных всех измерений, выполняемых в комплексе АМК-03-4, с автоматической непрерывной диагностикой технического состояния устройства в целом и его составных частей в отдельности с оперативной выдачей соответствующей информации оператору;

– непрерывное, неограниченное заранее по времени, вычисление мгновенных значений метеорологических параметров: температуры воздуха, трех ортогональных компонент вектора скорости ветра, атмосферного давления, относительной влажности воздуха, а так же их мгновенных пространственных производных по трем осям декартовой системы координат;

– вычисление средних значений перечисленных выше метеорологических параметров (и др., производных от них) с заданным оператором временем усреднения (от 1 до 20 минут), а также их минимальных и максимальных значений за интервал усреднения и за период между регистрациями средних величин;



а) *б*)



в)

Рис. 4. Основные диалоговые окна программы «AMK-rotor», используемые при запуске выполнения измерений в комплексе АМК-03-4

– вычисление ряда стандартных статистических характеристик для турбулентных флуктуаций полей температуры и скорости ветра;

– вычисление наиболее значимых числовых параметров, используемых в теории атмосферной турбулентности;

– периодическое автоматическое сохранение всех вычисляемых результатов измерений на жестком диске компьютера в виде файлов различных типов, отличающихся по содержанию, в заданные оператором временные сроки.

В программе «AMK-rotor» имеется ряд диалоговых окон, через которые пользователь может контролировать и изменять используемые в ней настройки. Все последние настройки, введенные пользователем, программа автоматически сохраняет во вспомогательном файле, из которого они ею считываются при каждой новой загрузке. Поэтому большинство из этих настроек вновь устанавливаются только при замене ультразвуковых термоанемометров и изменении схемы их подключения к контроллеру (см., например, рис. 4, *а*). При запуске измерений в программе «AMK-rotor» она открывает диалоговое окно «Параметры измерений…» (рис. 4, *б*), в котором необходимо установить требуемый временной интервал, мгновенные

данные измерений за который должны использоваться при усреднении метеорологических параметров и вычислении характеристик атмосферной турбулентности. Также здесь устанавливаются сроки метеорологических наблюдений, в которые программа должна записывать на жесткий диск компьютера файлы с результатами измерений и ее вычислений. Программа «АМК-rotor» может одновременно записывать файлы разных типов, отличающихся между собой по содержанию сохраняемой в них информации. Перечень записываемых файлов и частично структура их содержания для текущего сеанса работы программы устанавливаются в отдельном диалоговом окне (см. рис. 4, *в*).

3. Выходные данные измерений

Выходные данные измерений комплекса АМК-03-4 частично (только значения первичных данных термоанемометров УГИ-75 и основных метеорологических параметров) отображаются на экране монитора в главном окне программы «АМК-rotor». Они также записываются в файлы, которые содержат более многообразную информацию.

Каждый файл любого типа, используемого в этой программе, начинается с записи раздела с общей информацией о проведенных измерениях, который при необходимости можно исключать. В данный раздел записываются тип и конфигурация используемого устройства; дата и время с указанием часового пояса; географические координаты и высота над земной поверхностью места измерений.

Файл отчета (типа *.ггR, гг – две последние цифры текущего года) кроме общей информации содержит минимум еще один раздел, в который записываются средние значения метеорологических параметров: температуры воздуха, трех ортогональных компонент вектора скорости ветра, скорости и направления горизонтального ветра, атмосферного давления, относительной влажности воздуха, температуры точки росы и т. д., а также минимальные и максимальные значения для температуры и скорости ветра. Кроме того, в файл отчета, как правило, включаются еще два раздела. Один из них содержит с вычисленные статистические характеристики турбулентных пульсаций температуры и ветра (среднеквадратические отклонения, коэффициенты асимметрии, эксцесса, корреляции и др.), а второй – вычисленные параметры атмосферной турбулентности. При этом обычно вычисляются следующие параметры турбулентности:

$E_V = (\sigma_u^2 + \sigma_v^2 + \sigma_w^2)/2$ – энергия турбулентных движений ($\sigma_u^2, \sigma_v^2, \sigma_w^2$ – дисперсии турбулентных пульсаций трех компонент скорости ветра u', v', w');

$E_t = \sigma_t^2/2$ – энергия температурных флуктуаций (σ_t^2 – дисперсия турбулентных пульсаций температуры T');

$\tau = -\rho < u' \cdot w' >$ – вертикальный поток импульса (ρ – плотность воздуха);

$H = c_p \rho < T' \cdot w' >$ – вертикальный поток тепла (c_p – удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении);

$v^* = \sqrt{- < u' \cdot w' >}$ – скорость трения (масштаб ветра);

$T^* = - < T' \cdot w' > / v^*$ – масштаб температуры;

$L^* = < T > (v^*)^2 / (\chi \cdot g \cdot T^*)$ – масштаб Монина-Обухова (χ = 0,4 и g = 9,81 м/с^2);

$\xi = z/L^*$ – число Монина-Обухова (z – высота измерений);

$C_d = (v^* / < V >)^2$ – коэффициент сопротивления потоку;

$C_T^2 = <[T'(t+\Delta t) - T'(t)]^2> (<V_m>\Delta t)^{-2/3}$ – структурная постоянная температурных флуктуаций (V_m – модуль среднего вектора скорости ветра; Δt – временной интервал между мгновенными значениями метеорологических величин);

$C_V^2 = <[u'(t+\Delta t) - u'(t)]^2> (<V_m>\Delta t)^{-2/3}$ – структурная постоянная ветровых флуктуаций;

$C_{na}^2 = C_T^2 / (2<T_k>)^2 + C_V^2 / <c>^2$ – структурная постоянная флуктуаций акустического показателя преломления (T_k – температура воздуха в Кельвинах; c – скорость звука);

$C_{no}^2 = \left\{8 \cdot 10^{-5} <P> / <T_k>^2\right\}^2 C_T^2$ – структурная постоянная флуктуаций оптического показателя преломления (P – атмосферное давление в гПа).

Перечисленных параметров достаточно для оценивания динамического режима турбулентности в приземном слое атмосферы, в том числе для определения класса устойчивости атмосферной стратификации. Здесь также можно выполнять прогностические оценки параметров универсальных функций подобия от безразмерной высоты $\xi = z/L^*$ для ветровой и температурной стратификации, соответственно.

В файл с мгновенными данными (типа *.ггD) после общей информации записываются строки, содержащие в виде колонок порядковый номер информационного пакета с устройства и вычисленные из него мгновенные значения температуры T, южной v_s, восточной v_e и вертикальной w ортогональных компонент вектора скорости ветра, атмосферного давления P и относительной влажности воздуха r. Количество этих строк в файле здесь всегда соответствует количеству информационных пакетов устройства, принятых в компьютер за интервал времени перед записью файла, равный установленному времени усреднения.

Файл с таблицей строк с усредненными данными (типа *.ггT), в отличие от файлов предыдущих двух типов, за время одного сеанса измерений формируется в единственном числе. Он создается в памяти программы и сохраняется на жестком диске при наступлении первого срока регистрации результатов. При наступлении каждого нового срока регистрации результатов в образ файла, сохраняемого в памяти программы, добавляется снизу новая строка данных. После этого новый образ повторно записывается на жесткий диск под тем же именем, замещая ранее записанный файл. В каждую строку данных здесь включаются (в порядке следования): порядковый номер строки данных; дата и время срока, к которому относятся сохраняемые данные; фактическое время усреднения данных; средние значения метеорологических параметров; среднеквадратические отклонения флуктуаций температуры и компонент ветра; параметры атмосферной турбулентности C_T^2, C_V^2, C_{no}^2, C_{na}^2, τ, H, T^*, v^*, L^* и ξ.

Описанные выше три типа файлов с выходными данными измерений применялись и ранее в серийной метеостанции АМК-03 в программе «МЕТЕО 3.0». Теперь в комплексе АМК-03-4 программа «АМК-rotor» их может записывать в двух вариантах (см. рис. 4, *в*): для каждого используемого термоанемометра УГИ-75 в отдельности (это сделано для совместимости со старыми программами вторичной обработки данных «МЕТЕО 3.0») и в файлах, общих для всего комплекса АМК-03-4. Во втором варианте для каждого атмосферного параметра вместо одного его значения Q в файлах делается запись четырех его значений, полученных из данных измерений разных термоанемометров, в виде $Q_1/Q_2/Q_3/Q_4$, где с помощью индексов обозначены номера разъемов на контроллере, применяемых для их подключения.

Программа «АМК-rotor» также записывает файл с мгновенными пространственными производными для метеорологических параметров (типа *.ггV), данные для которого могут быть получены только из измерений, выполняемых новым комплексом АМК-03-4. По формату записи он аналогичен файлу типа *.ггD, но вместо мгновенных значений T, v_s, v_e, w, P и r здесь в каждой строке записываются мгновенные пространственные производные этих же

метеорологических параметров в 5-и направлениях: вдоль осей X, Y, Z и вдоль векторов, соединяющих точку 2 с точками 3 и 4 на рис. 1, *б*. Данные этого файла создают принципиально новые возможности для исследований пространственно-временной структуры атмосферной турбулентности.

Данная работа была выполнена по заказу и при финансовой поддержке Лаборатории когерентной и адаптивной оптики ИОА СО РАН (зав. д-р физ.-мат. наук В. П. Лукин) по инициативе д-ра физ.-мат. наук В. В. Носова, под руководством которого будут выполняться исследования атмосферной турбулентности с использованием созданного аппаратно-программного комплекса АМК-03-4.

Список литературы

1. Автоматизированный ультразвуковой метеорологический комплекс АМК-03 / А. А. Азбукин, А. Я. Богушевич, В. С. Ильичевский, В. А. Корольков, А. А. Тихомиров, В. Д. Шелевой // Метеорология и гидрология. 2006. № 11. С. 89–97.

2. Полевой вариант метеорологического комплекса АМК-03 / А. А. Азбукин, А. Я. Богушевич, В. А. Корольков, А. А. Тихомиров, В. Д. Шелевой // Метеорология и гидрология. 2009. № 2. С. 101–106.

3. Автоматические метеостанции АМК-03 и их модификации / А. А. Азбукин, А. Я. Богушевич, А. А. Кобзев, В. А. Корольков, А. А. Тихомиров, В. Д. Шелевой // Датчики и системы. 2012. № 3. С. 47–52.

4. Бовшеверов В. М., Воронов В. П. Акустический флюгер // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1960. № 6. С. 882–885.

5. Богушевич А. Я. Ультразвуковые методы оценивания метеорологических и турбулентных параметров атмосферы // Оптика атмосферы и океана. 1999. Т. 12, № 2. С. 170–175.

6. Богушевич А. Я. Ультразвуковая метеостанция, версия 3.0 («МЕТЕО 3.0») / Российское агентство по патентам и товарным знакам. Свидетельство об офиц. регистрации программы для ЭВМ № 2002612038 от 3.12.02.

7. Богушевич А. Я. Источники погрешностей при ультразвуковых измерениях метеовеличин в атмосфере, методы и алгоритмы их минимизации на основе опыта создания промышленной метеостанции АМК-03 // Учен. зап. физ. фак. Моск. ун-та. 2014. № 6. 146308. 10 с.

8. Гурвич А. С. Акустический микроанемометр для исследования микроструктуры турбулентности // Акуст. журн. 1959. Т. 5, вып. 3. С. 368–369.

9. Мордухович М. И. Акустический термометр // Тр. ИФА АН СССР. 1962. № 4. С. 30–80.

10. Тихомиров А. А. Ультразвуковые термометры и анемометры для измерения пульсаций скорости и температуры и воздушных потоков. Обзор / Оптика атмосферы и океана, 2010. Т. 23, № 7. С. 585–600.

11. Тихомиров А. А., Корольков В. А., Богушевич А. Я., Азбукин А. А., Шелевой В. Д. Бортовой метеорологический комплекс на базе многоцелевых гусеничных и колесных машин / А. А. Тихомиров, В. А. Корольков, А. Я. Богушевич, А. А. Азбукин, В. Д. Шелевой // Вестн. Акад. воен. наук. 2008. № 3 (24). С. 144–148.

12. DA-600 Series ultrasonic anemometer/thermometerr // KAIJO CORPORATION Catalog No. M-440-22E. 6 p.

13. A new type sonic anemometer-thermometer for field operation / T. Hanafusa, T. Fujitani, Y. Koboi, Y. Mitsuta // Pap. Meteorol. Geophys. 1982. Vol. 33. P. 1–19.

14. Kaimal J. C., Businger J. A. A continuous wave sonic anemometer-thermometer // J. Appl. Meteorol. 1963. Vol. 2, N 2. P. 156–164.

15. Mitsuta Y. Sonic anemometer-thermometer for general use // J. Meteorol. Soc. Japan, 1966. Vol. 44, N 1. P. 12–23.

16. Solent Meteorological ultrasonic anemometers. GILL Instruments Limited. 8p.

17. Ultrasonic Turbulence Sensor USAT3 – METEK Meteorologische Messtechnic GmbH. 4 p.

УДК 551.584.2

Использование климатической модели и тепловых космических снимков для исследования острова тепла Москвы (лето 2015 г.)

М. В. Варенцов (mvar91@gmail.com), М. Ю. Грищенко (m.gri@geogr.msu.ru)

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва

Аннотация. В рамках данной работы на примере лета 2015 г. проведено сопоставление температуры подстилающей поверхности по данным тепловых космических снимков съёмочной системы MODIS, температуры приповерхностного воздуха (на высотах 2–4 м) по данным наблюдений на стандартных метеорологических станциях и автоматических станциях контроля качества загрязнения атмосферы (АСКЗА) ГПБУ «Мосэкомониторинг», а также температуры поверхности и приповерхностного воздуха по данным регионального климатического моделирования, полученных с использованием модели COSMO-CLM. По результатам сопоставления выявлено, что характеристики городского острова тепла в поле температуры поверхности и температуры приповерхностного воздуха существенно различаются, особенно днем, в условия солнечного нагрева.

Ключевые слова: городской остров тепла; климатическое моделирование; тепловые космические снимки; климат Москвы.

Постановка проблемы

Городской остров тепла – явление, заключающееся в повышении температуры воздуха и земной поверхности в городской черте по сравнению с окружающими территориями. Для изучения городского острова тепла применяют данные 3 типов: данные прямых измерений, данные климатического моделирования, космические данные [5; 12; 13]. Данные прямых измерений, результаты климатического моделирования и космические снимки при изучении городских островов тепла используются как отдельно друг от друга, так и совместно [6; 8], однако примеров сопоставления всех трёх типов данных в таких исследованиях не так уж много [6]. Тем более такое сопоставление ранее не проводилось для теплового острова Москвы, хотя по отдельности такие данные для изучения этого объекта используются [1; 2].

Многие исследователи отмечают, что разные типы данных при исследовании городских островов тепла иллюстрируют разные его аспекты, и потому не являются взаимозаменяемыми. Так, к примеру, неоднократно отмечалось, что остров тепла, фиксируемый тепловыми космическими снимками, следует рассматривать как специфический поверхностный остров тепла, интенсивность и пространственно-временная изменчивость которого отличаются от соответствующих характеристик острова тепла, связанного с температурой поверхностного слоя атмосферного воздуха [7; 9; 10].

Материалы

В качестве космических источников информации о летнем острове тепла Москвы использованы данные съёмочной системы MODIS, работающей на спутнике Terra, а именно растры значений температуры земной поверхности MOD11A1 как за дневной период (время регистрации пикселов – около 12 часов МСК), так и за ночной (время регистрации пикселов – 21 час МСК). Съёмочная система MODIS осуществляет съемку в 36 каналах видимого, ближнего, среднего и теплового инфракрасных диапазонов спектра. Для изучения острова тепла важны данные каналов 31 и 32 (10,78–11,28 и 11,77–12,27 мкм соответственно), в которых фиксируется интенсивность теплового излучения земной поверхности, и которые приходятся на диапазон, соответствующий максимуму собственного излучения Земли (10–12 мкм). На основе данных этих каналов рассчитывают значения температуры земной поверхности, которые предоставляются конечному пользователю в растровой форме через портал EarthDATA NASA.

Для сопоставления этих растров с результатами климатического моделирования значения температуры земной поверхности, полученные в ходе космической съёмки, приведены к сетке модели COSMO-CLM [4]. Она является специальной версией модели COSMO, используемой для оперативного прогноза погоды во многих странах мира, включая РФ. В дан-

ном исследовании она использована для детализации данных реанализа ERA-Interim для Московского региона с высоким пространственным разрешением (1 км). В рамках такой постановки задачи динамика характеристик и подстилающей поверхности воспроизводилась для реальных синоптических условий с учетом локальных особенностей местности. Для описания урбанизированных территорий в модели использована параметризация TERRA_URB [14], позволяющая учитывать ключевые особенности их теплового баланса, включая характерные теплофизические параметры искусственных материалов, меньшую площадь испаряющих поверхностей, антропогенный поток тепла и пр. Опыт применения данной модели для условий Московской агломерации более подробно описан [2; 11], там же показано, что она способна адекватно воспроизводить термический режим Московского региона, включая пространственную и временную изменчивость интенсивности городского острова тепла.

Результаты

Сопоставление температуры приповерхностного воздуха по данным станционных наблюдений и моделирования за лето 2015 г. показало хорошие результаты, дополнительно подтверждающие адекватность модели.

Более сложная картина получилась по данным сравнения результатов моделирования и космических снимков. Днем поле приповерхностной температуры воздуха размыто, различия между городом и загородными территориями по данным моделирования и наблюдений не превышают 1–2 °С. Однако в поле температуры поверхности по данным MODIS, городские территории ярко выделяются на фоне загородных (разница температур достигает порядка 10 °С). Еще сильнее выражены различия температуры поверхности между городом и фоном по данным моделирования. Дневные значения такой разности по данным моделирования превышают ее значения по данным MODIS в 2 и более раза (о чем свидетельствует коэффициент наклона линейных трендов двух величин). При этом для загородных территорий данные моделирования и космических снимков хорошо согласованы, т. е. завышение температуры поверхности характерно именно для города. Пространственная структура аномалий температуры поверхности по данным моделирования и космических снимков хорошо согласуется.

Поздним вечером наблюдается принципиально иная картина. Как в поле температуры воздуха (по данным наблюдений и моделирования), так и в поле температуры поверхности (по данным моделирования и космических снимков) различия между городом и фоном соизмеримы и могут достигать 10 °С. Также хорошо согласуется пространственная структура аномалий температуры по всем типам рассматриваемых данных. При этом, если днём поле температуры поверхности в пределах города пестрое, теплые аномалии соответствуют плотно застроенным территориям, то ночью городская аномалия температуры имеет более гладкую концентрическую форму, тенденция убывания температуры по мере удаления от центра города выражена ярче. Сопоставление температуры поверхности по данным MODIS с температурой поверхности по данным моделирования показывает, что последняя для городских условий также несколько завышена (коэффициент наклона тренда составляет ≈1,25). А вот сравнение температуры поверхности по данным MODIS с температурой приповерхностного воздуха по данным моделирования показывает различия одного масштаба (коэффициент наклона тренда близок к единице).

Таким образом, показано, что характеристики городского острова тепла в поле температуры поверхности и температуры приповерхностного воздуха существенно различаются, особенно днем, в условия солнечного нагрева, что важно учитывать в различных научных и практических задачах.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ, проект 17-77-20070 «Оценка и прогноз биоклиматической комфортности городов России в условиях изменения климата в XXI в.».

Список литературы

1. Балдина Е. А., Грищенко М. Ю. Картографирование тепловых аномалий Москвы по разносезонным тепловым снимкам // Геоэкологические проблемы Новой Москвы / под ред. А. В. Кошкарёва, Э. А. Лихачёвой, А. А. Тишкова. М. : Медиа-ПРЕСС, 2013. С. 70–76.

2. Воспроизведение острова тепла Московской агломерации в рамках региональной климатической модели COSMO-CLM / М. И. Варенцов, Т. Е. Самсонов, А. В. Кислов, П. И. Константинов // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2017. № 6. С. 25–37.

3. Грищенко М. Ю. Применение тепловых снимков системы ETM+ для изучения теплового острова Москвы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9, № 4. С. 95–101.

4. CLM – the climate version of LM: brief description and long-term applications / U. Böhm, M. Kücken, W. Ahrens, A. Block, D. Hauffe, K. Keuler, B. Rockel, A. Will // COSMO Newsl. 2006. Vol. 6. P. 225–235.

5. Remote sensing of the urban heat island effect across biomes in the continental USA / M. L. Imhoff, P. Zhang, R. E. Wolfe, L. Bounoua // Remote Sensing of Environment. 2010. Vol. 114. P. 504–513.

6. Climatological analysis of the mitigating effect of vegetation on the urban heat island of Milan, Italy / L. Mariani, S. G. Parisi, G. Cola, R. Lafortezza, G. Colangelo, G. Sanesi // Science of the Total Environment. 2016. Vol. 569–570. P. 762–773.

7. Long-term and fine-scale satellite monitoring of the urban heat island effect by the fusion of multi-temporal and multi-sensor remote sensed data: A 26-year case study of the city of Wuhan in China / H. Shen, L. Huang, L. Zhang, P. Wu, C. Zeng // Remote Sensing of Environment. 2016. Vol. 172. P. 109–125.

8. Comparison of the urban heat island intensity quantified by using air temperature and Landsat land surface temperature in Hangzhou, China / L. Sheng, X. Tang, H. You, Q. Gu, H. Hu // Ecological Indicators. 2017. Vol. 72. P. 738–746.

9. Impact of spatial resolution and satellite overpass time on evaluation of the surface urban heat island effects / J. A. Sobrino, R. Oltra-Carrio, G. Soria, R. Bianchi, M. Paganini // Remote Sensing of Environment. 2012. Vol. 117. P. 50–56.

10. Song Y., Wu C. Examining the impact of urban biophysical composition and neighboring environment on surface urban heat island effect // Advances in Space Research. 2016. Vol. 57. P. 96–109.

11. Varentsov M. I., Konstantinov P. I., Samsonov T. E. Mesoscale modelling of the summer climate response of Moscow metropolitan area to urban expansion // IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci., 2017. Vol. 96. P. 12009.

12. Weng Q. Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications, and trends // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2009. Vol. 64. P. 335–344.

13. Weng Q. Thermal remote sensing of urban areas: An introduction to the special issue // Remote Sensing of Environment. 2006. Vol. 104. P. 119–122.

14. Efficient urban canopy parametrization for atmospheric modelling: description and application with the COSMO-CLM model for a Belgian Summer / H. Wouters, M. Demuzere, U. Blahak, K. Fortuniak, B. Maiheu, J. Camps, D. Tielemans, Lipzig N.P.M. van // Geosci. Model Dev. 2016. Vol. 9. P. 3027–3054.

УДК 551.508.953

Результаты исследований атмосферных параметров в Якутии методами спектральной солнечной фотометрии

М. С. Васильев (m.s.vasiliev@ikfia.ysn.ru)

[1]ФГБУН Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю. Г. Шафера СО РАН, г. Якутск

Аннотация. В работе представлены результаты исследований атмосферных параметров в Якутии, полученные в 2015–2017 гг. В исследованиях использовались данные Sun-Sky-радиометра марки CIMEL CE-318 входящим в состав глобальной международной сети АЭРОНЕТ. Основными параметрами исследований являются аэрозольная оптическая толщина (АОТ) и интегральное влагосодержание атмосферы (*W*).

Ключевые слова: аэрозольная оптическая толщина, влагосодержание атмосферы, тропосфера, стратосфера, солнечная активность, квазидвухлетние колебания, солнечный фотометр.

Введение

Известно, что в климатологии, одной из важнейших задач является изучение оптически активных компонентов атмосферы, определяющих поглощение, рассеивание и пропускание как солнечного, так и теплового излучения Земли. Параметры атмосферного аэрозоля и водяного пара как климатообразующие факторы, недостаточно изучены на обширных территориях (например, Якутия), что связано в основном с отсутствием сети экспериментальных приборов. В отличие от парниковых газов, атмосферный аэрозоль отличается многообразием свойств и взаимодействий с солнечной радиацией и другими физическими полями, а также компонентами биосферы. Например, аэрозоль и его климатическое радиационное возмущающее воздействие может, как усиливать, так и ослаблять парниковый эффект. В свою очередь, известно, что исследования, связанные с водяным паром, позволяют учесть энергетические ресурсы атмосферы, например, оценка которых важна при решении задач по активным воздействиям на циклоны [9]. С процессами влагообмена связано образование облачного покрова и выпадение осадков [например, 11].

Общая циркуляция атмосферы во многом зависит от процессов влагообмена, в которых происходит изменение энергии в результате фазовых преобразований водяного пара. Известно, что данные дистанционного зондирования, климатических моделей и реанализа, которые позволяют выявить изменение элементов влагообмена дают возможность проанализировать их природные колебания, например, в годы экстремальных ситуаций (переувлажненных и засушливых лет). Для стран с засушливым климатом (например, страны Средней Азии), информация о количестве переносимой влаги в тропосфере и о причинах формирования ее максимумов и минимумов может послужить основой для устойчивого развития сельского хозяйства и агропромышленного комплекса, обеспечения продовольственной безопасности.

Стоит отметить, что в настоящее время эффективным методом регулярных сетевых наблюдений за оптическими параметрами атмосферы (АОТ, *W* и озона) является солнечная фотометрия атмосферы. Например, глобальная международная сеть пунктов мониторинга АЭРОНЕТ (AERONET – AErosol RObotic NETwork, https://aeronet.gsfc.nasa.gov/) [16] имеет наибольший географический охват. Сеть пунктов мониторинга за оптическими параметрами атмосферы АЭРОНЕТ создана и поддерживается Центром космических полетов им. Годдарда (США, НАСА). Пункты мониторинга сети АЭРОНЕТ представлены на рис. 1, два из которых расположены на территории Якутии – ст. Якутск (61° с. ш., 129° в. д.) и ст. Тикси (71° с. ш., 128° в. д.).

Мониторинг атмосферных параметров на ст. Якутск осуществляется с помощью солнечного фотометра марки CIMEL CE-318 (ИКФИА СО РАН, http://ikfia.ysn.ru/), который расположен ~50 км к юго-западу от г. Якутска на полигоне ИКФИА «ШАЛ» (с. Октемцы) [4–6]. В ведении ИКФИА также находится солнечный фотометр марки SP-9 производства ИОА СО РАН (г. Томск, http://iao.ru/), который расположен на крыше здания Института.

Пункт мониторинга ст. Тикси (АЭРОНЕТ) находится в ведении Росгидромета (www.meteorf.ru) и расположен в районе метеорологической обсерватории «Тикси».

В настоящей работе представлены результаты исследований на основе параметров АОТ и *W* преимущественно над центральной частью Якутии, полученные солнечным фотометром CIMEL CE-318 [4–6].

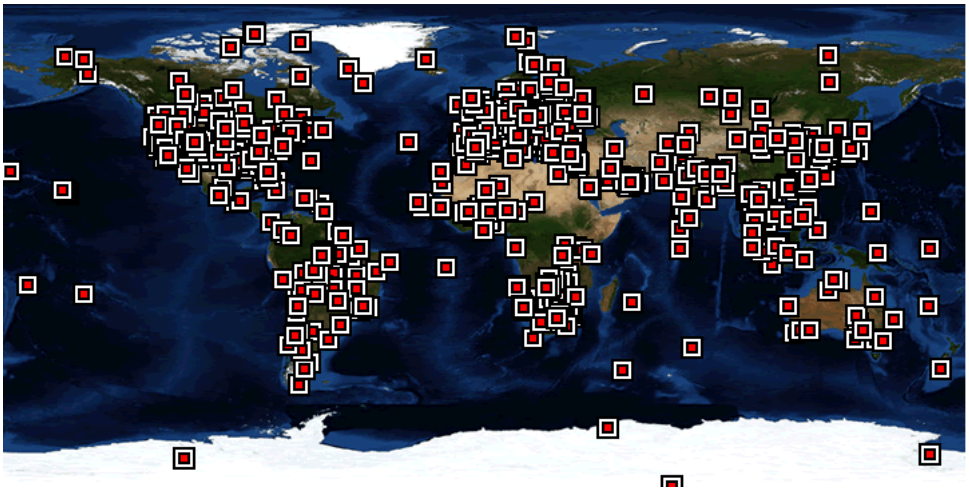


Рис. 1. Схема размещения пунктов мониторинга за оптическими параметрами атмосферы сети АЭРОНЕТ по состоянию на 2017 г.

Краткое описание приборов

Солнечные фотометры с интерференционными фильтрами могут использоваться для измерения содержания оптически активных компонентов атмосферы: водяного пара, аэрозоля и озона. Например, наиболее известными приборами, которые удовлетворяют современным требованиям измерений влагосодержания и АОТ, можно отметить: Sun-Sky-радиометр CIMEL CE-318 (www.cimel.fr), прецизионный фильтровый радиометр PFR (http://pmodwrc.ch), солнечный фотометр MS-120 (http://www.eco.co.jp), радиометр с вращающимся теневым экраном MFR-7 (http://www.yesinc.com) и фильтровый спектрометр SPUV-6. Однако для проведения регулярных круглогодичных измерений необходима «полная автоматизация» – без участи оператора. Таким требованиям соответствует Sun-Sky-радиометры CE-318.

Далее описаны приборы, находящиеся в ведении ИКФИА – CIMEL CE-318 и SP-9 (рис. 2).

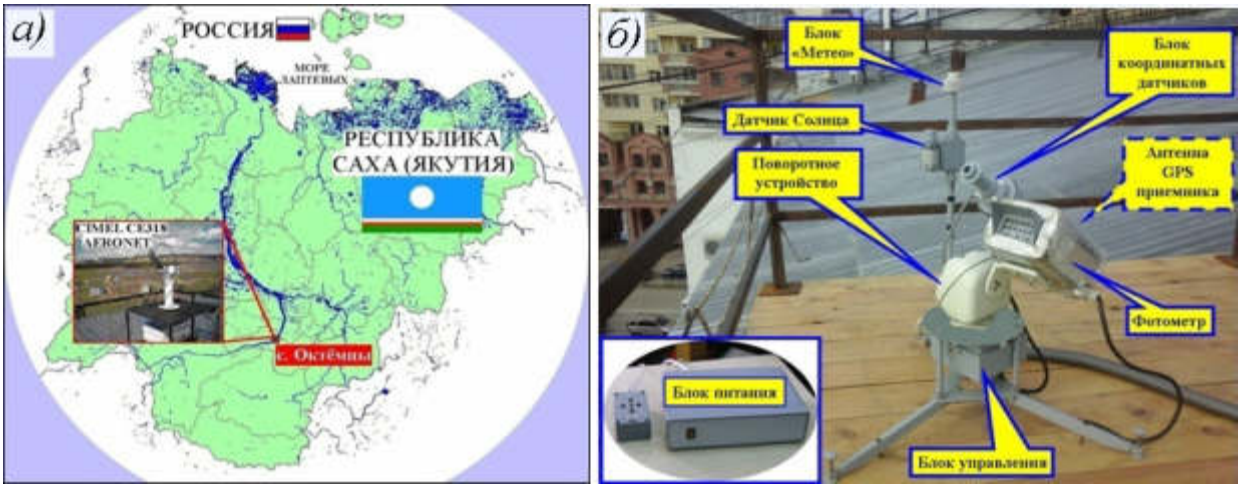


Рис. 2. Вид и расположение солнечного фотометра марки CIMEL CE-318 на полигоне ИКФИА «ШАЛ» (*а*) и SP-9 на крыше здания Института в г. Якутск (*б*)

Фотометр SP-9 предназначен для измерений спектральной прозрачности атмосферы в диапазоне спектра 0,3–2,2 мкм с целью последующего определения АОТ и *W*. Процесс измерений полностью автоматизирован и выполняется без участия оператора. Результаты измерений спектральной солнечной радиации (вместе с координатами и временем замеров) накапливаются в цифровом виде во flash-памяти прибора и затем передаются на персональный компьютер для последующей обработки и анализа. Определение искомых характеристик атмосферы основывается на методе «прозрачности» – фотометрировании прямого солнечного излучения, прошедшего через атмосферу, и дифференциальной методике [8]. При нормальных условиях эксплуатации и калибровочных данных, погрешность определения составляет 0,01–0,02 и ~0,1 г/см^2, соответственно для АОТ и *W*.

Роботизированный солнечный фотометр (Sun-Sky radiometer) CE-318 французской фирмы CIMEL измеряет прямую солнечную радиацию в восьми спектральных каналах (0,34, 0,38, 0,44, 0,50, 0,67, 0,87, 0,94 и 1,02 мкм) с периодичностью до 4 раз в час в зависимости от высоты Солнца. Канал 940 нм используется для определения насыщенности атмосферы водяным паром. АОТ вычисляется исходя из спектрального ослабления луча на каждой длине волны при помощи закона Бугера. «Метод Бугера» [2; 7; 12; 17] основан на измерении прямого солнечного излучения с целью последующего определения АОТ атмосферы и общего содержания некоторых газов. Можно также выделить «метод(ы) индикатрисы» [1; 10; 13], заключающийся в измерении угловых распределений рассеянного излучения (яркости неба) для определения индикатрисы аэрозольного рассеяния. К недостаткам этих методов можно отнести ограничение их реализации в условиях облачности. Например, «метод Бугера» может применяться при частичной облачности (диск Солнца не должен быть закрыт облаками), а реализация «метода индикатрисы» возможна только в условиях безоблачного неба.

Температурный эффект дымового аэрозоля в летний сезон над центральной частью Якутии

Над центральной частью Якутии в работе [4] впервые было показано, что возмущение атмосферы аэрозольными частицами вследствие очагов возгорания лесного массива (рис. 3) приводит к снижению потока солнечной радиации и при наличии отрицательной фазы уходящей длинноволновой радиации, наблюдается спад амплитуды приземной температуры воздуха (рис. 4, *а*).

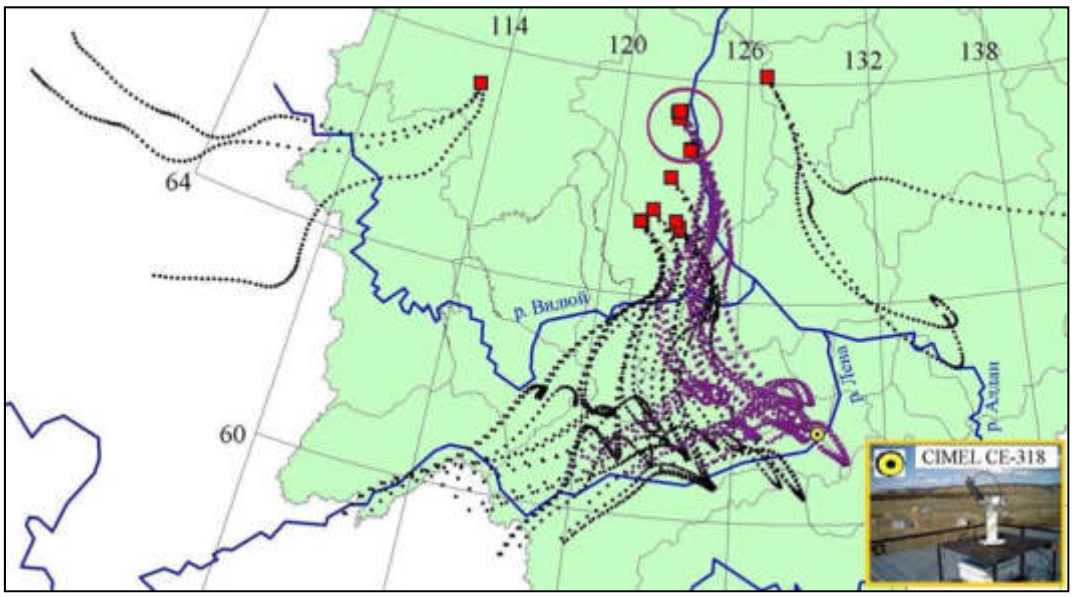


Рис. 3. Траектории распределения воздушных масс фотохимического смога (дымы) на высотах 0, 500 и 1000 м (точки черного и фиолетового цвета) по данным модели HYSPLIT [14] от очагов лесных пожаров (данные AVHRR/NOAA [3] – квадраты красного цвета) за период 11–13 июля 2005 г. Кружком отмечена зона очагов пожаров и их траектории воздушных масс смога, которые непосредственно охватили местоположение фотометра CIMEL CE-318. Сплошные жирные линии – основные элементы гидрографии

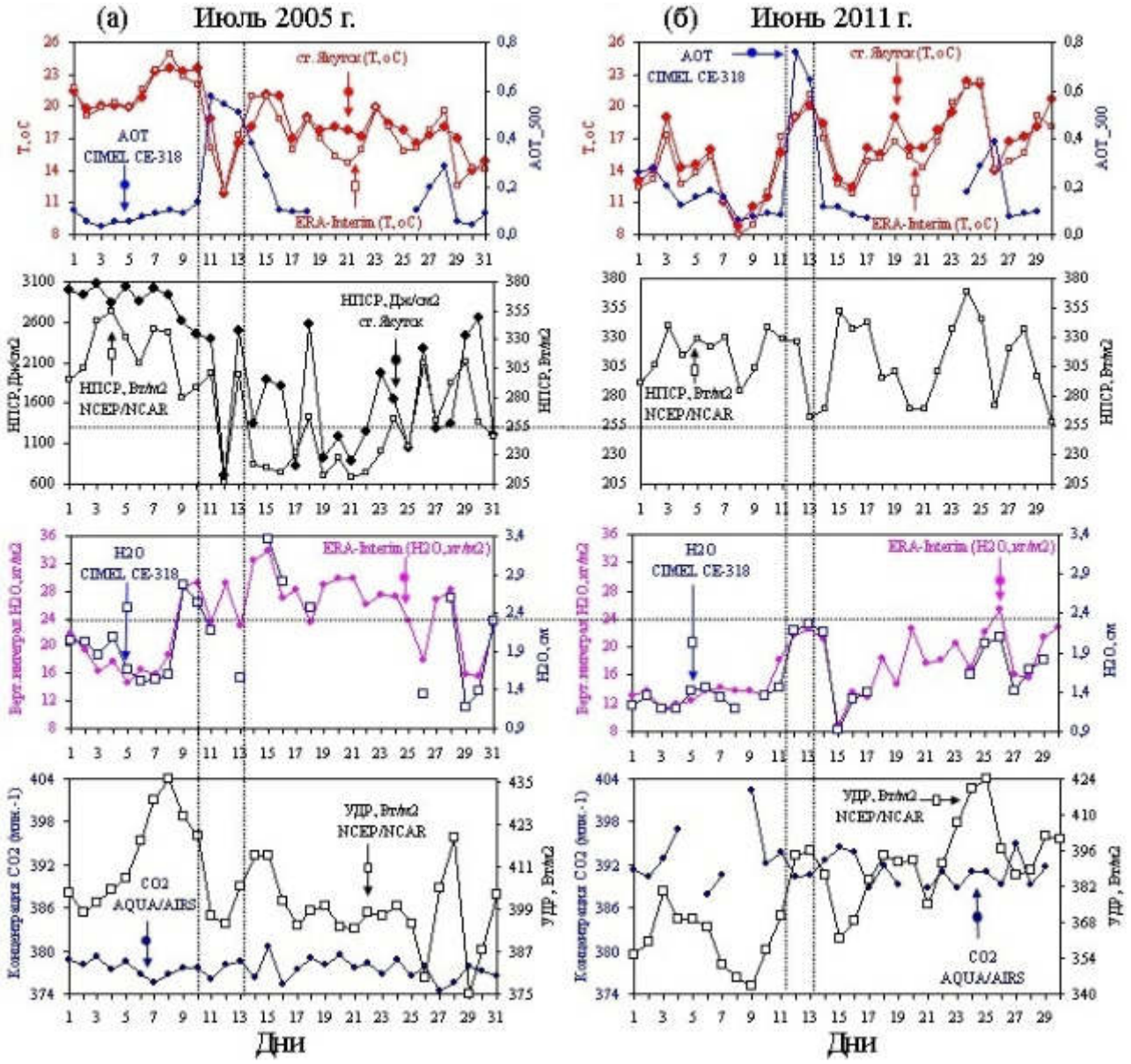


Рис. 4. Среднесуточные вариации приземной температуры воздуха (ПТВ), АОТ, нисходящего потока солнечной радиации (НСПР) и CO_2 в июле 2005 г. (*а*) и июне 2011 г. (*б*)

Состояние прозрачности атмосферы над центральной частью Якутии

В работе [6] был использован параметр АОТ для исследования состояния прозрачности атмосферы за период 2004–2014 гг. с последующим сравнительным анализом годового хода среднемесячных значений АОТ с данными спутникового мониторинга. Было установлено, что ежегодно, дни со значениями АОТ относящихся к III классу прозрачности атмосферы («грязная» атмосфера) составляли в среднем 25–30 % от общего числа дней измерения АОТ.

Для примера, на рис. 5 представлен график значений АОТ и НПСР в мае 2008 г. Видно (рис. 5), что значения АОТ и НПСР находятся в противофазе. Коэффициент корреляции Пирсона (R) между АОТ и НПСР, составляет –0,4 с уровнем значимости 99 % при критическом значении $r_{крит.} = 0{,}45$. За данный период при наблюдаемых значениях АОТ III класса прозрачности атмосферы свыше M_0 (Мода – варианта с наибольшей частотой проявления) в 1,5–3,5 раза превышающих значения АОТ, относящихся ко II классу («типичная» атмосфера), общий спад НПСР составлял в среднем 16–37 Вт/м^2.

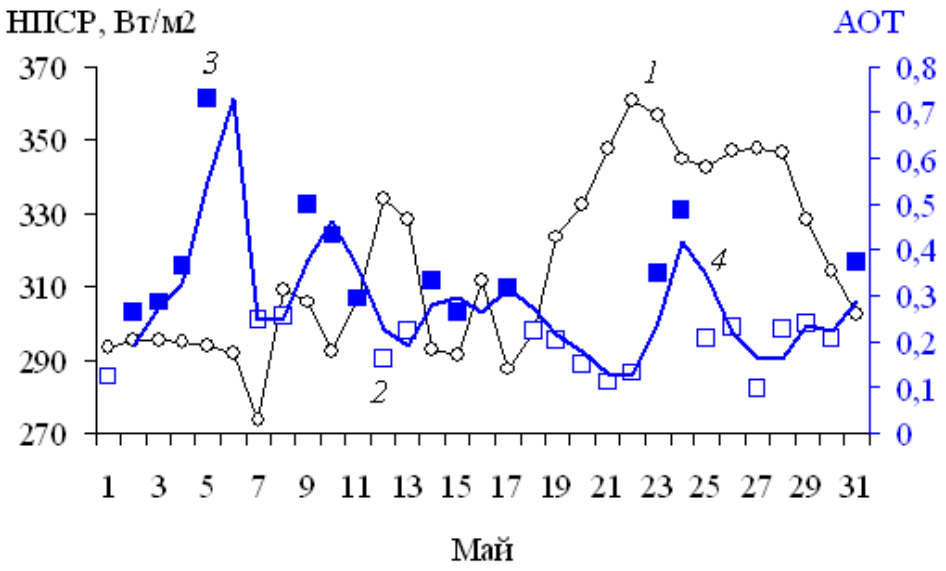


Рис. 5. График значений АОТ и НПСР в мае 2008 г. над центральной частью Якутии, где *1* – НПСР (Вт/м^2); *2* – АОТ II класса прозрачности атмосферы; *3* – АОТ III класса прозрачности атмосферы свыше M_0; *4* – аппроксимация (сглаживание) среднесуточных значений АОТ

Связь широтной динамики влагосодержания атмосферы с квазидвухлетними колебаниями зонального ветра в экваториальной стратосфере и солнечной активностью над северо-востоком Евразии

В работе [5] по данным АЭРОНЕТ (ст. Якутск, ст. Томск, ст. Иркутск и ст. Даланзадгад) проведено сопоставление среднемесячных значений W ($г/см^2$) с данными реанализа ERA-Interim [15] за период 1979–2015 гг. и рассчитаны средние квадратичные отклонения среднего арифметического значения (S_x). Показано, что максимальное расхождение между данными наблюдается в летний период, однако коэффициенты корреляции Пирсона R (вычислены с уровнем значимости $P = 99$ %) находятся свыше критических значений $r_{крит}$ и указывают на хорошую временную согласованность данных (например, рис. 6).

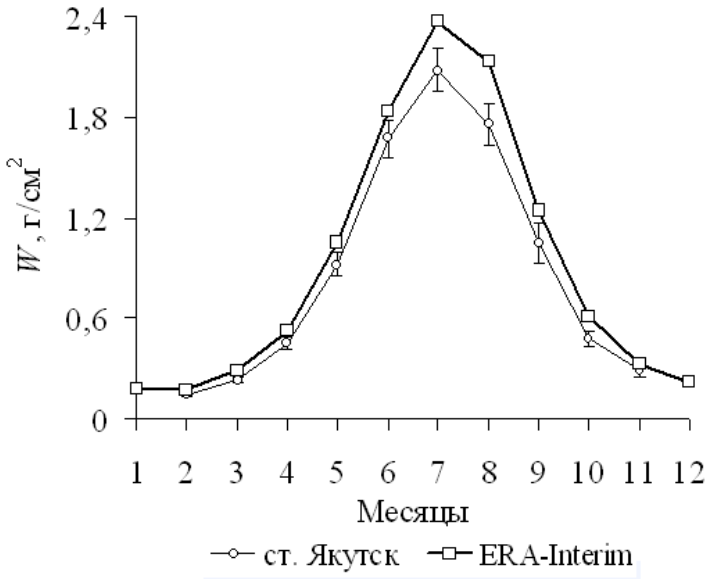


Рис. 6. Сезонный ход W по данным ст. Якутск и ERA-Interim реанализа за период 2004–2015 гг.

По данным реанализа ERA-Interim обнаружена достоверно значимая корреляционная связь (свыше 0,7 при уровне значимости 99 % и $r_{крит.} = 0{,}42$) среднегодовых значений W с квазидвухлетними колебаниями зонального ветра в экваториальной стратосфере при его восточной фазе за период 1979–2015 гг. В тоже время в вариациях W в зависимости от географической широты наблюдается проявление фундаментальных циклов СА (Швабе, Хейла и Брюкнера). Проявление квазирегулярных колебаний в вариациях W представлено на рис. 7.

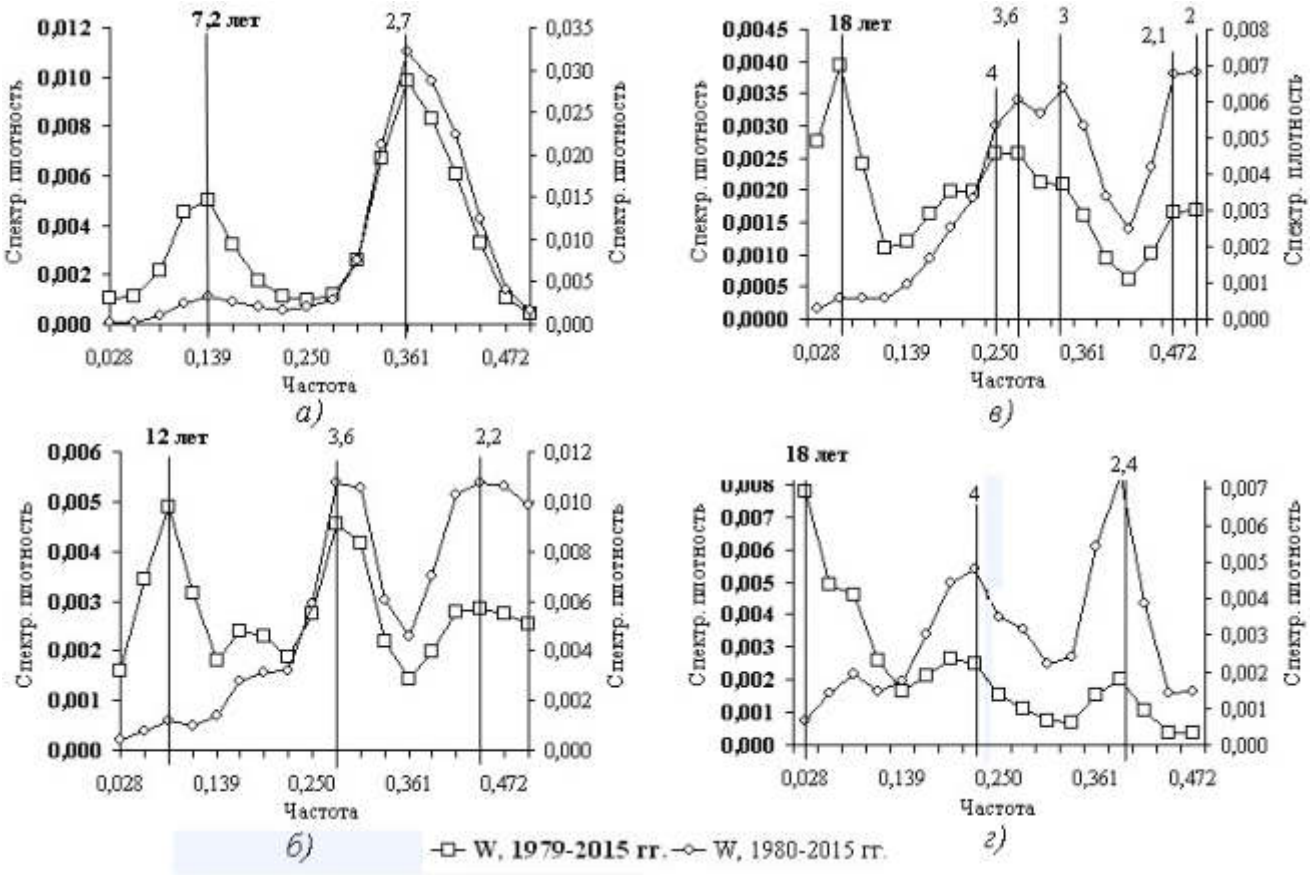


Рис. 7. Спектральный анализ среднегодовых значений W (ERA-Interim) за период 1979–2015 гг. (с учетом трендовой компоненты – левая ось ординат) и 1980–2015 гг. (без трендовой компоненты – правая ось ординат) над ст. Якутск (*а*), ст. Томск (*б*), ст. Иркутск (*в*) и ст. Даланзадгад (*г*). По оси абсцисс отложена частота, соответствующая определенным периодам (годам). Вертикальными линиями отмечены максимальные всплески («пики») квазирегулярных колебаний

Заключение

Таким образом, вышеописанные результаты исследований, полученные с помощью данных спектральной солнечной фотометрии и проведенные в 2015–2017 гг., свидетельствуют о том, что использование солнечных фотометров необходимо с точки зрения как фундаментальной, так и прикладной науки. На обширной территории Якутии необходима сеть экспериментальных приборов и установок для осуществления непрерывного (с «полной автоматизацией») мониторинга за атмосферными параметрами.

Список литературы

1. Определение аэрозольных индикатрис рассеяния безоблачной атмосферы в спектральной области 0,55–2,4 мкм / В. С. Антюфеев, А. И. Иванов, Г. Ш. Лившиц, Г. А. Михайлов // Изв. АН СССР. Физ. атмосферы и океана. 1980. Т. 16, № 2. С. 146–154.

2. Прозрачность толщи атмосферы в видимой и ближней ИК-области спектра / О. Д. Бартенева, Н. В. Никитинская, Г. Г. Сакунов, Л. К. Веселова. Л. : Гидрометеоиздат, 1991. 224 с.

3. Васильев М. С., Каримов Р. Р. Исследование возможных причин возникновения лесных пожаров в Якутии по данным дистанционных наблюдений // В мире научных открытий. Красноярск : Науч.-инновац. центр. 2014. № 4(52). С. 161–171.

4. Васильев М. С., Николашкин С. В. Температурный эффект дымового аэрозоля в летний сезон над центральной частью Якутии за период 2004–2014 гг. // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28, № 12. С. 1106–1111.

5. Васильев М. С., Николашкин С. В. Связь широтной динамики влагосодержания атмосферы с квазидвухлетними колебаниями зонального ветра в экваториальной стратосфере и солнечной активностью над северо-востоком Евразии за период 1979–2015 гг. // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30, № 5. С. 409–413.

6. Васильев М. С., Николашкин С. В., Бороев С. В. Состояние прозрачности атмосферы над центральной частью Якутии по данным солнечного фотометра за период 2004–2014 гг. // Метеорология и гидрология. 2017. № 11. С. 14–20.

7. Гущин Г. П. Методы, приборы и результаты измерения спектральной прозрачности атмосферы. Л. : Гидрометеоиздат, 1988. 200 с.

8. Кабанов Д. М., Сакерин С. М. О методике определения аэрозольной оптической толщи атмосферы в ближнем ИК диапазоне спектра // Оптика атмосферы и океана. 1997. Т. 10, № 8. С. 866–875.

9. Калинин Н. А., Ветров А. Л. Генерация доступной потенциальной энергии вследствие крупномасштабной конденсации в циклонах умеренных широт // Метеорология и гидрология. 2002. № 4. С. 17–27.

10. Пясковская-Фесенкова Е. В. Исследование рассеяния света в земной атмосфере. М. : Изд-во АН СССР, 1957. 220 с.

11. Семенова А. П. К вопросу о связи осадков с влагосодержанием атмосферы // Тр. УкрНИГМИ. 1982. Вып. 188. С. 14–17.

12. Сивков С. И. Методы расчета характеристик солнечной радиации. Л. : Гидрометеоиздат, 1968. 232 с.

13. Смеркалов В. А. Прикладная оптика атмосферы. СПб. : Гидрометеоиздат, 1997. 334 с.

14. Draxler R. R., Rolph G. D. HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) [Электронный ресурс] / Model access via NOAA ARL READY. NOAA Air Resources Laboratory, College Park, MD. 1997. URL: http://www.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php.

15. ECMWF Newsletter N 110 – Winter 2006/07 / Ed. by B. Riddaway. European Center for Medium Range Weather Forecast, 2007. P. 53.

16. AERONET – a federation instrument network and data archive for aerosol characterization / B. N. Holben [et al.] // Remote Sens. Environ. 1998. Vol. 66, N 1. P. 1–16.

17. Shaw G. E., Reagan J. A., Herman B. M. Investigation of atmospheric extinction using direct solar radiation measurements made with a multiple wavelength radiometer // J. Appl. Met. 1973. Vol. 12. P. 374–380.

УДК 551.578.42 +551.525

Исследование температурного режима болот Западной Сибири с применением автоматических атмосферно-почвенных измерительных комплексов

Е. А. Дюкарев (dekot@mail.ru), С. А. Кураков (ksa@imces.ru),
М. В. Киселев, Е. А. Макеев

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск

Аннотация. Представлены результаты мониторинга температуры воздуха и почвы и высоты снежного покрова в болотных экосистемах юга Западной Сибири с использованием автоматических измерителей.

Ключевые слова: болотные экосистемы, температура воздуха, температура почвы, снежный покров, микроклимат, автоматические измерители.

Начиная с середины 1960-х гг., в России преимущественно отмечается потепление климата [3; 6; 24]. Повышение температуры воздуха оказывает существенное влияние на состояние грунтов в зоне многолетней мерзлоты России, которая занимает более 65 % территории РФ [1; 16]. По данным [16], современное повышение температуры мерзлых толщ достигает глубины в десятки метров. Измерения температуры почв и грунтов на отдельных метеорологических станциях России начали проводить более ста лет назад [16], однако массовые наблюдения (до глубины 1,6–3,2 м) начались в России в 1930–1950-х гг. [4]. Имеющаяся сеть метеорологических станций Росгидромета насчитывает более 1500 станций, но данные о температуре почвогрунтов за последние 40–50 лет доступны приблизительно с 650 метеостанций, в том числе в пределах криолитозоны России их насчитывается всего около 100 [20].

Современная система мониторинга погоды и климата Росгидромета на территории Сибири представлена довольно редкой наблюдательных сетью метеостанций. Метеостанции, проводящие наблюдения за температурой почвы расположены исключительно на минеральных почвах [21] и данные о температурном режиме торфяных почв редки и нерегулярны. Для выявления характеристик температурного (и тесно связанного с ним гидрологического режима) торфяных почв и необходимо проведение мониторинга непосредственно на территории болотных экосистем с использованием автоматического оборудования. Торфяные почвы являются одним из главных источников CO_2, CH_4 и N_2O, выделяемых в процессе распада органического вещества торфа, управляемого гидрологическим и термическим режимом торфяной залежи [5; 11; 27]. Снижение уровня вод вызывает иссушение верхних слоев торфа, механическую усадку торфа, изменение температуры и аэрируемости торфяной залежи [8]. Гидротермическая деградация торфяных почв приводит к нарушениям в биогеохимических циклах и изменениям потоков энергии и влаги на деятельной поверхности [10].

По разным оценкам болотные экосистемы содержат 120–455 млрд т углерода [2; 23]. В России запасы углерода в виде торфа оцениваются в 215 млрд т [22]. Болота Западной Сибири содержат до 70 млрд т углерода [26]. Столь значительный резервуар углерода в результате изменения климата или антропогенного воздействия потенциально может частично перейти в атмосферу в виде CO_2 или CH_4 и внести значительный вклад в углеродный баланс атмосферы [11; 25]. Потепление климата [6; 23] приводит к изменению термического режима грунтов и динамике их промерзания [5; 8], изменению дат установления и разрушения снежного покрова, а также к изменению снегонакопления [8; 13; 15; 16].

Исследования микроклиматических особенностей болотных экосистем являются весьма актуальными и необходимыми при проведении комплексных исследований болотных экосистем Западной Сибири [9]. Оценка непосредственного воздействия заболоченных территорий на региональный климат позволит корректно интерпретировать существующие сценарии климатических изменений на следующие столетия. Выявление закономерностей функционирования болотных экосистем при различных климатических условиях и их изме-

нении создает основу для надежной оценки состояния растительности и разнонаправленных потоков углерода.

Приборы и методы

Для натурных исследований температурного режима почвогрунтов и характеристик микроклимата болотных экосистем в Институте мониторинга климатических и экологических систем СО РАН разработан уникальный атмосферно-почвенный измерительный комплекс АПИК [14]. АПИК предназначен для мобильных и стационарных долговременных автоматических измерений и регистрации основных параметров атмосферы, почвогрунтов и водоемов. Некоторые модификации АПИК комплектуются датчиками высоты и температуры снежного покрова, уровня болотных вод, сумм атмосферных осадков, скорости и направления ветра, характеристик солнечной радиации, концентрации углекислого газа и пр. Отличие от уже имеющихся измерительных систем заключается в сочетании низкого энергопотребления, широкого набора подключаемых датчиков, необслуживаемого режима работы, работоспособности в широком диапазоне условий эксплуатации и низкой цены. В настоящее время более 200 разных модификаций АПИК работают на обширной территории Сибири и Дальнего Востока, география которой приведена на рис. 1.

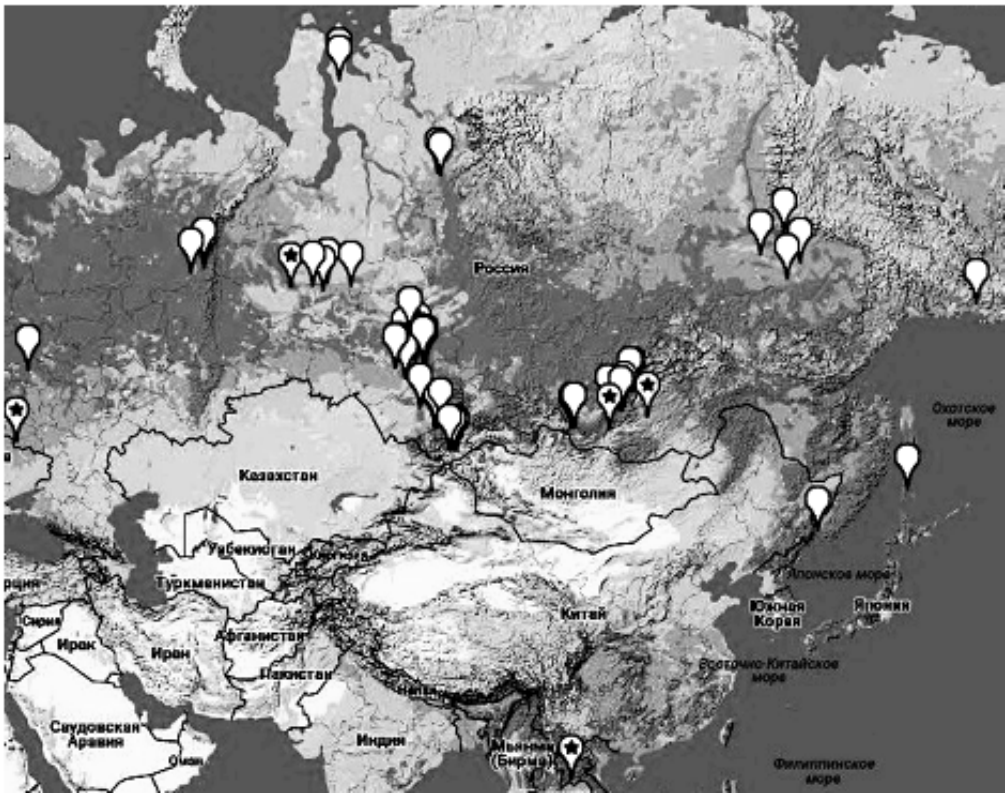


Рис. 1. География применения АПИК

Существуют два основных направления создания сетей мониторинга: с использованием логгеров скрытой установки и стационарных не маскируемых станций.

Регистратор для скрытой установки предназначен для «антивандального» размещения на местности, что определяет невозможность использования демаскирующих конструкций: антенн, солнечных батарей и многих типов датчиков. В итоге этих ограничений получается контроллер с ультрамалым энергопотреблением (питание от батарей); с большой внутренней энергонезависимой памятью измерений; с интерфейссом USB, используя специальный кабель с герметичным разъёмом (чтобы для считывания данных не выкапывать контроллер из земли); с максимальной степенью защиты оболочки прибора IP68 (возможная работа ниже уровня грунтовых вод); с возможностью использования только датчиков параметров грунта – температуры, влажности, проводимости, а также, уровня воды.

В регистраторе применяется микроконтроллер (ATMEGA1284), который через цифровой интерфейс (1-Wire) опрашивает температурные датчики (DS18B20), аналоговые входы и сохраняет данные в энергонезависимой памяти (AT45DB321) с привязкой ко времени измерения, с помощью часов (PCF8563T). В памяти логгера также фиксируется напряжение питания. Интерфейс USB (FT232RL) обеспечивает связь регистратора с компьютером для конфигурирования его работы и считывания данных.

Опираясь на опыт предыдущих разработок, созданный автономный контроллер-регистратор (АКР) как базовый элемент предназначен для создания сетей мониторинга из стационарных не маскируемых станций. АКР, в отличие от регистратора скрытой установки, комплектуется дополнительными аналоговыми и цифровыми интерфейсами (RS485, RS232 – 2 шт.), а главное он через интерфейсные модули расширения может подключаться к сетям GSM, WI-FI, Ethernet и спутниковому интернету. Питание регистратора обеспечивается свинцовым гелиевым аккумулятором 12FGHL48, который, через схему с температурной коррекцией напряжения заряда, подпитывается от маломощной солнечной батареи. В таблице 1 приведены основные используемые в АПИК датчики.

Таблица 1

Датчики, используемые для измерения в АПИК

№	Компонент	Диапазон измерения	Погрешность
1	Датчик температуры DS18B20	от -55 до +55°C	±0,1 °C
2	Датчик влажности воздуха HIH-5031	от 0 до 100 %	±3,5 %
3	Датчик влажности грунта TRIME-PICO32	от 0 до100 %	±2 %
4	Датчик атмосферного давления MPL3115A2	от 500 до 1100 ГПа	±4 ГПа
5	Датчик скорости и направления ветра Davis Anemometer 6410	от 0,9 до 78 м/с от 0 до 360°	±5 % ±7 %
6	Датчик количества жидких осадков Davis 7852M	т 0 до 1000 мм/ч	±5 %
7	Пиранометр 2-х канальный (Альбедометр) ИМКЭС. Диапазон от 0,35 до 9 мкм	от 0 до 2000 Вт/м2	±10 %
8	Измеритель уровня воды ИМКЭС	От 0 до 10,5 м	±1 %
9	Датчик-профилемер высоты снежного покрова ИМКЭС	От 0 до 2 м	±0,05 м
10	Ультразвуковой датчик высоты снежного покрова MB7384	От 0 до 4 м	±0,015 м

Датчики температуры и влажности воздуха, расположенные на уровне 2 м, защищены от солнечных лучей и атмосферных осадков пластиковой защитой. В датчике скорости и направления ветра применяется переменный резистор и геркон. Датчик суммарной солнечной радиации (2 канала) размещен на мачте, на высоте 1,5 м. Поток излучения, проходя через фторопластовый защитно-рассеивающий фильтр, попадает на два зачернённых и два блестящих алюминиевых сектора, нагревая их, а с помощью прикреплённых к ним с обратной стороны платиновых резисторов определяется плотность потока солнечной радиации по разнице сопротивлений.

По датчику-профилемеру высоты снежного покрова рассчитывается уровень снега по перепаду температуры на границе сред воздух-снег. Жидкие осадки, собираемые входным сечением воронки датчика осадков, наливаются в одну из чашек коромысла, которое после наполнения чашки (0,2 мм осадков) опрокидывается, подставляя под воронку другую чашку, при этом магнит, закреплённый на коромысле, проходит мимо геркона, вызывая его замыкание.

Зонд профиля температуры грунта размещен на расстоянии более 1 м от остальных датчиков и регистратора, и содержит цифровые датчики температуры на уровнях 0, 2, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 60, 80, 120, 160, 240, 320 см вглубь почвы. Зонд выполнен в виде трехпроводной печатной платы с припаянными к ней высокоточными цифровыми термометрами, защищенной термоусадочной трубкой, точность которых путём калибровки в диапазоне –

55…+55 °С доведена до ±0,1 °С. Датчики влажности грунта измеряют отношение объёмного содержания воды к объёму вещества по удельной диэлектрической проницаемости. Проводимость воды датчиком измеряется по мостовой схеме на ультранизкой частоте переменного тока. Электроды изготовлены из нержавеющей стали.

Программное обеспечение АИПТ предоставляет возможность визуального представления рядов данных. Данные экспортируются в текстовый формат *.csv. АИПТ позволяет оперативно (в on-line режиме) в течение года с заданной периодичностью получать информацию о показателях атмосферного и почвенного климата, составлять базу данных для анализа информации, на основе которых появляется возможность выявления более тонких временных (суточных) закономерностей динамики показателей температуры, влажности, осадков и, соответственно, характеристик глубины протаивания и промерзания почв и грунтов.

Благодаря использованию оригинальных пластиковых конструкций мачт, модульности конструктивов и применению герметичных разъёмных соединений, удалось добиться простоты в сборке, установке и ремонте комплекса в удалённых и труднодоступных местах.

К настоящему времени на территории лесо-болотных экосистем Западной Сибири установлено около 30 измерительных комплексов АПИК. Накоплены данные о температуре и влажности воздуха, температуре торфяных и минеральных почв, уровням болотных вод, высоте и температуре снежного покрова за 3–7 лет. Ключевые участки (КУ), в которых развернута сеть из 4–10 комплексов АПИК, расположены в северной тайге Западной Сибири (КУ Мухрино – стац. Мухрино ЮГУ, Ханты-Мансийск ХМАО), в средней тайге (КУ Нибегинский – пос. Нибегинский, Верхнекетский район Томской области), южной тайге (КУ Бакчарский – д. Полынянка, Бакчарский район Томской области и КУ Кинзяровский, пос. Усть-Бакчар, Чаинский район Томской области), подтайге (КУ Томский – п. Тимирязево, Томский район Томской области).

Микроклиматические наблюдения проводятся в автоматическом режиме с высоким временным разрешением (15–60 минут) одновременно на нескольких наблюдательных площадках в пределах КУ. Наблюдательные площадки каждого КУ включают несколько болотных экосистем разного типа (заболоченный лес, рям, топь, грядово-мочажинный и/или грядово-озерковый комплексы) и реперные площадки с минеральной почвой (поле и лес) [12].

На КУ Бакчарский (южная тайга) организовано 11 пунктов наблюдений (заболоченный лес, высокий рям (ВР), низкий рям (НР), осушенный рям (ОС), грядово-мочажинный комплекс – гряда и мочажина (ГМКГ и ГМКМ), эвтрофное болото (ЕВ), горелое болото, горелое болото восстановленное, хвойный лес, смешанный лес, поле. На КУ Кинзяровский (южная тайга) – 4 пункта (рям, топь, ГМК-мочажина, смешанный лес), КУ Нибегинский – 4 пункта (рям, ГМК – мочажина, ГМК – гряда, хвойный лес), КУ Мухрино – 6 пунктов (высокий рям, низкий рям, топь, ГМК – мочажина, ГМК – гряда, хвойный лес).

Температура воздуха

По данным измерений температуры воздуха, полученных с помощью автономных измерителей АИПТ, для КУ Бакчарский были рассчитаны количественные показатели температуры: среднесуточные температуры, амплитуда суточного хода, минимальные и максимальные суточные температуры, а также время их наступления.

В результате исследования выявлено, что в изучаемых болотных экосистемах (ОТ, ГМК, НР и ЕВ) среднегодовая температура воздуха немного ниже, чем на метеостанции Бакчар. Сравнение средних месячных температур на болоте и метеостанции показывает, что низкий рям теплее суходольного участка в августе-сентябре и марте-мае. В мае 2011 г. температура во всех исследованных болотных экосистемах выше, чем на метеостанции на 0,5–1,5 °С. В остальное время средняя температура на болоте ниже, чем на метеостанции.

Амплитуда суточного хода температуры воздуха на болоте ниже, чем на метеостанции на 1–5 °С. Исключение составляют низкий рям и эвтрофное болото, где в августе и с января по май амплитуда суточного хода немного выше (на 0,5–1,0 °С).

Максимальные дневные температуры воздуха наблюдаются в июле, но поскольку этот месяц не попал в исследуемый период, то максимальные температуры приведены для августа месяца. Наибольшие максимальные суточные температуры наблюдались в низком ряме – 22,6 °С, что на 1,3 °С выше, чем на метеостанции Бакчар. В остальных болотных экосистемах максимальная дневная температура в августе немного ниже, чем на метеостанции. В мае 2011 г максимальные суточные температуры на болоте выше, чем на суходоле на 1–2,5 °С. В апреле-мае верхние рыхлые слои мха освобождаются ото льда, и происходит их высушивание. Дальнейшее протаивание торфа существенно замедляется из-за высоких теплоизолирующих свойств поверхностного слоя.

Минимальные суточные температуры воздуха в исследуемых экосистемах, как правило, выше, чем наблюдаемые на метеостанции Бакчар. В декабре 2010 разности минимальных температур достигали 3,5–4,5 °С. Только в январе 2010 г. на эвтрофном болоте и в низком ряме минимальные температуры ниже на десятые доли градуса, чем на метеостанции. В летнее время минимум температуры во всех исследованных болотных экосистемах на 1–3 ° выше, чем на не заболоченных участках. Механизм отепляющего воздействия болота в летнее время в ночные часы аналогичен отепляющему воздействию водоемов. Тепло аккумулированное торфяной залежью в дневное время и высокая теплоудерживающая способность пропитанных водой слоев торфа сдерживает остывание поверхности в ночное время. Отсутствие конвективных движений воды в торфяной почве также способствует повышению тепловой инерции слоев торфа, находящихся ниже уровня воды.

Таким образом, микроклиматическая специфика болотных экосистем ярко проявляется в особенностях суточного и годового хода температуры воздуха. По данным многолетних инструментальных наблюдений, экосистема низкого ряма в летние месяцы теплее, чем незаболоченный участок, а в зимние месяцы – холоднее.

Исследованные открытые болотные экосистемы (открытая топь и два пункта наблюдений на грядово-мочажинном комплексе) проявляют сходную динамику колебаний температуры в годовом и суточном масштабе. Среднесуточная температура воздуха на открытых (незалесенных) болотах ниже на 0,2–1 °С, а амплитуда суточного хода меньше на 2–5 °С, чем на метеостанции. Пониженные значения амплитуды суточного хода формируются за счет увеличенных (по сравнению с незаболоченной территорией) минимальных суточных температур в течение всего года.

Микроклиматические характеристики залесенных болотных экосистем (низкий рям и эвтрофное болото) существенно отличаются от характеристик болот без древесного яруса. Среднесуточные температуры воздуха и максимальные суточные температуры здесь в летнее время выше, а в зимнее время – ниже, чем на метеостанции. Годовой ход минимальных суточные температур совпадает с ходом на открытых болотах, а именно – минимум суточной температуры повышен по сравнению с метеостанцией.

Температура почвогрунтов

Тепловые режимы торфяных и минеральных почв существенно различаются. Торфяная залежь представляет собой сложную органоминеральную систему, обладающую специфическими свойствами: высокой обводнённостью и пористостью, содержанием большого количества малоразложившегося органического вещества [18]. На низких влажных местах с большим количеством органики слабая теплопроводность часто провоцирует заморозки на поверхности почвы весной и осенью, а сильно заторфованные почвы северных широт способствуют подъему уровня многолетней мерзлоты и продвижению ее в более южные районы. Температуропроводность торфяной залежи болот особенно в период ее промерзания и оттаивания зависит от процессов выделения или поглощения тепла, связанных с фазовыми превращениями воды [19]. Поэтому скорость распространения тепла в залежи определяется величиной эффективного коэффициента температуропроводности. Необходимо также подчеркнуть, что детальный мониторинг температуры почвенного слоя предоставляет уникальный экспериментальный материал для изучения сложных процессов передачи тепла от приземного слоя атмосферы в почвогрунты.

Измерения температуры почвы на 13 глубинах по данным автономных измерителей показали, что микроклиматическая специфика болотных экосистем ярко проявляется в особенностях суточного и годового хода температуры почвы на разных глубинах.

По данным наблюдений за температурным режимом почв на КУ Бакчарский получено, что торфяные почвы холоднее минеральных на 8–10 °С в теплое время и теплее их на 1–3 °С в холодное время года. Были установлены существенные различия в температуре почвы на площадках с высоким и низким уровнями болотных вод наблюдающиеся во всей торфяной залежи. Все пункты наблюдения были разделены на 2 основные группы, различающиеся по уровню болотных вод (высокий и низкий). К первой группе относятся – открытая топь и мочажина ГМК. Ко второй группе – высокий рям, низкий рям и гряда ГМК. На площадках первой группы уровень болотных вод располагается ближе к поверхности (4–6 см в среднем), чем на площадках второй группы (25–45 см в среднем). Различия в уровне болотных вод между группами приводят как к температурным различиям, так и к различиям в растительном покрове.

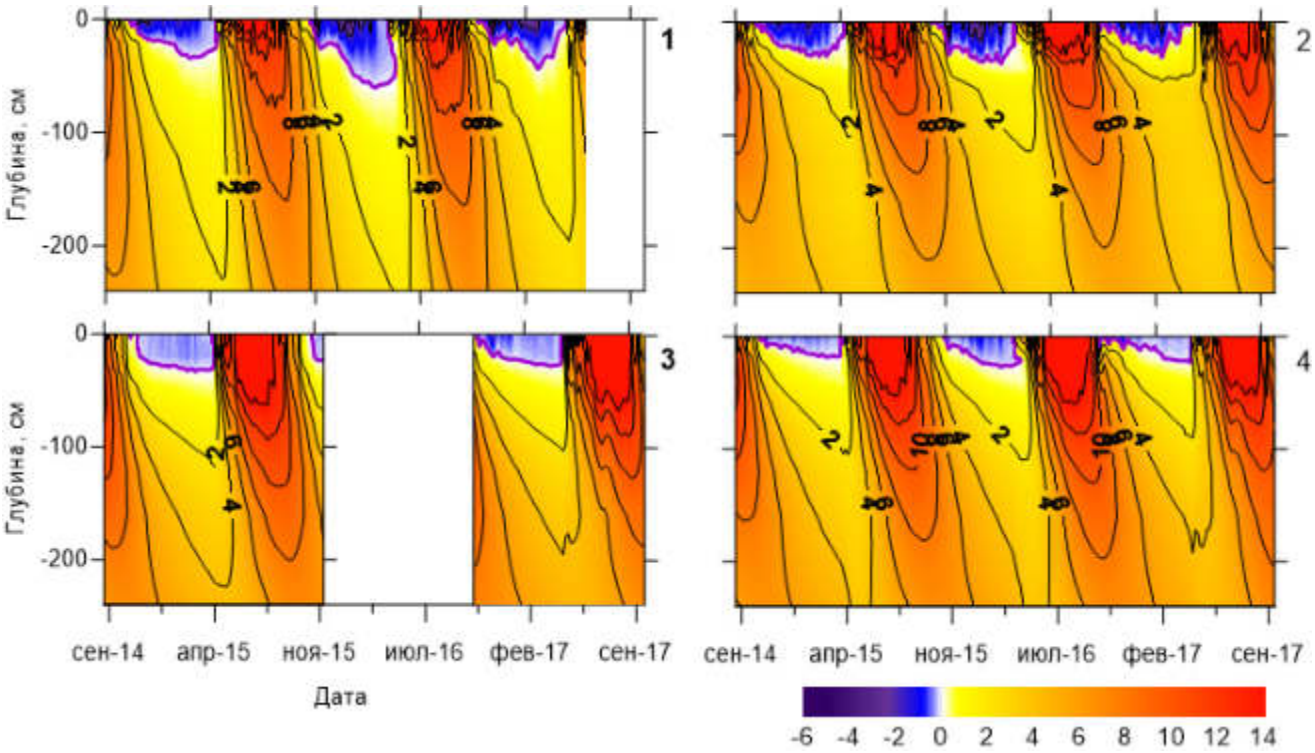


Рис. 2. Временной ход температуры почвы (Т, °С) на КУ Бакчарский.
1 – смешанный лес, *2* – низкий рям, *3* – ососково-сфагновая топь, *4* – мочажина ГМК

Анализ годового хода температуры торфяной почвы в профиле 0–240 см дает более четкое и наглядное представление о данных группах. При одинаковом количестве поступающей солнечной радиации на все площадки и при мало отличающейся плотности и влажности торфа, площадки первой группы в теплый период прогреваются лучше, чем площадки второй группы. При этом максимальная температура в июле на поверхности на мочажине и открытой топи 18,1 и 17,4 °С соответственно; в низком ряме, высоком ряме и на гряде – 17,3, 14,1 и 17,7 °С соответственно. Также на глубинах до 60 см отслеживаются различия между площадками внутри одной группы, которые превышают 1 °С. Глубже 60 см различия между площадками одной группы уменьшаются и редко превышают 1 °С. Так в июле температура почвы на глубине 120 см на мочажине и открытой топи – 8,1 и 8,5 °С соответственно, в низком ряме, высоком ряме и на гряде – 3,9, 4,2 и 7,2 °С соответственно.

Особенности температурного режима в теплый период связаны не только с уровнем болотных вод, но и с густотой растительного покрова. Так низкий и высокий рям, относящиеся к условно холодным площадкам, в слое 0–60 см имеют более низкие температуры, чем

гряда. Особенность гряды заключается в отсутствии густой растительности и, следовательно, большой открытости. Таким образом, в теплый период гряда является самой теплой площадкой из второй группы. Низкий и высокий рям, в свою очередь, из-за густой растительности получают меньше солнечной радиации, часть которой поглощают растения и в совокупности с низким уровнем болотных вод становятся холоднее мочажины, открытой топи и гряды.

Толщина сезонно-мерзлого слоя на всех площадках составляет 20–60 см и максимально промерзание торфяной толщи достигается в феврале-марте. Промерзание торфяной почвы от подстилающей поверхности до максимальной глубины в среднем проходит со скоростью 0,2–0,3 см/сут. Максимальная зафиксированная скорость промерзания составляла 0,51 см/сут и наблюдалась в 2012 г. на высоком ряме. При этом скорость промерзания в слое от поверхности до 20 см составляет в среднем 0,6–0,7 см/сут, что больше, чем в слое от 20 см до максимальной глубины сезонно-мерзлого слоя в среднем на 0,4 см/сут. При этом максимальная скорость промерзания может быть больше в 2–3 раза. Например, в 2011 г. на гряде она достигала 1,43 см/сут, а в 2015 г. в высоком ряме 1,67 см/сут.

Деградация сезонно-мерзлого слоя начинается как сверху, так и снизу. Этому способствует незамерзающая относительно теплая торфяная толща, которая находится ниже сезонно-мерзлого слоя. Так как в середине-конце зимы высота снежного покрова является значительной, то влияние отрицательных температур воздуха на поддержание низких температур сезонно-мерзлого слоя ослабевает и начинается процесс оттаивания торфяной толщи снизу.

Снежный покров

Снежный покров оказывает значительное влияние практически на все процессы взаимодействия атмосферы с подстилающей поверхностью в холодное время года на обширных площадях суши [15; 16]. Поэтому мониторинг высоты снежного покрова с применением автоматических регистраторов является актуальной задачей.

С помощью АПИК измерение высоты и температуры снежного покрова проводилось на территории геофизического стационара «Васюганье» на Бакчарском болотном массиве с 2012 по 2016 г. Наблюдения проводились на нескольких пунктах, включавших открытые и залесенные олиготрофные болота, эвтрофное болото и не заболоченные участки.

Для решения задачи автоматического измерения высоты снежного покрова с высоким пространственным разрешением был выбран способ определения границы воздух-снег по нахождению температурных экстремумов в вертикальном профиле температуры. Измерительная рейка выполнена в виде трехпроводной печатной платы с припаянными к ней высокоточными цифровыми термометрами [17], подключенными по однопроводному интерфейсу к регистратору. Рейка размещена в белой термоусадочной трубке. Предлагаемая конструкция датчика позволяет снизить паразитную теплопередачу между датчиками на рейке, ухудшающую точностные характеристики из-за отсутствия большого количества проводов; за счёт снижения габаритов рейки и применения цифровых термометров уменьшить её влияние на естественный снежный покров, как за счёт образования «наддувов» и «выветриваний», а также за счёт оттаивания снега около зонда из-за его нагрева солнцем; предлагаемый датчик высоты снежного покрова имеет возможность использовать большее количество (50…100) цифровых термометров, что позволяет увеличить разрешающую способность и точность измерения.

Датчики температуры размещаются над поверхностью почвы с регулярным шагом (5 см) до высоты 70 см. Регистрация данных температуры выполнялась с шагом 1 час. Высота снежного покрова определяется по превышению заданного порогового значения разницы показаний между двумя соседними термометрами, начиная с верхнего. Данный метод позволяет определять высоту снежного покрова с точностью 5 см. В определенных условиях (при выравнивании профиля температуры в приземном воздухе и снеге) определить высоту снежного покрова не удается. В такие моменты высота снега принималась равной высоте в предыдущий момент времени.

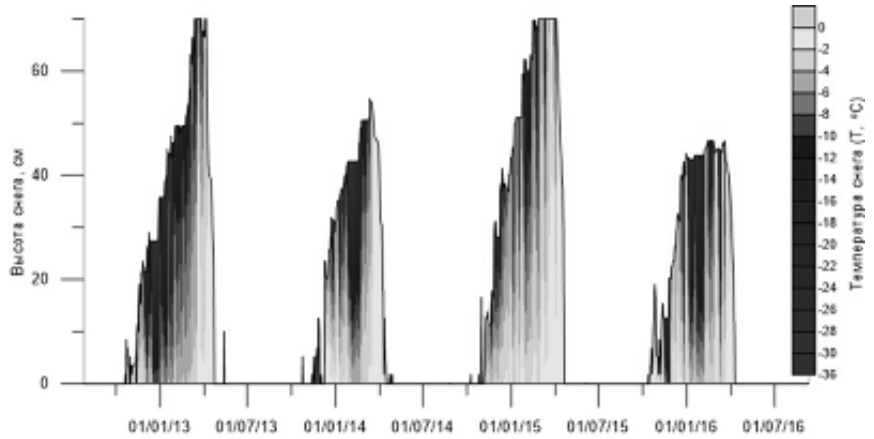


Рис. 3. Изменения высоты снежного покрова и температуры снега в 2012–2016 гг. Средние суточные значения. Смешанный лес на периферии эвтрофного болота «Самара»

Получено, что высота снежного покрова увеличивается в течение зимы, достигая 45–90 см в середине марта, после чего быстро уменьшается. Наибольшая максимальная высота снега за зиму была зарегистрирована в марте 2015 г., наименьшая – в 2016 г. На открытых участках болота снежный покров накапливается хуже, чем на облесенных. В лесу или ряме высота снега на 30–40 % больше, чем на топи.

Уточнение предварительных расчетов проводилось с привлечением данных режимных измерений высоты снежного покрова на близлежащей метеостанции (Бакчар). Данные измерений высоты снега с помощью АПИК сопоставлялись с высотой снега регистрируемой на метеостанции. Достоверные данные АПИК с примирением полинома третьего порядка интерполировались на каждый день зимы (рис. 3). Коэффициенты полинома получены для каждого пункта наблюдений.

Колебания температуры на поверхности почвы существенно сглажены по сравнению с колебаниями температуры воздуха (рис. 3). На поверхности почвы температура не опускается ниже –8 °С в начале зимы при высоте снега менее 20 см, и ниже –2 °С в момент достижения максимальной высоты снега в апреле-марте.

Заключение

Детальный мониторинг физических параметров состояния болотных экосистем Западной Сибири предоставляет уникальный экспериментальный материал для изучения сложных процессов передачи тепла. Интерпретация полученных данных и прогноз изменения температурного режима почв невозможны без применения современных математических моделей, описывающих ключевые процессы, формирующие почвенный климат. Разработка моделей деятельного слоя и калибровка этих моделей по данным натурных наблюдений позволит выявить закономерности реакции болотных экосистем на современные изменения климата уточнить параметризацию наземных экосистем в современных климатических моделях. Полученные результаты имеют важное мировое значение для выявления роли обширных заболоченных территорий Западной Сибири не только в глобальном круговороте углерода, но и в формировании регионального и глобального климата.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-05-00306.

Список литературы

1. Анисимов О. А., Шерстюков А. Б. Оценка роли природно-климатических факторов в изменениях криолитозоны России // Криосфера Земли. 2016. Т. 20, № 2. С. 90–99.

2. Вомперский С. Э. Роль болот в круговороте углерода // Биогеоценотические особенности болот и их рациональное использование. М. : Наука, 1994. С. 5–37.

3. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М., 2014. 605 с.

4. Использование данных метеорологических станций для оценки тенденций многолетних изменений температуры почв на территории сезонной и многолетней криолитозоны России / Д. А. Гиличинский, С. С. Быховец, В. А. Сороковиков, Д. Г. Федоров-Давыдов, Р. Г. Барри, Т. Жанг, М. К. Гаврилова, О. И. Алексеева // Криосфера Земли. 2000. Т. 4, № 3. С. 59–66.

5. Головацкая Е. А., Дюкарев Е. А. Влияние факторов среды на эмиссию CO2 с поверхности олиготрофных торфяных почв Западной Сибири // Почвоведение. 2012. № 6. С. 658–667.

6. Географические и сезонные особенности современного глобального потепления / Г. В. Груза, Э. Я. Ранькова, Э. В. Рочева, В. Д. Смирнов // Фундаментальная и прикладная климатология. 2015. № 2. С. 41–62.

7. Дюкарев Е. А. Влияние температуры воздуха и снежного покрова на характеристики сезонно-мерзлого слоя почвогрунтов // Криосфера Земли, 2015. Т. 19, № 3. С. 45–51.

8. Дюкарев Е. А. Прогноз глубины промерзания почвы с помощью простейшей регрессионной модели // Вестн. Том. гос. ун-та. 2014. № 387. С. 266–270.

9. Дюкарев Е. А., Алексеева М. Н., Головацкая Е. А. Оценка надземной продукции растительного покрова болотных экосистем по спутниковым данным // Исслед. Земли из космоса. 2017. № 2. С. 38–51.

10. Иванов К. Е., Новиков С. М. Болота Западной Сибири, их строение и гидрологический режим Л. : Гидрометеоиздат, 1976. 447 с.

11. Карелин Д. В., Замолодчиков Д. Г. Углеродный обмен в криогенных экосистемах. М. : Наука, 2008. 344 с.

12. Киселев М. В., Воропай Н. Н., Дюкарев Е. А. Особенности температурного режима почв верхового болотного массива // Изв. вузов. Физика. 2016. Т. 29, № 7/2. С. 93–98.

13. Киселев М. В., Воропай Н. Н., Дюкарев Е. А. Температурный режим почвы осоково-сфагновой топи верхового болота в южной тайге Западной Сибири // География и природ. ресурсы, 2017. № 3. С. 110–117.

14. Кураков С. А. Система автономного мониторинга состояния окружающей среды // Датчики и системы. 2012. № 4. С. 29–32.

15. Осокин Н. И., Сосновский А. В., Накалов П. Р. О влиянии изменчивости параметров снежного покрова на промерзание грунта // Лед и снег. 2015. Т. 130, № 2. С. 60–68.

16. Павлов А. В. Мониторинг криолитозоны. Новосибирск : Гео, 2008. 229 с.

17. Пат. 2542598 Российская Федерация, МПК G 01 W 1/14. Датчик высоты снежного покрова / С. А. Кураков ; заявитель и патентообладатель ИМКЭС СО РАН. № 2013136310/28 ; заявл. 01.08.2013 ; опубл. 20.02.2015, Бюл. № 5. [4 с].

18. Романов В. В. Гидрофизика болот. Л. : Гидрометеоиздат, 1961. 365 с.

19. Чудновский А. Ф. Теплофизика почв. М. : Наука, 1976. 353 с.

20. Шерстюков А. Б. Корреляция температуры почвогрунтов с температурой воздуха и высотой снежного покрова // Криосфера Земли. 2008. Т. 12, № 1. С. 79–87.

21. Шерстюков А. Б. Массив суточных данных о температуре почвогрунтов на глубинах до 320 см по метеорологическим станциям Российской Федерации // Тр. ВНИИГМИ-МЦД. 2012. Вып. 176. С. 233–256.

22. Carbon pools and accumulation in peatlands of the Former Soviet Union / M. S. Botch, K. I. Kobak, T. S. Vinson, T. P. Kolchugina // Global biogeochemical cycles. 1995. Vol. 9. P. 37–46.

23. Gorham E. Canada's peatlands: their importance for the global carbon cycle and possible effects of "greenhouse" climatic warming // Trans. Royal Soc. Canada. 1988. Ser. V. Vol. 3. P. 21–23.

24. IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 1535 p.

25. Detecting the permafrost carbon feedback: Talik formation and increased cold-season respiration as precursors to sink-to-source transitions / N. C. Parazoo, , C. D. Koven, D. M. Lawrence, V. Romanovsky, C. E. Miller // The Cryosphere. 2018. N 12. P. 123–144.

26. A high–resolution GIS–based inventory of the west Siberian peat carbon pool // Y. Sheng, L. C. Smith, G. M. MacDonald, K. V. Kremenetski, K. E. Frey, A. A. Velichko, M. Lee, D. W. Beilman, P. Dubinin // Global biogeochemical cycles. 2004. Vol. 18. P. GB3004.

27. Carbon accumulation in West Siberian mires, Russia / J. Turunen, T. Tahvanainen, K. Tolonen, A. Pitkainen // Global biogeochemical cycles. 2001. Vol. 15, N 2. P. 285–296.

УДК 629.783:551.577

Особенности расчета величины слоя осадков над акваторией Азовского моря с использованием данных дистанционного зондирования

В. П. Евстигнеев (vald_e@rambler.ru)[1], Д. В. Мишин (miwindv@gmail.com)[2], Л. П. Остроумова (lostroumova@mail.ru)[2]

[1] Севастопольский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, Севастополь,
[2] Государственный океанографический институт им. Н. Н. Зубова, Москва

Аннотация. В работе на основе данных спутникового зондирования Земли радиометром SEVIRI была построена статистическая модель пространственной связанности поля осадков над акваторией Азовского моря. Был определен набор из четырех локаций поля для восстановления интегрального слоя осадков над морем. Модель может быть применена при водно-балансовых исследованиях Азовского моря с использованием данных измерений на береговых метеорологических станциях.

Ключевые слова: слой осадков, статистические методы, Азовское море, SEVIRI, сеть метеостанций, водный баланс, корректировка измерений осадков.

Введение

Осадки, как один из основных факторов увлажнения поверхности Земли, являются важнейшей приходной составляющей водного баланса рек, водоемов, внутренних морей. Оценка слоя осадков представляет собой нетривиальную задачу, поскольку не существует исчерпывающей информации о том, насколько точечные измерения, проводимые на сети метеорологических станций, отражают истинную динамику выпадения осадков над водными акваториями. Высокая изменчивость осадков в пространстве, времени и интенсивности существенно ограничивают использование многолетних данных наблюдений наземной сети метеорологических станций в силу недостаточной ее плотности. В качестве альтернативы могут использоваться данные зондирования земной поверхности с орбиты геостационарных спутников, что обеспечивает освещение больших по пространству территорий и разнообразных по интенсивности процессов формирования осадков [9].

Целью настоящей работы является разработка статистической модели пространственной связанности поля осадков над акваторией Азовского моря на основе данных дистанционного зондирования Земли для расчета интегрального слоя осадков над морем. В основу работы положена гипотеза о том, что пространственная связь, установленная по данным спутникового зондирования между отдельными локальными точками и интегральной характеристикой над акваторией моря, отражает объективную связанность поля осадков. В случае справедливости гипотезы уравнение пространственной связи, полученное по данным дистанционного зондирования, можно применять в практике водно-балансовых расчетов для оценки слоя осадков над Азовским морем по данным измерений наземной сети метеорологических станций.

Материалы исследования

В последнее десятилетие получили развитие алгоритмы извлечения данных о характеристиках осадков на основе зондирования земной поверхности микроволновыми и инфракрасными радиометрами (SSM/I, SEVIRI) [7].

В работе использовались данные о суточном слое осадков радиометра SEVIRI, размещенного на Европейском геостационарном спутнике METEOSAT второго поколения. Массив суточных слоев осадков радиометра SEVIRI включает в себя данные за период с 1 января 2013 г. по 2 сентября 2015 г. с отдельными перерывами (всего 941 запись), представленным в пространственном секторе 32–43 °в. д. и 40,8–47,5 °с. ш., охватывающим Азовское море и восточную часть Черного моря. На рис.1 представлены карты распределе-

ния суточных сумм осадков за отдельные даты (05.06.2013, 25.05.2014, 25.06.2015), полученные по данным SEVIRI.

На карте рис. 1 символами обозначены локации метеостанций, по данным которых может производиться расчет слоя осадков над Азовским морем. Задача состояла в установлении связи (в первом приближении линейной) между оптимальным количеством этих локаций и интегральным слоем, рассчитанным по данным SEVIRI.

Следует понимать, что оценка параметров осадков с использованием SEVIRI являются непрямыми измерениями слоя, а только косвенными, полученными путем параметризации отдельных микрофизических и оптических параметров облаков и классификации информации, поступающей со спутника, а также сопутствующих метеорологических данных (см. например [3; 4]). Поэтому валидация оценочных величин количества осадков SEVIRI попрежнему проводится по данным прямых измерений осадков на сети метеорологических станций.

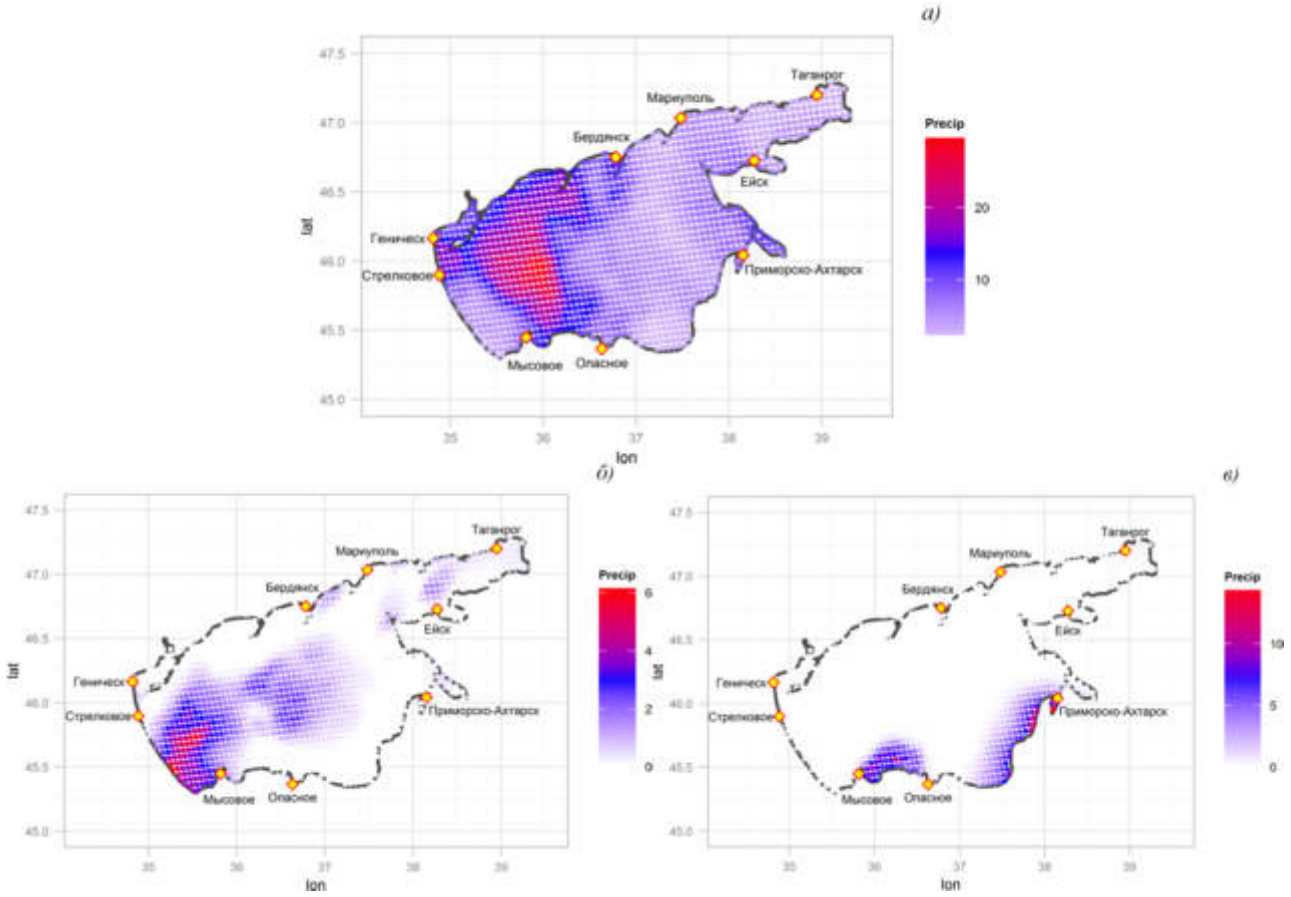


Рис. 1. Пример данных радиометра SEVIRI по суточному количеству осадков (мм) над акваторией Азовского моря за различные даты: *а* – 25.06.2015; *б* – 05.06.2013; *в* – 25.05.2014

На рисунке 1 точками изображено местоположение береговых станций Азовского моря, характеристики которых представлены в табл. 1. К сожалению, доступные массивы данных метеорологических наблюдений не позволяют провести сравнение прямых и спутниковых наблюдений. В связи с этим, можно лишь сослаться на работу [3], где по данным 48 метеостанций юга Европейской территории России было показано удовлетворительное согласование данных SEVIRI/AVHRR с данными прямых измерений суточного количества осадков на метеостанциях. Кроме того, в этой работе показано неплохое согласование пространственно осредненных характеристик осадков, что обосновывает их использование в настоящей работе.

На основе этих данных была построена статистическая модель пространственной связанности поля осадков над акваторией Азовского моря методом множественной линейной регрессии. Во всех статистических тестах был принят 5 % уровень значимости за исключением специально оговоренных случаев. Все расчеты проводились в специализированной программной среде статистического программирования R [8].

Таблица 1

Пункты наблюдения гидрометеорологической сети

№	Станция	Код	Широта, °	Долгота, °	Высота, м
P1	Мариуполь	34712	47	37,5	8
P2	Бердянск	34717	46,8	36,7	2
P3	Мысовое	33981	45,5	35,9	15
P4	Геническ	33910	46,17	34,82	15
P5	Стрелковое	33961	45,9	34,9	4
P6	Таганрог	34720	47,2	38,9	30
P7	Ейск	34727	46,8	38,3	3
P8	Приморско-Ахтарск	34824	46,03	38,15	3
P9	Опасное	33986	45,4	36,6	2

Статистическая модель пространственной связанности поля осадков

В первом приближении в настоящей работе рассматривалась линейная зависимость интегрального слоя осадков над Азовским морем P_{azov} от 9-ти локаций (см. (1)), соответствующих месторасположению основных метеорологических станций региона. Множественная линейная зависимость слоя осадков над Азовским морем P_{azov} имеет следующий вид:

$$P_{azov} = a_0 + a_1P_1 + a_2P_2 + a_3P_3 + a_4P_4 + a_5P_5 + a_6P_6 + a_7P_7 + a_8P_8 + a_9P_9, \quad (1)$$

где P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6, P_7, P_8, P_9 – количество осадков в точках метеостанций (нумерация по списку станций в табл.1); a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9 – коэффициенты уравнения регрессии. Аддитивность модели была подтверждена тестом Тьюки, проверяющим наличие взаимодействия между факторами. Оценка параметров множественной линейной регрессии одним из известных методов – методом наименьших квадратов или максимального правдоподобия.

Однако выбранные предикторы могут быть недостаточно информативными для построения надежной регрессионной модели.

В результате применения специальных статистических тестов был определен оптимальный набор предикторов (4 локации) для восстановления слоя осадков над Азовским морем – «Бердянск», «Стрелковое», «Приморско-Ахтарск» и «Опасное».

В некоторых работах ([3]) для улучшения качества восстановления данных об осадках по спутниковым данным в уравнениях использовалось слагаемое, отражающее внутрисезонную изменчивость осадков. Само по себе включение такого слагаемого в модель спорно, поскольку ряды осадков в локациях-предикторах модели уже содержат сезонную составляющую. Тем не менее, согласно расчетам, использование этой переменной может улучшить модель. Итак, в модель, представленную в данной работе, в качестве влияющего фактора включена трехмесячная изменчивость осадков. Прямым пересчетом был установлен оптимальный вид слагаемого $\sin\left(2\pi \times t/9\right)$, где t – порядковый номер декады в году.

Окончательный вид модели при коэффициенте детерминации R^2>98 %:

$$P_{azov} = 0{,}361 \cdot P_2 + 0{,}205 \cdot P_5 + 0{,}258 \cdot P_8 + 0{,}165 \cdot P_9 - 0{,}4 \cdot \sin\left(2\pi \times t/9\right) \quad (2)$$

где P_2 – «Бердянск», P_5 – Стрелковое, P_8 – Приморско-Ахтарское, P_9 – Опасное (см. табл. 1).

В некоторых случаях пиковых осадков модель занижает их сумму, однако в среднем ошибка модели составила чуть более 1 мм.

Кроме того, для расчета интегрального слоя осадков над Азовским морем необходимо осуществить корректировку измеренных осадков на метеорологических станциях. С целью подтверждения данного тезиса, в нашей работе был произведен расчет действительных сумм осадков для указанных четырех станций Приазовья. Для получения действительных сумм осадков по месяцам и за год была использована их корректировка методом ГГО-КазНИИ за период 1976–2010 гг. [2]. В среде статистического программирования R [8] был реализован код внесения поправок в исходные, первичные материалы наблюдений за осадками.

Обсуждение и выводы

Во многих работах показано [1; 2; 6], что корректировка измеренных сумм, осуществляемая на метеорологических станциях, является недостаточной для получения действительных величин осадков.

С целью подтверждения данного тезиса, в данной работе были рассчитаны действительные суммы осадков для 4 станций Приазовья, используемых для восстановления интегрального слоя осадков над морем. Проведено сравнение полученных величин с метеорологическими данными, использованными в работе [5] (рис. 2), обозначенными как метод «НОРМА» (по отношению норм осадков на береговых станциях и открытой части моря). Для получения действительных сумм осадков был использован метод ГГО-КазНИИ [2], который наряду с методикой ГГИ-ГГО [1] является точным способом корректировки осадков [6]. Сравнение проводилось по среднемноголетним суммам осадков за месяц и за год, рассчитанным за период 1976–2010 гг.

В результате, значительные отклонения между поправками (до 18 мм) выявлены для месяцев зимнего сезона и марта (рис. 2, *а*).

Вследствие использования стандартной методики, недоучет осадков для января-марта колеблется в пределах от 27 до 37 % в зависимости от станции, за теплый период с мая по октябрь величина недоучета не превышает 17 % (рис. 2, *б*). Основным вкладом в поправку к измеренным осадкам в холодный период является ветровой недоучет. Сильные ветра, в особенности на северном побережье Азовского моря, приводят к увеличению аэродинамического поправочного коэффициента. В годовых величинах недоучет стандартного метода достигает значений от 50 мм (Стрелковое) до 90 мм (Приморско-Ахтарск). В процентном отношении недоучет среднемноголетних годовых сумм осадков составляет 13–16 %.

Сравнение интегрального слоя осадков над Азовским морем, полученного по представленной в данной работе модели, с учетом корректировки измеренных слоев осадков на сети метеорологических станций методами «НОРМА» (данные для сравнения были взяты из монографии [5] и таблиц ЕДМ за аналогичный период) и ГГО-КазНИИ с ранее опубликованными данными показало существенные различия в оценках годового слоя осадков (до 37 %).

Таким образом, выявленное различие в оценках годового слоя осадков над Азовским морем связано, как с неверным воспроизведением пространственной структуры поля осадков над морем, так и с введением корректировки измеренных осадков на метеорологических станциях. Полученный результат приводит к необходимости пересмотра составляющих водного баланса Азовского моря, представленных ранее в литературных источниках.

Исследование, проведенное в рамках данной работы, показало возможность использования статистической модели пространственной связанности поля осадков над акваторией Азовского моря методом множественной линейной регрессии на основе данных спутникового зондирования Земли радиометром SEVIRI для определения корректировки составляющих водного баланса Азовского моря за доступный исторический период.

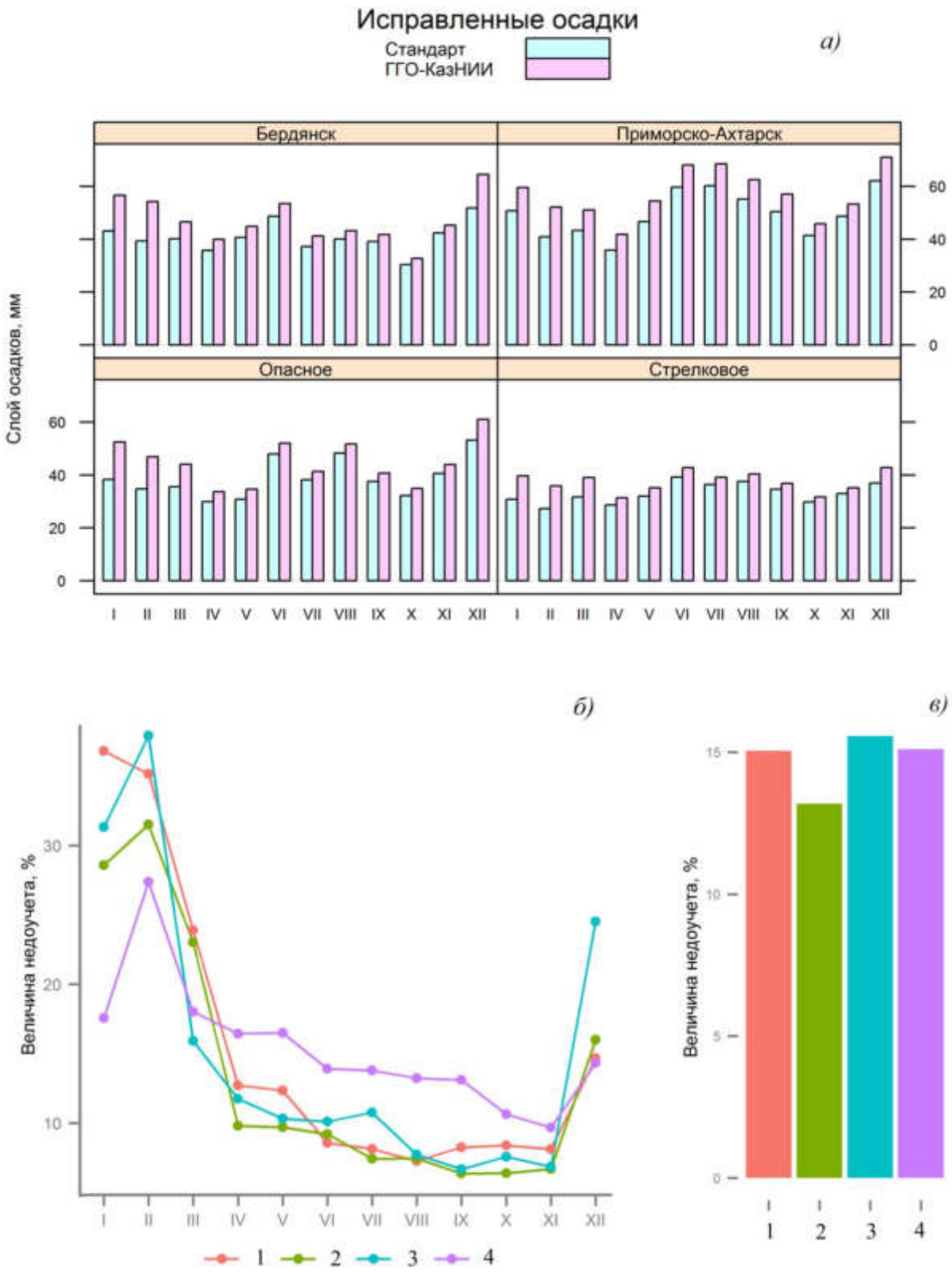


Рис. 2. Месячные величины исправленных осадков методами «НОРМА» и ГГО-КазНИИ (*а*) и недоучет месячных (*б*) и годовых (*в*) сумм осадков в методе «НОРМА» для береговых станций Азовского моря. *1* – Опасное;
2 – Стрелковое; *3* – Бердянск; *4* – Приморско-Ахтарск

Список литературы

1. Новая модель корректировки измеренных осадков и ее применение в полярных районах России / Э. Г. Богданова, В. С. Голубев, Б. М. Ильин, И. В. Драгомилова // Метеорология и гидрология. 2002. № 10. С. 68–94.
2. Браславский А. П., Струзер Л. Р., Шергина К. Б. Методика определения исправленных величин атмосферных осадков при срочных наблюдениях // Тр. ГГО. 1975. Вып. 341. С. 32–50.
3. Волкова Е. В. Определение сумм осадков по данным радиометров SEVIRI/Meteosat-9,10 и AVHRR/NOAA для Европейской территории России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11, № 4. С. 163–177.
4. Волкова Е. В., Успенский А. Б. Оценки параметров облачного покрова по данным геостационарного МИСЗ Meteosat-9 круглосуточно в автоматическом режиме // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. 2010. Т. 7, № 3. С. 16–22.
5. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 5: Азовское море. СПб. : Гидрометиздат, 1991. 235 с.
6. Остроумова Л. П. Определение действительных величин атмосферных осадков по наблюдениям на метеорологических станциях, используемых в водном балансе Северного Каспия // Тр. ГОИН, 2014. Вып. 215. С. 257–276.
7. Kidd C., Levizzani V., Laviola S. Quantitative Precipitation Estimation from Earth Observation Satellites, Rainfall: State of the Science // Geophysical Monograph. 2010. Series 191. P. 127–158.
8. R Core Team, R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing [Электронный ресурс]. Vienna, Austria. 2012. URL: http://www.R-project.org/.
9. Roebeling R. A., Holleman I. SEVIRI rainfall retrieval and validation using weather radar observations // J. Geophys. Res. 2009. Vol. 114. D21202. doi:10.1029/2009JD012102.

УДК 551.515.6

Характеристики мезомасштабных объектов на территории Западной Сибири, восстановленные инструментами ATOVS

Д. А. Жохова[1] (darijazhohova@mail.ru), И. В. Кужевская[1] (ivk@ggf.tsu.ru),
К. Н. Пустовалов[2] (const.pv@yandex.ru)

[1] Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск
[2] Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск

Аннотация. В работе по выявленным датам формирования местных циклонов над территорией Западной Сибири проведено исследование метеорологических характеристик при циклогенезе. В работах наиболее часто рассматриваются мезомасштабные циклоны, образовавшиеся над морской поверхностью, при этом мезомасштабные процессы над равнинными частями континентов, несомненно, не менее важны. Получено, что местные циклоны чаще формируются при циркуляционных условиях нарушения зональности, а восстановленные по данным радиометра ATOVS очаги повышенного влагосодержания соответствуют зонам выпадения ливневых осадков. Индекс неустойчивости атмосферы KI, рассчитанный по восстановленным данным спутникового зондирования, со значениями более 33 °C соответствует зонам, где были зафиксированы грозы.

Ключевые слова: спутниковые зондирование, местные циклоны, конвективная облачность.

Общие сведения

Опасные и особо опасные явления погоды, связанные с интенсивной конвективной деятельностью, отличаются большим многообразием, нередко наносят значительный материальный ущерб. Прогноз образования конвективных явлений, особенно мезомасштабных объектов, возможен только при использовании радиолокационных методов или методов спутникового зондирования. К таким объектам относятся местные циклоны. Они образуются при сильном прогреве воздуха от подстилающей поверхности, малоразвиты (одна – две изобары у поверхности Земли) и имеют короткий срок существования. Обнаружение мезомасштабных циклонов возможно при наличии метеорологических локаторов, но на данном этапе техническое оснащение МРЛ по территории России имеет редкую сеть. Поэтому актуаль-

но исследование мезомасштабных циклонов с помощью инструментов зондирования, установленных на космических аппаратах.

Мезомасштабные вихри изучают с разных точек зрения. Наиболее используемым является определение из [5]: не фронтальными мезомасштабными вихрями (НМВ) называют циклонические циркуляции в умеренных и высоких широтах с горизонтальными размерами 100–500 км, которые зарождаются и продолжают существовать вне прямой связи с фронтальными системами синоптического масштаба. Горизонтальные размеры НМВ в отдельных случаях могут достигать 1000 км. Время жизни таких вихрей составляет чаще всего 1–2 суток. Их облачные системы могут принимать вил слабо-организованного скопления кучево-дождевых облаков, облачной запятой или семейства облачных спиралей, состоящих из конвективных облаков. Развитие таких циклонов характеризуется очень быстрым падением давления.

Мезомасштабным вихрям соответствуют участки повышенной циклонической завихренности в средней тропосфере и повышенная термическая неустойчивость в нижней тропосфере, возникающая в результате перемещения холодной воздушной массы над теплой подстилающей поверхностью. Часть таких вихрей, особенно с облачной системой в виде запятой, в целом имеют строение сходное со строением фронтального циклона. Некоторые из них обладают существенной осевой симметрией, характерной скорее для тропических циклонов [5].

Большое внимание в современных исследованиях [7; 8; 14; 15; 17; 19] уделяется изучению мезомасштабных циклонов в Арктике, их возникновение над морскими поверхностями, в них предложены новые классификации вихрей, изучены механизмы их образования. Такое внимание связано с тем, что образование мезовихрей сопровождается резким изменением ветра, они приносят резкое ухудшение погоды, способное навредить морской навигации.

В свою очередь, образование мезоциклонов над континентами менее изучено, хотя представляет большой интерес для региональных прогнозов погоды, в частности для Западной Сибири.

В связи с этим целью настоящего исследования является выявление особенностей формирования мезомасштабных циклонов над территорией Западной Сибири.

Материалы и методы исследования

В работе были привлечены данные о вертикальном профиле температуры воздуха и удельной влажности, полученные в Сибирском центре ФГБУ «Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета» [12] на основе измерений комплекса инструментов зондирования атмосферы Advanced TIROS Operational Vertical Sounder (ATOVS) КА 16, 18, 19 серий спутников «NOAA». Данные ATOVS имеют пространственное разрешение 0,25 ° по широте и долготе, для 42 уровней по изобарической высоте от 1050 до 0,1 гПа. Для исследования была использована информация для 20 уровней в слое от 1000 до 100 гПа, который примерно соответствует тропосфере [4].

С помощью пакета MatLab осуществлялось картирование значений:

- удельной влажности (q, г/кг) и
- температуры воздуха (T, °C),
- индекса неустойчивости воздуха (KI, °C).

Индекс вычисляется на основе данных температуры воздуха и температуры точки росы (Td, °C) на уровнях изобарических поверхностей 850, 700 и 500 гПа в соответствии с формулой:

$$KI = T_{850} + Td_{850} - T_{700} + Td_{700} - T_{500.} \quad (1)$$

Значения индекса KI и вероятность возникновения грозы по [10]:

- 0–15 вероятность 0 %;
- 18–19 вероятность 20 %;
- 20–25 вероятность 35 %;
- 26–30 вероятность 50 %;
- 31–35 вероятность 85 %;
- 40 и более вероятность 100 %.

Результаты

Даты образования местных циклонов определены на основе анализа синоптических карт с 2016 по 2017 г. Исследованием возникновения местных циклонов над территорией Западной Сибири занимается ведущий синоптик ФГБУ «Западно-Сибирского УГМС» Е. Л. Тунаев По характеру синоптической ситуации на основе данных приземных синоптических карт в период 1976–2007 гг. им было выделено четыре основных типа циклонических вихрей: первый тип – циклоны, образовавшиеся на волнах фронтальных систем; второй тип – несколько образовавшихся одновременно или поочередно заполняющихся и вновь образующихся циклонов (серия волновых циклонов); третий тип – циклоны, образовавшиеся на вторичных (приземных) фронтах; четвертый тип – другие циклоны [13]. Так же было выявлено, что циклоны, образующиеся над территорией юго-востока Западной Сибири, имеют волновую природу. При волновом процессе на фронте сложно спрогнозировать, произойдет ли углубление ложбины и образование местного циклона на конкретной волне, или она пройдет, не получив достаточного развития. Это самые глубокие, достаточно высокие и долгоживущие циклоны. На практике, образующиеся местные волновые циклоны могут значительно исказить ожидаемое барическое поле, замедлив процесс.

Далее все местные циклоны были разделены в зависимости от продолжительности их жизни: I группа – циклоны с продолжительностью жизни до одних суток; II группа – циклоны, живущие 2–3 дня; III группа – циклоны, продолжительность жизни которых составляет 4–6 дней. Наибольший интерес представляют местные циклоны, которые быстро образуются над территорией Западной Сибири и существуют не более суток. Такие циклоны имеют наибольшую повторяемость (74 %), они менее интенсивные (имеют более высокое, по сравнению с остальными, давление в центре), имеют волновой характер, т. е. могут образоваться на любой волне (сложно оценить предпосылки этого), и достаточно развиты по вертикали [13].

В настоящей работе рассматриваются ситуации, когда наблюдались мезомасштабные местные циклоны в период 2016–2017 гг. За выбранный период произошло формирование 50 местных циклонов. В основном, они отмечались в апреле (7 объектов) и декабре (9) 2016 г., в 2017 г. их формирование происходило более равномерно по 3–4 местных циклонов в месяц.

Нужно отметить, что 2016 г., в целом для территории Российской Федерации был полон чередования температурных аномалий. В апреле 2016 г. аномалия для юга Западной Сибири составила +2 °С, и для целого ряда станций произошло обновление суточных максимумов температуры воздуха. Так, 21 апреля 2016 г. на станциях Новосибирск, Барнаул и Кемерово максимальная температура воздуха превысила свой исторический максимум более чем на 1 °С. Такие условия формировались на фоне аномалий циркуляции атмосферы. Положение высотной фронтальной зоны в апреле 2016 г. значительно отклонялось от климатического и на севере Западной Сибири отклонения составили 10 °. Интенсивность зональной циркуляции в средней тропосфере была меньше нормы, меридиональный перенос был интенсивнее обычного [1].

В декабре 2016 г. циклоническая деятельность в Западной Сибири ослабила северную и западную периферии сибирского максимума (аномалия давления –7 гПа). Площадь, занятая антициклоном, была меньше, чем обычно. Однако, очень активными, в течение всего месяца, оставались его восточные и северо-восточные гребни, которые распространялись далеко на север (аномалия 5 гПа над полуостровом Таймыр). На этом фоне в середине месяца в ряде пунктов были установлены новые рекорды суточного максимума температуры воздуха. На ряде станций суточные максимумы превысили +2 °С. При этом, в декабре 2016 г. отмечалась неустойчивая погода с резкими колебаниями температуры воздуха по территории юга Западной Сибири, температурные контрасты днём могли составлять от –5...–10 до –25... –30 °С. Осадки в виде снега выпадали часто, в отдельные дни было до 9 мм [2].

В июне 2017 г. так же произошло обновление максимумов температуры воздуха за сутки для станций Западной Сибири. В период 15–30 июня 2017 г. в южной половине Западной Сибири наблюдалась аномально жаркая погода: в Новосибирской, Томской, Кемеровской областях, Алтайском крае и Республике Алтай с максимальной температурой 30–34 °С

(в отдельные периоды в Алтайском крае и Республике Алтай 35–37 °С). 21 июня 2017 года на отдельных станциях Новосибирск, Красноярск, Кемерово, Тура было зафиксировано превышение максимальной среднесуточной температуры воздуха на 1 °С и более. Положительные аномалии температуры сформировались здесь под влиянием теплых секторов западносибирских циклонов, смещавшихся на северо-восток, с одной стороны, и антициклональной погоды – с другой. Положение планетарной высотной фронтальной зоны в июне 2017 г. заметно отличалось от климатического. Наибольшие отклонения фронтальной зоны к северу происходили над центральными районами Сибири и в среднем за месяц составили 5–7°[3].

Для подробного представления данных спутникового зондирования, анализа полей влажности и индекса неустойчивости были отобраны случаи образования местных циклонов в эти аномальные месяцы:

- 07.04.16 волновой циклон в ложбине основного циклона, в районе Кокчетава;
- 22.04.16 циклон в ложбине между Курганом и Омском;
- 21.06.17 волновой циклон в ложбине основного циклона между Ивделем и Тобольском.

Для анализа облачности в дни с местными циклонами были использованы материалы сайта EOSDIS Worldview [16]. В облачности рассмотренных циклонов преобладают облака вертикального развития *Cu, Cb, Ci*. Облачность имеет хорошо развитую вихревую структуру.

Облака вертикального развития в теплое время года часто связаны с термической конвекцией. Формированию термической конвекции в пограничном слое атмосферы способствует неравномерный прогрев подстилающей поверхности и неустойчивая вертикальная стратификация атмосферы. В этом случае перегретый объем воздуха начинает подниматься от исходного уровня, его температура падает с высотой медленнее, чем окружающего воздуха, и он оказывается теплее и легче относительно окружающей среды на уровнях выше исходного. Отметим, что для этого в ненасыщенном воздухе вертикальный градиент температуры должен быть больше сухоадиабатического: $\gamma > \gamma_a$, а в насыщенном – больше влажноадиабатического: $\gamma > \gamma_{ва}$ [11]. Индекс KI характеризует степень конвективной неустойчивости воздушной массы, которая необходима для возникновения и развития гроз.

Так, на рис. 1 приведен снимок облачности местного циклона за 07.04.16 г. и результаты 2D-картирования по спутниковым данным температуры воздуха у подстилающей поверхности, удельной влажности воздуха и рассчитанный индекс неустойчивости KI. Этот циклон образовался в районе юга Западной Сибири/северной части Казахстана.

По данным воспроизведения полей видно, что горизонтальный градиент температуры воздуха составил более 20 °С на 1000 км, заметим, что более чем достаточно 5–7 °С/1000 км для формирования циклонических возмущений [9].

По высоте температура воздуха выше 8 °С достигала уровня 700 гПа. «Прогретость» с высотой выше 3 км быстро убывает, только на этой высоте стратификация начинает соответствовать стандартной.

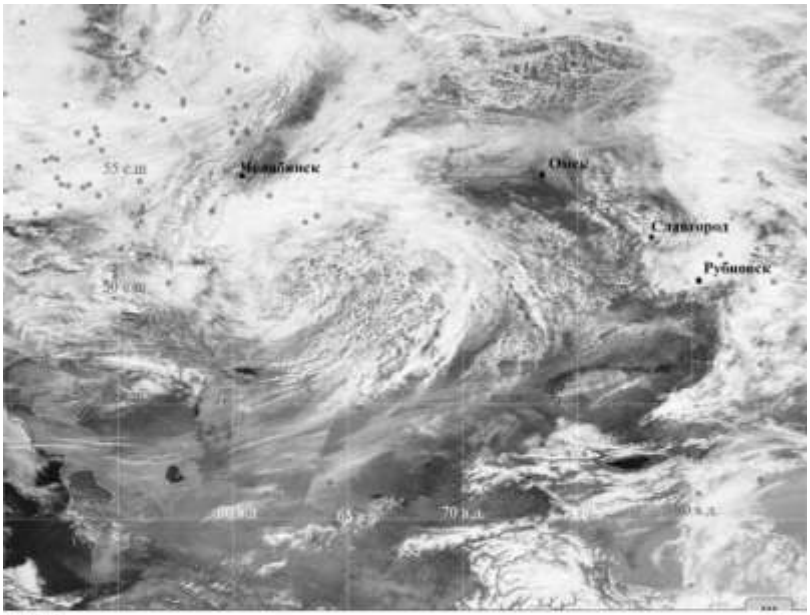
В поле удельной влажности есть замкнутые изограммы, с очагами до 14 г/кг, что говорит о высокой вероятности формирования сильных ливневых осадков [9]. По данным синоптических карт в этих областях отмечались осадки.

В поле неустойчивости, описываемой KI индексом, возможность возникновения грозы в 85 % наблюдается в участках со значениями индекса выше 31 °С, и, действительно, грозы в этих районах отмечались на синоптических картах.

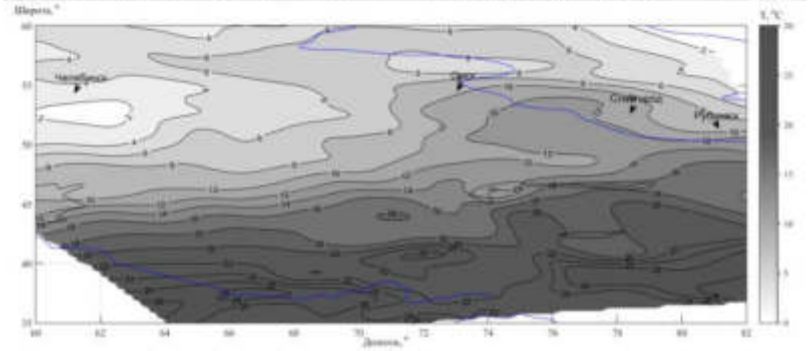
Апрель 2016 г. стал аномальным по температурному режиму, и в конце месяца наблюдалась вторая волна тепла, которая поспособствовала развитию еще одного местного мезоциклона 22.04.16 (рис. 2).

Мезомасштабный циклон, представленный на рис. 2, образовался на юге Омской области. Хорошо выражена завихренность, которая чаще встречается у циклонов тропических широт. Температурный фон, на котором формировался этот циклон (21–22.04.2016) несколько ниже, относительно температурного поля мезоциклона первой волны тепла (07.04.16). Горизонтальный градиент составил 10 °С/1000 км.

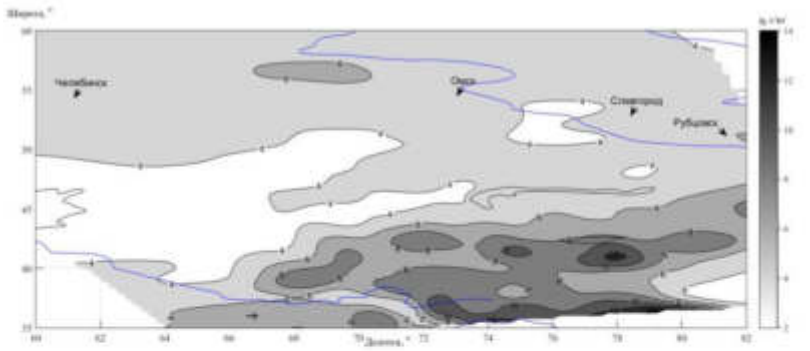
а)



б)



в)



г)

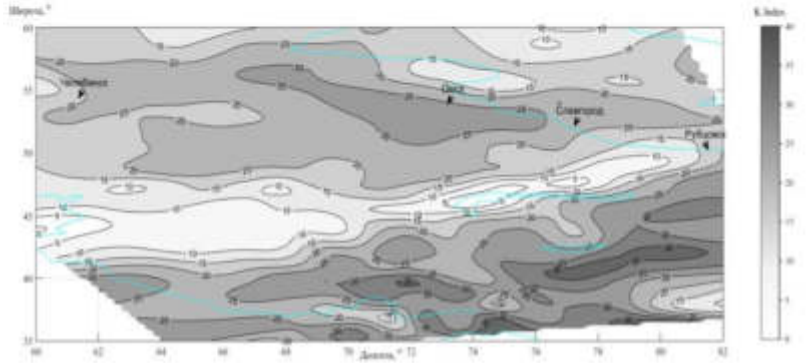
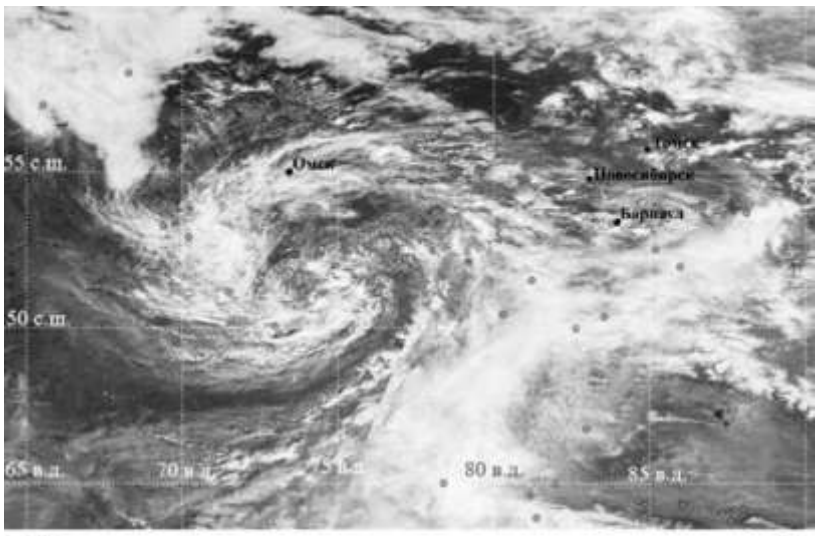
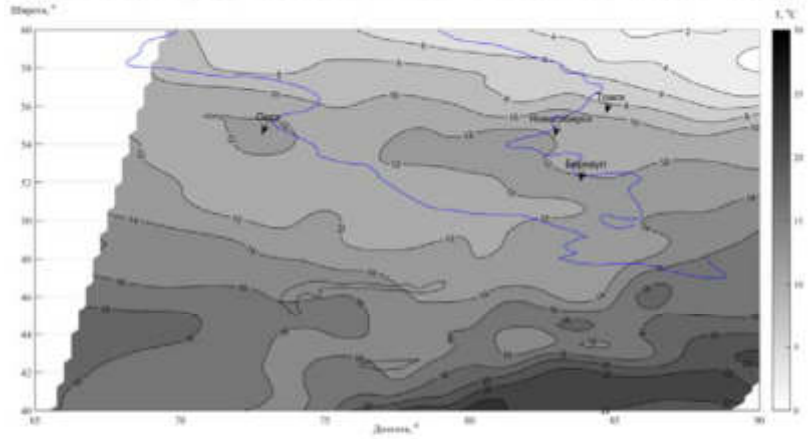


Рис. 1. *а*) Фрагмент монтажа космических RGB-изображений MODIS (композит 1,4,3 каналов) за 05:55 и 07:35 GMT 07.04.2016; контурные карты значений: (*б*) температуры воздуха; (*в*) удельной влажности; (*г*) индекса неустойчивости атмосферы – KI на изобарической высоте 1000 гПа, построенные по данным ATOVS за 09:05 GMT 07.04.2016

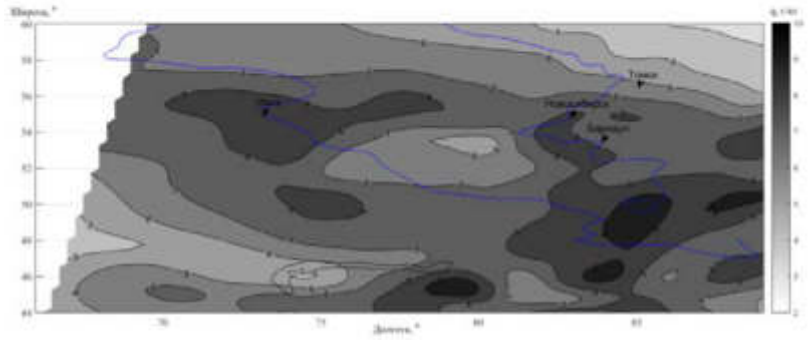
а)



б)



в)



г)

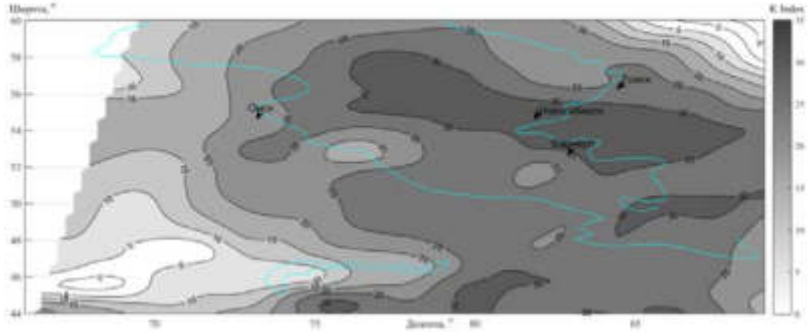
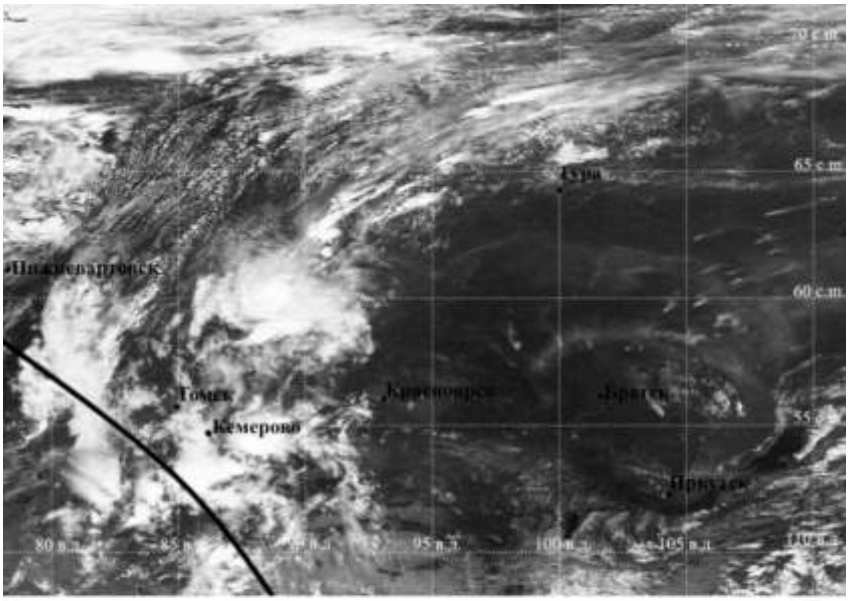
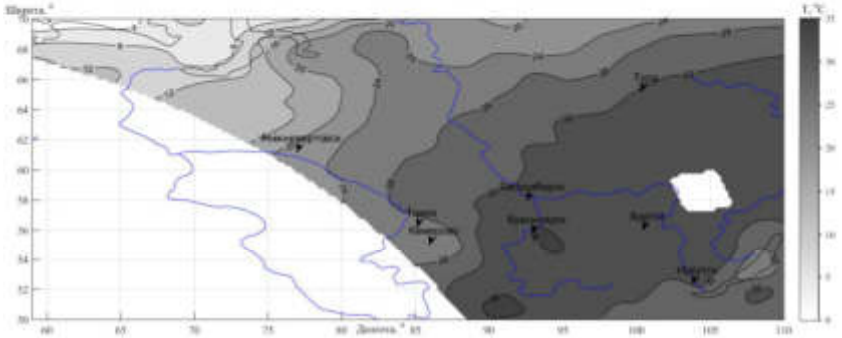


Рис. 2. *а*) Фрагмент монтажа космических RGB-изображений MODIS (композит 1,4,3 каналов за 05:55 и 07:35 GMT 22.04.2016; контурные карты значений: (*б*) температуры воздуха; (*в*) удельной влажности; *г*) индекса неустойчивости атмосферы – KI на изобарической высоте 1000 гПа, построенные по данным ATOVS за 21:50 GMT 22.04.2016

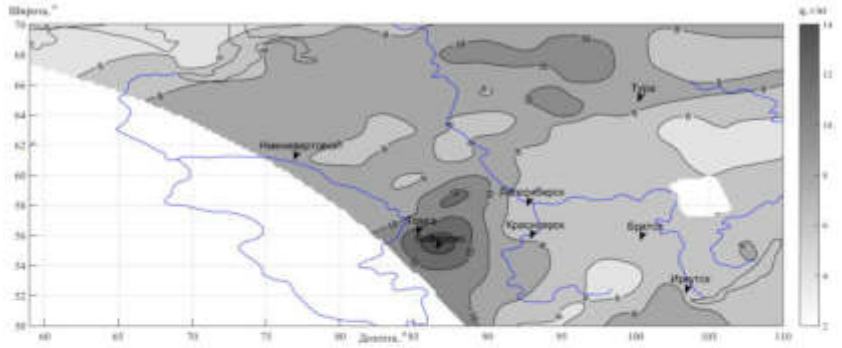
а)



б)



в)



г)

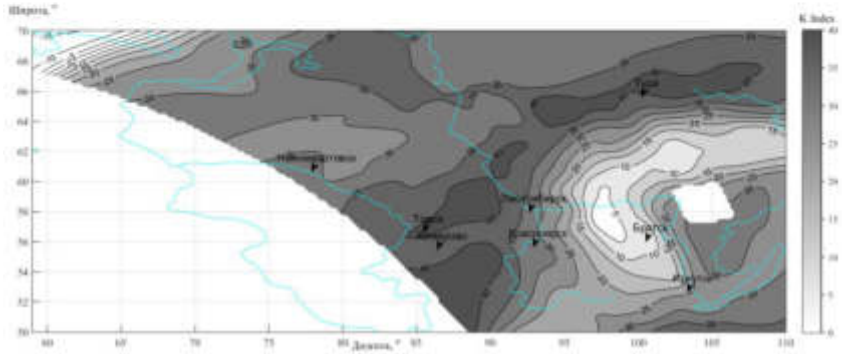


Рис. 3. *а*) Фрагмент монтажа космических RGB-изображений MODIS (композит 1,4,3 каналов за 05:55 и 07:35 GMT 21.06.2017 г.; контурные карты значений (*б*) температуры воздуха, (*в*) удельной влажности, (*г*) индекса неустойчивости атмосферы – Ki на изобарической высоте 1000 гПа, построенные по данным ATOVS за 07:34 GMT 21.06.2017

В поле удельной влажности хорошо прослеживаются очертания этого мезовихря. Но значения удельной влажности достигают всего 10 г/кг, этого также достаточно для формирования сильных ливневых осадков, что подтверждается данными приземной синоптической карты. Значения неустойчивости находились в пределах 20–30 °С, что говорит о меньшей вероятности (до 50 %) возникновения гроз при данной синоптической обстановке, в действительности грозы не наблюдались.

На рисунке 3 представлена ситуация формирования местного циклона, выраженного в облачности как мезомасштабный конвективный комплекс (МКК), проходящий по периферии антициклона, расположенного над Восточной Сибирью.

Скопление кучево-дождевых облаков образовалось в поле приземной температуры 24–30 °С, хорошо выражено в поле удельной влажности, значения которой достигают 14 г/кг. Значения индекса неустойчивости (выше 40 °С) диагностируют образование гроз с вероятностью 99 %, что и отражено в синоптической наноске за это число. Так же видно, что минимальные значения KI (<15 °С) соответствуют антициклоническому полю. Эти результаты хорошо согласуются с данными авторов [6; 18] и подтверждают пороговые значения KI > 32 для идентификации грозовых ситуаций над Западной Сибирью.

Известно, что характер погоды в тыловой (западной) части антициклона может быть самым различным. В одних случаях наблюдается сухая жаркая погода, в других – погода с ливнями и грозами над значительными территориями. Неодинаковый характер погоды объясняется различными воздушными массами, наблюдающимися летом при такой синоптической ситуации. Особенно при возрастании влажности воздуха, как у земли, так и на высотах (относительная влажность 70–80 % или D ≤ 1–3 °С) и уменьшении адвекции теплого воздуха с высотой [11].

Заключение

В ходе проделанной работы были выявлены следующие особенности формирования мезомасштабных циклонов над территорией Западной Сибири:

- местные циклоны чаще проявляются при циркуляционных условиях нарушения зонального переноса.
- восстановленные поля удельной влажности хорошо согласуются с областями выпадения ливневых осадков.
- использование данных спутникового зондирования дают более наглядное (полное) представление при оценке неустойчивости атмосферы, чем данные аэрологического зондирования, так как можно посмотреть распределение неустойчивости по площади, а не только в одной точке.

Исследование будет продолжено для выявления характеристик пороговых значений с целью дальнейшей детализации физических параметров при местном циклогенезе.

Список литературы

1. *Бережная Т. В., Голубев А. Д., Паршина Л. Н.* Аномальные гидрометеорологические явления на территории Российской Федерации в апреле 2016 г. // Метеорология и гидрология. 2016. № 7. С. 118–126.

2. *Бережная Т. В., Голубев А. Д., Паршина Л. Н.* Аномальные гидрометеорологические явления на территории Российской Федерации в декабре 2016 г. // Метеорология и гидрология. 2017. № 3. С. 134–141.

3. *Бережная Т. В., Голубев А. Д., Паршина Л. Н.* Аномальные гидрометеорологические явления на территории Российской Федерации в июне 2017 г. // Метеорология и гидрология. 2017. № 9. С. 128–139.

4. Вельтищев Н. Ф. Мезометеорология и краткосрочное прогнозирование. Сборник лекций : пособие для самостоят. раб. студентов. Л. : Гидрометеоиздат, 1988. 136 с.

5. Вельтищев Н. Ф., Степаненко В. М. Мезометеорологические процессы. М. : Геогр. фак. МГУ, 2007. 127 с.

6. Термодинамические условия формирования мезомасштабной конвекции в атмосфере Западной Сибири / В. П. Горбатенко, Д. А. Константинова, О. И. Золотухина, Е. Л. Тунаев // Изв. вузов. Физика. 2011. Т. 54, № 11/3. С. 148–155.

7. Гурвич И. А., Пичугин М. К. Исследование сравнительных характеристик типичных мезомасштабных циклонов над дальневосточными морями на основе спутникового мультисенсорного зондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10, № 1. С. 51–59.

8. Особенности формирования и классификации штормовых мезомасштабных вихрей / Е. В. Заболотских, Л. П. Бобылев, А. В. Дикинис, Л. О. Неелова, Ю. Е. Смирнова // Учен. зап. РГГМУ. 2010. № 16. С. 59–76.

9. Зверев А. С. Синоптическая метеорология : учеб. пособие. Л. : Гидрометеоиздат, 1957. 558 с.

10. Индекс неустойчивости [Электронный ресурс]. URL: http://weather.uwyo.edu (дата обращения: 05.12.2017).

11. Назаренко А. В. Опасные природные явления. Ч. 3: Опасные явления погоды конвективного происхождения : учеб.-метод. пособие. Воронеж : Издат.-полиграф. центр Воронеж. гос. ун-та, 2008. 62 с.

12. НИЦ Планета [Электронный ресурс]. URL: http://www.rcpod.ru (дата обращения: 27.11.2017).

13. Тунаев Е. Л., Горбатенко В. П., Поднебесных Н. В. Особенности циклогенеза над территорией Западной Сибири за период 1976–2015 гг. // Тр. Гидрометеорол. науч.-исслед. центра РФ. 2017. № 364. С. 81–92.

14. Duncan C. N. A numerical investigation of polar lows // Quart. J. R. Meteorol. Soc. 1977. Vol. 103. P. 255–267.

15. Emanuel K. A., Rotunno R. Polar lows as arctic hurricanes // Tellus. 1989. Vol. 41A. P. 1–17.

16. EOSDIS Worldview [Электронный ресурс]. URL: https://worldview.earthdata.nasa.gov (дата обращения: 27.11.2017).

17. Harold J. M., Bigg G. R., Turner J. Mesocyclone activities over the north-east Atlantic. Part 2: an investigation of causal mechanisms // Int. J. Climatol. 1999. Vol. 19. P. 1283–1299.

18. Konstantinova D. A., Gorbatenko V. P. Threshold values of characteristics of atmosphere instability during thunderstorms // Proc. SPIE 10035, 22nd International Symposium Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 100356Q (November 29, 2016).

19. Noer G., Ovhed M. Forecasting of polar lows in the Norwegian and the Barents Sea // Proc. Ninth meeting of the EGS Polar Lows Working Group, 2003, Cambridge, UK.

УДК 551.582.2

Сравнительный анализ результатов измерения температуры почвогрунтов с использованием атмосферно-почвенного измерительного комплекса и вытяжных термометров

М. В. Киселев[1] (xplutox@yandex.ru), Н. Н. Воропай [1,2] (voropay_nn@mail.ru)

[1] Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск
[2] Институт географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, Иркутск

Аннотация: В работе рассматривается температурный режим минеральных почв на метеостанции Тунка (Республика Бурятия) в период с 1 апреля 2013 г. по 1 апреля 2016 г. Было проведено сравнение данных, полученных при помощи атмосферно-почвенного измерительного комплекса на глубинах 0–320 см, с данными полученными при помощи вытяжных глубинно-почвенных термометров. Получены высокие значения коэффициента корреляции 0,9–0,99. Наибольшие отклонения температуре почвы наблюдаются в холодный период, наименьшие в теплый период. Разброс отклонений колеблется в пределах от 3,5 до –1,7 °С. Результаты данной работы позволяют нам говорить о возможности использования атмосферно-почвенного измерительного комплекса для мониторинга температуры минеральных почв.

Ключевые слова: Тункинская котловина, температурный режим минеральных почв, автоматический мониторинг температуры почвы, вытяжные почвенно-глубинные термометры.

Введение

Температура почвы является ключевым фактором, контролирующим многие биотические и абиотические процессы, протекающие в почвах. С температурой почвы связаны скорость и интенсивность почвенных процессов. Большая теплоемкость, медленное накопление энергии и постепенная теплоотдача обеспечивают относительную стабильность температурного режима почвы для роста и развития растений.

Почва, являясь бассейном с постоянно накапливающимся и хранящимся внутри теплом, оказывает влияние на температуру приземного слоя воздуха. Однако такой бассейн на разных участках суши отличается по ряду признаков: составу, растительному покрову, влажности, географическому расположению и т. п. Такие существенные различия могут наблюдаться в рамках одной территории с различными ландшафтами [3].

Необходимость более точного описания климатических, почвенных и других характеристик приводит к необходимости создания сети мониторинга. Существующая метеорологическая сеть не позволяет получить достаточный объем данных для определения особенностей температурного режима различных почв.

Таким образом, необходимо внедрять новое оборудование, которое позволит упростить процесс получения таких данных в ландшафтах, где отсутствуют метеорологические станции или гидрологические посты.

Исследования температурного режима почв проводились на территории метеорологической станции Тунка в Тункинском районе. Тункиский район занимает Саяно-Прибайкальскую часть Республики Бурятия, с севера граница проходит по гольцам Восточного Саяна, с запада по массиву Мунку-Саридак (другое название – Мунку-Сардык), с юга по хребту Хамар-Дабан. Тункинская долина является продолжением Байкальской впадины, она протянулась на 200 км, постепенно поднимаясь до 1200 м над уровнем моря и сужаясь от 30 до 20 км. Площадь 11,8 тыс. км².

Для анализа температурного режима почв горно-котловинных ландшафтов на глубинах от поверхности до 10 м были организованы исследования микроклимата территории с использованием атмосферно-почвенных измерительных комплексов (АПИК).

Атмосферно-почвенный измерительный комплекс (АПИК) предназначен для автоматической регистрации температуры почвы, воздуха и других метеорологических характеристик в заданное время; накопления данных измерений за длительный промежуток времени.

Микроконтроллер (ATMEGA16) через цифровой интерфейс (1-Wire) опрашивает температурные датчики (DS18B20), имеющие заводской уникальный идентификатор, и сохраняет данные в памяти (Flash AT45DB16) с привязкой ко времени измерения. В память логгера также заносятся по желанию: напряжение элемента питания, ток потребления датчиков. В случае заполнения памяти измерения останавливаются.

Технические характеристики прибора:

1. Диапазон рабочих температур блока регистрации, от –40 до + 50 °С
2. Диапазон измеряемых температур, от –55 до +50 °С
3. Абсолютная погрешность измерения температуры, ±0,1 °С
4. Устанавливаемый период измерения, от 2 с до 12 часов [2].

Атмосферно-почвенный измерительный комплекс был запрограммирован на измерения температуры почвы с периодичностью 1 час и установлен на территории метеорологической станции. Температура почвы измеряется от поверхности до глубины 3,2 м. Информация с регистратора считывается, как правило, один-два раза в год.

Возможность устанавливать АПИК в различных почва (минеральные, торфяные), на разных глубинах, с разным количеством датчиков, выбирать шаг регистрации значений от 2 с до 12 часов, проводить круглогодичный мониторинг в труднодоступных местах позволяет успешно и массово интегрировать атмосферно-почвенный измерительный комплекс в различные метеорологические и климатические исследования.

Для подтверждения репрезентативности данных, полученных с использованием атмосферно-почвенного измерительного комплекса, проведен сравнительный анализ рядов данных АПИК и вытяжных почвенно-глубинных термометров на метеостанции Тунка [1] за период наблюдений с 1 апреля 2013 г. по 1 апреля 2016 г. на глубинах от 20 см до 320 см.

Результаты исследования

Анализ результатов был выполнен по среднем суточным данным.

Данные для атмосферно-почвенного измерительного комплекса были усреднены за 24 часа с шагом в один час. Данные для вытяжных глубинно-почвенных термометров на глубинах от 80 до 320 см измеряются один раз в сутки и, следовательно, не усредняются, а данные на глубинах от 20 до 40 см в теплую половину года измеряются в стандартные метеорологические сроки (8 раз в сутки) и, следовательно, были также приведены к средним суточным значениям.

Таким образом, для определения основных различий между приборами нами были рассмотрены коэффициент корреляции и отклонение температуры почвы АПИК от стандартных метеорологических приборов.

Коэффициенты корреляции имеют высокие значение на всех глубинах для каждого месяца (от 0,9 и выше). Но за весь исследуемый период прослеживается несколько аномалий, когда коэффициент корреляции ниже 0,9. Низкие значения были зафиксированы в сентябре на глубине 240 см – 0,66 (2014 г.), 0,69 (2013 г.), 0,83 (2015 г.). В сентябре температура почвы, измеренная при помощи атмосферно-почвенного измерительного комплекса на глубине 240 см, выше в среднем на 0,5 °С. Такие различия наблюдались во все годы. Помимо этого, низкие значения коэффициента корреляции также фиксируются на глубине 320 см и приходятся на апрель-май. Значения коэффициента корреляции в эти месяца изменяется от 0,55 в апреле 2015 г. до –0,06 в апреле 2014 г (табл. 1). Сравнение температуры на этих глубинах в эти периоды показывает отличие в 0,1–0,2 °С. Такие различия в значениях могут быть вызваны механической ошибкой измерения вытяжных термометров (погрешность 0,2 °С). Таким образом, мы считаем, что можно пренебречь низкими значениями коэффициента корреляции ссылаясь на небольшие внутригодовые колебания температуры на глубине 320 см.

Таблица 1

Коэффициенты корреляции температуры почвы между АПИК и вытяжными термометрами в 2015 г.

Глубина, см	20	40	80	120	160	240	320
Январь	0,99	0,96	0,92	0,98	0,99	0,99	0,99
Февраль	0,98	0,98	0,89	0,99	0,98	0,96	0,98
Март	1,00	1,00	1,00	1,00	0,95	0,89	0,96
Апрель	0,99	0,98	1,00	0,98	0,99	0,98	0,55
Май	1,00	1,00	0,99	1,00	0,97	0,94	-0,32
Июнь	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,89	0,98
Июль	0,97	0,98	0,99	0,99	1,00	1,00	1,00
Август	0,99	0,99	0,92	0,93	0,98	1,00	1,00
Сентябрь	1,00	1,00	1,00	1,00	0,98	0,83	0,99
Октябрь	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,93
Ноябрь	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99
Декабрь	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Сравнение температурных кривых, построенных по средним суточным значениям, позволило определить нам участки с наибольшими отклонениями в температуре почвы и участки с наименьшими отклонениями. Так наибольшие отклонения температуры почвы наблюдаются в холодное время года на глубине 20 см и с увеличением глубины сглаживаются. В этот период значение температуры почвы по данным атмосферно-почвенного измерительного комплекса на 1,8–2,0 °С выше, чем температура почвы по данным вытяжных термометров (рис. 1). Различия в значениях температуры почвы уменьшается с переходом от холодного периода к теплому, летом они минимальные (в среднем 0,5–0,8 °С). При этом в начале лета значения температуры почвы, по данным атмосферно-почвенного измерительного комплекса, выше, а в конце лета ниже.

С увеличением глубины наблюдается уменьшение отклонений между АПИК и вытяжными термометрами (рис. 2). Анализ распределения температуры на глубине 160 см показывает, что значения температуры почвы, полученные по данным АПИК больше зимой-весной (на 1,0–1,5 °С) и меньше летом-осенью (на 0,1–0,3 °С).

Таким образом, результаты сравнения измерений температуры почвы с использованием атмосферно-почвенного измерительного комплекса и измерений по вытяжным глубинно-почвенным термометрам подтвердили возможность применения АПИК для исследования температурного режима разных ландшафтах и корректность последующего сравнения полученных данных с данными метеостанции на глубинах 20–320 см.

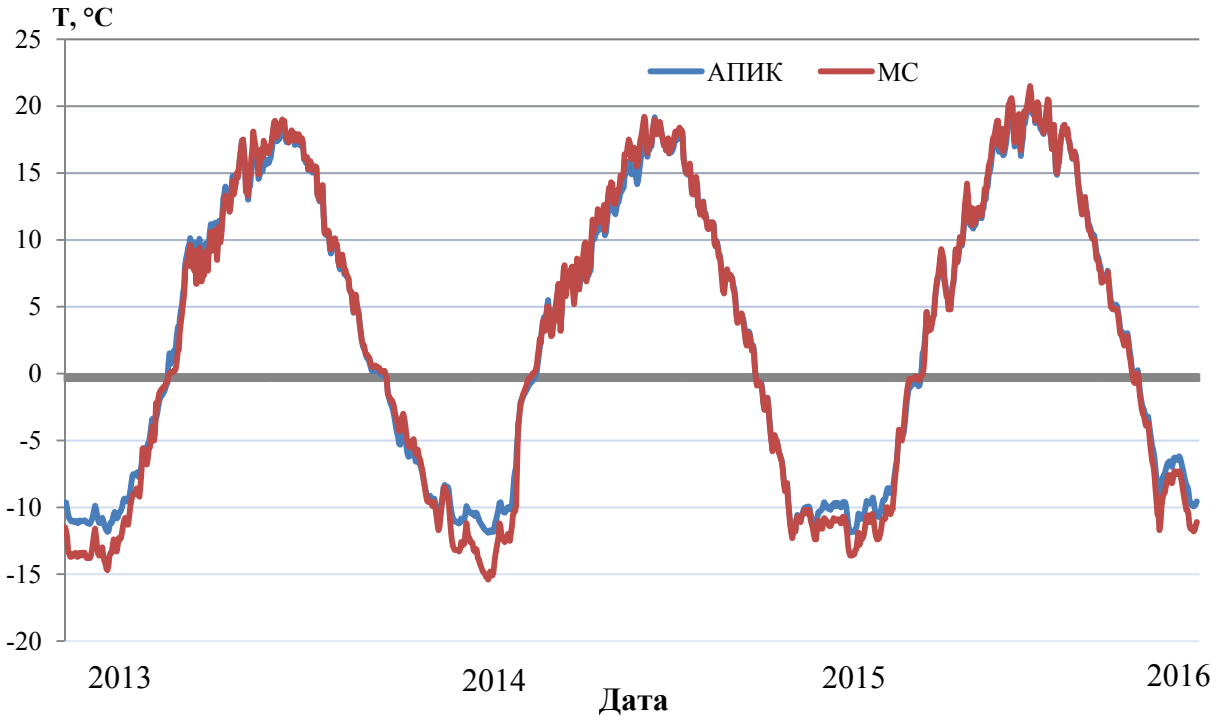


Рис. 1. Годовой ход температуры почвы на глубине 20 см

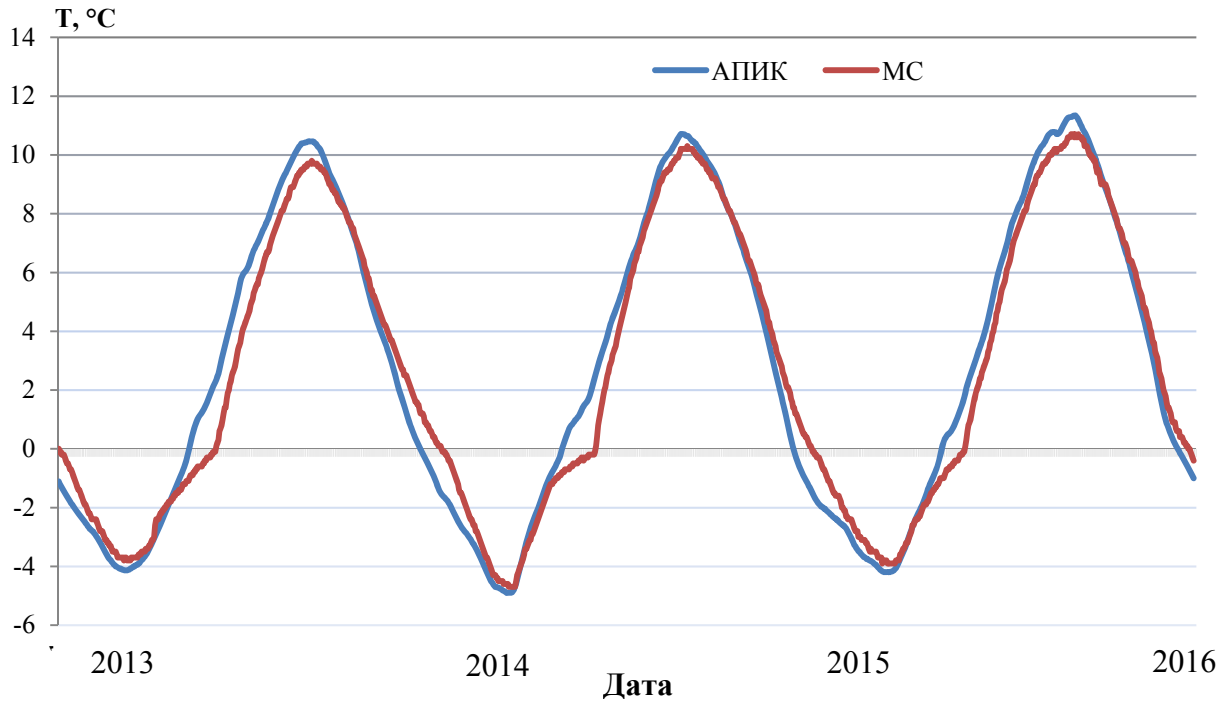


Рис. 2. Годовой ход температуры почвы на глубине 160 см

Список литературы

1. Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – мировой центр данных [Электронный ресурс]. URL: https://meteo.ru.

2. Кураков С. А. Система автономного мониторинга состояния окружающей среды // Датчики и системы. 2012. № 4. С. 29–32.

3. Романов В. В. Гидрофизика болот. Л. : Гидрометеоиздат, 1961. 359 с.

УДК 504.064.36:551.508

Комбинированный агрометеорологический комплекс КАМК

В. А. Корольков[1] (kor@imces.ru), А. А. Тихомиров[1] (tikhomirov.43@mail.ru), А. Е. Тельминов[1] (talexey@sibmail.com), К. П. Пустовалов[1] (const.pv@yandex.ru), Р. В. Мордус[1] (xxxrodionxxx@mail.ru), А. А. Азбукин[2] (lep@imces.ru)

[1] Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск
[2] ООО «Сибаналитприбор», Томск

Аннотация. Представлено описание разрабатываемого агрометеорологического комплекса КАМК. В его состав входит двухуровневая (2 и 10 м) ультразвуковая метеостанция и одноуровневый (2 м) метеопост, которые измеряют в приземном слое атмосферы основные метеорологические величины (температуру, скорость и направление ветра, давление и относительную влажность), а также профили температуры и влажности почвы до глубины 1 метра. Кроме того, электронная метеостанция, размещенная на БПЛА типа гексакоптер, обеспечивает измерение профилей температуры, давления и относительной влажности до высоты 500 м, а также измерение высоты снежного покрова на полях с помощью видеокамеры, установленной на БПЛА.

Ключевые слова: агрометеорологический комплекс, ультразвуковая метеостанция, БПЛА, профили температуры, давления и относительной влажности, уровень снежного покрова.

Введение

В России освещение сельскохозяйственных территорий агрометеорологической информацией осуществляется, главным образом, на основе данных измерений, выполняемых метеостанциями Росгидромета, расстояние между которыми превышает 100 км, что приводит к малой репрезентативности получаемой на них метеорологической информации по отношению к отдельным сельскохозяйственным территориям, особенно в случае пересечённого рельефа местности. Кроме того, даже близлежащие к сельскохозяйственным полям метеостанции, как правило, располагаются в населённых пунктах, что не позволяет в полной мере оценить специфические локальные агрометеорологические условия на этих полях. Наконец, получаемая в ходе стандартных неавтоматизированных измерений метеорологическая информация, имеет недостаточное для ряда агрометеорологических задач временное разрешение (3 часа), а в её состав не входят многие важные для сельского хозяйства параметры состояния атмосферы и почвы. В связи с этим, проблема освещения сельскохозяйственных территорий оперативной и детальной агрометеорологической информацией может быть решена путем размещения на таких территориях современных автоматических агрометеорологических станций и измерительно-вычислительных систем на их основе.

За рубежом выпускаются универсальные автоматические агрометеорологические станции (ААС) фирмами: Delta-T Devices (Великобритания) [6]; Campbell Scientific Inc. [7], (США); Cimel» [8] (Франция); Vaisala [9] (Финляндия) и др. В России разработаны и производятся МК-30 «Агро» (НПО «Тайфун», г. Обнинск) [10] и САА С-АФИ (ГНУ АФИ РАСХН, г. Санкт-Петербург) [4]. Большинство из этих ААС измеряют основные метеорологические величины на одном уровне, что не обеспечивает определение потоков тепла и влаги над почвой.

В соответствии с рекомендациями ВМО [2] важной является также информация о значениях температуры воздуха, влажности и скорости ветра на различных уровнях (от земной поверхности до 10 метров над верхней границей преобладающей растительности), вертикальных градиентах этих параметров, как в толще растительности, так и в прилегающем слое воздуха над ней, турбулентности воздуха в нижнем слое, температуре и влажности почвы на различных глубинах (до 100 см), вертикальном градиенте температуры и влажности в почве. Полный набор отмеченной выше информации не измеряет ни одна из вышеперечисленных автоматических агрометеорологических станций.

Для больших по площади сельскохозяйственных полей, особенно при пересечённой местности и сложном рельефе, целесообразно создание единой измерительно-вычислительной

системы на основе пространственно разнесённых ААС с оптимальным набором датчиков, состав которых зависит от расположения ААС. Необходим также сервер, осуществляющий сбор информации со всех ААС, ее обработку и визуализацию результатов в удобном для аграриев виде.

В статье приведена информация о разработанном в ООО «Сибаналитприбор» и ИМКЭС СО РАН комбинированном агрометеорологическом комплексе КАМК, имеющем расширенные по сравнению с ААС МК-30 «Агро» и САС-АФИ.

Описание комплекса КАМК

Комбинированный метеорологический комплекс предназначен для метеорологического обеспечения сельскохозяйственной деятельности.

КАМК обеспечивает на контролируемой территории измерение первичных метеорологических параметров: скорости и направления ветра; температуры, относительной влажности и атмосферного давления на уровнях 2 и 10 м; температуры и влажности почвы до глубины 100 см; вида, количества и интенсивности осадков; фотосинтетически активной радиации (ФАР), а также: профили температуры воздуха, относительной влажности воздуха и давления в атмосферном пограничном слое в произвольных точках над контролируемой территорией на высотах от 2 до 500 м, высоту снежного покрова на полях (см. рис. 1).

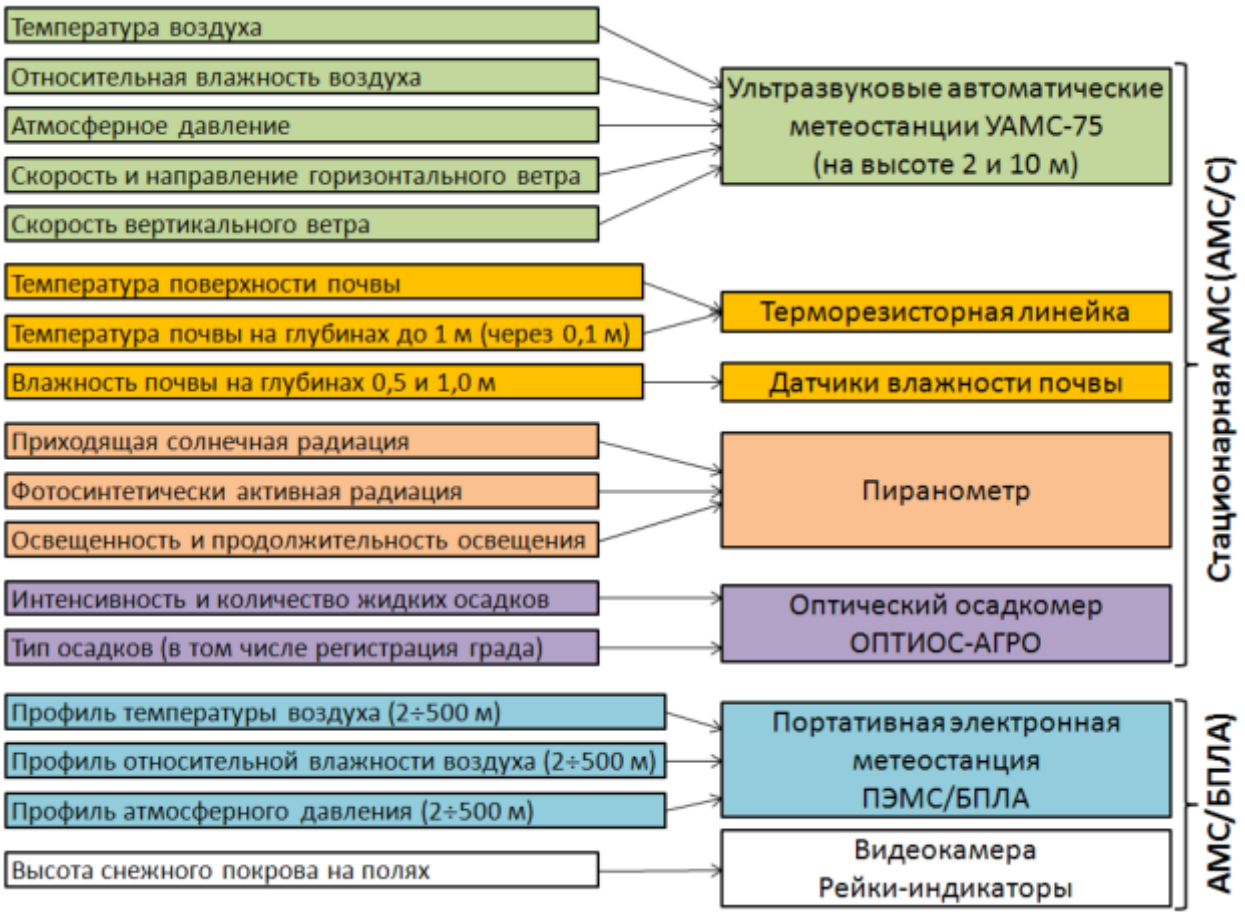


Рис. 1. Метеорологические величины, измеряемые датчиками КАМК

Кроме первичной метеоинформации, измеряемой непосредственно датчиками, КАМК обеспечивает на основе адаптированных известных и новых методов получение вторичной метеорологической информации (на основе первичной), относящейся к списку дополнительных наблюдений [2]. К ней относятся: а) значения вертикального градиента скорости ветра, температуры воздуха и относительной влажности в приземном слое атмосферы от 0 до 30 м;

б) информация о глубине промерзания почвы и глубине распространения биологических минимумов и максимумов температур прорастания семян различных сельскохозяйственных культур, в) информация о начале опасных агрометеорологических явлений, таких как шквал, сильный ветер, суховей, атмосферная и общая засуха, оттепель и заморозки. В дополнение к получаемой обязательной и рекомендуемой агрометеорологической информации, отмеченной выше, КАМК обеспечивает текущий прогноз (наукастинг) с заблаговременностью до 4–6 часов, на основе адаптированных известных и новых методов, возможности возникновения оттепели и заморозков.

В состав КАМК входят два комплекта автоматических метеостанций (АМС): 1) портативная электронная метеостанция (ПЭМС/БПЛА), входящая в комплект АМС/БПЛА и установленная на беспилотном летательном аппарате (БПЛА), и 2) стационарная автоматическая метеостанция (АМС/С), включающая две составные части – автоматическую (двухуровневую) агрометеорологическую станцию (ААС) и автоматический агрометеорологический пост (ААП). Информация, получаемая от метеодатчиков всех АМС, через контроллеры сбора данных (КСД) поступает на систему сбора, усвоения и обработки данных (СУОД) (см. рис. 2).

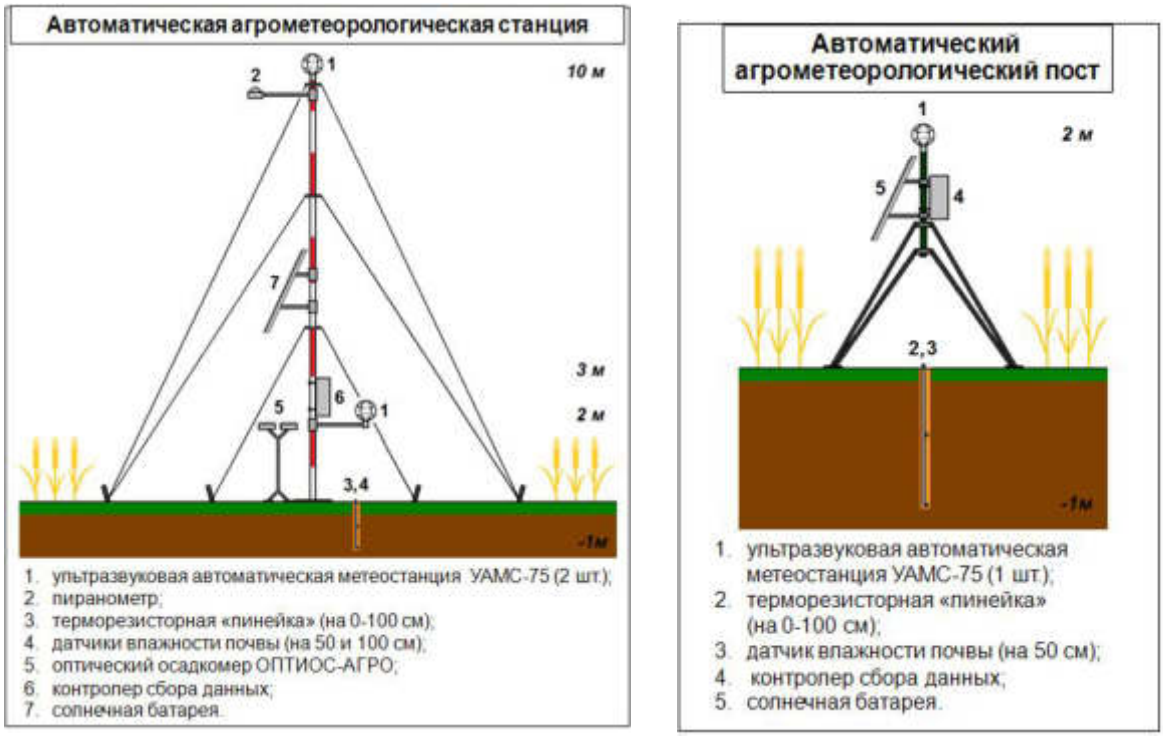


Рис. 2. Структурная схема КМК

На рисунке 3 показаны конфигурация и состав разработанных ААС и ААП.

Вновь разработанные ультразвуковые автоматические метеостанции УАМС-75, входящие в состав ААС и ААП являются модернизированным вариантом УАМС АМК-03 [1] и имеют более жесткую конструкцию и расширенный диапазон измерения температур и скорости ветра. Информация с метеодатчиков ААС и ААП поступает на соответствующие контроллеры сбора данных (КСД) (см. рис. 3) и затем по сети Интернет передается на СУОД.

СУОД обеспечивает получение, сохранение, отображение и выдачу по запросу пользователей данные измерений метеорологической информации, полученной от датчиков, входящих в состав КАМК, а также производит расчеты вторичной метеорологической информации (см. рис. 4).



а *б*

Рис. 3. Конфигурации и состав датчиков, входящих в ААС (*а*) и ААП (*б*)

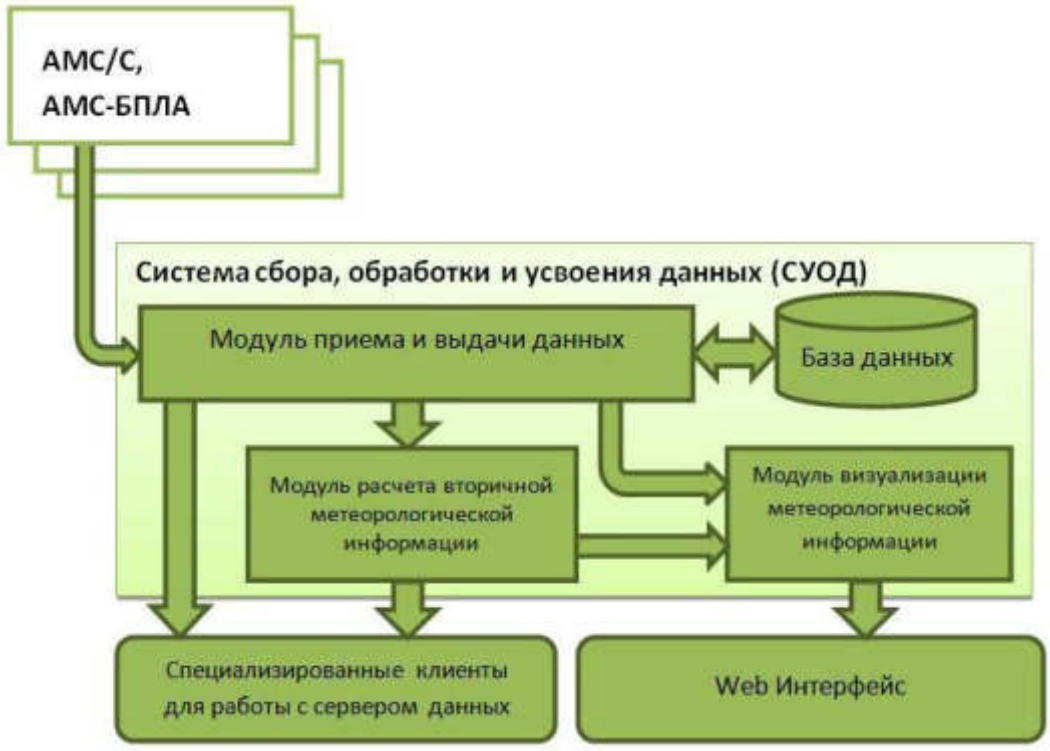


Рис. 4. Общая функциональная схема СУОД

Программные модули, установленные на СУОД, обеспечивают прием и выдачу первичной метеорологической информации, поступающей с датчиков АМС/С и ПЭМС/БПЛА; расчет вторичных метеопараметров: глубины промерзания, глубины распространения биологических минимумов и максимумов температур, вертикального градиента скорости ветра, температуры воздуха, относительной влажности. Также обеспечивается выявление: возможного шквала, суховея, атмосферной засухи, заморозков.

Программное обеспечение КАМК выдает тренд-прогноз на 4–6 часов вперед: температуры воздуха, скорости ветра, влажности воздуха, атмосферного давления [5]. Кроме того, ПО КМК обеспечивает сохранение рядов метеорологической информации в своей базе данных и выдачу полученной и рассчитанной метеорологической информации внешним клиентам-пользователям, имеющим право доступа на ее получение.

Комплекс серверного программного обеспечения СУОД разработан для платформы x86-64 под управлением операционной системы семейства UNIX. В качестве СУБД используется PostgreSQL. Сервер СУОД осуществляет прием информации от КСД через Ethernet соединение с сетью Интернет. Информация поступает по протоколу TCP/IP посредством HTTP пакетов.

Некоторые результаты предварительных натурных измерений

Для проведения предварительных натурных испытаний макет КАМК (прототип ААС в составе УАМС АМК-03, почвенного измерительного комплекса и челночного осадкомера) был поставлен в агрохолдинг ГК «Зеленая долина» на хутор Зоринские Дворы Ивнянского района Белгородской области и с конца июня 2017 г. работал в режиме непрерывных рутинных измерений. На рисунках 5–7 представлены результаты измерений. При этом метеорологическая информация по сети Интернет передавалась на сервер, размещенный в ИМКЭС СО РАН.

На рисунке 5 изображен интерфейс модуля визуализации данных (http://mon.imces.ru), в котором построен график температуры воздуха за период с 15 июля по 21 ноября 2017 г. Интерфейс модуля визуализации (левая часть окна) позволяет выбирать необходимую метеостанцию, анализируемую метеорологическую величину и временной диапазон анализа. На графике этого рисунка виден суточный и месячный ход температуры воздуха. Максимальные дневные температуры в июле-августе достигали +32 °С, минимальные ночные – +12 °С. Со середины сентября наблюдалось постепенное уменьшение максимальных значений дневных температур. При этом ночные минимумы температур в конце сентября приближались к нулю. Из графика видно, что первый переход температуры через ноль был зафиксирован 23.10.2017. Максимальная температура воздуха за указанный период наблюдалась 4 августа и достигала 32,5 °С, а минимальная температура – 23 октября и составила –4,5 °С.

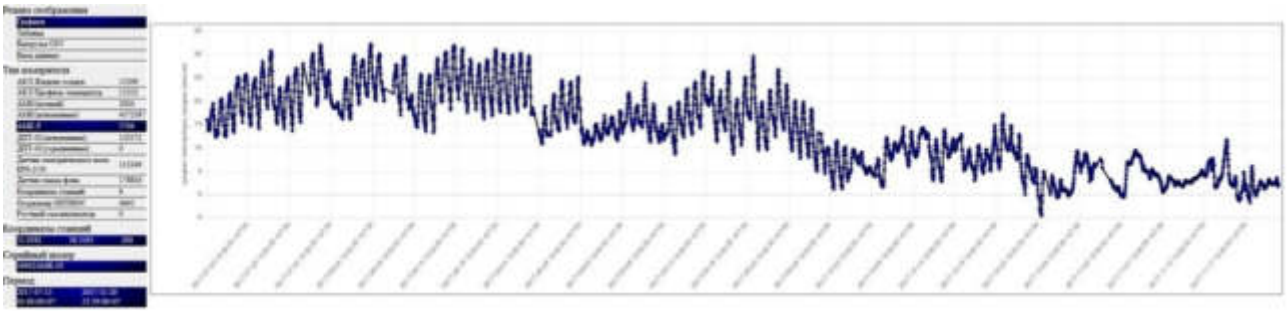


Рис. 5. Пример интерфейса модуля визуализации (http://mon.imces.ru). Сетка по шкале абсцисс проведена через 5 суток

На рисунке 6 представлены метеорологические величины: скорость горизонтального ветра, температура воздуха, относительная влажность воздуха, атмосферное давление, измеренные автоматическим ультразвуковым метеокомплексом АМК-03 (прототип УАМС-75) за период с 15.07.2017 по 15.08.2017. На графиках отчетливо виден суточный ход температуры воздуха, относительной влажности и атмосферного давления. Максимальная температура воздуха за этот период, составляющая 32 °С, наблюдалась 28 июля и 3 августа. В течение рассматриваемого периода, согласно измеренным значениям атмосферного давления и температуры воздуха, отмечалось прохождение трёх циклонов, атмосферным фронтам которого соответствовали усиления средней скорости ветра до значений более 5 м/с, продолжитель-

ные периоды с относительной влажностью 100 % и выпадение ливневых осадков. Основная часть осадков за рассматриваемый период выпала с 27 по 31 июля. Максимальная интенсивность осадков отмечалась 27 июля и составила 5 мм за 30 мин.

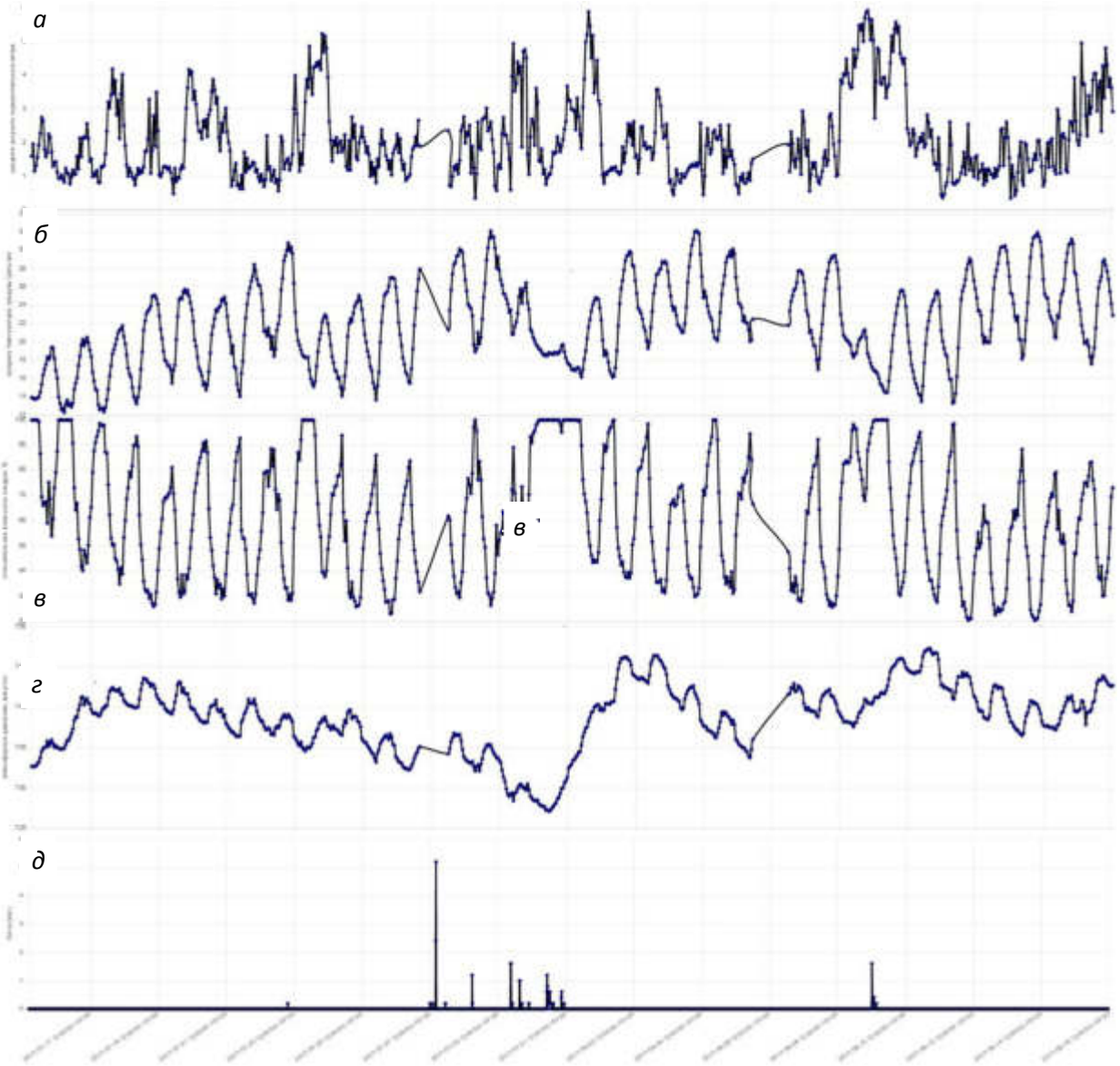


Рис. 6. Результаты измерений АМК-03 за период с 15 июля по 15 августа 2017 г. Сверху вниз представлены графики изменения средне минутных значений скорости горизонтального ветра (*а*), температуры воздуха (*б*), относительной влажности воздуха (*в*), атмосферного давления (*г*) и количества осадков (*д*). Сетка по оси абсцисс проведена через двое суток

На рисунке 7 представлены графики изменения температуры подстилающей поверхности и почвы на различных глубинах за период с 1 по 20 июля 2017 г. Из рисунка видно, что суточный ход температуры почвы отчётливо проявляется на глубине 30 см (с временной задержкой на ~10 часов) и практически исчезает на глубине 50 см. На бóльших глубинах (100 см) суточный ход практически не выражен. В первой половине рассматриваемого периода отмечалось падение температуры почвы, составившее для глубины 30 см более 5 °С. При этом, время наступления минимума температуры почвы сильно запаздывало с глубиной, и на глубине 100 см минимум температуры отмечался на 6 дней позже по сравнению с подстилающей поверхностью.

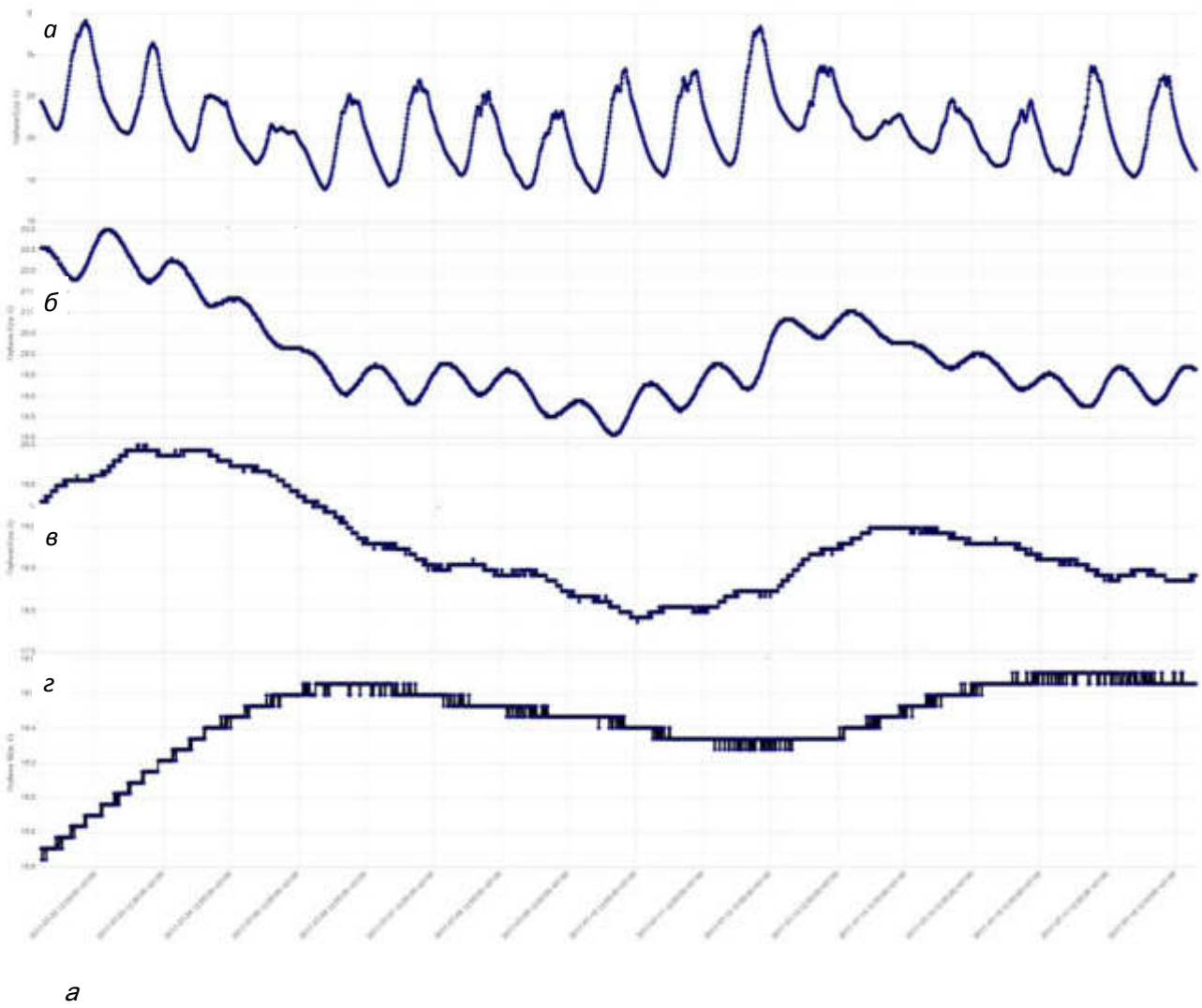


Рис. 7. Изменения температуры на поверхности почвы – глубина 0 см (*а*) и почвы на глубинах 30 (*б*), 50 (*в*) и 100 см (*г*) за период с 1 по 20 июля 2017 г. Сетка по шкале абсцисс проведена через 1 сутки

Проведенные натурные испытания макета КАМК показывают его возможности для проведения агрометеорологических наблюдений.

Заключение

Созданная АМС/С позволяет расширять свою конфигурацию (увеличение числа входящих в нее ААП) и функциональные возможности при использовании дополнительных покупных метеорологических датчиков.

Существенным отличием разработанного комбинированного метеорологического комплекса от МК-30 «Агро» и СААС-АФИ является наличие в КАМК, кроме стационарно устанавливаемых АМС, метеорологических датчиков, размещенных на БПЛА, что обеспечивает измерение вертикальных и горизонтальных профилей основных метеорологических величин на большой пространственной территории. Кроме того, аппаратура АМС/БПЛА обеспечивает визуальный контроль за состоянием сельскохозяйственных площадей и выращиваемых на ней агрокультур, а также измерение уровня снега на полях в зимнее время.

Кроме описанного назначения разработанный КАМК может быть использован для:

– метеорологического обеспечения функционирования объектов транспортной инфраструктуры (аэродромов, морских и речных портов, автомобильных дорог) и специальных объектов (космодромов, временных вертолетных площадок);

– метеорологического обеспечения специальных операций (воздушное и морское десантирование людей и грузов, спасательных операций и т. д.).

Список литературы

1. URL: http://www.delta-t.co.uk/wp-content/uploads/2017/03/Soil_Moisture_Product_ Summary_2017_ver_1.pdf (дата обращения: 11.04.2017).

2. URL: http://www.westernweathergroup.com/pdf/b_weatherstation.pdf (дата обращения: 11.04.2017).

3. URL: http://www.cimel.fr/?weather-station=automatic-agro-weather-station&lang=en (дата обращения: 11.04.2017).

4. URL: http://www.raimet.ru/imgs/db/catalog2_files/file_461.pdf (дата обращения: 11.04.2017).

5. URL: http://www.rpatyphoon.ru/upload/medialibrary/fb3/price2017.pdf (дата обращения: 11.04.2017).

6. Каталог научно-технической продукции. СПб. : ГНУ АФИ Россельхозакадемии, 2010. 71 с.

7. ВМО-№ 544. Наставление по Глобальной системе наблюдений. Т. 1: Глобальные аспекты. Дополнение V к Техническому регламенту ВМО. Женева : Всемир. метеоролог. организация, 2015. 60 с.

8. *Зуев В. В.*, Кураков С. А. Беспилотный измеритель вертикальных профилей метеопараметров в пограничном слое атмосферы // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29, № 8. С. 994–999.

9. Автоматизированный ультразвуковой метеорологический комплекс АМК-03 / А. А. Азбукин, А. Я. Богушевич, В. С. Ильичевский, В. А. Корольков, А. А. Тихомиров, В. Д. Шелевой // Метеорология и гидрология. 2006. № 11. С. 89–97.

10. Региональная информационно-измерительная система для непрерывного мониторинга атмосферного приземного слоя и прогноза опасных метеорологических явлений / А. А. Тихомиров, А. Я. Богушевич, В. А. Корольков, А. А. Кобзев // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2012. № 5. С. 398–405.

УДК 535.311:551.508.77

Оптический осадкомер для решения задачи автоматизации измерения характеристик атмосферных осадков

В. А. Корольков (kor@imces.ru), В. В. Кальчихин (vvk@imces.ru), А. А. Кобзев (alexey-kobzev@mail.ru), А. А. Тихомиров (tikhomirov.43@mail.ru)

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск

Аннотация. Показаны преимущества разработанного оптического осадкомера перед традиционными приборами при решении задачи автоматизации измерения характеристик атмосферных осадков (дождя, снега, града). Представлено описание особенностей измерительной схемы, результаты лабораторных и натурных испытаний опытного образца оптико-электронного измерителя осадков ОПТИОС. Применяемый метод основывается на получении и анализе теневых изображений падающих частиц атмосферных осадков. Приведены схемные и программные решения, обеспечивающие автономность работы прибора и снижающие погрешность измерений параметров осадков. Показана эффективность применения ОПТИОС для измерения интегральных и микроструктурных характеристик дождя, снега и града на примере анализа результатов сравнительных натурных испытаний со стандартным осадкомером О-1 и измерителем осадков челночного типа Davis Rain Collector. Диапазон размеров измеряемых частиц 0,5...10 мм; чувствительность по количеству выпавших осадков не хуже 0,0001 мм; диапазон измеряемой интенсивности дождя от 0...2000 мм/ч; диапазон оцениваемых скоростей падения частиц осадков 0,2...20 м/с.

Ключевые слова: оптический осадкомер, атмосферные осадки, автоматизация измерений.

Введение

Информация о количестве выпадающих атмосферных осадков и их интенсивности имеет существенное значение для ряда отраслей экономики, а также для климатических исследований [3]. В некоторых задачах прикладных исследований [4; 10; 20] также необходимы данные о микроструктурных характеристиках осадков – параметрах отдельных частиц. Среди средств измерений, предназначенных для определения характеристик атмосферных осадков, наиболее перспективными являются приборы, основанные на оптических методах [5; 19]. Они обеспечивают возможность автоматического получения наиболее полной информации о характеристиках атмосферных осадков: времени начала и продолжительности выпадения, их виде (дождь, снег, град), интенсивности и количестве, а также об их микроструктуре. Кроме того, такие приборы должны легко интегрироваться в состав автоматиче-

ских метеорологических комплексов, для расширения их измерительных возможностей. В статье приведено описание разработанного опытного образца оптико-электронного осадкомера ОПТИОС, принцип действия которого основан на анализе теневых изображений отдельных частиц осадков, представлены результаты его лабораторных испытаний и натурных измерений характеристик дождевых и снеговых осадков и их сравнение с традиционными осадкомерами.

1. Метод получения и анализа теневых изображений частиц осадков

Поскольку традиционные осадкомеры, широко применяемые для метеорологических наблюдений, не позволяют получать информацию о микроструктурных характеристиках жидких осадков, для определения этих характеристик используются специальные приборы – дисдрометры [5; 19]. Среди оптических дисдрометров выделяется группа приборов [12; 14; 21], в основе работы которых лежит метод получения и анализа теневых изображений частиц осадков.

Впервые данный метод был предложен Нолленбергом [18] для определения характеристик частиц облаков при самолетных измерениях. Метод основан на том, что падающие частицы осадков пересекают световой поток, формируя при этом тень. Многоэлементный приемник оптического излучения регистрирует изменение освещенности отдельных светочувствительных элементов. Обработка и анализ полученных сигналов позволяет восстановить форму частиц, определить их размеры и скорости перемещения.

Дальнейшее совершенствование источников и приемников оптического излучения, способов и технологий обработки, передачи и хранения информации позволило существенно повысить качество получаемых результатов. Высокая точность измерения микроструктурных характеристик осадков, обеспечивает возможность вычисления интегральных характеристик для жидких осадков – их интенсивности I и количества Q.

Кроме того, подход, основанный на получении функции распределения частиц осадков по эквивалентным диаметрам, обеспечивает определение и других характеристик осадков: концентрации частиц ($м^{-3}$), водности ($г/м^3$), удельной энергии ($Дж/м^2$), удельного сечения ($км^{-1}$), радиолокационной отражаемости ($мм^6/м^3$) [11].

Следует отметить, что рассмотренный метод, предоставляя информацию о размерах и скоростях падения частиц осадков, позволяет определять вид осадков путем сравнения этих параметров с величинами, характерными для данного вида. Известно, что размеры и скорости падения капель дождя имеют взаимно-однозначное соответствие [11], тогда как размеры снежинок и снежных хлопьев варьируются в широких пределах при скоростях падения до 1,5 м/с. Для идентификации града можно воспользоваться функцией распределения частиц по размерам. Несмотря на довольно большой диапазон возможных размеров градин (от одного до нескольких десятков миллиметров), в большинстве случаев распределение градин по размерам может быть описано одновершинной кривой с максимумом в диапазоне диаметров 5–10 мм [11]. Кроме того, градовые частицы, как правило, имеют существенно большую по сравнению с каплями и снежинками терминальную скорость падения, что также может учитываться при определении вида осадков с помощью метода получения и анализа теневых изображений частиц.

2. Оптический осадкомер ОПТИОС

Основываясь на анализе работ [12; 14; 18; 21], а также на результатах собственных разработок [1; 6; 7], нами разработан опытный образец оптико-электронного осадкомера ОПТИОС, внешний вид и схема которого представлены на рис. 1. Для реализации метода получения и анализа теневых изображений частиц осадков плоский горизонтальный световой поток от источника излучения *1*, коллимированный с помощью цилиндрической линзы *2*, направляется на приемник *3* (линейный оптический сенсор, содержащий 768 светочувствительных элементов размером 63,5×63,5 мкм каждый). При этом формируется измерительная площадка прибора (рис. 1, *б*). Размеры последней определяются длиной оптического сенсора и размером открытой части измерительного канала, через которую проходят части-

цы осадков. Пересекая световой поток от источника излучения, падающие частицы вызывают затенение элементов линейного сенсора.

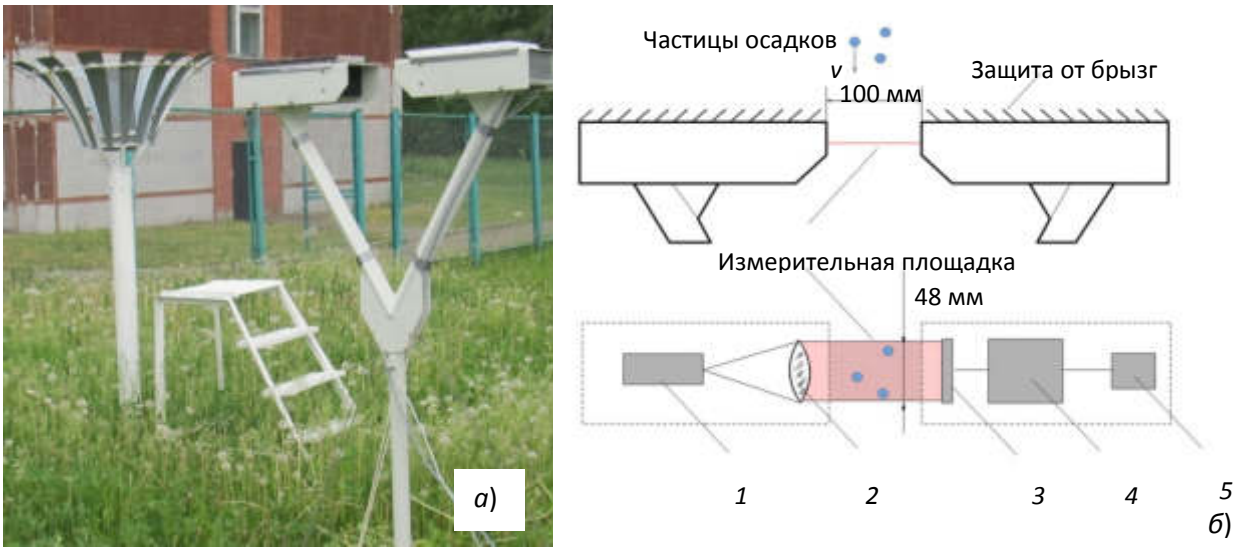


Рис. 1. Оптический осадкомер ОПТОС: *а* – внешний вид прибора рядом со стандартным осадкомером О-1 на метеорологической площадке ИМКЭС СО РАН; *б* – функциональная схема ОПТИОС: *1* – источник оптического излучения; *2* – система оптических линз; *3* – линейный сенсор; *4* – блок формирования измерительной информации; *5* – выходной интерфейс

Высокая частота считывания информации о количестве затененных элементов (порядка 20 кГц) обеспечивает возможность многократного измерения горизонтальных сечений тени каждой частицы по мере ее прохождения через измерительную площадку. Сигнал с выходов линейного сенсора поступает в блок формирования измерительной информации *4*, работающий под управлением встроенного микроконтроллера. После предварительной обработки измерительная информация через выходной интерфейс *5* поступает во внешнее обрабатывающее устройство (персональный компьютер – ПК) для дальнейшей обработки, визуализации и хранения. Число измеренных сечений каждой частицы зависит от скорости ее падения, вертикального размера и частоты сканирования линейного сенсора. На основании анализа размеров сечений каждой частицы восстанавливаются её эквивалентный диаметр и высота, форма, скорость падения, содержащийся в ней объём жидкости и другие параметры. Прибор точно определяет количество частиц, прошедших через измерительную площадку в единицу времени, что позволяет оценивать интенсивность осадков любого вида.

Погрешность измерений, производимых с помощью ОПТИОС, практически не зависит от количества, продолжительности и интенсивности зарегистрированных осадков, а чувствительность по количеству выпавших осадков у него существенно выше, чем у традиционных осадкомеров. Поэтому измерительная площадка такого прибора может иметь существенно меньший размер, чем приемное отверстие стандартного осадкомера. Основными критериями выбора этой величины, определяющими эффективность измерения, являются чувствительность прибора и объем формируемой измерительной информации. Результаты проведенных оценок [7] показали приемлемость выбранного размера площадки – 48 см^2.

Существенное влияние на точность измерений параметров атмосферных осадков оказывает ветровой недоучет осадков (эффект Джевонса), проявляющийся в том, что при ветре количество собранной традиционным осадкомером влаги оказывается заниженным. Это происходит вследствие увеличения скорости воздушного потока непосредственно над приемным отверстием, поскольку при наличии ветра массивный корпус осадкомера существенно влияет на поток воздуха вблизи него. Оптимальным решением проблемы ветрового недоучета является применение конструкции прибора, обеспечивающей формирование виртуаль-

ной измерительной площадки на определенном расстоянии от основных элементов конструкции прибора [7]. Результаты численного моделирования показали [8], что конструкция ОПТИОС и пропорции ее элементов обеспечивают ветровую прозрачность, достаточную для уменьшения погрешности, связанной с ветровым недоучетом.

При эксплуатации прибора может происходить регистрация объектов, не являющихся падающими частицами осадков: брызги осадков, запотевание и изморозь на защитных стеклах, а также насекомые, листья и т. д. Эти помехи приводят к ошибочным результатам, а в некоторых случаях – к сбоям в работе прибора.

Созданная система устранения внешних помех [9], использующая ряд технических и программных решений, обеспечивает повышение автономности работы прибора и увеличение временного интервала между его техническим обслуживанием. Для устранения помех, вызванных погодными явлениями с образованием влаги и ледяного покрытия на поверхности защитных стекол, применена система обогрева. Она включается и отключается автоматически при получении соответствующей информации. Программные решения исключают из анализа объекты, не относящиеся к падающим частицам осадков, путем применения фильтрации. Основными критериями для этого являются размеры объектов и время их нахождения в пределах измерительной площадки.

Разработанное программное обеспечение (ПО), кроме фильтрации измерительных данных, обеспечивает решение ряда других задач, направленных на автоматизацию процесса измерений. ПО состоит из двух программ. Первая программа выполняется в блоке формирования измерительной информации ОПТИОС и осуществляет преобразование сигналов с выходов линейного сенсора в измерительную информацию, первичную фильтрацию данных и их передачу в выходной интерфейс. Вторая программа работает на ПК и осуществляет обработку, корректировку и фильтрацию данных, вычисление параметров отдельных частиц (диаметр, объем, скорость), расчет интегральных характеристик осадков на основе разработанных алгоритмов, визуализацию, а также выдачу измерительной информации и формирование файлов данных.

3. Калибровка и лабораторные испытания ОПТИОС

Важным этапом создания любого средства измерения является установление зависимости между его показаниями и реальным значением измеряемой физической величины. Калибровка ОПТИОС заключалась в проведении процедуры получения значений поправочных коэффициентов, которые необходимо внести в алгоритм расчета суммарного объема жидкости, прошедшей через измерительную площадку.

На первом этапе проведения лабораторных испытаний ОПТИОС [13] измерялись диаметры падающих калиброванных стальных шаров приборных подшипников, выполненных с высокой точностью, в диапазоне диаметров 1÷7 мм. Определение зависимости измеренного размера от местоположения шара в пределах измерительной площадки осуществлялось посредством сравнения измеренных и реальных диаметров шаров. Было выявлено, что погрешность измерения зависит от местоположения шара в поперечном сечении площадки и что существенный вклад в эту погрешность вносится несовершенством оптической системы прибора. Предложенная методика калибровки [13] позволила определить значения поправочных коэффициентов, применение которых обеспечивает относительную однородность результатов измерения диаметров эталонных шаров в разных местах поперечного сечения измерительной площадки. Использование такой процедуры позволяет достичь погрешности измерения размеров частиц, не превышающей 0,1 мм. В дальнейшем была предложена процедура калибровки, усовершенствованная за счет использования вместо шаров непрозрачного стержня, который в вертикальном положении вносится в измерительную площадку и перемещается в горизонтальной плоскости перпендикулярно к направлению светового потока, при этом значения поправочных коэффициентов рассчитываются автоматически с помощью специально разработанного алгоритма [2].

Кроме того, при лабораторных испытаниях [13] оценена погрешность определения количества (объема осадков) путем измерения суммарных объемов серий капель, выпускае-

мых из шприца объемом 1 мл и проходящих через измерительную площадку. Капли, получаемые непосредственно над измерительной плоскостью, имели форму, близкую к шарообразной, поэтому их объем достаточно точно вычислялся по формуле для объема шара. Погрешность измерения суммарного объема всех капель рассчитывалась с учетом абсолютной погрешности первоначального объема шприца. На основании анализа полученных результатов обработки данных, установлено, что погрешность измерения объема выпускаемой жидкости в лабораторных условиях не превышала 5 %.

Таким образом, проведенные лабораторные испытания ОПТИОС позволили уточнить систематические погрешности опытного образца прибора и ввести соответствующие поправочные коэффициенты в программу обработки результатов измерений. По результатам расчетов и испытаний получены следующие технические характеристики ОПТИОС: диапазон размеров регистрируемых частиц 0,5...10 мм; погрешность измерения размеров (D, мм) частиц не более $0{,}033(10 + D)$; диапазон оцениваемых скоростей падения гидрометеоров 0,2...20 м/с; погрешность измерения количества осадков (без учета пространственных вариаций и погрешности, создаваемой ветром) – не более 5 %; диапазон измеряемой интенсивности дождя 0...2000 мм/ч; чувствительность по количеству выпавших осадков – не хуже 0,0001 мм; измерительная площадка – 48 см^2; масса 8 кг; потребляемая мощность (без системы обогрева) – 0,5 Вт; рабочий диапазон температур –20...+60 °С; регистрация дождя, снега, града и смешанных осадков.

4. Результаты натурных испытаний

Натурные испытания опытного образца ОПТИОС выполнялись в течение летне-осеннего сезона 2016 г. на метеорологической площадке ИМКЭС СО РАН (восточная окраина г. Томска). В летний период проводились также сравнительные испытания ОПТИОС со стандартным осадкомером О-1 (с ветровой защитой Третьякова) и челночным осадкомером Davis Rain Collector (RC). Все три прибора были установлены в непосредственной близости друг относительно друга (2–3 м), чтобы уменьшить погрешность, связанную с пространственными вариациями распределения осадков.

Ниже представлены наиболее характерные результаты измерений микроструктурных характеристик (распределение частиц по размерам) осадков различных видов, полученные в период с июня по октябрь 2016 г. и показывающие возможности ОПТИОС. Рисунок 2, *а* иллюстрирует распределение по размерам $N(D)$ капель ливневого дождя, выпавшего 15 июня в период 18:45÷19:20 местного времени. За этот временной интервал зарегистрировано 6–12 капель, прошедших через измерительную площадку прибора. Среднее значение интенсивности дождя составляло 20 мм/ч при максимальной интенсивности порядка 50 мм/ч. Данное распределение может быть описано одновершинной кривой с максимумом в области размера частиц 1–1,5 мм.

На рисунке 2, *б* показано распределение по размеру, полученное для частиц снега, выпавшего 11 октября 2016 г. в период 17:10÷19:16, (зарегистрировано 3637 частиц). Особенностью данного распределения является большое количество снежных частиц в области до 2 мм. Более подробно результаты измерения характеристик снеговых осадков с помощью ОПТИОС описаны в [16].

На рисунке 2, *в* представлено распределение частиц по размерам при осадках в виде дождя, сопровождающегося градом. Данные получены 9 июля 2016 г. в период 18:49÷18:52 (зарегистрировано 1267 частиц). Кривая распределения частиц сохранила форму, характерную для крупных капель дождя с максимумом в области 1,5 мм, при этом она имеет пологое продолжение в область более крупных частиц и не ограничивается диапазоном размеров частиц жидких осадков. Таким образом, ОПТИОС успешно регистрирует осадки, выпадающие в виде града, что хорошо согласуется с оценками, выполненными ранее [15].

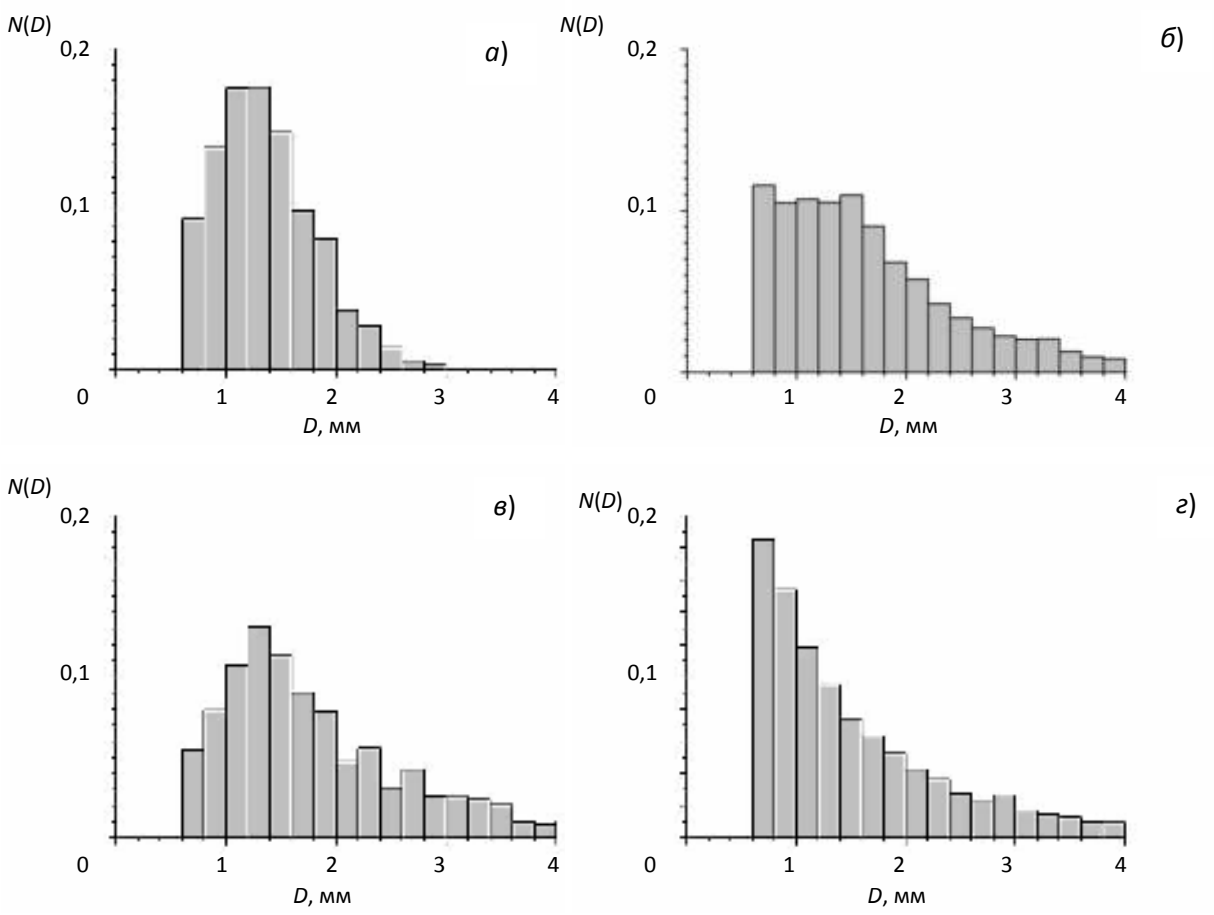


Рис. 2. Измеренные с помощью ОПТИОС распределения частиц осадков по размерам:
а – дождь; *б* – снег; *в* – град и дождь; *г* – мокрый снег

На рисунке 2, *г* представлено распределение *N(D)* для явления (так называемого мокрого снега), которое считается наиболее сложным для автоматического распознавания. Этот вид осадков наблюдается при положительной и близкой к нулевой температуре окружающего воздуха и характеризуется одновременным выпадением снежинок и капель дождя. Результаты получены 10 октября 2016 г. в период 10:00÷12:10 (зарегистрировано 11 534 частицы). Гистограмма представляет собой типичное экспоненциальное распределение с большим количеством мелких частиц и относительно малым – крупных. Распределение частиц осадков по размерам для мокрого снега трудноотличимо от некоторых случаев выпадения ледяных кристаллов и снежных хлопьев. Для повышения достоверности определения вида выпадающих атмосферных осадков необходимо учитывать скорость падения частиц и температуру воздуха. Подробно вопросы, касающиеся оценки скоростей падения частиц осадков рассмотрены в [17].

Пример сравнительного синхронного измерения интенсивности осадков *I* с помощью осадкомеров ОПТИОС и RC представлен на рис. 3, *а*. Результаты получены 15 июня 2016 г., в период 18:45÷19:20. Видно, что временная динамика *I* у измерителей показывает хорошее совпадение. Отклонение значений, полученных ОПТИОС и RC в различных временных интервалах, может быть объяснено меньшим разрешением челночного осадкомера по количеству осадков (0,22 мм), что не позволяет производить с помощью RC точные измерения интенсивности осадков. Поэтому результаты измерений значений *I* для RC и ОПТИОС могут различаться на 25 % и более, в зависимости от выбранного временного интервала. Некоторое несовпадение моментов резкого изменения значений *I* объясняется особенностями алгоритмов осреднения данных, получаемых ОПТИОС, что может приводить к временному сдвигу результатов измерения на величину порядка 10 с.

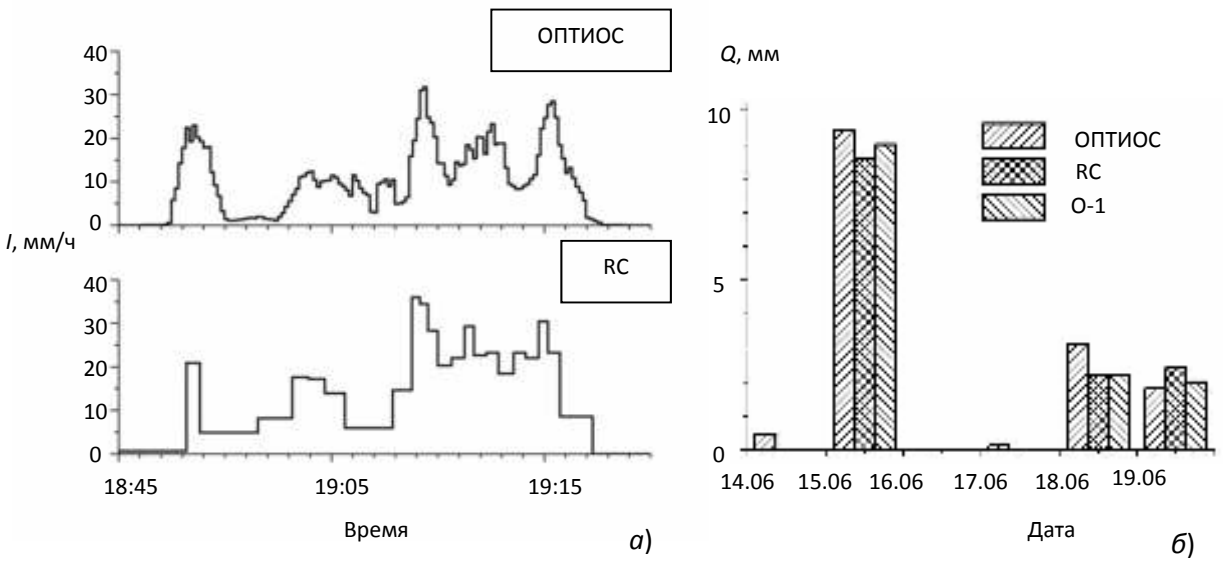


Рис. 3. Сравнение результатов измерения интегральных характеристик:
а – интенсивность осадков ОПТИОС (вверху) и челночного осадкомера RC (внизу);
б – количество осадков, измеренных с помощью ОПТИОС, RC и О-1

Проведено также синхронное измерение количества собранных за сутки осадков Q с помощью ОПТИОС, RC и О-1. Показания О-1 снимались 2 раза в сутки (10:00 и 19:00 местного времени), показания RC и ОПТИОС снимались автоматически при регистрации выпадения осадков. За начало измерений в каждых сутках выбрано время 10:00. На рисунке 3, *б* представлены результаты измерений количества осадков Q за период 14–19 июня 2016 г. Видно, что данные измерений ОПТИОС в целом хорошо согласуются с данными RC и О-1. Анализ данных измерений за 14 июня показал, что за эти сутки осадкомеры RC и О-1 не зарегистрировали осадков. В то же время количество выпавших осадков по данным ОПТИОС составило величину порядка 0,5 мм, что превышает заявленный порог чувствительности стандартных приборов. Возможно, такое малое количество осадков не было зафиксировано из-за погрешностей, связанных со смачиванием и испарением жидкости, поскольку 14 июня температура воздуха установилась в области 25 °С. С помощью ОПТИОС были зарегистрированы также совсем незначительные осадки 16–17 июня. За весь выбранный период количество измеренных осадкомером ОПТИОС осадков составило 14,46 мм, челночным осадкомером RC – 13,86 мм, а стандартным О-1 с ветровой защитой Третьякова – 13,2 мм.

Заключение

Разработанный опытный образец оптико-электронного осадкомера ОПТИОС обеспечивает выполнение долговременных автоматических измерений микроструктурных и интегральных характеристик атмосферных осадков, которые необходимы для решения различных научных и прикладных задач. Применение новых алгоритмов существенно упрощает процедуру калибровки прибора и создает возможность ее автоматизации.

Анализ результатов сравнительных натурных испытаний ОПТИОС совместно с традиционными измерителями О-1 и RC показал их достаточно хорошее совпадение. Полученная погрешность измерения количества жидких осадков, не превышающая 10 % по сравнению со стандартными приборами, и совпадение хода измеренной интенсивности выпадения дождя показывают, что разработанные алгоритмы обработки и фильтрации данных обеспечивают минимизацию случайных ошибок измерений. Вместе с тем, принципиальные различия в применяемых методах измерения не дают возможности для корректного сравнения целого ряда измеряемых параметров (например, для снеговых осадков), что требует применения дополнительных средств измерения.

Оптический осадкомер, представленный в данной работе, требует минимального обслуживания в процессе эксплуатации, обеспечивает оперативное дистанционное получение и

обработку измерительных данных, имеет программные и аппаратные средства автоматического контроля и восстановления работоспособности, предоставляет возможность автоматического определения вида осадков с точностью, сравнимой с точностью визуальных наблюдений. Совокупность этих характеристик позволяет сделать выводы о высоких показателях автономности данного измерителя характеристик атмосферных осадков и перспективности его применения в составе современных информационных систем, предназначенных для автоматического мониторинга и анализа метеовеличин.

Работа выполнена при поддержке Гранта Президента МК-179.2017.5.

Список литературы

1. Оптико-электронный блок измерения параметров атмосферных осадков / А. А. Азбукин, В. В. Кальчихин, А. А. Кобзев, В. А. Корольков, А. А. Тихомиров // Приборы и техника эксперимента. 2013. № 4. С. 140–141.

2. Пат. 2617033 Российская Федерация, МПК G01W 1/14. Способ калибровки оптического измерителя осадков / А. А. Азбукин, В. В. Кальчихин, А. А. Кобзев, В. А. Корольков, А. А. Тихомиров ; заявитель и патентообладатель ИМКЭС СО РАН, ООО «Сибаналитприбор». № 2016108180 ; заявл. 09.03.2016 ; 2017, Бюл. № 11.

3. Безрукова Н. А., Чернокульский А. В. Российские исследования облаков и осадков в 2011–2014 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52, № 5. С. 577–589.

4. Воеводина Л. А. Структура почвы и факторы, изменяющие ее при орошении // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. 2016. № 1 (21). С. 134–154.

5. Приборное обеспечение измерения параметров атмосферных осадков. Современное состояние / В. В. Кальчихин, А. А. Кобзев, В. А. Корольков, А. А. Тихомиров // Изв. вузов. Физика. 2009. № 12. С. 92.

6. Оптико-электронный двухканальный измеритель осадков / В. В. Кальчихин, А. А. Кобзев, В. А. Корольков, А. А. Тихомиров // Оптика атмосферы и океана. 2011. Т. 24, № 11. С. 990–996.

7. К выбору размеров измерительной площади двухканального оптического осадкомера / В. В Кальчихин, А. А. Кобзев, В. А. Корольков, А. А. Тихомиров // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т. 26, № 2. С. 155–159.

8. Кальчихин В. В., Кобзев А. А., Тельминов А. Е. Решение проблемы ветрового недоучета с помощью оптического осадкомера // Высокие технологии в современной науке и технике : сб. науч. тр. II Всерос. науч.-техн. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов с междунар. участием. ТПУ, 2013. Т. 1. С. 328–332.

9. Система устранения внешних естественных помех в измерительном канале оптического осадкомера / В. В. Кальчихин, А. А. Кобзев, И. М. Краснолобов, А. А. Тихомиров // Докл. ТУСУР. 2016. Т. 19, № 2. С. 45–47.

10. Киселев В. Н., Кузенов А. Д. Методы зондирования окружающей среды (атмосферы). СПб. : РГГМУ, 2004. 429 с.

11. Литвинов И. В. Структура атмосферных осадков. Л. : Гидрометеоиздат, 1974. 154 с.

12. Солдаткин Н. П. Оптические приборы и методы контроля микрофизических параметров атмосферных осадков // Региональный мониторинг атмосферы. Ч. 2: Новые приборы и методики измерений. ИОА СО РАН. 1997. С. 217–232.

13. Determination of Calibration Parameters of an Optoelectronic Precipitation Gage / A. A. Azbukin, V. V. Kalchikhin, A. A. Kobzev, V. A. Korolkov, A. A. Tikhomirov // Atmospheric and Oceanic Optics. 2014. Vol. 27, N 5. P. 432–437.

14. An Optical Array Instrument for Shape and Fall Velocity Measurements of Hydrometeors / E. Barthazy, S. Goke, R. Schefold, D. Hogl // J. Atmos. Oceanic Technol. 2004. Vol. 21. P. 1400–1416.

15. Specifics of the hail parameter measurements using the optical precipitation gauge / V. V. Kalchikhin, A. A. Kobzev, V. A. Korolkov, A. A. Tikhomirov // Proc. of SPIE. 2015. Vol. 9680. P. 968038-1-4.

16. Measurement of snow characteristics using optical precipitation gauge / V. V. Kalchikhin, A. A. Kobzev, V. A. Korolkov, A. A. Tikhomirov // Proc. of SPIE. 2016. Vol. 10035. P. 100352W1-4.

17. Determination of the Rate of Fall of Rain Drops in Measurements of Their Parameters by an Optical Rain Gauge / V. V. Kal'chikhin, A. A. Kobzev, V. A. Korol'kov, A. A. Tikhomirov // Measurement Techniques. 2017. Vol. 59, N 11. P. 1175–1180.

18. Knollenberg R. G. The optical array and alternative to scattering or extinction for airborne particle size determination // J. Appl. Meteor. 1970. Vol. 9, N 2. P. 86–103.

19. Michaelides S. C. Precipitation: Advances in Measurement, Estimation and Prediction. Berlin-Heidelberg : Springer-Verlag, 2008. 552 p.

20. Pustovalov K. N., Kobzev A. A., Nagorskiy P. M. Study of atmospheric surface layer electrical processes in case of varying intensity rain // Proc. of SPIE. 2015. Vol. 9680. P. 96806L1-4.

21. Schönhuber M., Lammer G., Randeu W. L. Ch. 1. The 2D-Video-Disdrometer // Precipitation: Advances in Measurement, Estimation and Prediction. Springer-Verlag. 2008. P. 3–32.

УДК 551.508.29

Сравнительный анализ данных измерения температуры воздуха психрометрическим термометром и атмосферно-почвенным измерительным комплексом

П. С. Куракова[1] (kanta465945@gmail.com)
Н. Н. Воропай[2,3] (voropay_nn@mail.ru)

[1] Томский государственный университет, Томск
[2] Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск
[3] Институт географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, Иркутск

Аннотация. Сравниваются данные измерений температуры воздуха метеорологической станции Тунка (Республика Бурятия) и измерений Атмосферно-почвенного измерительного комплекса, изготовленного ИМКЭС СО РАН, стоящего там же. Расчитаны отклонения между измерениями и некоторые статистические характеристики. Проанализированы различия отклонений в разное время.

Ключевые слова. Автоматическое оборудование, метеорологическая станция, сравнение измерений, температура воздуха.

В метеорологии и климатологии важную роль играют наличие и правильность наблюдений и измерений. Измерения даже одной и той же физической величины проводятся разными методами и разным оборудованием. С течением времени появляется новое оборудование и улучшается уже существующее. Возникает вопрос об использовании новых технологий в условиях, в который ранее было невозможно проводить измерения с нужной точностью.

Но каждое оборудование нуждается в оценке правильности измерений. Помимо лабораторных тестов, важно протестировать его работу в реальных условиях.

Целью данной работы было сравнение данных срочных наблюдений за температурой воздуха с метеорологической станции Тунка (Республика Бурятия) [1] и данных, полученных при использовании Атмосферно-почвенного измерительного комплекса (АПИК) [2], установленного на этой же станции (рис. 1) за период 2013–2015 гг.



Рис. 1. АПИК и датчик температуры и влажности воздуха АПИКа

Метод измерения температуры воздуха основан на использовании термометров, которые постоянно установлены в психрометрической будке на высоте 2 м. Влияние радиации на температурный режим термометра исключается радиационной защитой (будкой). Температура термометра определяется по изменению одного из термометрических свойств чувствительного элемента.

В АПИК, который предназначен для долговременного автоматического измерения метеовеличин, используется температурный датчик, установленный на высоте 2 м в пластиковой радиационной защите. Автоматическая специализированная метеостанция позволяет измерять температуру и относительную влажность воздуха, атмосферное давление, скорость и направление ветра, количество осадков, приходящую и отражённую солнечную радиацию, температурный профиль снега, профили температуры и влажность почвы. Комплекс работает автономно в непрерывном режиме.

В температурных зондах используются цифровые датчики DS18B20, точность которых путём калибровки доведена до 0,1 °С.

Измерения температуры воздуха психрометрическим термометром в психрометрической будке производятся раз в три часа, а автоматические измерения производятся каждые 15 минут. Чтобы понять причины отклонений в измерениях разных приборов, было взято четыре срока, записанного АПИК: в момент окончания срока наблюдений (в срок), за 15 и за 30 минут до окончания срока и через 15 минут после окончания срока.

Коэффициенты корреляции между данными метеостанции и данными за все четыре срока АПИКа составляют более 99 %. Максимальная корреляция с данными метеостанции в срок «за 30 мин» (99,9 %). Значение этих коэффициентов говорит о тесной связи.

Для сравнения временных рядов были вычислены отклонения температуры, измеренной датчиком, входящим в АПИК, от данных метеостанции. Средние отклонения во все сроки составили 0,1–0,2 °С.

Наименьшие различия были обнаружены между данными метеостанции и данными АПИК за 30 мин до окончания срока наблюдения на метеостанции. В этот срок оказались минимальными значения абсолютного среднего отклонения (0,5°С), амплитуды и дисперсии (0,6) (рис. 2). Анализ отклонений показал, что в пределах ±1°С оказалось 88 % измерений (рис. 3).

Можно указать ряд основных причин, объясняющих полученные результаты. На метеорологической станции при производстве наблюдений нельзя полностью исключить человеческий фактор, т. е. возможна вероятность грубой ошибки.

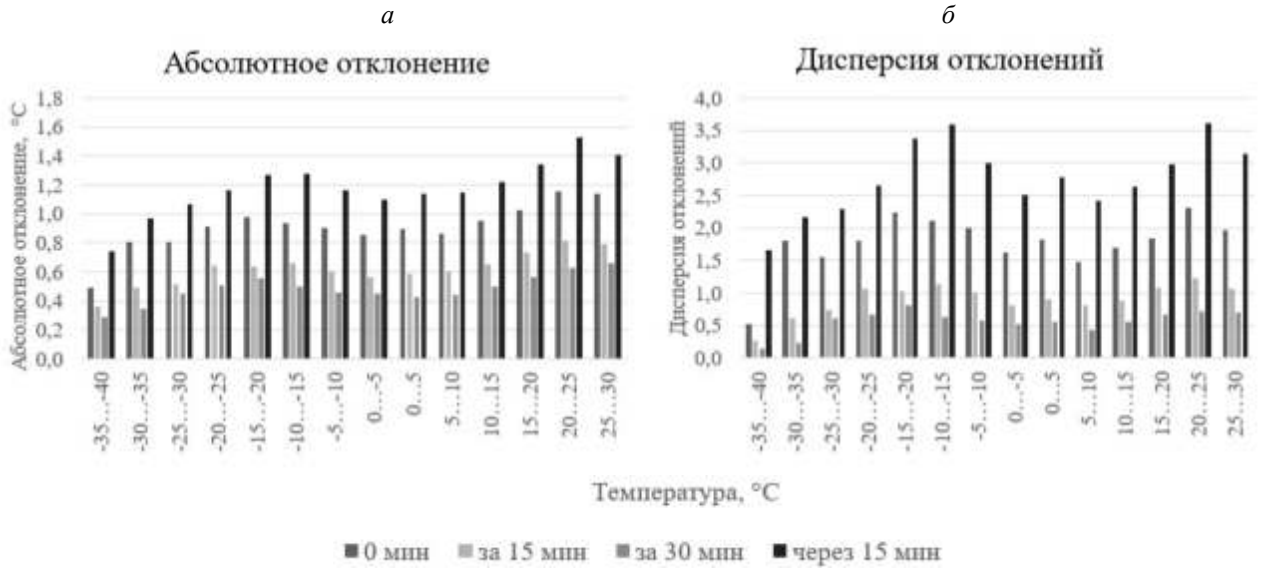
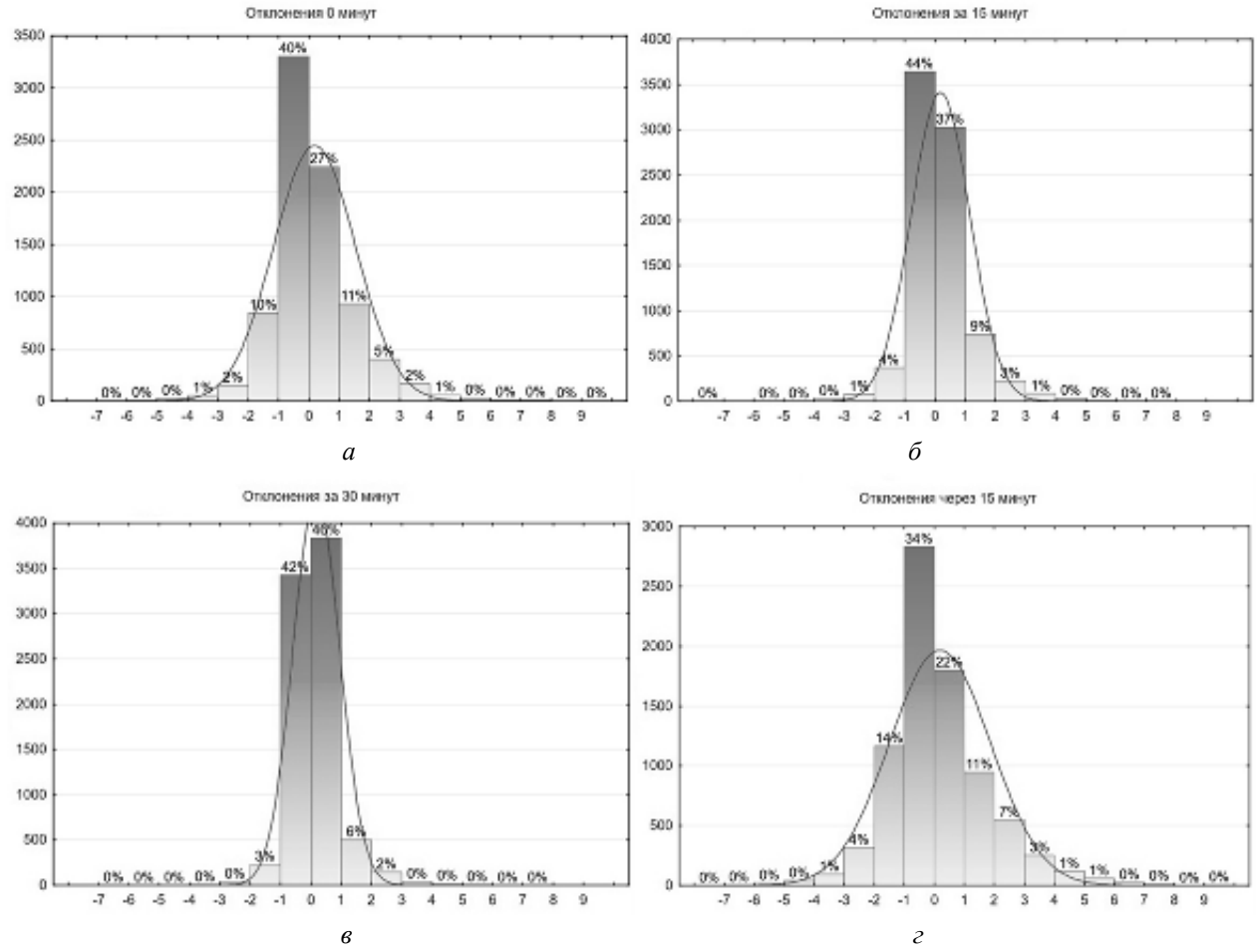


Рис. 2. Абсолютное отклонение (*а*) и дисперсия отклонений (*б*) температуры воздуха, измеренной АПИК от температуры, измеренной психрометрическим термометром на метеостанции



а *б* *в* *г*

Рис. 3. Гистограммы отклонений температуры воздуха «в срок» (*а*), «за 15 мин» (*б*), «за 30 мин» (*в*), «через 15 мин» (*г*)

По сравнению с АПИК психрометрическая будка больше задерживает воздухообмен с окружающей средой из-за её объёмов и строения, особенно это заметно при штиле. Это мешает быстрому реагированию термометра на изменяющиеся условия в атмосфере. Термометр успевает изменить свою температуру от срока к сроку, но получается, что мы измеряем температуру с опозданием, и это может не согласовываться с наблюдаемыми атмосферными явлениями и показаниями других приборов, «успевших» вовремя.

В автоматическом оборудовании для метеостанций радиационную защиту делают пластмассовой. Она чуть хуже защищает от прямой солнечной радиации, но сама конструкция позволяет датчику фиксировать температуру воздуха практически без задержки.

На измерения температуры воздуха также влияет ветер. При сильном ветре воздух хорошо циркулирует в психрометрической будке и в радиационной защите АПИК. Но при штиле циркуляция заметно уменьшается. Так как радиационная защита меньше у АПИК, влияние ветра на него слабее, чем на приборы в психрометрической будке.

Массивная будка препятствует и нагреву воздуха в будке от подстилающей поверхности, что в АПИК практически исключено. Воздух, нагретый подстилающей поверхностью, быстро достигает температурного датчика. По «Наставлению гидрометеорологическим станциями и постам» [3] измерения температуры воздуха осуществляются за 10 минут до окончания срока, то есть измерения температуры на метеостанции должны совпадать с измерением АПИК за 15 минут до окончания срока. С учетом поправки на инерцию наименьшее различие между измерениями должно быть получено при измерении и за 30 минут до окончания срока. Этот вывод был подтвержден в ходе расчетов.

Список литературы

1. *Булыгина О. Н.*, Разуваев В. Н., Александрова Т. М. Описание массива данных суточной температуры воздуха и количества осадков на метеорологических станциях России и бывшего СССР (TTTR) [Электронный ресурс]. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014620942. URL: http://meteo.ru/data/162-temperature-precipitation#описание-массива-данных (дата обращения 21.04.2017).
2. *Кураков С. А.* Система автономного мониторинга состояния окружающей среды // Датчики и системы. 2012. № 4. С. 29–32.
3. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Л. : Гидрометеоиздат, 1985. Вып. 3, ч. 1. 300 с.

УДК 551.5

Верификация показаний автоматического метеорологического комплекса (АМК) и психрометрической пары по данным агрометеорологической станции города Тюмень

П. В. Мальцева[1] (maltsevapolina@rambler.ru),
Л. В. Переладова[2] (LORA-geograf@mail.ru)

[1] Тюменский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды – филиал ФГБУ «Обь-Иртышское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды», Тюмень
[2] ТюмГУ, Тюмень

Аннотация. Приведены результаты верификации показаний температуры и относительной влажности воздуха автоматического метеорологического комплекса и измеренных значений психрометрической пары по агрометеорологической станции города Тюмень, позволяющие упростить работу техника – метеоролога, путем прекращения измерений показаний по психрометру.

Ключевые слова: температура воздуха, относительная влажность воздуха, психрометр, временные ряды, статистические характеристики, погрешность измерений.

Введение

Данные метеорологических наблюдений важны для составления всех видов прогнозов метеорологических условий и предупреждения об ожидаемых неблагоприятных условиях народно-хозяйственных организаций и населения, накопления и обобщения объективных данных о метеорологическом режиме и климате конкретной территории. В целях сравнимости, метеоданные должны обладать достаточной степенью точности и однородностью. Это достигается путём использования однотипных, выверенных, одинаково на всех пунктах установленных приборов, проведением наблюдений по единой методике, в строго определённые сроки и в определённой последовательности. Показания метеорологических приборов не должны зависеть от случайных местных условий. Координацию работы метеослужб разных стран осуществляет Всемирная метеорологическая организация (ВМО).

На агрометеорологической станции Тюмень с 10 июня 2010 г. ведутся параллельные измерения температуры и влажности воздуха с использованием показаний психрометрической пары и автоматического метеорологического комплекса (АМК) с целью проведения верификации показаний и определения возможности упрощения работы техника-метеоролога путем прекращения измерений показаний психрометрической пары.

Станция Тюмень расположена на юго-западе Западно-Сибирской равнины в подтаежной зоне. Широта пункта наблюдений – 57°1', долгота – 65°4', координатный номер 571 654, высота над уровнем моря: барометра – 101,8 м, площадки – 101,0 м. Почтовый адрес: Тюменская область, Тюменский район, п. Московский, ул. Новая, д. 1. Рельеф местности равнинный с небольшими увалами. Главным водным объектом территории исследования является река Тура, протекающая в 8 км к северо-востоку от станции. В том же направлении на

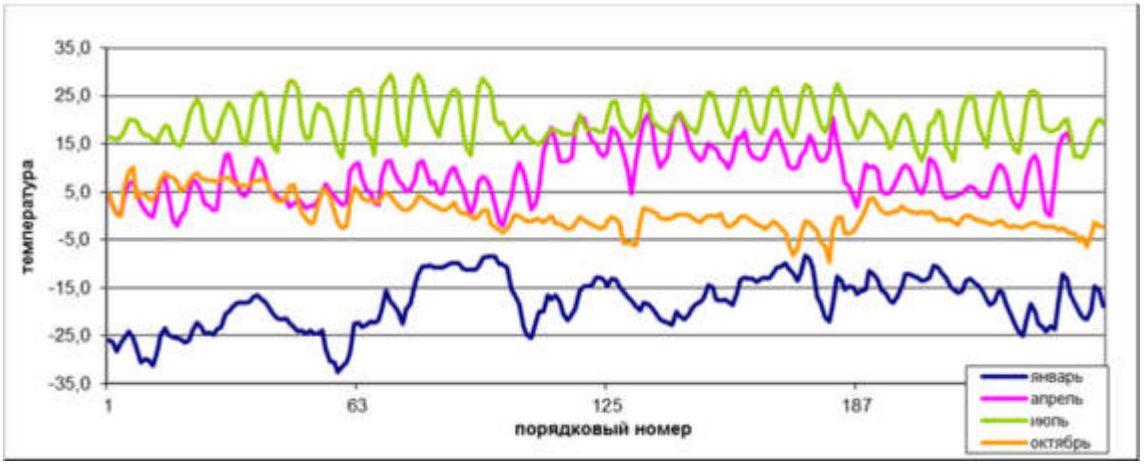
расстоянии 15 км начинаются обширные Тарманские болота. В пятистах метрах к востоко-северо-востоку расположен искусственный водоем (пруд) площадью 1000 м^2.

Методика и результаты исследований

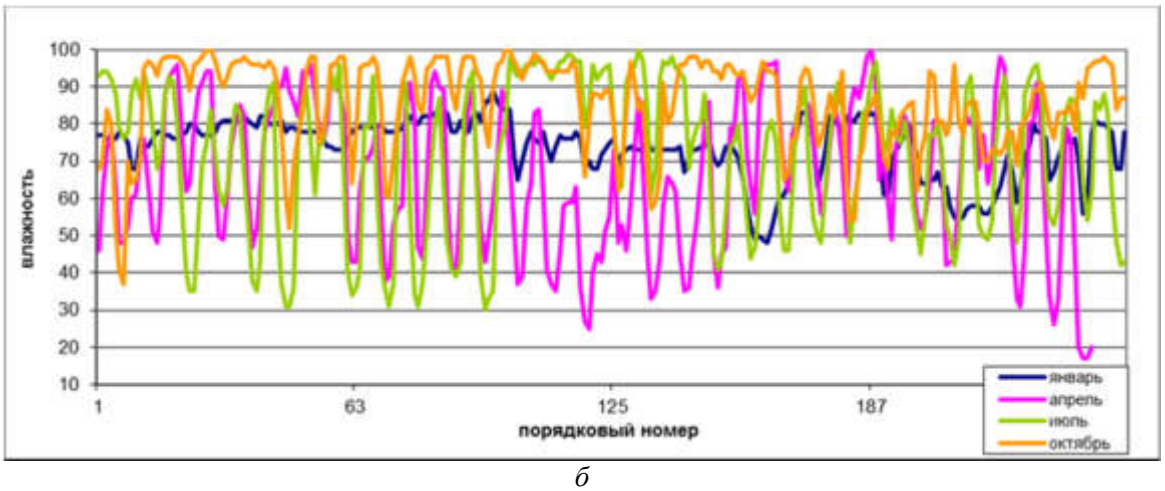
Наблюдения за температурой и влажностью воздуха производились одновременно с помощью психрометра Августа и АМК. В качестве совмещенного датчика температуры и влажности воздуха в составе АМК использован датчик фирмы Vaisala HMP45D с радиационной защитой Vaisala DTR 502. При помощи датчика HMP45D производятся измерения в следующих диапазонах: температура воздуха от –40 до +50 °С; относительная влажность воздуха от 10 до 100 % при температуре от –30 до +50 °С. Согласно [2] наблюдения за температурой и влажностью воздуха производились синхронно в 00, 03, 06, 09, 12, 15 ,18, 21 часов (синоптические сроки) по всемирно скоординированному времени (ВСВ).

Для проведения верификации показаний температуры и относительной влажности воздуха автоматического метеорологического комплекса – АМК и измеренных значений психрометрической пары были собраны данные за четыре месяца 2016 г.: январь, апрель, июль и октябрь. Январь – месяц наинизших температур воздуха в районе исследования, апрель и октябрь – месяцы перехода температур воздуха через точку нуля и июль – месяц наиболее высоких температур. Общее количество обработанных данных составило – 3908 измерений за 4 месяца (8 сроков в сутки, дискретность измерений – 3 часа).

По сформированным временным рядам построены графики сезонных колебаний температур и относительной влажности воздуха за четыре месяца 2016 г. на основании данных, измеренных с помощью психрометрической пары (рис. 1). Каждый временной ряд содержит более 240 значений.



а



б

Рис. 1. Сезонные колебания параметров, измеренных психрометрической парой, за четыре месяца 2016 г.: *а* – температура воздуха; *б* – относительная влажность воздуха

Анализ временных рядов температуры воздуха (рис. 1, *а*) показал, что в теплое время года (апрель, июль) амплитуда суточных колебаний выше, чем в холодное (октябрь, январь). В начале января хорошо прослеживается недельный ход температур, связанный с циклонической деятельностью в зимний период. Для относительной влажности воздуха суточный ход так же наиболее четко выражен в апреле и июле. Суточные колебания значений в этот период достигают 60 %. В октябре он становится менее заметным (диапазон колебаний – порядка 20 %), а в январе практически отсутствует. Высокая относительная влажность воздуха преобладает в октябре, где максимальные значения в отдельные дни достигают 100 %, наиболее низкая – в июле и апреле (рис. 1, *б*). Расчет статистических характеристик подтвердил результаты визуального анализа (табл. 1).

Таблица 1

Статистические характеристики метеорологических параметров

Статистическая характеристика	месяц							
	январь		апрель		июль		октябрь	
	T, °C	f, %	T, °C	f, %	T, °C	f, %	T, °C	f, %
Среднее	-18,2	73,8	8,5	66,4	19,8	71,9	0,71	86,0
Стандартная ошибка	0,35	0,51	0,34	1,27	0,26	1,26	0,23	0,77
Интервал	24,4	41	23	83	17,8	70	19,6	63
Минимум	-32,6	48	-2	17	11,5	30	-9,6	37
Максимум	-8,2	89	21	100	29,3	100	10	100

Далее произведен сравнительный анализ значений температуры и относительной влажности воздуха, измеренных с помощью АМК и психрометрической пары, за выбранные характерные периоды (январь, апрель, июль, октябрь).

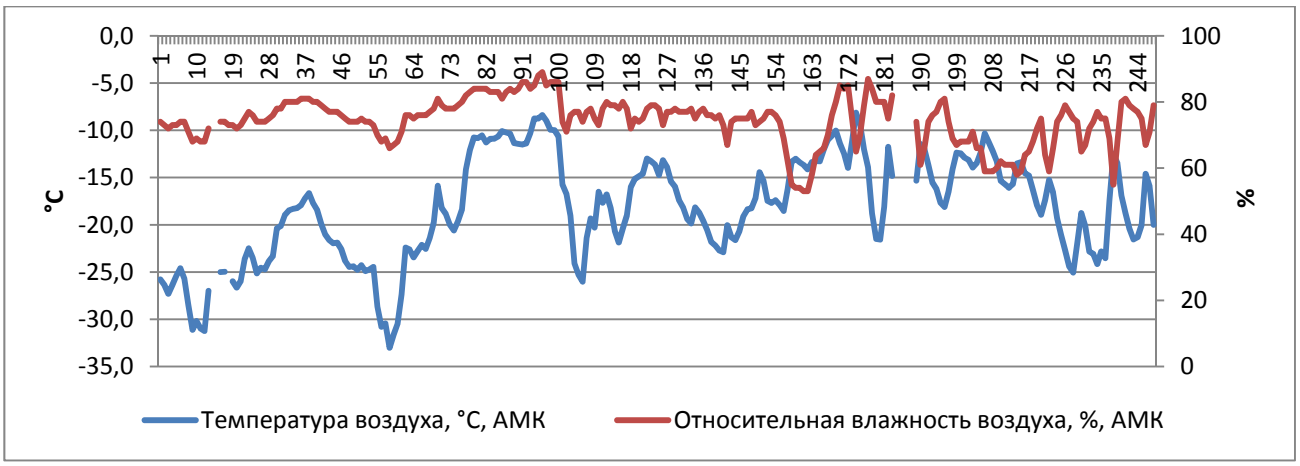
Как видно из рис. 2, в данных за январь 2016 г., измеренных АМК, присутствуют небольшие временные разрывы, связанные с отключением электроэнергии: точки 13 и 181 – 190 (рис. 2). Относительная влажность воздуха в течение всего месяца изменяется не значительно и колеблется около 75 %, вследствие низких температур. Это свидетельствует об устойчивой атмосферной циркуляции.

Статистические параметры данных АМК и психрометра в январе, согласно произведенным расчетам, во многих случаях практически совпали, что свидетельствует о соответствии измеренных данных температуры и относительной влажности воздуха. Относительная влажность в январе 2016 г. изменяется не существенно, ее среднее значение по данным АМК составило 74 %, минимальное – 53 %, максимальное – 89 %, размах вариации – 36 %. Температура воздуха в течение месяца меняется от минус 33,0 °С до минус 8,1 °С. Размах вариации между минимальным и максимальным значениями составил 24,9 °С.

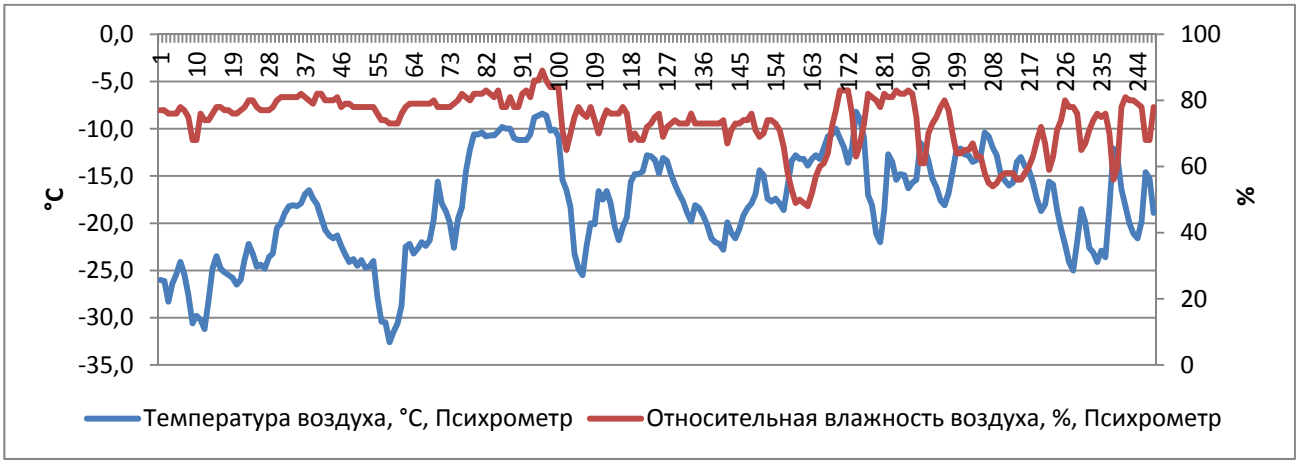
Сравнительный анализ значений температуры и относительной влажности воздуха, измеренных с помощью АМК и психрометрической пары за апрель, показал, что ход метеорологических параметров идентичен (рис. 3). Кроме того, хорошо читается обратная зависимость между температурой и относительной влажностью воздуха.

При построении временных рядов по данным АМК за апрель 2016 г., в показаниях отмечены разрывы (в районе точек 89 и 225) (рис. 3, *б*), что связано с временной неработоспособностью датчика температуры (точка 89) и отключением электрической энергии (точка 225).

Между статистическими параметрами данных АМК и психрометра за апрель наблюдается небольшая разница. Например, среднее значение, стандартная ошибка и медиана по показаниям двух приборов практически одинаковы, а минимальные, максимальные показатели и, соответственно, интервалы отличаются друг от друга. Относительная влажность воздуха в апреле по данным АМК изменяется в пределах от 16 до 95 %, среднее значение составило 63 %. Наблюдается большой размах вариации, который равен 79 %. Температура воздуха по данным АМК изменяется от –2,5 до +21,2 °С. Размах вариации составил 23,7 °С, среднее значение – 8,4 °С.



а



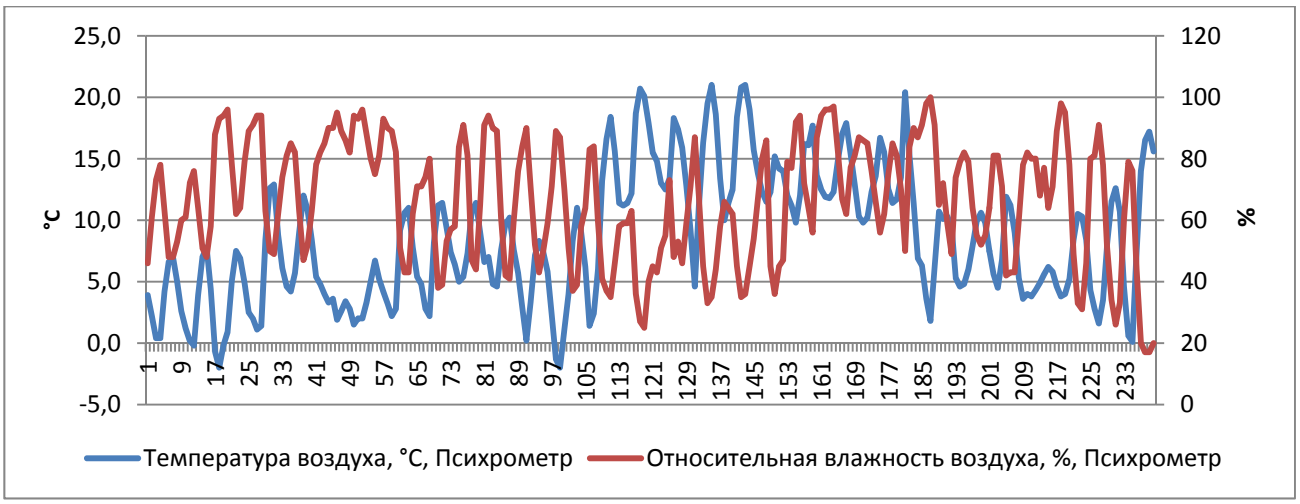
б

Рис. 2. Ход температуры и относительной влажности воздуха в январе:
а – по данным АМК; *б* – по данным психрометрической пары

Статистические характеристики данных АМК и психрометра по температуре практически не отличаются, а в параметрах относительной влажности наблюдаются некоторые различия. Среднее значение, мода и медиана, а также минимальные и максимальные значения и, соответственно, интервалы по данным АМК несколько ниже, чем по данным психрометра. Например, минимальное значение относительной влажности за июль по данным АМК составляет 27 %, а по данным психрометра – 30 %. Максимальное значение относительной влажности по данным АМК – 94 %, а по психрометру – 100 %. По данным АМК среднее значение относительной влажности в июле составило 68 %, размах вариации – 67 %, по данным психрометра – 71,8 и 70 %, соответственно. Температура воздуха изменяется от 11,1 °С до 28,9 °С. Размах вариации при этом составляет 17,8 °С и является наименьшим за весь исследуемый период.

При визуальной оценке временных рядов за октябрь (рис. 5) видно, что температура и относительная влажность воздуха, измеренные по АМК и психрометром, практически совпадают. Пропусков наблюдений по АМК не обнаружено (рис. 5, *а*). Во второй декаде октября значения температуры воздуха становятся ниже 0 °С. Относительная влажность в ночное время суток превышает 90 %.

Рассчитанные статистические параметры по данным АМК и психрометра в октябре практически одинаковы, что говорит о близких значениях измеренных температур и относительной влажности воздуха, которая в октябре 2016 г. в большинстве случаев имеет высокие значения. Ее среднее значение по данным АМК составляет 86 %, минимальное – 34 %, максимальное – 100 %, размах вариации – 66 %. Температура воздуха изменяется от плюс 9,7 °С до минус 10,1 °С. Размах ее вариации составляет 19,8 °С.



а



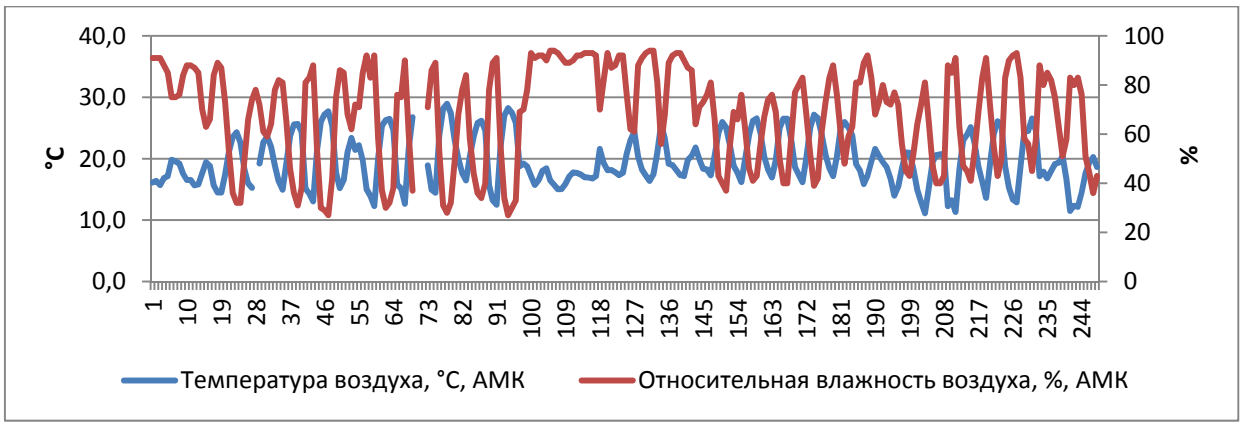
б

Рис. 3. Ход температуры и относительной влажности воздуха в апреле 2016 г.:
а – по данным психрометрической пары; *б* – по данным АМК

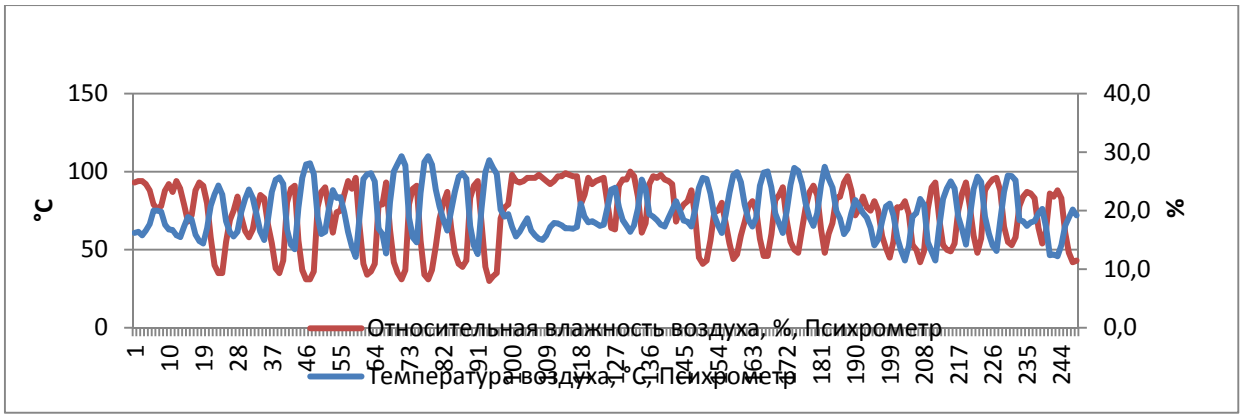
Аналогично ведут себя временные ряды в июле, просматриваются совпадения в изменении параметров (рис. 4). Временные ряды АМК также имеют разрывы в районе точек 28 и 73 (рис. 4, *а*), причины которых были указаны выше.

Для проверки однородности данных [3; 4], полученных по АМК и психрометрической паре, был проведен анализ корреляционной связи между показаниями двух приборов. С помощью пакета Excel рассчитаны коэффициенты корреляции. При анализе результатов расчета выявлено, что самый высокий коэффициент корреляции для значений температуры воздуха наблюдается в январе и октябре и равен 0,997, а самый низкий в июле (0,991). Для значений относительной влажности воздуха самый высокий коэффициент корреляции оказался равен 0,99 и наблюдается в июле, а самый низкий – в январе (0,912). Степень корреляционной связи во всех рассматриваемых случаях можно оценить, пользуясь шкалой Чеддока, как весьма высокую ($0{,}9 < |r_{xy}| < 1$).

С помощью критерия Пирсона проведена оценка значимости коэффициентов корреляции, которая показала, что за каждый исследуемый месяц они оказались значимы. Вследствие того, что все значения коэффициентов корреляции близки к единице и значимы, а связь между исследуемыми параметрами практически функциональна, сделан вывод о том, что данные, полученные по АМК и психрометрической паре, однородны.

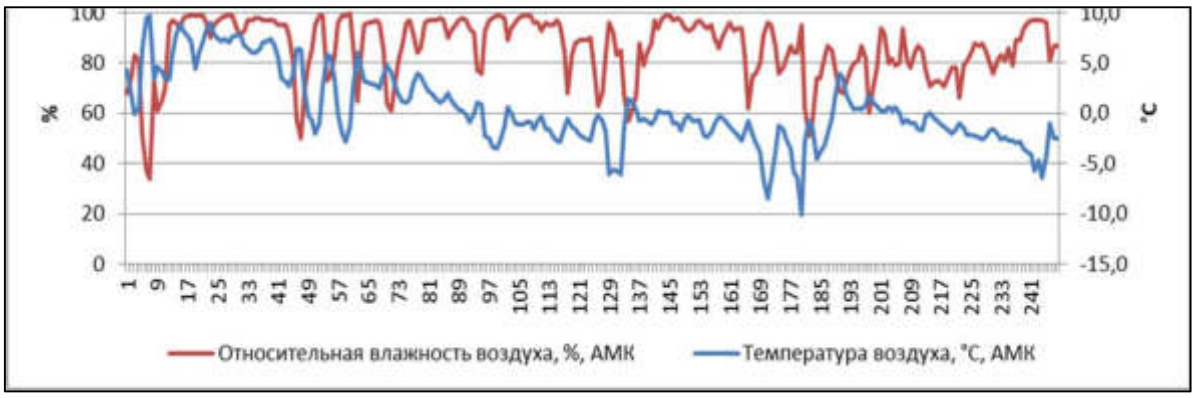


а

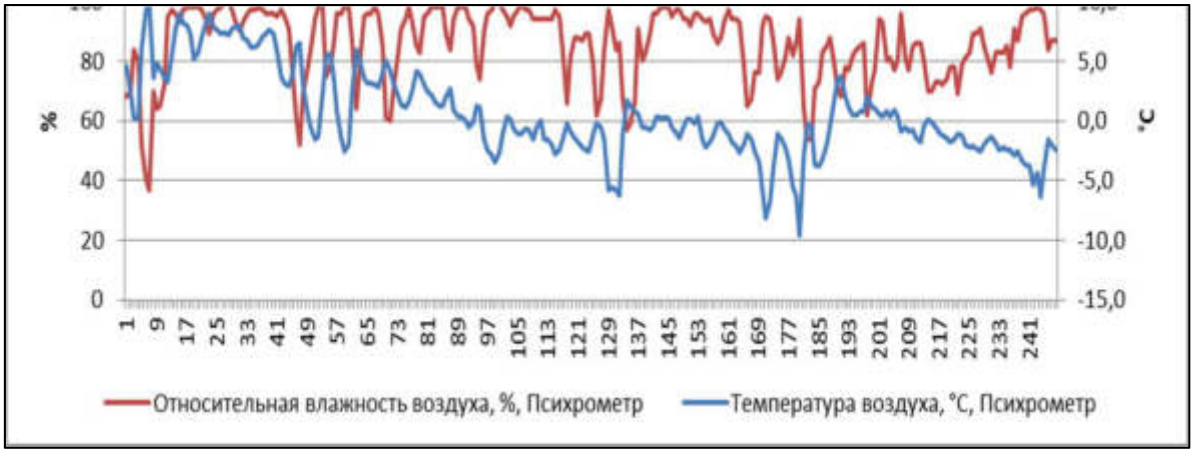


б

Рис. 4. Ход температуры и относительной влажности воздуха в июле 2016 г.:
а – по данным АМК; *б* – по данным психрометрической пары



а



б

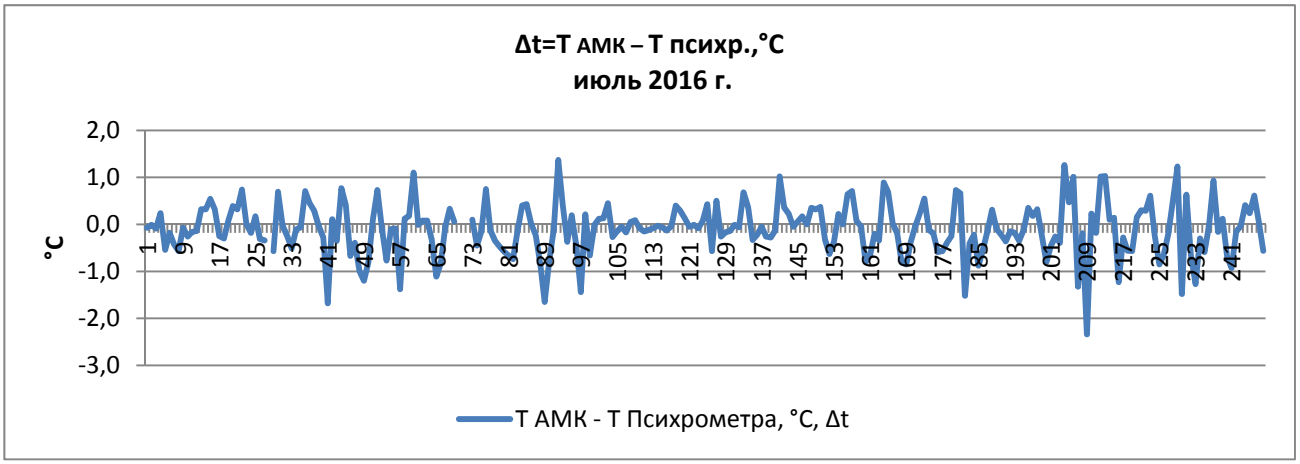
Рис. 5. Ход температуры и относительной влажности воздуха в октябре 2016 г.:
а – по данным АМК; *б* – по данным психрометрической пары

Для выявления разницы в показаниях АМК и психрометра найдены значения разности между данными (Δt, Δf), полученными в одинаковые сроки по формулам 1 и 2:

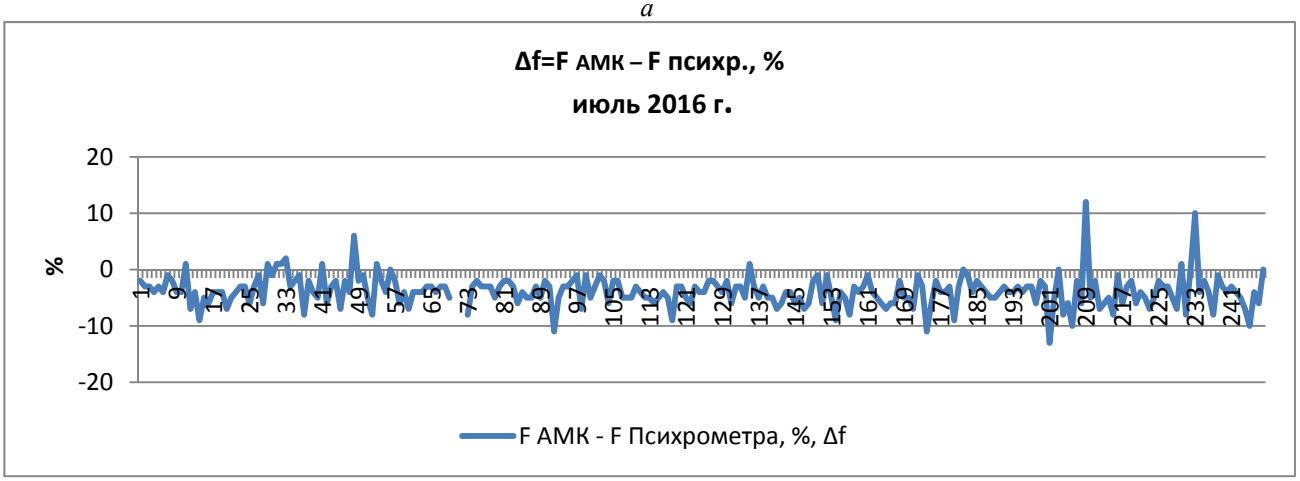
$$\Delta t = T_{АМК} - T_{псих.} \quad (1)$$

$$\Delta f = F_{АМК} - F_{псих.} \quad (2)$$

Из рисунка 6 видно, что основная масса значений разницы температур воздуха (рис. 6, *а*) не превышает 1 °С, хотя и наблюдается несколько значений, достигающих 1,5 °С. Основная масса значений разницы показаний двух приборов при определении относительной влажности воздуха (рис. 6, *б*) находится в пределах 5 %.



а



б

Рис. 6. Разница в показаниях АМК и психрометра в июле:
а – по температуре воздуха (Δt); *б* – по влажности воздуха (Δf)

При помощи программы Microsoft Excel рассчитано количество случаев завышения значений температуры воздуха, измеренных АМК ($\Delta t > 0$), занижения $\Delta t < 0$) и случаев, когда разницы в показаниях приборов не наблюдалось ($\Delta t = 0$), а так же их процентное соотношение. Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Случаи завышения и занижения показаний температуры воздуха АМК относительно измеренных значений психрометрической пары

2016 г.	январь		апрель		июль		октябрь	
Δt	Δt	%	Δt	%	Δt	%	Δt	%
> 0	56	23	91	39	92	38	51	20
< 0	182	76	143	60	149	61	193	78
0	2	1	2	1	3	1	4	2
Всего случаев	240	100	236	100	244	100	248	100

Анализ данных табл. 6 подтверждает, сделанные выше выводы. В большинстве случаев АМК показывает более низкие значения температур, чем психрометрическая пара. Так, в январе и октябре количество заниженных значений равно 182 и 193, соответственно, что составило более 70 % от всех измерений. В апреле и июле АМК дает более низкие данные в 143 и 149 случаях (60 %). Случаи, когда $\Delta t = 0$, практически отсутствуют за все четыре месяца и составляют в общем количестве значений около 2 %.

Подобные расчеты были проведены и для выявления случаев завышения ($\Delta f > 0$), занижения ($\Delta f < 0$) и совпадения ($\Delta f = 0$) показаний АМК и психрометрической пары для относительной влажности воздуха (табл. 3).

Таблица 3

Случаи завышения и занижения показаний влажности воздуха АМК относительно измеренных значений психрометрической пары

2016 г. Δf	январь		апрель		июль		октябрь	
	Δf	%	Δf	%	Δf	%	Δf	%
> 0	136	56	20	8	12	5	106	43
< 0	89	37	204	86	228	93	76	30
0	16	7	14	6	5	2	66	27
Всего случаев	241	100	238	100	245	100	248	100

Наибольшее количество случаев с заниженными показаниями приходятся на апрель и июль (204 и 228, соответственно), что составляет 86 % и 93 % от общего количества показаний за указанные периоды. В январе и октябре преобладают завышенные значения (136 и 106 случаев, соответственно), что составило 56 % и 43 %. В отличие от температуры воздуха, показания АМК и психрометрической пары по относительной влажности совпали в большем количестве случаев. Если в январе и апреле количество совпадений составило 7 % и 6 %, то в октябре достигло 27 % от общего количества случаев. Исключением оказался июль, когда количество совпадений оказалось равным 2 %.

Расчет средней ошибки в показаниях АМК и психрометра по температуре показал, что за январь она составила по модулю 0,1 °С, за остальные месяцы – 0,2 °С. Средняя ошибка в показаниях АМК и психрометра по относительной влажности воздуха имеет наибольшие значения по модулю в июле и апреле (3,8 % и 3,1 %), наименьшие – в январе и октябре (0,8 % и 0,1 %).

Сравнение полученных расчетных данных с технической документацией АМК [1] показывает, что средняя ошибка в январе и октябре не превышает значений допустимой погрешности (±2–3 %). В апреле и июле при достаточно высоких значениях относительной влажности воздуха (более 90 %) значение рассчитанной средней ошибки превышает значения допустимой абсолютной погрешности.

Выводы

Таким образом, в показаниях АМК и психрометрической пары при определении температуры и относительной влажности воздуха была выявлена незначительная разность. Связь между измеренными параметрами практически функциональная, а значения коэффициента корреляции, которые были рассчитаны для проверки однородности данных, близки к единице и значимы.

Как показали исследования, АМК даёт заниженные показания температуры и относительной влажности воздуха по сравнению с психрометрической парой. Это объясняется следующим:

1. Датчики АМК и психрометрической пары находятся в противорадиационных защитах, выполненных из материалов с разной теплопроводностью.

2. Разность в показаниях может возникать за счет того, что показания психрометрической пары снимаются на 10 минут раньше [2], чем измеряет данные АМК, а в часы заката и восхода солнца температура и относительная влажность воздуха могут существенно меняться.

3. Невозможно исключить возникновение погрешностей при снятии показаний техником-метеорологом.

Если учесть, что значения средних ошибок по температуре воздуха не превышают пределы допустимой погрешности, а для относительной влажности воздуха ее превышение минимально и наблюдается далеко не всегда, то результаты расчетов и сравнений показаний АМК и психрометрической пары по данным агрометеорологической станции Тюмень подтверждают возможность автоматизации производства. Исследование показало, что АМК с комплектом датчиков температуры и относительной влажности воздуха фирмы Vaisala работает качественно и обеспечивает достаточно точные показания метеорологических параметров при постоянном энергоснабжении. Это позволяет оптимизировать работу метеоролога.

Список литературы

1. Инструкция пользователя. Датчик влажности и температуры Vaisala HMP 45D. Финляндия Vaisala, 2008.

2. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 3, ч. 1. Метеорологические наблюдения на станциях. Л. : Гидрометеоиздат, 1985. 300 с.

3. *Окоренков В. Ю.* Методы и средства поверки метеорологических информационно-измерительных систем и средств измерений. СПб. : Астерион, 2006. 520 с.

4. *Окоренков В. Ю.* Метрологическая надёжность метеорологических средств измерений и автоматизированных информационно-измерительных систем. СПб. : Астерион, 2013. 312 с.

УДК 551.515.1

Выявление и исследование условий возникновения полярных циклонов в европейских морях Северного Ледовитого океана

О. В. Машталер (mashtaler@rshu.ru), О. В. Волобуева (ovvolobueva@rshu.ru)

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург

Аннотация: Актуальность исследования полярных циклонов (ПЦ) обоснована их огромной разрушительной силой и созданием угрозы для безопасности судоходства в высоких широтах и по Северному морскому пути. Самое опасное воздействие на морскую деятельность оказывает обледенение. Кроме того, изучение ПЦ приобретает актуальность в связи с резким уменьшением площади морского льда в Арктике в последние годы и появлением участков открытой воды, пригодных для возникновения и развития ПЦ. Тем не менее, несмотря на всю важность ПЦ, они явно недостаточно изучены. Поскольку нет никаких метеорологических наблюдений в районах их возникновения, главным источником информации о ПЦ являются спутниковые наблюдения. Используя данные нескольких спутников, работающих в ИК и видимом диапазонах (например, MODIS и AVHRR), а также данные радаров с синтезированной апертурой высокого разрешения (Sentine-1, ASAR) и скаттерометров низкого разрешения (Metop-A, B ASCAT и QuikSCAT SeaWinds) о приводном поле ветра, была проведена идентификация полярных минимумов в различных частях Арктики и выявлены статистические закономерности в появление ПЦ, их распределение и интенсивность. Собранная база данных ПЦ и их характеристики будут использоваться для дальнейшего прогнозирования моделей развития ПЦ.

Ключевые слова: полярные циклоны, Арктика, дистанционное спутниковое зондирование, синергетический анализ.

Введение

Полярные циклоны (ПЦ) представляют собой кратковременные, но исключительно интенсивные атмосферные мезомасштабные вихри, образующиеся над свободной ото льда морской поверхностью к полюсу от основной бароклинной зоны (полярного фронта или другой обширной бароклинной зоны). Характерный пространственный размер этих вихревых образований составляет менее 1000 км, а время жизни, как правило, не превышает 1-2 дня, что в совокупности зачастую не позволяет обнаруживать ПЦ на синоптических картах. Скорость приповерхностного ветра, развиваемая в ПЦ, превышает 15 м/с, что является главной особенностью, позволяющей выделить их в отдельный подкласс мезомасштабных циклонов.

Задачи

Основная задача этой работы заключается в расширении климатологии полярных циклонов, опубликованных в [2] над морями Ледовитого океана (Баренцево, Карское, Норвежское и Гренландского морей) за период с 2009 по 2016 г. Определение координат и времени жизни идентифицированных циклонов, с использованием синергетического анализа спутниковых данных, включая спутниковые спектральные радиометры MODIS и AVHRR, скаттерометров (METOP ASCAT, QuikSCAT SeaWinds) и радаров синтетической апертуры высокого разрешения (Sentinel-1, ASAR) за период с 2009 по 2016 г. Кроме того, планируется провести анализ пространственно-временного распределение ПЦ и их характеристик, а также определить условия формирования и развития ПЦ.

Данные и методы

Изображения высокого разрешения РСА являются хорошим инструментом для исследования ПЦ, поскольку они имеют самое высокое пространственное разрешение (до десятков метров), предоставляя информацию о поле ветра над океаном, независимо от света и погодных условий.

Поскольку значения высокой скорости ветра является непременным атрибутом и особенностью ПЦ, анализ радиолокационных данных не только помогает в идентификации и выделении ПЦ из группы менее интенсивных мезомасштабных завихренностей, но также может дать ценную информацию о внутренней структуре ПЦ, для дальнейшего моделирования и прогнозирования.

К сожалению, этот инструмент не подходит для постоянного мониторинга развития полярных циклонов, поскольку РСА снимки отличатся нерегулярностью и имеют низкое пространственное разрешение, в то время как ПЦ заполняются слишком быстро. Кроме того, РСА изображения делаются не на регулярной основе, что означает невозможность создания детальной статистики ПЦ, основанной только на данных РСА данных. В то же время, радиолокационные изображения являются более информативными относительно изображений видимого и инфракрасного диапазонов, так как они позволяют оценить скорость приводного ветра.

Скаттерометры Metop-A, B ASCAT и QuikSCAT SeaWinds

Данные скаттерометра предоставляют информацию о поле ветра, отличающуюся более низким пространственным разрешением (25×25 км или 12,5×12,5 км), в отличие от Envisat ASAR, но более регулярную и с высоким временным разрешением в полярных районах. Скаттерометрические данные служат дополнительным источником информации о поле ветра. Хотя разрешением они существенно уступают данным радиолокаторов с синтезированной аппертурой, регулярность скаттерометрических данных расширяет возможности их использования. Пример ПЦ по скаттерометрическим данным спутника QuikSCAT представлен на (рис. 1).

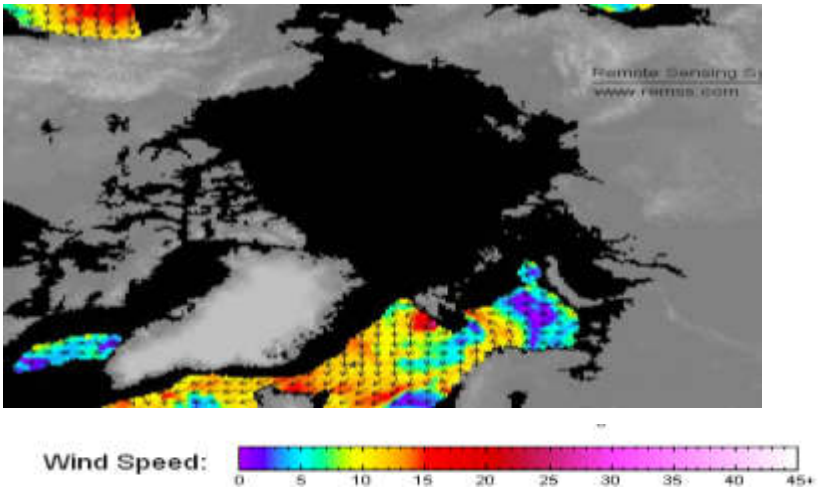


Рис. 1. Поле приводного ветра по данным QuikSCAT.
Полярный циклон над юго-западном побережье о-ва Шпицерген, 26 марта 2009 г.

В данном примере (рис. 2) скорость ветра достигает более 15 м/с, что позволяет рассматривать этот случай как ПЦ. Данные активных микроволновых приборов позволяют получать количественную информацию о скорости приводного ветра независимо от облачности и времени суток, именно поэтому они рассматривались как основополагающий источник информации о ПЦ.

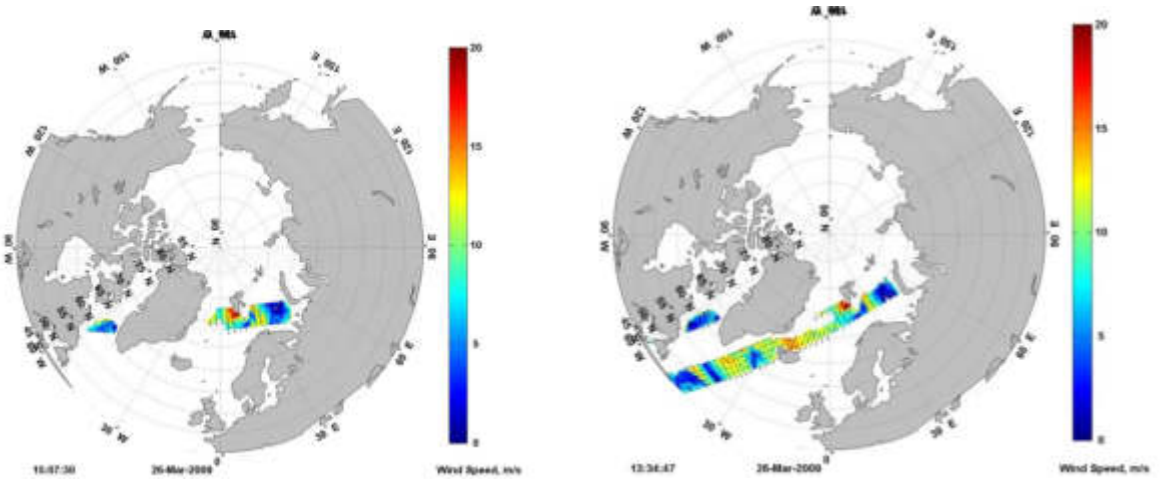


Рис. 2 Скорость ветра по данным Metop-A ASCAT

Радиометры NOAA AVHRR, MODIS Terra

Инфракрасные радиометры на спутниках, обладающих полярной орбитой, такие как радиометры AVHRR спутников серии NOAA оказываются, одними из самых информативных среди ИК инструментов для полярных районов. Изображения ИК диапазона считаются традиционным инструментом при изучении циклонов разных масштабов. Инфракрасные изображения предоставляют информацию о расположении циклонов и температуре верхних слоев облачности. Данные AVHRR имеют самый длинный временной ряд и высокое временное разрешение в полярных районах, что позволяет определять время жизни циклона.

Пример изображения в инфракрасном диапазоне, на котором ПЦ проявляется в поле облачности, приведен на (рис. 3).

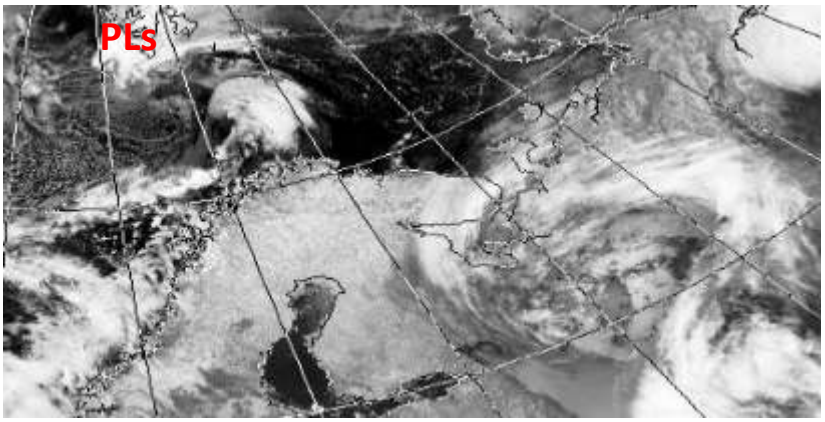


Рис. 3. Поле облачности в инфракрасном диапазоне по данным AVHRR
Полярный циклон над юго-западным побережьем о. Шпицерген, 26 марта 2009 г.

Образование ПЦ проверялась с помощью оценки максимальной скорости приводного ветра, развивающейся в циклоне. Как показано на рис. 1, 2, скорость ветра составила > 15 м/с. Далее, по данным прибора AVHRR проверялось наличие облачной сигнатуры, соответствующей данному ПЦ. Как видно из (рис. 3), облачная сигнатура ПЦ на инфракрасных снимках хорошо соответствует проявлению ПЦ в поле приводного ветра.

Изображения видимого диапазона, хотя и не обеспечивают частого покрытия из-за ограничения в суточных и сезонных изменениях, также используются для изучения циклонов разных масштабов. Просмотр спутниковых данных в течение зимы более сложен, так как облака на изображениях в видимом диапазоне невозможно отличить ото льда, покрывающего поверхность океана.

Снимки радиометров AVHRR и MODIS позволяют получать качественную информацию о сопровождающей циклон облачности, следить за развитием циклона, поскольку обладают регулярностью и высоким временным разрешением, а также позволяют судить о воздушных массах и физических процессах, вовлеченных в образование рассматриваемых систем, обеспечивают информацией о форме и структуре облачности, ассоциированной с ПЦ.

Пример изображения в инфракрасном диапазоне, на котором ПЦ проявляется в поле облачности, приведен на (рис. 4).

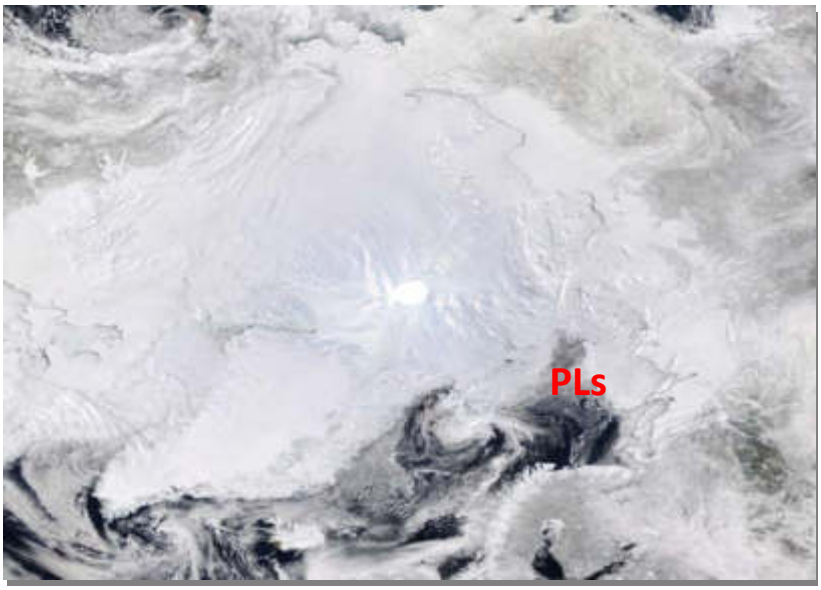


Рис. 4. Поле облачности в видимом диапазоне по данным MODIS
Полярный циклон над юго-западным побережьем о. Шпиберген, 26 марта 2009 г.

Облачная сигнатура на снимках в видимом диапазоне также подтверждает проявление ПЦ в поле приводного ветра.

Пример выявления циклонов над территорией Северо-Западного бассейна представлен в табл. 1.

Этапы работы

Метод обнаружения ПЦ, применяемый в данной работе для всего периода исследования (2009–2016 гг.), включает в себя следующие этапы:

1. Идентификация возможного ПЦ по небольшим областям сильного ветра более 15 м/с по данным приводного поля ветра скаттерометра ASCAT.
2. Изучение изображений облачного покрова, сопутствующее ПЦ в этом районе, в ИК или видимом диапазоне – по данным MODIS и AVHRR.
3. Сопоставление поля ветра с облачностью и диагностирование случаев ПЦ. Включение их в базу данных и определение следующих параметров:

- Координаты центра (приблизительно, для какого-то момента, когда наблюдается максимальное развитие облачности);
- Район (море и район моря)
- Момент зарождения (дата, время);
- Время жизни (приблизительно – по ИК изображениям);

Таблица 1

Выявление ПЦ над морями Северо-Европейского бассейна

Дата	Координаты центра	Район моря	Момент зарождения	Время жизни	Макс V ветра, м/с
19.03.2009	1)-42,44; 60,42; 2)-24,12; 71,44	1) Северо-восток норвежского моря; 2) Южное побережье Гренландии	1)04:00; 2)05:00	1) 04:00–11:00; 2) 05:00–20:00	1) 20; 2) 20)
20.03.2009	-41,66; 62,69	Северо-запад Норвежского моря, юго-восточное побережье Гренландии	1:00	01:00–04:00	29
23.03.2009	-44,01; 54,35	Юго-западное побережье Гренландии	01:00	01:00–05:00	25
24.03.2009	-	-	-	-	-
25.03.2009	1)-21,06; 66,55; 2)-39,91; 65,00	1)Северо-запад Исландии, северо-зап часть Норвежского моря; 2) Юго-восточное побережье Гренландии	1) 1:00; 2) 6:00	1) 1:00–5:00; 2) 6:00–10:00	1) 16; 2) 25
26.03.2009	11,55; 77,94	Северо-восток Гренладского моря, юго-западное побережье Шпицбергена	1:00	1:00–12:00	26
27.03.2009	-	-	-	-	-
28.03.2009	-39,77; 64,69	Запад Норвежского моря, юго-восточное побережье Гренландии	02:00	02:00–09:00	23
29.03.2009	-20,75; 66,40	Юг Гренладского моря, северо-запад Исландии	2:00	02:00–8:30	28
30.03.2009	1) -21,43; 2) 66,46	1) Сев-западное побережье о. Исландия; 2) Юго-восток побережья Гренландии	1) 10:00; 2) 2:00	1) 10:00–14:00; 2) 2:00–22:00	1) 18; 2) 16
01.04.2009	-19,75; 64,40	Сев-запад побережья Исландии	1:00	1:00–14:00	19
02.04.2009	-42,61; 62,38	Южное побережье Гренладии	9:00	10:00–20:00	24

Будущие этапы работы

1. Определение максимальной скорости ветра в течение жизненного цикла;
2. Определение расстояния до края морского льда;
3. Определение концентрации льда на кромке морского льда, ближайшего к ПЦ.
4. Анализ пространственного и временного распределения ПЦ и их характеристик,
5. Идентификация условий, влияющих на формирование и эволюцию ПЦ;
6. Выбор различных случаев исследований с использованием ПЦ над открытой водой и над кромкой морского льда.
7. Использование анализа модельных данных ERA Interim и WRF для будущего моделирования выбранных тематических исследований.

Выводы

Совмещая данные спутниковых изображений спектральных радиометров MODIS и AVHRR в видимом и ИК диапазонах, скаттерометра ASCAT и данные радаров высокого разрешения синтезированной апертуры (Sentinel-1, ASAR), были выявлены случаи возникновения ПЦ в высоких ПЦ по небольшим областям сильного ветра больше 15 м/с и соответствующей облачности, их время жизни и момент зарождения. По данным Арктического портала был определен район возникновения и координаты центра ПЦ. Для установления метеорологических особенностей в момент образования ПЦ планируются использоваться данные реанализа на выбранной территории.

В дальнейшем, полученные данные будут использованы для анализа пространственно-временного распределения ПЦ и их характеристик, и выявления условий, влияющих на их образование и эволюцию, включая ледовые условия.

Список литературы

1. *Rasmussen E. A.*, Turner J. Polar lows: mesoscale weather systems in the polar regions. Cambridge : Cambridge University Press, 2003.

2. Polar low climatology over the Nordic and Barents seas based on satellite passive microwave data / J. E. Smirnova, P. A. Golubkin, L. P. Bobylev, E. V. Zabolotskikh, B. Chapron // Geophys. Res. Lett. 2015. Vol. 42, N 13. P. 5603–5609.

УДК 551.594.1/551.594.2

Использование данных об электрическом состоянии приземного слоя для оценки метеорологических условий

К. Н. Пустовалов (const.pv@yandex.ru)[1,2], А. А. Кобзев[1,2] (alexey-kobzev@mail.ru), В. А. Корольков[1,2] (kor@imces.ru), П. М. Нагорский[1] (npm_sta@mail.ru), А. Е. Тельминов[1,2] (talexey@imces.ru)

[1] Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск
[2] ООО «Сибаналитприбор», Томск

Аннотация. Статья посвящена анализу изменчивости градиента потенциала электрического поля приземного слоя атмосферы на основе данных с высоким временным разрешением при безоблачной погоде и при прохождении облаков основных форм отдельно для тёплого и холодного сезонов года. В результате были получены оценки возмущений приземного электрического поля под воздействием облаков основных форм и предложена методика, позволяющая выявить наличие конкретных видов облачности.

Ключевые слова: атмосферное электричество, облака, осадки.

Введение

Локальное электрическое поле приземной атмосферы весьма чувствительно к метеорологическим условиям и существенно изменяется под влиянием облачности, особенно конвективных форм [1–4]. Данная особенность может быть использована для решения обратной задачи – диагностирования и уточнения метеорологических условий на основе данных об электрических характеристиках приземного слоя атмосферы. Однако, для решения такой задачи требуется накопление надёжных сведений об особенностях влияния различных метеорологических факторов на приземное электрическое поле.

К настоящему времени проведены исследования влияния различных природных факторов на электрическое поле приземной атмосферы во многих регионах земного шара [1; 2; 4]. Однако полученные результаты дают лишь общие представления об особенностях изменения электрического поля, поскольку получены на основе данных с низким временным разрешением и (или) при отсутствии детальной метеорологической информации. Для получения

надёжных оценок необходимо провести анализ вариаций градиента потенциала электрического поля ($\nabla\varphi$) во время большого числа случаев прохождения облаков основных форм отдельно для тёплого и холодного периодов года.

Получение репрезентативных для больших территорий оценок воздействия облаков основных форм на приземное электрическое поле осложнено влиянием на измеренные значения локальных условий пункта измерения: орографии местности, наличия близкорасположенных строений, деревьев и линий электропередачи, особенностей расположения и крепления датчика, фоновой электропроводности воздуха и других факторов. Чтобы исключить влияние локальных условий на оценки необходимо использовать не абсолютную, а относительную величину воздействия облаков различных форм на приземное электрическое поле.

1. Описание экспериментального материала и методов обработки

Для оценки изменчивости $\nabla\varphi$ при прохождении кучево-дождевых облаков и сопутствующих им атмосферных явлений были использованы данные, полученные в 2006–2013 гг. на геофизической обсерватории ИМКЭС СО РАН, а также данные об облачности и атмосферных явлениях, получаемые в стандартные сроки на метеорологической станции «Томск» (29 430), расположенной ~6 км от ИМКЭС СО РАН.

Для оценки изменчивости значений $\nabla\varphi$ при безоблачной погоде, а также при прохождении перистых (*Ci*), перисто-кучевых (*Cc*), перисто-слоистых (*Cs*), высококучевых (*Ac*), высокослоистых (*As*), кучевых (*Cu*), слоисто-кучевых (*Sc*), слоистых (*St*), слоисто-дождевых (*Ns*) и кучево-дождевых облаков (*Cb*) облаков из данных метеостанции «Томск» за исследуемый период были отобраны метеорологические сроки отдельно за тёплое (май-сентябрь) и холодное полугодие (ноябрь–март), характеризующиеся:

а) отсутствие облачности (ясно) или наличие облаков: *Ci*, *Cc*, *Cs*, *Ac*, *As*, *Cu, Sc, St, Ns* и *Cb* для соответствующих категорий отбора;

б) наличие только моросящих, обложных и ливневых осадков (или грозы) для случаев *St*, *Ns* и *Cb* соответственно;

в) отсутствие тумана, дымки, мглы и дыма.

В интервалы времени, соответствующие случаям отсутствия облачности или наличия облаков различных форм кроме кучево-дождевых, выделялись и анализировались вариации данных $\nabla\varphi$ в интервалах времени ±30 минут относительно срока. В отобранных интервалах времени с кучево-дождевыми облаками анализировались участки с интенсивными изменениями величины и знака $\nabla\varphi$. Общее количество исследованных случаев каждой из категорий отбора представлено в табл. 1.

Таблица 1

Количество исследованных случаев вариаций $\nabla\varphi$ во время ясной погоды и при прохождении облаков основных форм

Формы облаков	Ясно	*Ci*	*Cc*	*Cs*	*Ac*	*As*	*Cu*	*Sc*	*St*	*Ns*	*Cb*
Теплый период	852	937	17	47	383	52	448	714	65	61	463
Холодный период	899	645	9	81	49	18	–	178	88	343	210

Для получения оценок воздействия на приземное электрическое поле объёмных зарядов облаков основных форм, не зависящих от местных факторов, определялось отношение значений градиента потенциала электрического поля, измеренных при прохождении облаков каждой из форм, к невозмущённому значению градиента потенциала приземного электрического поля в пункте измерения ($\nabla\varphi_0$) – коэффициент возмущения (K_d)

$$K_d = \frac{\nabla\varphi}{\nabla\varphi_0}. \qquad (1)$$

В качестве $\nabla\varphi_0$ было принято медианное значение $\nabla\varphi$ при отсутствии облаков и атмосферных явлений в пункте измерения. При этом, величина B_0 представляет собой произведение двух множителей:

$$\nabla\varphi_0 = \nabla\varphi_{(0,5)} \cdot r, \qquad (2)$$

где $\nabla\varphi_{(0,5)}$ – медианное значение $\nabla\varphi$, измеренное на открытой плоской местности при данных метеорологических условиях, r – редукционный множитель, равный отношению значений $\nabla\varphi$, измеренных в реальных условиях, к значениям $\nabla\varphi$, измеренным на открытой плоской местности.

При этом, величина $K_d \in [-\infty ; +\infty]$ и не равна нулю, отрицательные значения K_d указывают на смену знака $\nabla\varphi$ под воздействием исследуемых условий, а $K_d = 1$ соответствует отсутствию возмущения нормального электрического поля в приземном слое атмосферы в пункте измерения.

Были рассчитаны медианная величины коэффициента возмущения – $K_{d(0,5)}$, а также минимальная и максимальная его величины (при $\alpha = 0{,}05$) – $K_{d(0,025)}$ и $K_{d(0,975)}$:

$$K_{d(0,5)} = \frac{\nabla\varphi_{(0,5)}}{\nabla\varphi_0} \qquad K_{d(0,025)} = \frac{\nabla\varphi_{(0,025)}}{\nabla\varphi_0} \quad K_{d(0,975)} = \frac{\nabla\varphi_{(0,975)}}{\nabla\varphi_0}, \qquad (3)$$

где $\nabla\varphi_{(0,5)}$ – медианное (квантиль 0,5) значения $\nabla\varphi$ при прохождении облаков каждой из основных форм, а $\nabla\varphi_{(0,025)}$ и $\nabla\varphi_{(0,975)}$ – соответствующе значения $\nabla\varphi$ для квантилей 0,025 и 0,975.

Для анализа возмущения электрического поля под воздействием облаков основных форм аналогичным образом были рассчитаны экстремальные (граничные) значения K_d, наблюдающиеся ($\alpha = 0{,}05$) при отсутствии облаков и атмосферных явлений – $B_{(0,025)}$ и $B_{(0,975)}$.

2. Оценки данных эксперимента и их обсуждение

Распределения значений $\nabla\varphi$ при прохождении облаков основных форм, а также при отсутствии облачности и атмосферных явлений близки логнормальному или степенному законам распределения. Гистограммы распределения значений $\nabla\varphi$ под воздействием 10 основных форм облачности в тёплый период года представлены на рис. 1.

Для статистического описания данных распределений, не соответствующих нормальному закону, вместо среднего арифметического значения и среднеквадратичного отклонения были использованы медианное значение и интерквартильный размах, а вместо минимального и максимального значений (при $\alpha = 0{,}05$) – значения $\nabla\varphi$, соответствующие квантилям 0,025 и 0,975. Статистические характеристики значений градиента потенциала электрического поля во время ясной погоды и при прохождении *Ci*, *Cc*, *Cs*, *Ac*, *As*, *Cu, Sc, St, Ns* и *Cb* облаков в тёплый и холодный периоды года представлены в табл. 2.

Таблица 2

Медианное значение, интерквартильный размах, значения градиента потенциала электрического поля во время безоблачной погоды и при прохождении облаков основных форм

Период / форма облаков		Ясно	*Ci*	*Cc*	*Cs*	*Ac*	*As*	*Cu*	*Sc*	*St*	*Ns*	*Cb*
Тёплый	Медиана (0,5-квантиль)	212	218	330	170	240	275	240	191	200	18	-659
	Интерквартильный размах	232	237	254	220	279	301	276	244	325	320	2782
	0,025-квантиль	-143	-29	27	38	0	10	-71	-71	-406	-1239	-4849
	0,975-квантиль	795	857	837	988	951	1029	795	745	849	600	4961
Холодный	Медиана (0,5-квантиль)	229	212	159	294	310	276	–	229	141	128	624
	Интерквартильный размах	301	338	135	401	265	325	–	258	240	269	1579
	0,025-квантиль	18	0	29	12	29	-106	–	-94	-100	-228	-1943
	0,975-квантиль	899	1066	907	949	1128	808	–	667	578	795	3147

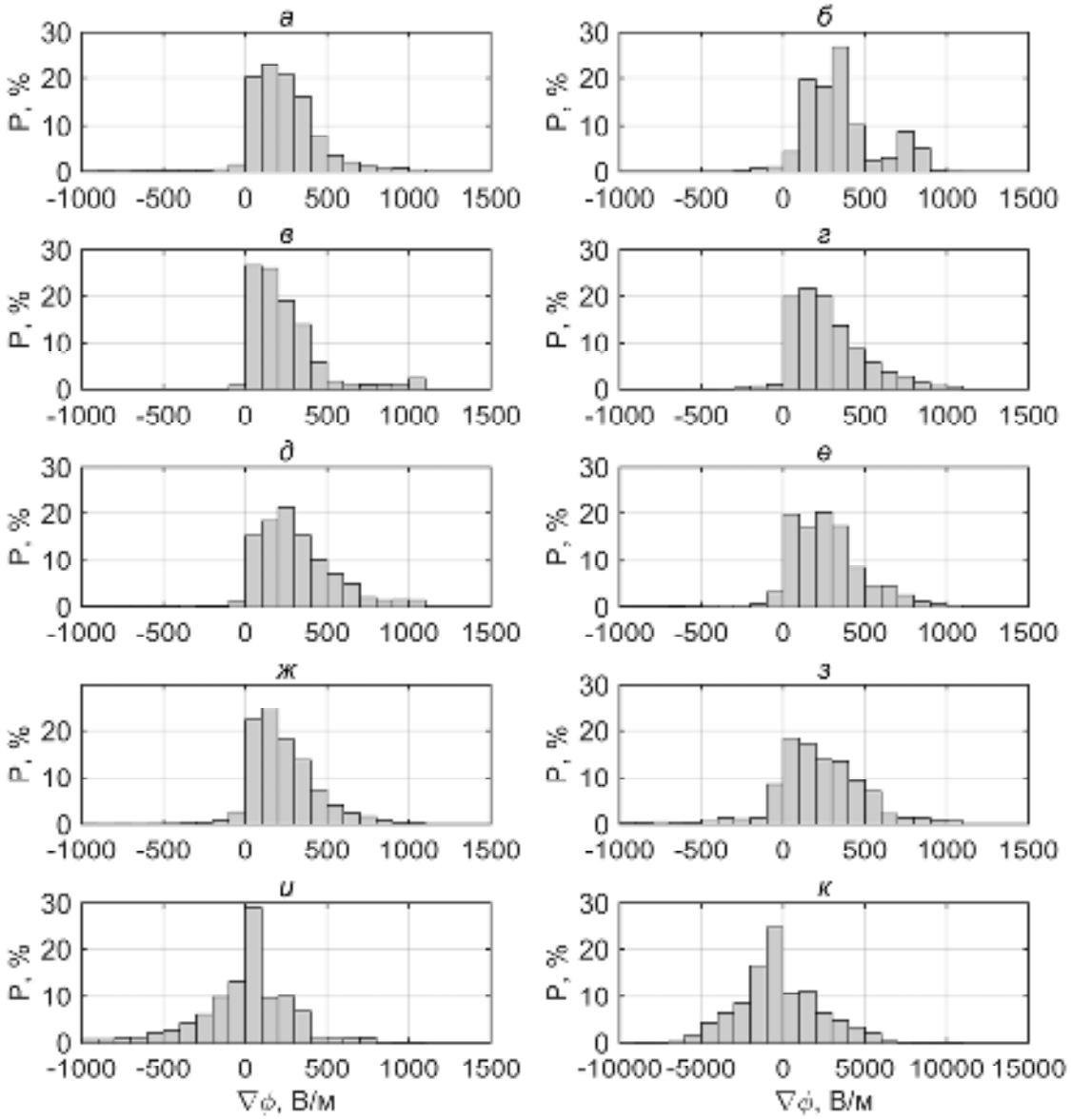


Рис. 1. Распределение значений ∇φ при прохождении облаков основных форм (*а*, *б*, *в*, *г*, *д*, *е*, *и*, *к*) для облаков *Ci*, *Cc*, *Cs*, *Ac*, *As*, *Cu, Sc, St, Ns* и *Cb* соответственно) в тёплый период (май – сентябрь), полученное по данным измерений в г. Томск за период 2006–2013 гг.

Наибольшие значения коэффициента возмущения отмечаются под воздействием кучево-дождевых облаков, при которых экстремальные K_d ($K_{d(0,025)}$, $K_{d(0,975)}$) превышают граничные значения (при $\alpha = 0,05$) для невозмущённых условий в тёплый период на 22,2 и 19,7 соответственно, а в холодный период на 8,5 и 9,7 соответственно (табл. 3, рис. 2). Согласно [3], сравнительно низкие значения ∇φ в диапазоне примерно от 0 до ±1000 В/м наблюдаются, главным образом, при приближении/удалении кучево-дождевого облака или при смене полярности поля вследствие последовательного прохождения разноимённых объёмных зарядов *Cb*, длительность последнего из процессов, как правило, не превышает трёх минут. В связи с отмеченной выше особенностью, значения K_d в диапазоне от 0 до ±5, не являются типичными для прохождения кучево-дождевых облаков и, как правило, не соответствуют *Cb*.

Слоисто-дождевые облака оказывают наибольшее после *Cb* возмущение нормального электрического поля, однако отмечается превышение только нижнего граничного значения ($B_{(0,025)}$) на 5,2 в тёплый период и на 1,0 в холодный период. Слоистые облака обуславливают величину K_d, которая может превышать нижнее пороговое значение на 1,3 и 0,5 для тёплого и холодного периодов соответственно. Коэффициент возмущения слоисто-кучевых облаков в тёплый период находится в пределах граничных значений для невозмущённого электриче-

ского поля, в то время как в холодный период может превышать ($K_{d(0,025)}$) величину нижнего граничного значения на 0,5. Высоко-слоистые облака характеризуются различными особенностями искажения в тёплый и холодный периоды года: в тёплый период $K_{d(0,975)}$ превышает на 1,1 величину верхнего порогового значения ($B_{(0,975)}$), а в холодный период $K_{d(0,025)}$ превышает величину $B_{(0,025)}$ на 0,5. Высоко-кучевые облака вызывают величину коэффициента возмущения, которая может превышать верхнее пороговое значения в тёплый и холодный периоды года на 0,7 и 1,0 соответственно.

Таблица 3

Значения коэффициента возмущения градиента потенциала электрического поля под воздействием облаков основных форм

Сезон \ форма облаков		*Ci*	*Cc*	*Cs*	*Ac*	*As*	*Cu*	*Sc*	*St*	*Ns*	*Cb*
Тёплый период	$K_{d(0,5)}$	1,03	1,55	0,80	1,13	1,30	1,13	0,90	0,94	0,08	-3,11
	$K_{d(0,025)}$	-0,14	0,13	0,18	0	0,05	-0,33	-0,33	-1,92	-5,84	-22,87
	$K_{d(0,975)}$	4,04	3,95	4,66	4,48	4,85	3,75	3,51	4,00	2,83	23,40
	K_v	1,02	1,10	0,95	1,21	1,30	1,19	1,05	1,40	1,38	12,00
Холодный период	$K_{d(0,5)}$	0,93	0,69	1,28	1,35	1,21	–	1,00	0,62	0,56	2,72
	$K_{d(0,025)}$	0	0,13	0,05	0,13	-0,46	–	-0,41	-0,44	-0,99	-8,48
	$K_{d(0,975)}$	4,65	3,96	4,14	4,93	3,53	–	2,91	2,52	3,47	13,74
	K_v	1,12	0,45	1,34	0,88	1,08	–	0,86	0,80	0,89	5,25

Перистые облака в тёплый период практически не оказывают влияния на приземное электрическое поле, в то время как в холодный период обуславливают K_d превышающий величину верхнего граничного значения на 0,8. С перисто-слоистыми облаками связана величина коэффициента возмущения, которая может превышать верхнее пороговое значение на 0,7 и 0,2 в тёплый и холодный периоды года соответственно. Кучевые и перисто-кучевые, как следует из табл. 3 и рис. 2, не вызывают существенного возмущения нормального электрического поля.

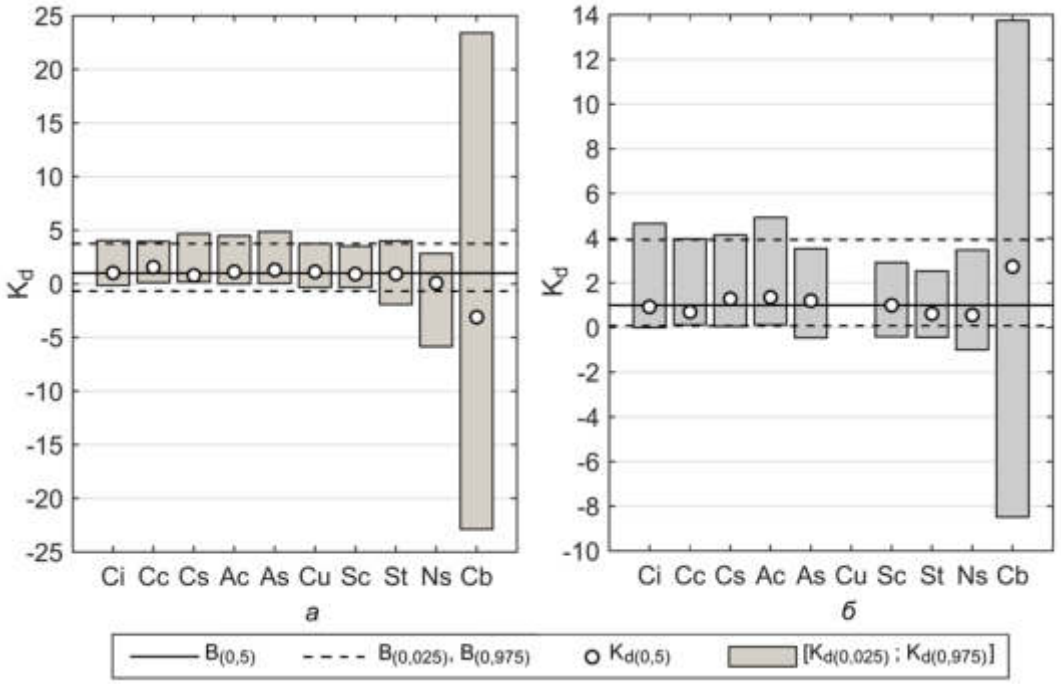


Рис. 2. Медианные ($B_{(0,5)}$ = 1) и граничные ($B_{(0,025)}$, $B_{(0,975)}$) значения невозмущённого электрического поля, и медианные ($K_{d(0,5)}$) значения и диапазоны изменения ([$K_{d(0,025)}$; $K_{d(0,975)}$]) коэффициента возмущения под воздействием облаков основных форм в тёплый и холодны периоды

Высокие значения K_d во время перистых, перисто-слоистых, высоко-кучевых облаков и высоко-слоистых облаков, превышающие верхнее граничное значение ($B_{(0,975)}$), вызывают сомнение, поскольку не могут быть объяснены электрической структурой облаков данных форм и, вероятно, связаны с прохождением кучево-дождевых облаков в окрестностях пункта наблюдения, которое не было зафиксировано на метеостанции и, следовательно, не учтено при отборе данных.

Полученные оценки величины коэффициента возмущения электрического поля при прохождении облаков основных форм могут быть использованы для получения косвенной информации об облачности на основе оперативных данных градиента потенциала электрического поля в приземном слое атмосферы. Для этой цели величина K_d в определённый момент времени, рассчитанная на основе текущего значения градиента потенциала и предварительно определённого невозмущённого значения $\nabla\varphi$ ($B_{(0,5)}$) в пункте измерения, сопоставляется с табличными значениями, характерными для облаков основных форм и граничными значения для невозмущённого электрического поля.

Изложенный выше подход может позволить получить, в зависимости от величины K_d, следующую информацию об облачности (в порядке убывания по степени надёжности):

– наличие *Cb* (в тёплый и холодный периоды);
– наличие *Ns* (в тёплый и холодный периоды);
– наличие *Ns* и/или *St* (в тёплый период);
– наличие *Ns* и/или *As* и/или *St* и/или *Sc* (в холодный период).
– облачность отсутствует или наличие облаков верхнего или среднего ярусов (в тёплый и холодный периоды).

Заключение

В результате исследований были получены значения коэффициента возмущения приземного электрического поля под воздействием облаков различных форм. Предложена методика, позволяющая выявлять наличие конкретных форм облачности на основе расчёта величины коэффициента возмущения и его сопоставления с табличными значениями. Описанная методика может быть применена в автоматических метеорологических станциях.

Поддержано грантом Президента Российской Федерации (МК-179.2017.5).

Список литературы

1. Филиппов А. Х. Грозы Восточной Сибири. Л. : Гидрометеоиздат, 1974. 76 с.
2. Попов И. Б. Статистические оценки влияния различных метеорологических явлений на градиент электрического потенциала атмосферы // Тр. ГГО. 2008. Вып. 558. С. 152–161.
3. Пустовалов К. Н., Нагорский П. М. Основные типы вариаций электрического поля при прохождении кучево-дождевых облаков различного генезиса // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29, № 8. С. 647–653.
4. Bennett A. J., Harrison R. G. Atmospheric electricity in different weather conditions // Weather. 2007. Vol. 62. P. 277–283.

УДК 551.507.32/551.506.7

Использование летательных аппаратов для мониторинга пограничного слоя атмосферы

К. Н. Пустовалов[1,2] (const.pv@yandex.ru), В. А. Корольков[1,2] (kor@imces.ru), А. Е. Тельминов[1,2] (talexey@imces.ru), В. А. Загорулько[2] (landscapology@yandex.ru)

[1] Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск
[2] ООО «Сибаналитприбор», г. Томск

Аннотация. В статье представлено описание вертикального зондирования характеристик пограничного слоя атмосферы с помощью привязного аэростата с автоматической метеорологической станцией АМК-03 на подвесе. Показана эффективность, в целом, данного способа для оценки вертикальных профилей метеорологических величин в пограничном слое атмосферы и мониторинга их изменения. Предложены подходы для увеличения точности измерений характеристик пограничного слоя посредством привязного аэростата.

Ключевые слова: атмосферный пограничный слой, мониторинг, аэростат.

Введение

Пограничный слой атмосферы представляет сравнительно тонкий слой (1–1,5 км) в масштабах всей атмосферы, при этом его в атмосферных процессах чрезвычайно велика. В данном слое происходит наиболее интенсивный обмен импульсом, теплом и влагой между подстилающей поверхностью и атмосферой, а также осуществляется торможение воздушного потока. Вследствие этих процессов в пограничном слое отмечаются наиболее сильные вертикальные градиенты температуры, влаги, скорости ветра, концентраций различных газов и примесей [1; 2].

В пограничном слое преимущественно происходит жизнь человека и его хозяйственная деятельность, из-за чего информация о данного слоя и его изменение имеет важное значение. Основным источником надёжной информации о вертикальном профиле характеристик пограничного слоя является их контактное измерение с помощью радиозондов на аэрологических станциях [3]. При этом пространственное и временное разрешение данных сети аэрологических станций, ограниченное дороговизной запуска одноразовых радиозондов, является недостаточным для решения многих научных и практических задач. Длительные, многократно повторяющиеся измерения в пограничном слое контактными методами могут проводится с помощью самолётов-лабораторий [4], однако, получаемые данные имеют высокую себестоимость, а сам самолёт оказывает значительное влияние на измеряемые характеристики атмосферы, исключить которое в полной мере не представляется возможным. Дистанционные методы зондирования атмосферы, активно развиваемые в настоящее время, не оказывают влияния на исследуемую среду и характеризуются низкой себестоимостью получаемых данных [5], однако, они существенно проигрывают в точности контактным методам. Альтернативным подходом, совмещающим преимущества каждого из способов, является выполнение контактным измерений с помощью «многоразовых» носителей измерительного оборудования, в качестве которых могут быть использованы привязные аэростаты и беспилотные летательные аппараты.

В Институте мониторинга климатических и экологических систем СО РАН и ООО «Сибаналитприбор» в г. Томск ведётся разработка и производство измерительных средств на базе привязного аэростата и беспилотного летательного аппарата для вертикального зондирования характеристик пограничного слоя атмосферы.

В данной работе представлены некоторые результаты пробного вертикального зондирования пограничного слоя атмосферы с помощью привязного аэростата с автоматической метеорологической станцией.

1. Описание эксперимента и средств измерения

В период с 6 по 7 сентября 2017 г. на полигоне «Фоновый» Института оптики атмосферы имени В. Е. Зуева СО РАН, располагающемся вблизи п. Киреевск (Шегарский район Томской области) на берегу р. Обь проводилось зондирование атмосферного пограничного слоя с помощью привязного аэростата с полезной нагрузкой.

Для запусков использовался привязной аэростат комбинированного типа (рис. 1), произведённый ОСКБ МАИ (http://oskbes.ru) и принадлежащий (ИМКЭС СО РАН, ООО «Сибаналитприбор»). В качестве подъёмного газа для аэростата использовался гелий. Полезная нагрузка была представлена автоматической метеорологической станцией АМК-03, разработанной в ИМКЭС СО РАН и произведённой ООО «Сибаналитприбор», аккумулятором и радиопередатчиком. Подвес с полезной нагрузкой располагался на ~2 м ниже оболочки аэростата.



Рис. 1. Привязной аэростат с полезной нагрузкой на подвесе

Регулирование подъёма и спуска аэростата осуществлялось с помощью лебёдки, размещённой на автоприцепе, электропитание которой осуществлюсь от сети близлежащего здания. Приближённое определение высоты аэростата осуществлялось оптическим дальномером. Более точная оценка высоты аэростата осуществлялась при обработке данных на основе барометрической формулы Бабинэ.

Для проведения параллельных наземный измерений 7 сентября использовалась аналогичная автоматическая метеорологическая стационарная, располагающаяся на вершине мачты высотой 4 м (рис. 2) в непосредственной близости от места запуска аэростата.

Дополнительно, данные измерений аэростатной АМК-03 сравнивались с данными классических автоматических датчиков скорости и направления ветра, температуры и относительной влажности воздуха полигона «Фоновый», располагающимися на многоуровневой мачте на высотах 10, 20, 30 и 40 м. Данные любезно предоставлены сотрудниками Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН.

В ходе работ было произведена оценка изменения метеорологических величин с высотой (от подстилающей поверхности до высоты примерно 1000 м), а также временного их изменения на различных высотах в пограничном слое атмосферы.

За отмеченный период было выполнено 4 запуска аэростата с различными условиями подъёма и спуска:

1) Запуск № 1 (6 сентября 2017 г., 16:30–17:32): подъем аэростата от подстилающей поверхности до высоты ~ 960 м со скоростью ≈ 30 м/мин и последующий спуск до высоты 200 м с той же скоростью;

2) Запуск № 2 (6 сентября 2017 г., 17:34–19:33): подъем аэростата со скоростью ≈ 30 м/мин от 200 до ~ 990 м с остановками длительностью 10 минут на высотах ~ 200, 400, 600, 800 и 990 м и последующий спуск от уровня 960 м до подстилающей поверхности;

3) Запуск № 3 (7 сентября 2017 г., 13:29–14:33): подъем аэростата от подстилающей поверхности до высоты ~ 960 м со скоростью ≈ 100 м/мин и последующий спуск до высоты 200 м с остановками длительностью 5 минут на высотах ~ 960, 800, 600, 400 и 200 м.

4) Запуск № 4 (7 сентября 2017 г., 14:35–15:31): подъем аэростата от уровня ~ 200 м до высоты ~ 1000 м со скоростью ≈ 100 м/мин и последующий спуск до подстилающей поверхности с остановками длительностью 3 минуты на высотах ~ 1000, 800, 600, 400, 200 и 100 м.



Рис. 2. Стационарная автоматическая метеорологическая станция «АМК-03», располагающаяся на вершине мачты (высота 4 м)

В ходе запусков № 3 и 4 при подъёме аэростата происходили непредвиденные остановки (длительность ~ 5 минут) на высотах ~ 200 и 570 м соответственно по причине потери связи с полезной нагрузкой аэростата.

Перед запуском № 3 дополнительно проводились параллельные измерения аэростатной и стационарной автоматическими метеостанциями АМК-03 на высоте 4 м, продолжительность которых составила 5 минут.

2. Основные результаты и их обсуждение

Согласно рис. 3, значения атмосферного давления, температуры и относительной влажности воздуха, горизонтальной и вертикальной составляющих скорости ветра, измеренные аэростатной АМК-03, близки аналогичным величинам, измеренным стационарной АМК-03, расположенной в непосредственной близости и на одно высоте с подвесом аэростата. В связи с этим, можно сделать вывод о том, что неподвижный аэростат не оказывает сильного влияния на измеряемые характеристики.

Измеренные вертикальные профили температуры, скорости горизонтально ветра и относительной влажности в целом хорошо согласуются с теоретическими представлениями о вертикальном изменение этих метеорологических величин (рис. 4, 5).

Исключение составляет профиль скорости вертикальной составляющей ветра, в котором наблюдаются высокие (более 1 м/с) отрицательные значения, не характерные для атмосферных условий в момент измерения. Причём, на этапах подъёма аэростата значения скорости существенно превосходят аналогичные значения на этапах спуска.

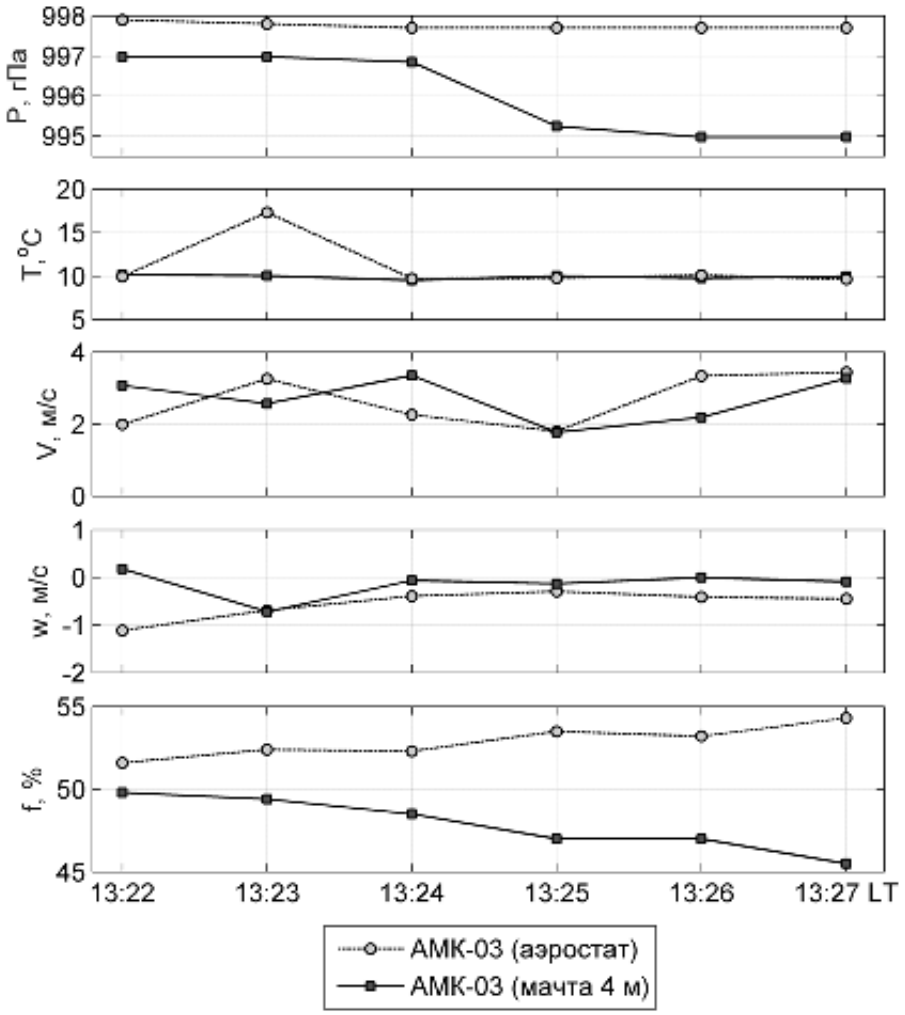


Рис. 3 Динамика атмосферного давления (*P*), температуры воздуха (*T*), скорости горизонтальной (*V*) и вертикальной (*w*) составляющих ветра, и относительной влажности (*f*), измеренная аэростатной и стационарной автоматическими метеостанциями АМК-03 на высоте 4 м

Отмеченный выше факт, а также наблюдаемая прямая зависимость между значениями вертикальной составляющей и горизонтальной составляющей ветра позволяют судить о том, что измеренные аномальные значения скорости вертикальной составляющей ветра предположительно связаны с влиянием компенсационных нисходящих движений окружающего воздуха при поднятии аэростата вверх и (или) вытеснением вниз набегающего на оболочку аэростата ветрового потока. Таким образом, расстояние между оболочной аэростата и полезной нагрузкой, равное 2 м, является недостаточным для надёжного измерения скорости вертикальной составляющей ветра и должно быть увеличено как минимум до 5 м.

Данные температуры воздуха характеризуются минимальным отличием (< 1 °C) значений, измеренных на этапах подъёма и спуска на одних и тех же уровнях (рис. 4, 5).

Сравнение измеренных значений относительной влажности на этапах подъёма и спуска аэростата (рис. 3), выполняющихся без остановок и с одинаковой скоростью, наоборот, показывает большое расхождение (> 15 %) между значениями на одной высоте, связанное с сильной инерционностью датчика относительной влажности.

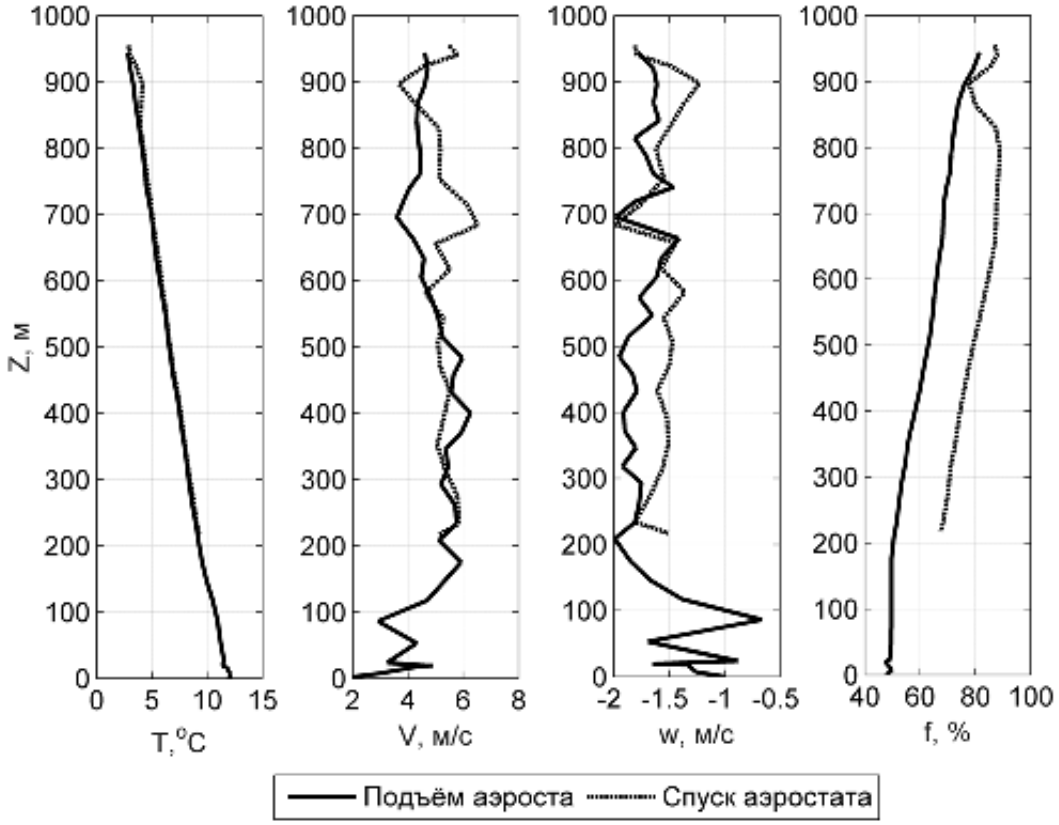


Рис. 4. Изменение температуры воздуха (*T*), скорости горизонтальной (*V*) и вертикальной (*w*) составляющих ветра, и относительной влажности (*f*) с высотой (*Z*), измеренное аэростатной автоматической метеостанцией АМК-03 на этапах подъёма и спуска аэростата в ходе запуска № 1

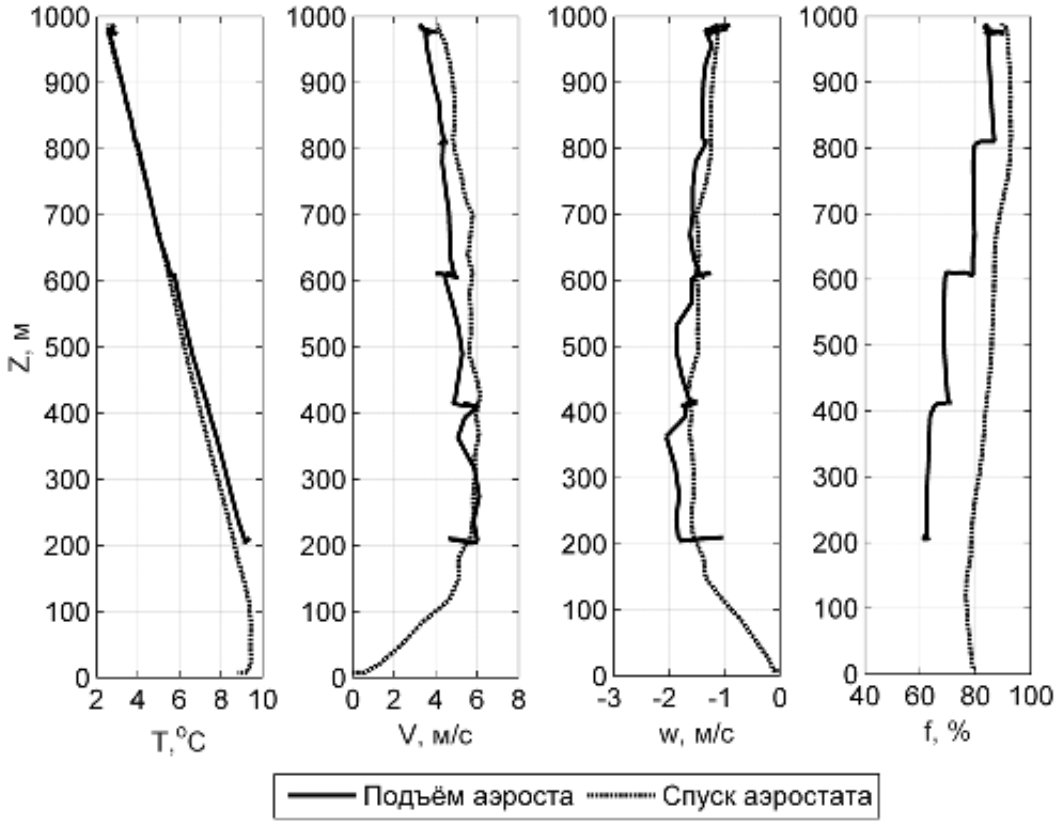


Рис. 5. Изменение температуры воздуха (*T*), скорости горизонтальной (*V*) и вертикальной (*w*) составляющих ветра, и относительной влажности (*f*) с высотой (*Z*), измеренное аэростатной автоматической метеостанцией АМК-03 на этапах подъёма и спуска аэростата в ходе запуска № 2

Анализ скорости прихода значений относительной влажности воздуха к условиям среды на фиксированных уровнях во время остановок длительностью 10 (рис. 5), 5 и 3 минуты позволил сделать вывод о том, что для измерения надёжных значений относительной влажности на фиксированных уровнях необходимы остановки длительностью не менее 5 минут.

Сравнение изменений температуры воздуха, относительной влажности, скорости горизонтальной и вертикальной составляющих ветра (рис. 6), измеренных аэростатной (при её подъёме и спуске) и стационарной метеостанциями показало, что влияние временного изменения атмосферных условий на метеорологические величины, измеренные при вертикальном зондировании пограничного слоя с помощью привязного аэростата, является не существенным за период времени ~ 30 минут и им можно пренебречь. Исключение составляю случаи прохождении атмосферных фронтов.

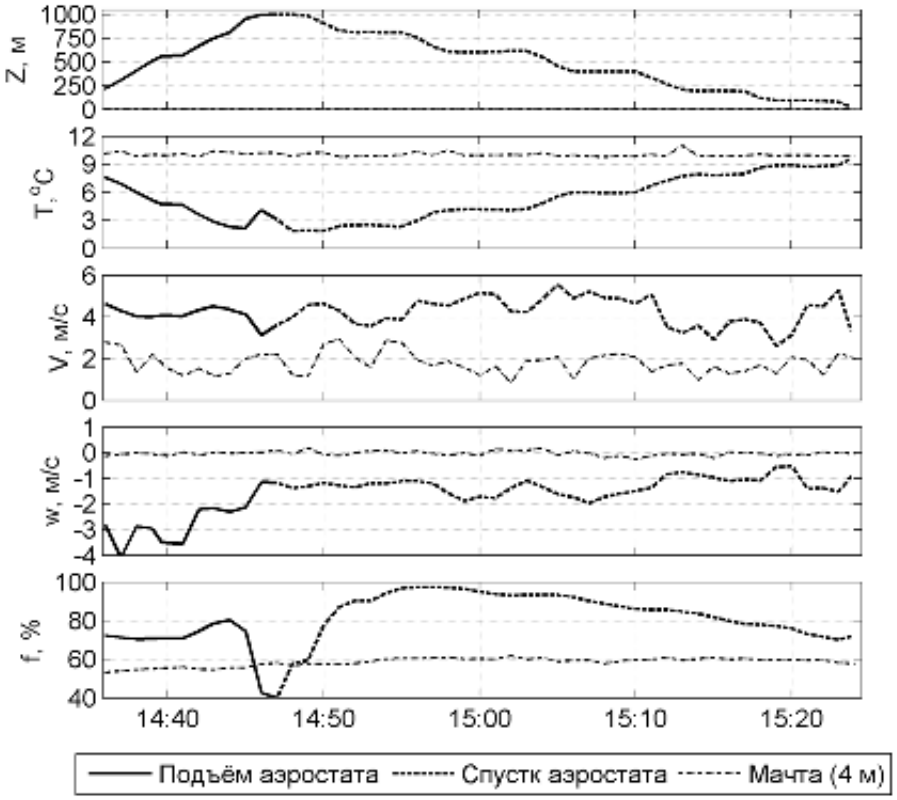


Рис. 6. Высота аэростатной и стационарной (мачта 4 м) автоматических метеостанций АМК-03, а также измеренная ими динамика значений температуры воздуха (*T*), скорости горизонтальной (*V*) и вертикальной (*w*) составляющих ветра, и относительной влажности (*f*) в ходе запуска № 4

На основе сравнительного анализа (рис. 7) значений метеорологических величин, измеренных аэростатной АМК-03 при её опускании от 600 до 0 м, с аналогичными величинами, измеренными стационарной АМК-03 (на высоте 4 м) и датчиками многоуровневой мачты полигона «Фоновый» (на высотах 10, 20, 30 и 40 м) отмечено следующее. При опускании аэростата до высот 40, 30, 20, 10 и 4 м значения температуры воздуха и скорости горизонтального ветра, измеренные аэростатной АМК-03, становятся практически равными значениям, измеренным наземными измерительными комплексами на соответствующих высотах. Этот факт подтверждает правильность измерения температуры воздуха и горизонтальной скорости ветра аэростатной метеостанцией при подъёме/спуске аэростата с заданной скоростью. При этом, значения относительной влажности, полученные полезной нагрузкой аэростата, остаются более чем на 10 % выше аналогичных значении, измеренных датчиками мачты ИОА СО РАН на той же высоте. Отмеченная особенность подтверждает необходимость периодических остановок для прихода рабочего вещества датчика относительной влажности к состоянию среды при подъёме/спуске аэростата.

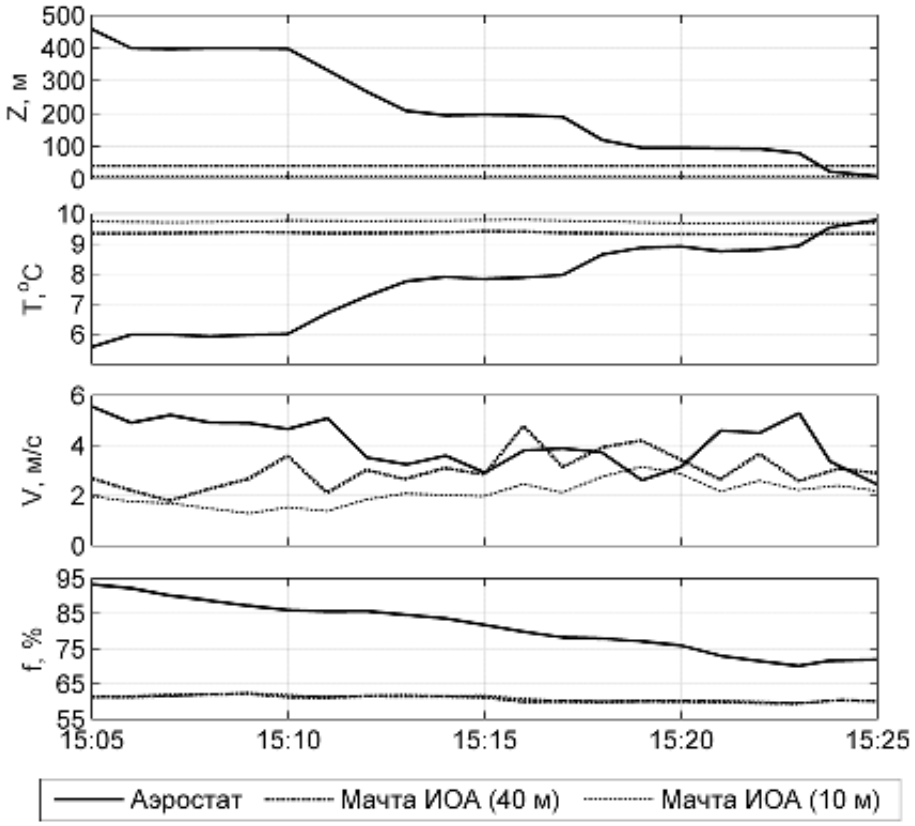


Рис. 7. Высота аэростатной и стационарной автоматических метеостанций АМК-03, и датчиков многоуровневой мачты обсерватории «Фоновая» (на высотах 10 и 40 м), а также измеренная ими динамика значений температуры воздуха (*T*), скорости горизонтальной (*V*) и вертикальной (*w*) составляющих ветра, и относительной влажности (*f*) на последнем этапе запуска № 4

Заключение

Анализ результатов измерений позволяет, в целом, сделать вывод о эффективности использования привязного аэростата с автоматической метеорологической станцией АМК-03 для оценки вертикальных профилей метеорологических величин в пограничном слое атмосферы и мониторинга их изменения. Показано, что для минимизации влияния оболочки аэростата на измеренные значения скорости вертикальной составляющей ветра расстояние от неё до полезной нагрузки должно составлять не менее 5 м. Отмечено, что влияние изменения атмосферных условий на метеорологические величины, измеренные при вертикальном зондировании пограничного слоя с помощью привязного аэростата, как правило, является несущественным за период времени ~ 30 минут и им можно пренебречь. Определено, что для получения надёжных значений относительной влажности при вертикальном зондировании пограничного слоя атмосферы необходимы остановки длительностью не менее 5 минут.

Список литературы

1. *Атмосфера* : справочник (справ. данные, модели) / под ред. Ю. С. Седунова [и др.]. Л. : Гидрометеоиздат, 1991. 509 с.

2. *Матвеев Л. Т.* Физика атмосферы. СПб. : Гидрометеоиздат, 2000. 777 с.

3. *Толмачева Н. И.* Методы и средства гидрометеорологических измерений : учеб. пособие. Пермь : Перм. ун-т, 2011. 223 с.

4. *Струнин М. А.* Исследования пограничного слоя атмосферы с помощью самолётов-лабораторий // Мир измерений. 2008. № 8. С. 6–14.

5. *Сутырина Е. Н.* Дистанционное зондирование земли : учеб. пособие. Иркутск : Изд-во ИГУ, 2013. 165 с.

УДК 556.556+528.88

Динамические явления синоптического масштаба в оз. Хубсугул по данным AVHRR

Е. Н. Сутырина (ensut78@gmail.com)
Иркутский государственный университет, Иркутск

Аннотация. Представлены результаты изучения протекания термобара и пелагического апвеллинга в оз. Хубсугул по картам распределения температуры поверхности воды, составленным по данным радиометра AVHRR. Показаны основные характеристики пелагического апвеллинга и их межгодовая изменчивость. Изучена связь параметров пелагического апвеллинга с прохождением более глубоких циклонов в августе. Показаны характер и скорость перемещения термического фронта, ассоциированного с термобаром, в оз. Хубсугул, а также влияние сроков очищения озера ото льда на протекание термобара.

Ключевые слова: озеро Хубсугул, данные радиометра AVHRR, термобар, апвеллинг.

Хубсугул – высокогорное озеро, расположенное на севере Монголии между 50°25′ и 51°37′ с. ш. и между 100°09′ и 100°48′ в. д. примерно в 200 км к юго-западу от озера Байкал на высоте 1645 м над у. м. и почти на 1190 м над уровнем Байкала. Оз. Хубсугул связано с оз. Байкал через речную систему Эгийн-Гол–Селенга протяженностью около 1000 км. Котловина оз. Хубсугул также имеет тектоническое происхождение и является южным элементом Байкальской рифтовой зоны. Оз. Хубсугул достигает 136 км в длину и 35 км в ширину (рис. 1). Длина береговой линии составляет около 431 км. Средняя глубина озера равна 139 м, максимальная глубина 262 м. Площадь водной поверхности – 2,76 тыс. км². Объём воды в оз. Хубсугул составляет 383,3 км³ [1].

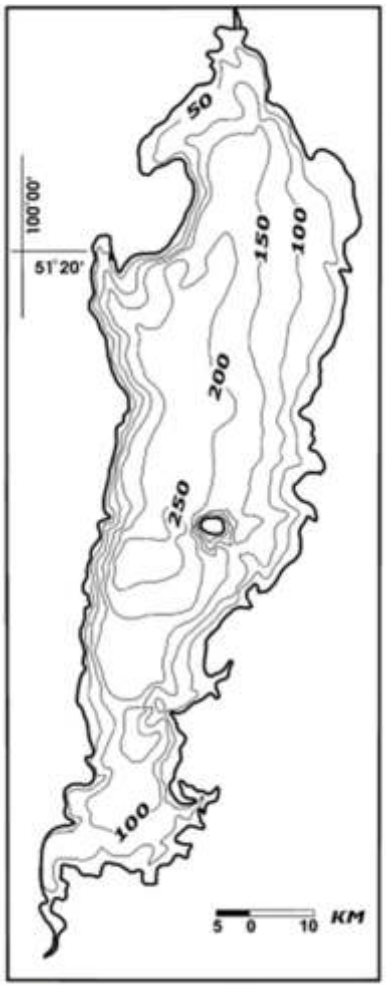


Рис. 1. Картосхема Хубсугула с изобатами

Применение данных дистанционного спутникового зондирования является незаменимым инструментом для исследования особенностей протекания динамических явлений в оз. Хубсугул, имеющего значительную протяженность и площадь акватории. В рамках данного исследования были использованы данные радиометра AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) в безледоставный период в 1998–2015 гг. С учётом пространственного и временного разрешения данных радиометра AVHRR, наиболее обоснованным с применением спутниковых данных AVHRR будет изучение синоптических неоднородностей в оз. Хубсугул, к которым согласно [6] относят неоднородности с масштабами десятки и первые сотни километров и временем существования от суток до месяцев. Свое название данный диапазон изменчивости получил вследствие аналогичности отмеченных вихрей атмосферным циклонам и антициклонам.

По картам распределения температуры поверхности воды можно косвенно анализировать такие явления, как термический барьер, вихревые структуры, апвеллинг и др. Для оценки и картографирования температуры поверхности воды оз. Хубсугул в виду отсутствия обширных массивов синхронных наземных и спутниковых наблюдений для данного водного объекта использовались региональные алгоритмы тематического картографирования температуры поверхности воды по данным прибора AVHRR, основанные на дифференцированном определении температуры в различное время суток (день, ночь) и в различные месяцы (июнь-июль, август-сентябрь, октябрь-декабрь), применении квадратичной модификации метода «расщеплённого окна прозрачности» и дополнительном привлечении информации видимого и ближнего инфракрасного каналов в дневное время суток разработанные для оз. Байкал [3]. Проверка данных алгоритмов для условий оз. Хубсугул осуществлялась по 56 точечным измерениям температуры поверхности воды (рис. 2, *а*), производимых в 1998, 2005, 2009 гг. в ходе выполнения различных гидробиологических исследований [2; 5; 7], и показала среднеквадратическую ошибку определения температуры оз. Хубсугул не более 0,7 °С.

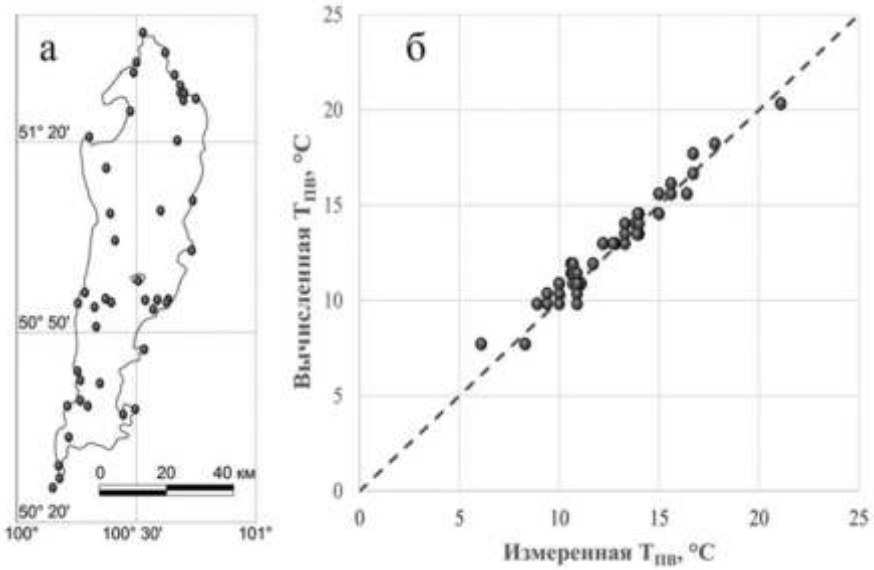


Рис. 2. Пространственное распределение точек подспутниковых измерений температуры поверхности воды оз. Хубсугул (*а*) и соотношение измеренных значений температуры поверхности воды оз. Хубсугул и значений, вычисленных по алгоритмам, разработанным для оз. Байкал (*б*)

В оз. Хубсугул по картам распределения температуры поверхности воды также прослеживаются зоны пелагического апвеллинга – подъема глубинных вод в пелагиали, где они представляют собой замкнутые квазикольцевые образования с минимальной температурой в центре. В табл.1 приведены полученные в ходе исследования средние и максимальные значения параметров зон пелагического апвеллинга в оз. Хубсугул.

Таблица 1

Средние и максимальные (в скобках) характеристики зон пелагического апвеллинга в оз. Хубсугул в мае-ноябре 1998–2015 гг. по данным AVHRR

Число наблюдённых явлений	Длина зоны апвеллинга, км	Ширина зоны апвеллинга, км	Площадь зоны апвеллинга, тыс. км²	Продолжительность, дни
22	81(109)	28(33)	1,81(2,23)	14(39)

По данным AVHRR за период с 1998 по 2015 г. в оз. Хубсугуле значения площади наиболее обширных зон пелагического апвеллинга составляли от 30 (в 2004 г.) до 81 % (в 2011 г.) от общей площади акватории озера, разность температуры поверхности воды на границе и в центре зон пелагического апвеллинга менялась от 2,6 (в 2004 г.) до 8,4 °С (в 2011 г.) (рис. 3).

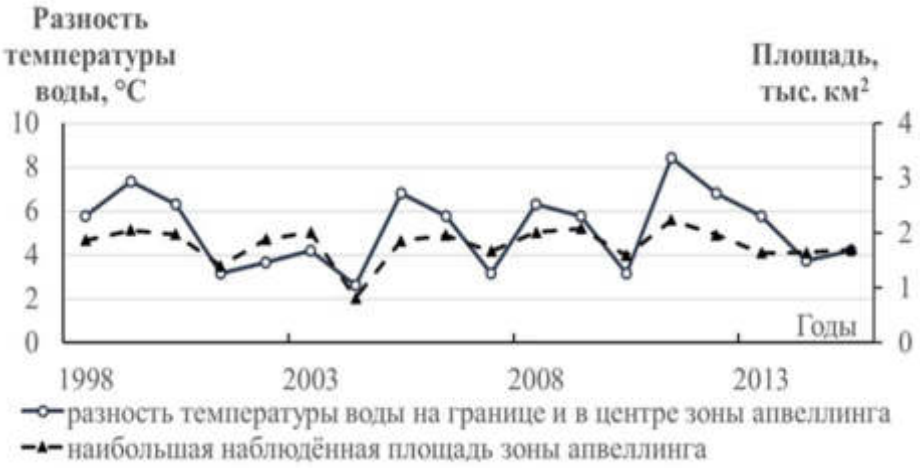


Рис. 3. Межгодовая изменчивость параметров наиболее обширной зоны апвел-линга в оз. Хубсугул в период наибольшего развития

Между размерами зон апвеллинга в оз. Хубсугул и контрастами температуры в их пределах наблюдалась тесная связь со значением коэффициента корреляции равным 0,74. При этом границы зон апвеллинга хорошо соотносятся с распределением глубин водоёма (см. рис. 1, 4).

В оз. Хубсугул протекание явления пелагического апвеллинга изучено недостаточно. Можно предположить, что имеет место образование пелагического апвеллинга в оз. Хубсугул как компенсационного подъема глубинных вод к поверхности при дивергенции поверхностных течений, возникшего вследствие воздействия больших циклонических вихрей и сопутствующих им сильных штормов при прохождении глубоких циклонов согласно [4].

Наличие циклонических вихрей или их совокупностей в оз. Хубсугул прекрасно читается по характерной структуре в поле распределения температуры поверхности воды в оз. Хубсугул при протекании пелагического апвеллинга (рис. 4).

Обусловленность пелагического апвеллинга прохождением глубоких циклонов косвенно подтверждается наличием заметной связи со значением коэффициента корреляции равным –0,67 между контрастами температуры в пределах зон пелагического апвеллинга и средним давлением у поверхности за август (месяц выбран в связи с тем, что наибольшее развитие зон апвеллинга в Хубсугуле наблюдается, как правило, в августе или в первых числах сентября).

Межгодовые колебания данных параметров происходят в противофазе, что свидетельствует о более выраженном проявлении пелагического апвеллинга на фоне более низкого атмосферного давления, возможно ассоциированного с прохождением более глубокого циклона в августе конкретного года (рис. 5).

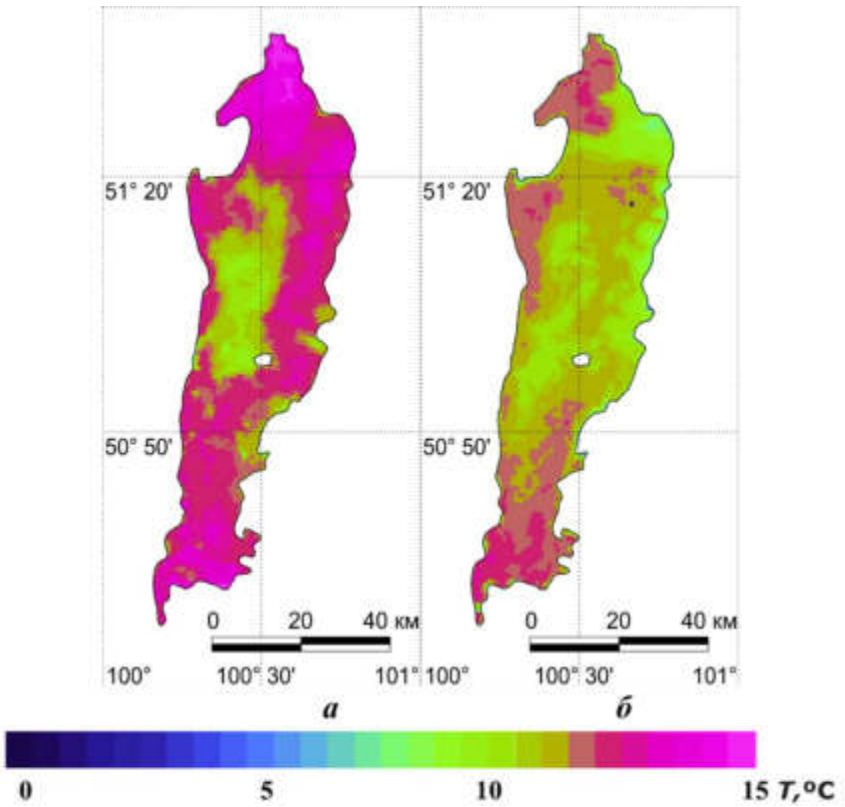


Рис. 4. Распределение температуры поверхности воды оз. Хубсугул по данным AVHRR за 17.07.2002 (*а*) и 23.08.2003 (*б*)

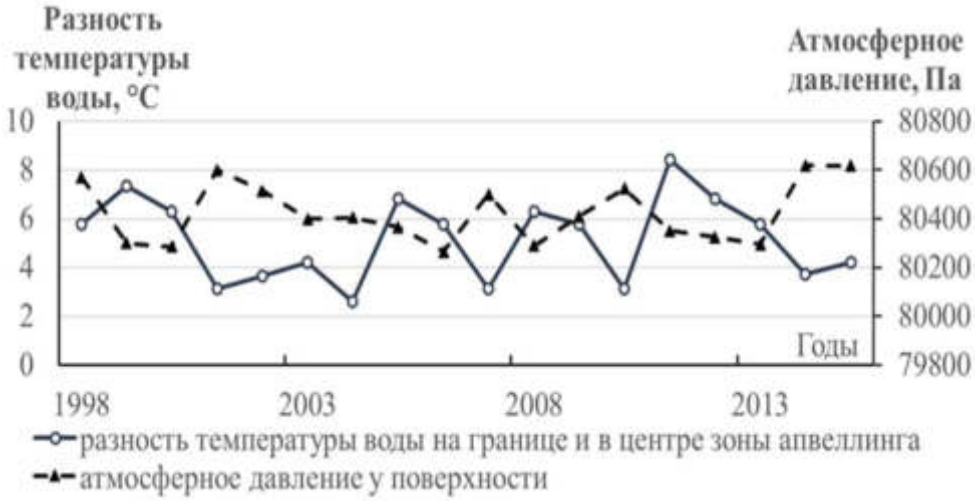


Рис. 5. Межгодовая изменчивость разности максимальных и минимальных значений температуры на поверхности в пределах наиболее обширной зоны пелагического апвеллинга в оз. Хубсугул и среднего давления у поверхности

По картам распределения температуры поверхности воды в оз. Хубсугул по положению изотермы 4 °С можно отчетливо различить локализацию термического фронта, ассоциированного с весенним термобаром, и оценить его динамику. В оз. Хубсугул характер перемещения термического фронта во многом определяется особенностями донного рельефа (см. рис. 1, 6).

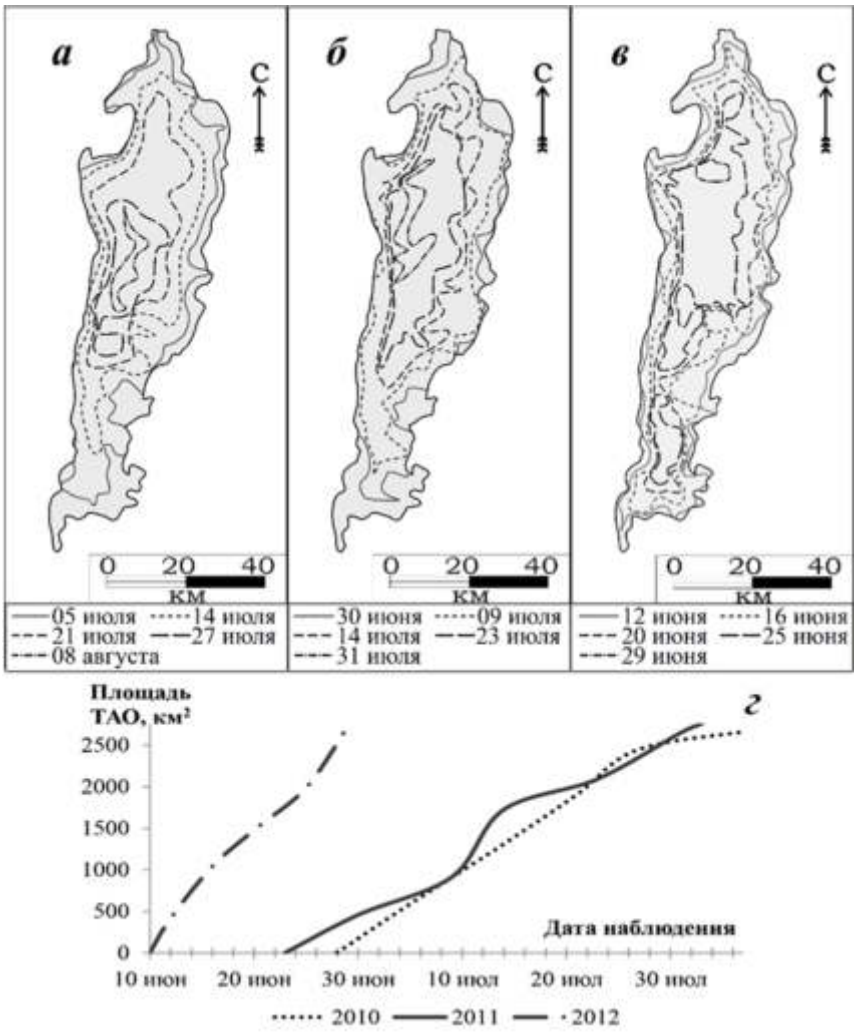


Рис. 6. Последовательные положения термического фронта в оз. Хуб-сугул в 2010 (*а*), 2011 (*б*) и 2012 (*в*) гг. и изменение площади теплоактивных областей (ТАО) в оз. Хубсугул (*г*)

Средняя скорость смещения ассоциированного с термобаром термического фронта от северной оконечности оз. Хубсугул к югу составляет 3,5 км/сут., максимальная скорость в этом направлении, наблюдённая по спутниковым данным доходит до 9 км/сут. От южной оконечности Хубсугула к северу термический фронт смещается со средней скоростью 2,7 км/сут., достигая максимального наблюдённого значения в 8 км/сут. Более низкая скорость смещения термического фронта от восточного побережья на запад: среднее значение которой составляет 1,6 км/сут., максимальное наблюдённое по спутниковым снимкам за период исследования доходит до 4,6 км/сут. И, наконец, самая низкая скорость перемещения термического фронта наблюдается при его перемещении от западного побережья на восток и составляет в среднем около 0,9 км/сут., при максимальном наблюдённом значении в 2,2 км/сут., в том числе это может объясняться влиянием распределения глубин, а также действием ветров зонального, в первую очередь западного, направления. Продолжительность весеннего термобара за период исследования существенно варьирует в зависимости от сроков схода льда на водоёме от 15 до 40 дней (рис. 6, *г*). При этом в зависимости от сроков полного очищения водоёма ото льда существенно изменяются и сроки возникновения весеннего термобара в оз. Хубсугул, размах которых может достигать более 20 дней и смещаться с первой декады на конец июня.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-29-05045.

Список литературы

1. Атлас озера Хубсугул. М. : ГУГК, 1989. 119 с.
2. Дрюккер В. В., Дутова Н. В., Ковадло А. С. Вириопланктон и бактериопланктон высокогорного озера Хубсугул (Монголия) // Докл. Акад. наук, 2011. Т. 440, № 2. С. 282–285.
3. Сутырина Е. Н. Изучение внутренних водоёмов и водосборов с применением данных дистанционного зондирования Земли. Иркутск : Изд-во ИГУ, 2014. 133 с.
4. Шлыгин И. А. Популярная гидрометеорология и судовождение. М. : Транспорт, 1987. 192 с.
5. Jersabek C. D., Bolortsetseg E. Mongolian rotifers (Rotifera, Monogononta) – a check-list with annotations on global distribution and autecology // Proceedings of The Academy of Natural Sciences of Philadelphia. 2010. Vol. 159. P. 119–168.
6. Kamenkovich V. M., Koshlyakov M. N., Monin A. S. Synoptic eddies in the ocean. Dordrecht, Boston, Lancaster, Tokyo : D. Reidel, 1986. 433 p.
7. Morales E. A., Edlund M. B. Studies in selected fragilarioid diatoms (Bacillariophyceae) from Lake Hovsgol, Mongolia // Phycological Research. 2003. Vol. 51. P. 225–239.

УДК 556.555.4, 528.8

Изучение возможности восстановления распределения температуры поверхности воды оз. Байкал с применением интерполяции спутниковых снимков AVHRR

Е. Н. Сутырина (ensut78@gmail.com), С. С. Тимофеева

Иркутский государственный университет, Иркутск

Аннотация. Представлены результаты предварительного исследования возможности восстановления распределения температуры поверхности воды оз. Байкал по данным радиометра AVHRR с применением интерполяции спутниковых снимков. Методом линейной интерполяции восстановлены данные о распределении температуры поверхности озера и проведено сравнение полученных в результате интерполяции карт с опорными картами, полученными непосредственно по спутниковым снимкам. Показано, что, чем больше сдвиг по времени суток результатов интерполяции от исходных, использовавшихся для интерполяции, снимков, тем больше ошибка интерполяции, что вероятно связано с наличием внутрисуточной изменчивости температуры поверхности озера, также представленной в данной статье.

Ключевые слова: озеро Байкал, температура поверхности воды, данные радиометра AVHRR, линейная интерполяция.

Введение

Объектом исследования является оз. Байкал. Длина водоёма достигает 672 км, ширина – доходит до 79 км, площадь акватории оз. Байкал составляет 31,7 тыс. км² [4]. Значительные размеры изучаемого водного объекта обусловливают актуальность применения дистанционных методов для его изучения. Одним из важнейших экологически значимых гидрофизических параметров, который может быть определён с применением спутниковых данных, является температура поверхности воды водоёма. Температура поверхности озера может служить индикатором климатических изменений, применяться для изучения динамических явлений в водоёме, использоваться для расчета теплового баланса и т. д. При оценке распределения температуры поверхности воды озера по данным тепловых инфракрасных каналов приборов дистанционного зондирования серьезной помехой является облачность. Поэтому актуальным является вопрос о возможности применения интерполяции для восстановления данных в облачные дни. В рамках данного исследования изучается возможность использования линейной интерполяции по времени для восстановления информации о распределении температуры на поверхности для условий оз. Байкал.

Материалы и методы исследования

В рамках данного исследования были использованы данные радиометра AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), который установлен на борту метеорологических спутников серии NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), функционирующих на околополярной орбите на высоте порядка 850 км. Радиометр AVHRR представляет собой типичный сканер и измеряет собственное и отраженное Землей излучение. Линейный размер элемента разрешения на местности радиометра AVHRR составляет около 1,1 км в надире.

Для исследования отобрана серия малооблачных снимков из второй декады июня 2015 г. Месяц июнь выбран ввиду интенсивного прогрева озера в этот период. По всем отобранным снимкам за указанный период были составлены схемы распределения температуры поверхности воды оз. Байкал. Для оценки температуры поверхности озера применялись региональные алгоритмы обработки данных AVHRR, основанные на дифференцированном определении температуры в различное время суток (день, ночь) и в различные месяцы (июнь–июль, август–сентябрь, октябрь–декабрь), использовании квадратичной модификации метода «расщеплённого окна прозрачности», и дополнительном привлечении информации видимого и ближнего инфракрасного каналов в дневное время суток, подробно описанные в [3]. Использование разработанных автором региональных алгоритмов позволяет увеличить точность определения температуры поверхности воды до 0,4 К в ночное время, и до 0,3 К в дневное время суток. Это дает преимущество перед применением предложенных ранее алгоритмов оценки температуры поверхности воды оз. Байкал [1; 2], точность которых не превышала 0,5 К для дневных условий и 0,7 К для ночных.

Далее для изучения возможности восстановления распределения температуры поверхности воды оз. Байкал путем линейной интерполяции по времени был выполнен расчеёт интерполированного значения температуры поверхности воды по (1):

$$T_i^{(sim)} = T_i^{(1)} \frac{\tau_2 - \tau}{\tau_2 - \tau_1} + T_i^{(2)} \frac{\tau - \tau_1}{\tau_2 - \tau_1}, \quad (1)$$

где $T_i^{(1)}$ и $T_i^{(2)}$ – температура поверхности воды на спутниковом снимке в *i*-том пикселе в начальный τ_1 и конечный τ_2 моменты времени соответственно, °С; $T_i^{(sim)}$ – интерполированное значение температуры поверхности воды в момент времени $\tau \in (\tau_1; \tau_2)$ в *i*-том пикселе, °С.

Результаты и их обсуждение

В ходе исследования было проведено сравнение данных о температуре, полученных в результате интерполяции, с данными, полученными непосредственно по спутниковому снимку за ту же дату и время. Ниже на рис. 1 и 2 представлено распределение температуры поверхности воды оз. Байкал, рассчитанное по региональным алгоритмам по данным AVHRR, и распределение инерполированных значений температуры. На рисунках 1, *в* и 2, *в* также приведены схемы распределения абсолютных значений разности температуры воды, полученных по спутниковому снимку AVHRR и определённых в ходе интерполяции. Время здесь и далее приведено в UTC.

Далее были расчитаны значения средней абсолютной ошибки интерполяции *MAE* (the mean absolute error) по формуле (2):

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \left| T_i^{(sim)} - T_i \right|, \quad (2)$$

где T_i – значение температуры поверхности воды в *i*-том пикселе, рассчитанное по данным AVHRR по региональным алгоритмам; $T_i^{(sim)}$ – значение температуры поверхности воды, полученное с помощью интерполяции, n – число пикселей, находящихся в пределах акватории оз. Байкал.

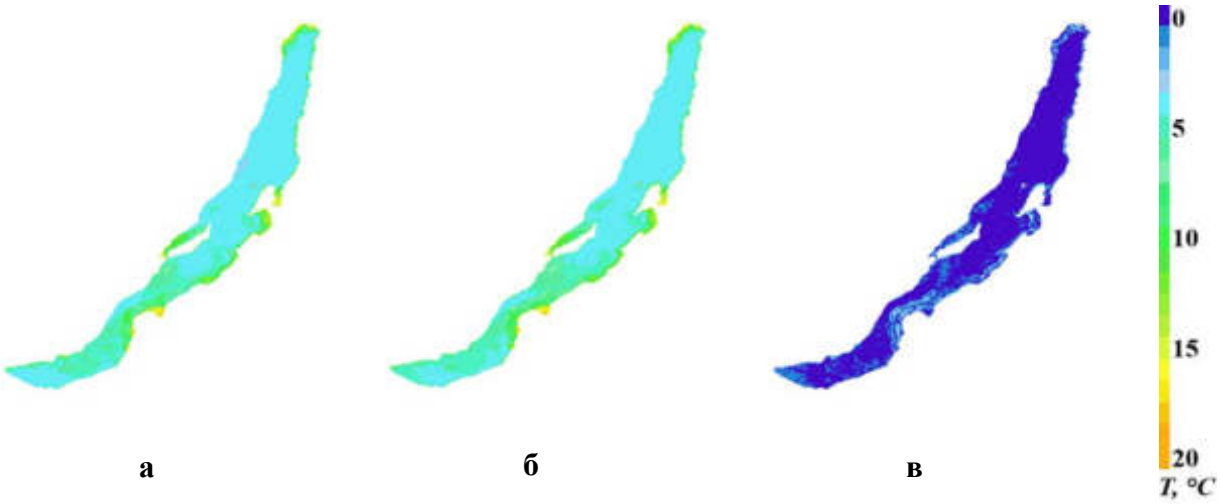


Рис. 1. Распределение температуры поверхности воды оз. Байкал 17 июня 2015 г. в 22:23:
а – рассчитанное по региональным алгоритмам по данным AVHRR, *б* – полученное в ходе интерполяции снимков за 18.06.2015 г. в 22:12 ч. и 16.06.2015 г. в 22:35 ч., *в* – абсолютное значение разницы интерполированной температуры и температуры, полученной по спутниковому снимку AVHRR

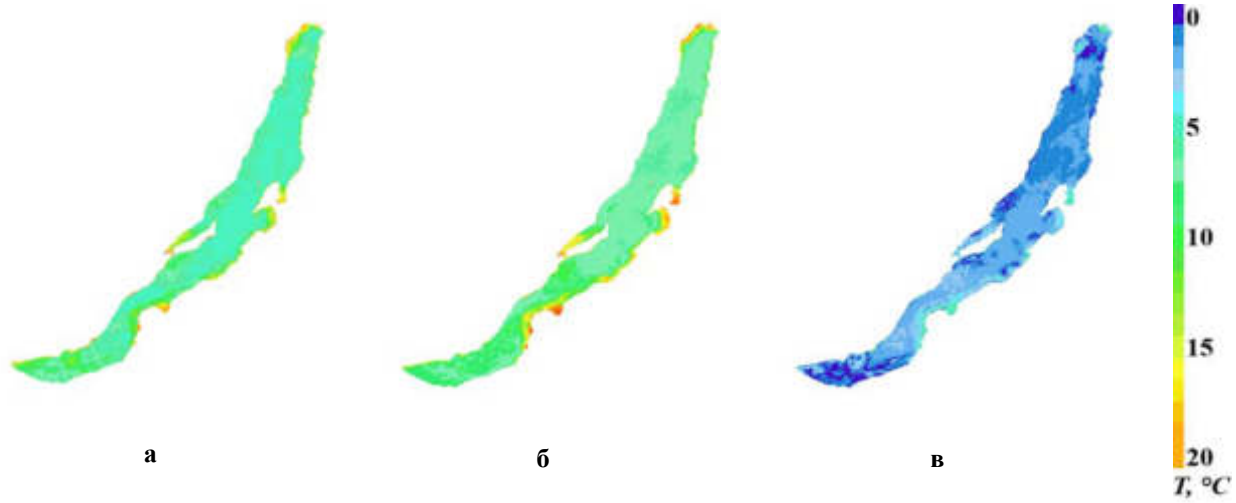


Рис. 2. Распределение температуры поверхности воды оз. Байкал 17 июня 2015 г. в 05:50:
а – рассчитанное по региональным алгоритмам по данным AVHRR, *б* – полученное в ходе интерполяции снимков за 17.06.2015 г. в 22:23 ч. и 16.06.2015 г. в 22:35 ч., *в* – абсолютное значение разницы интерполированной температуры и температуры, полученной по спутниковому снимку AVHRR

Средняя абсолютная ошибка *MAE* является одним из нескольких способов сравнения интерполируемого значения с фактическим или опорным значением. *MAE* выбрана в исследовании, так как концептуально проще и обладает преимуществами в интерпретируемости по сравнению со среднеквадратической ошибкой. Так каждая разность между опорным и интерполируемым значением влияет на величину *MAE* в прямой пропорции, и у *MAE* нет большей чувствительности к большим отклонениям интерполируемого значения от реального, что присутствует у среднеквадратической ошибки.

Далее значения средней абсолютной ошибки *MAE* сопоставлены с величиной сдвига по времени суток результатов интерполяции и исходных, использовавшихся для интерполяции, снимков (рис. 3). Из рисунка 3 можно делать вывод, что, чем больше данный сдвиг по времени суток, тем больше значение средней абсолютной ошибки интерполяции. Вероятно, это связанно с внутрисуточной изменчивостью температуры поверхности оз. Байкал.

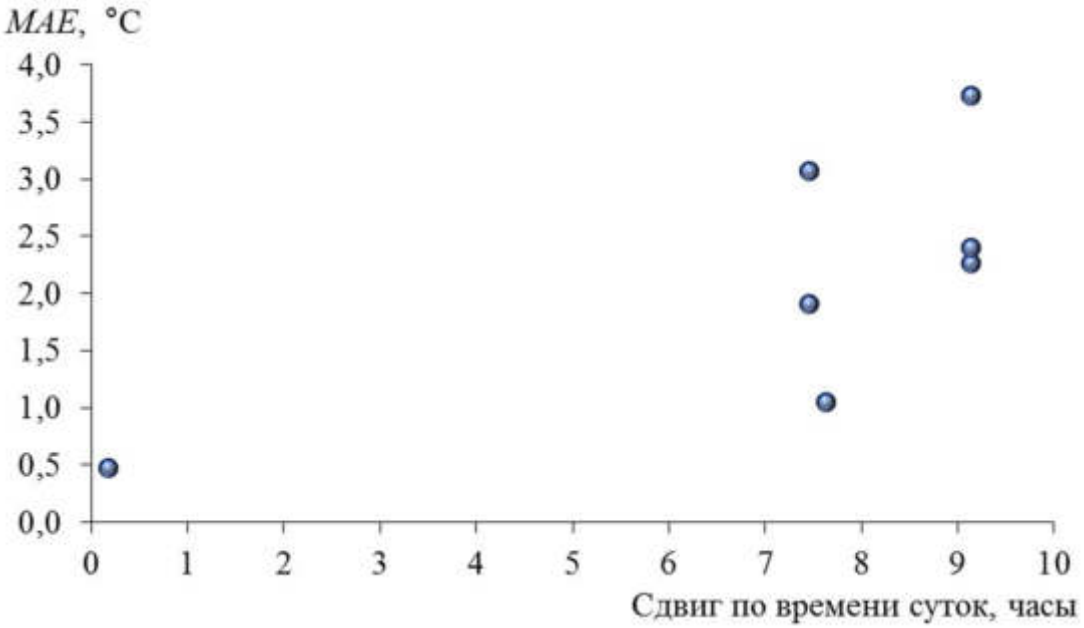


Рис. 3. Ошибки интерполяции температуры в сопоставлении со сдвигом по времени суток исходных снимков и результатов интерполяции

На рисунке 4 показана изменчивость значений средней температуры поверхности оз. Байкал 16–18 июня 2015 г., оценённая по спутниковым снимкам AVHRR и демонстрирующая, что размах среднего по акватории озера значения температуры поверхности может достигать в указанный промежуток времени практически 3 °С.

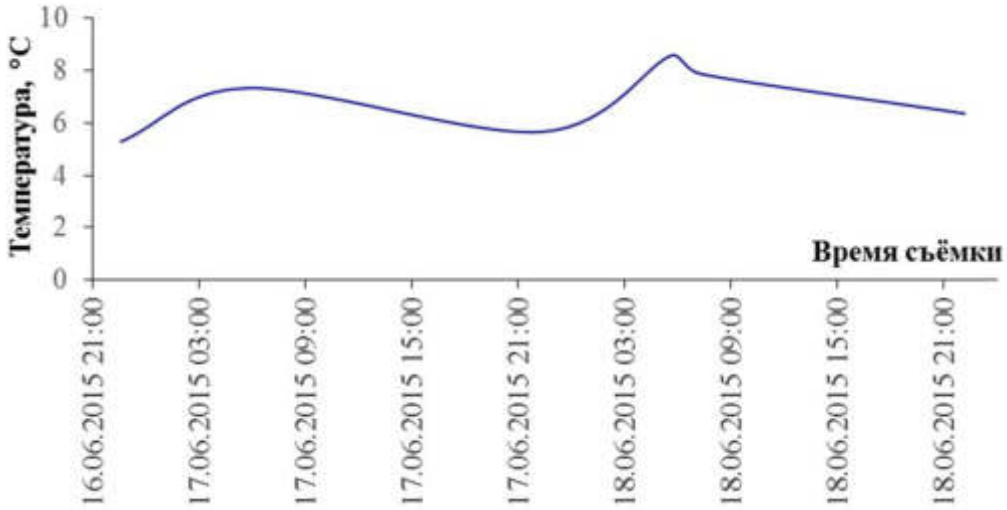


Рис. 4. Ход средних значений температуры поверхности оз. Байкал 16–18 июня 2015 г. по данным AVHRR (время в UTC)

Данное обстоятельство обуславливает показанную выше невозможность восстанавливать путём линейной интерполяции по времени распределение температуры поверхности воды оз. Байкал с удовлетворительной точностью при использовании для восстановления рас-

пределения температуры в дневное время ночных снимков и наоборот (как, например, показано на рис. 2). Однако при небольшом расхождении по времени суток результата интерполяции и использовавшихся для интерполяции снимков (рис. 1) можно получать удовлетворительные результаты восстановления распределения температуры поверхности воды оз. Байкал с ошибкой около 0,5 °С, которая сопоставима с ошибкой оценки температуры озера по данным AVHRR с применением региональных алгоритмов.

Выводы

В работе внимание было уделено изучению возможности применения линейной интерполяции по времени для восстановления «пробелов» в серии температурных карт оз. Байкал. Для этого методом линейной интерполяции были восстановлены данные о распределении температуры поверхности озера и проведено сравнение полученного в результате интерполяции распределения температуры с распределением, оценённым непосредственно по спутниковому снимку по региональным алгоритмам за ту же дату и время. Составлены схемы пространственного распределения абсолютного значения разницы интерполированной температуры и температуры, полученной по опорному спутниковому снимку AVHRR. Определена величина средней абсолютной ошибки интерполяции температуры поверхности оз. Байкал.

В работе показано, что, чем больше сдвиг по времени суток результата интерполяции и использовавшихся для интерполяции снимков, тем соответственно больше ошибка интерполяции. Видимо, это связанно с суточным ходом температуры поверхности оз. Байкал. По всей вероятности, приемлемым вариантом линейной интерполяции может быть только интерполяция с минимальным смешением по времени суток как самих снимков, применяемых для интерполяции, так и результата интерполяции.

Результаты данного исследования является предварительным и в дальнейшем будут проверятся на большем количестве снимков.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-29-05045.

Список литературы

1. Могилев Н. Ю., Гнатовский Р. Ю. Исследование режима температуры поверхности озера Байкал с использованием регулярной спутниковой информации // География и природ. ресурсы. 2002. № 2. С. 136–142.

2. Сутырина Е. Н. Дистанционные методы оценки температуры поверхности воды оз. Байкал // Естественные и технические науки. 2006. № 5. С. 163–165.

3. Сутырина Е. Н. Изучение внутренних водоемов и водосборов с применением данных дистанционного зондирования Земли. Иркутск : Изд-во ИГУ, 2014. 133 с.

4. Cyclonic circulation and upwelling in Lake Baikal / E. Troitskaya [et al.] // Aquatic Sciences. 2015. Vol. 77, Issue 2. P. 171–182. DOI: 10.1007/s00027-014-0361-8.

УДК 556.555; 528.8

Оценка экологически значимых параметров водной среды оз. Байкал по данным AVHRR

Е. Н. Сутырина (ensut78@gmail.com)

Иркутский государственный университет, Иркутск

Аннотация. Целью данной работы является разработка региональных подходов к оценке и картографированию экологически значимых гидрофизических параметров оз. Байкал – степени стаивания и разрушения снежно-ледяного покрова, прозрачности и температуры поверхности воды с применением данных дистанционного зондирования.

Ключевые слова: озеро Байкал**,** пространственное распределение, гидрофизические характеристики, данные радиометра AVHRR.

Основной целью работы является разработка региональных подходов к оценке экологически значимых гидрофизических параметров оз. Байкал с применением данных дистанционного зондирования.

В условиях меняющегося климата и возрастающего антропогенного воздействия на водные объекты в том числе от рекреации актуальной становится проблема дистанционного контроля состояния внутренних водоёмов. При изучении озера Байкал с площадью акватории 31,7 тыс. км² [12] применение дистанционных методов дает возможность изучать водоём, как целостный географический объект, наблюдая за состоянием всего озера, что затруднительно обеспечить традиционными наземными методами (рис. 1).

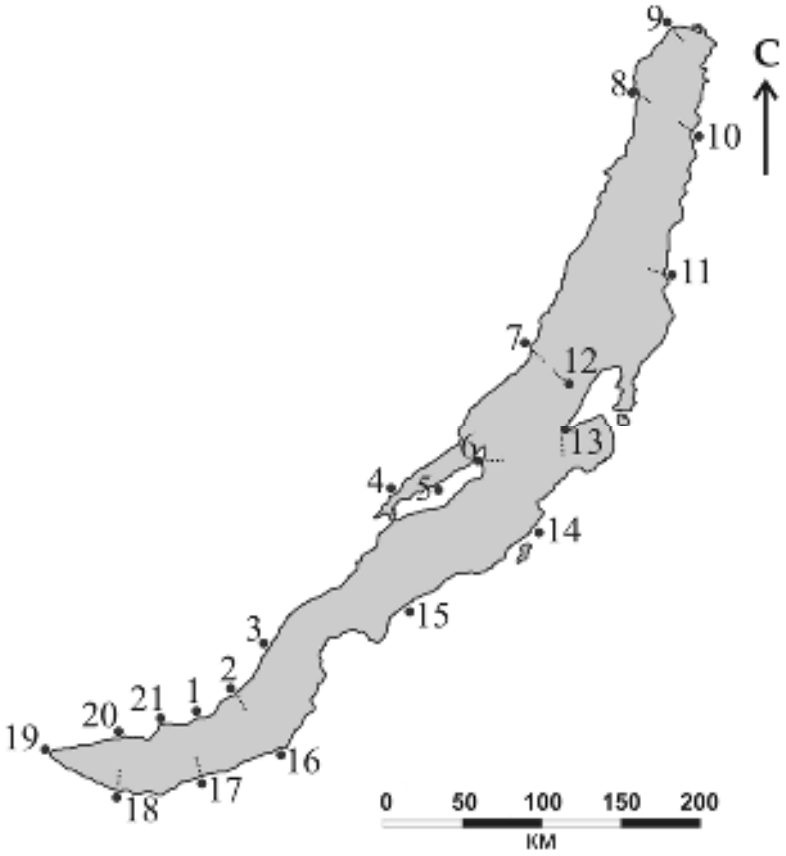


Рис. 1. Схема расположения пунктов ледовых наблюдений и ледовых профилей на оз. Байкал: направления ледовых профилей показаны штрихованными линиями; пункты ледовых наблюдений показаны точкам: *1* – Бол. Коты; *2* – Бол. Голоустное; *3* – Песчаная бухта; *4* – Сарма; *5* – Хужир; *6* – Узур; *7* – Солнечная; *8* – Байкальское; *9* – Нижнеангарск; *10* – Томпа; *11* – Давша; *12* – Бол. Ушканий остров; *13* – Ниж. Изголовье; *14* – Турка; *15* – Сухая; *16* – Бабушкин; *17* – Танхой; *18* – Байкальск; *19* – Култук; *20* – Маритуй; *21* – Байкал

В рамках исследования были использованы данные радиометра AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), который установлен на борту метеорологических спутников серии NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), функционирующих на околополярной орбите на высоте порядка 850 км. Радиометр AVHRR представляет собой типичный сканер и измеряет собственное и отраженное Землей излучение. Линейный размер элемента разрешения на местности радиометра AVHRR составляет около 1,1 км в надире.

Ледовые условия является важнейшим параметром, позволяющим выявить климатические изменения и вносят весомый вклад в состояние экосистемы озера. Кроме сугубо научных целей информация о ледовой обстановке необходима для безопасной эксплуатации ледовых дорог, планомерного проведения навигации. Стандартные наблюдения за состоянием ледяного покрова на стационарной гидрометеорологической сети в основном мало репрезентативны (рис. 1) и большая часть акватории остается необследованной. Кроме того, экспедиционные ледовые исследования в период разрушения льда могут быть опасны.

В период очищения водоёмов ото льда использование данных AVHRR об отражательной способности поверхности позволяют определять стадии разрушения снежно-ледяного покрова. В работе при оценке стадий стаивания и разрушения снежно-ледяного покрова на оз. Байкал за основу была принята классификация, приведенная В. М. Мишоном [2] (табл. 1) и доработанная на основании ряда исследований оптических свойств разрушающегося льда и снега, основными из которых являются работы [1; 8; 10; 11], а также совместного анализа мелкомасштабных снимков AVHRR с квазисинхронными снимками высокого и сверхвысокого разрешения, дающими частичное покрытие акваторий в отдельные даты. В результате для каждого типа, приведенного в табл. 1, был установлен диапазон значений альбедо, используемый для дальнейшего составления карт-схем по спутниковым изображениям.

Таблица 1

Характеристика состояния снежно-ледяной поверхности при различных степенях ее стаивания и разрушения [2]

Степень стаивания и разрушения	Характеристика состояния снежно-ледяной поверхности
I	Снег чистый, плотный, мелко- и среднезернистый, сухой
II	Снег чистый, слабо увлажненный (начало таяния), плотный; местами появляются отдельные серые пятна (более увлажненные участки)
III	Снег чистый, днем местами появляется вода; количество серых пятен составляет 10 – 20 % видимой поверхности
IV	Снег чистый, влажный, начинает оседать, переходит в крупнозернистый; на поверхности около 30 % серых и темных пятен
V	Снег влажный, местами загрязнен, на льду под снегом вода; количество белых (чистый снег), серых и темных пятен одинаково
VI	Снег интенсивно тает, на льду вода, снежная каша. Сплочённость после вскрытия составляет от 7 до 10 баллов
VII	Снег крупнозернистый, сохраняется на отдельных местах; ледяная поверхность шероховатая, серых или темных оттенков. Сплочённость после вскрытия составляет 7 баллов
VIII	Снежная каша, лёд тёмный, шероховатый, отдельные участки серого цвета. Сплочённость после вскрытия составляет от 5 до 7 баллов
IX	Лёд тёмный, распадается на вертикальные столбики, вода на льду. Сплочённость после вскрытия составляет менее 5 баллов

Для анализа точности предложенной методики привлекались не применявшиеся при разработке классификации крупномасштабные космофотокарты с метровым и субметровым разрешением и данные полевых исследований в апреле 2015 г., были составлены матрицы точности классификации, показавшие точность 91,7 %, подробно обсуждаемые в [6].

Ниже для примера приведены полученные карты-схемы, на которых представлено состояние снежно-ледяного покрова оз. Байкал в 2010 и 2012 гг., которые позволяют изучать динамику разрушения ледяного покрова и демонстрируют существенную межгодовую изменчивость (рис. 2).

Применение линейной интерполяции для восстановления данных в дни с высоким содержанием облачности на снимках частично решает проблему с облачностью. На рисунке 3 приведён пример сопоставления состояния снежно-ледяного покрова оз. Байкал по степени таивания и разрушения 9 мая 2015 г., наблюдённого по спутниковым данным (*б*) и полученного линейной интерполяцией (*г*) данных за 8 мая (*а*) и 10 мая (*в*) 2015 г. Применение данного подхода для восстановления информации при пропуске данных за 1–3 суток показывает точность сопоставимую с точностью самой классификации – 90,3 %.

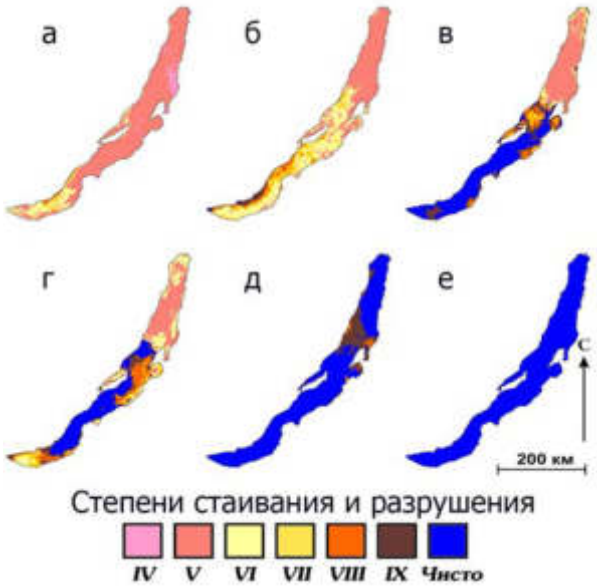


Рис. 2. Состояние снежно-ледяного покрова оз. Байкал по степени таивания и разрушения:
а – 10.05.2010 г.; *б* –17.05.2010 г.; *в* – 25.05.2010 г.; *г* – 4.05.2012 г.; *д* –14.05.2012 г.;
е – 21.05.2012 г. (IV–IX см. табл. 1)

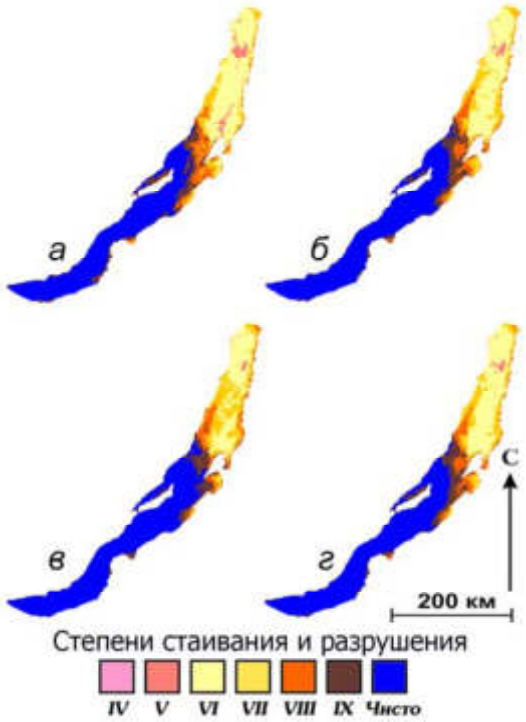


Рис. 3. Сопоставление состояния снежно-ледяного покрова оз. Байкал по степени таивания и разрушения 9 мая 2015 г., наблюдённого по спутниковым данным (*б*) и полученного линейной интерполяцией (*г*) данных за 8 мая (*а*) и 10 мая 2015 г. (IV–IX см. табл. 1)

Температура поверхности водоёмов является значимой характеристикой состояния экосистемы озера и важнейшим параметром, позволяющим выявить климатические изменения. Также информация о распределении температуры поверхности может использоваться для изучения ряда динамических явлений, термобара, апвеллинга и вихревых образований. В ходе исследования на основании сопоставления массивов квазисинхронных судовых и спутниковых измерений разработаны региональные алгоритмы оценки температуры поверхности воды по данным AVHRR, основанные на дифференцированном определении температуры в различное время суток (день, ночь) и в различные месяцы (июнь-июль, август-сентябрь, октябрь–декабрь), применении квадратичной модификации метода «расщеплённого окна прозрачности» [9] и дополнительном привлечении информации видимого и ближнего инфракрасного каналов в дневное время суток, не использовавшемся ранее для водных объектов [5]:

Применение разработанных региональных алгоритмов позволяет увеличить точность определения температуры поверхности воды до 0,4 К в ночное время, и в дневное время суток до 0,3 К. Использование полученных авторских алгоритмов оценки температуры поверхности воды оз. Байкал дает преимущество перед применением предложенных ранее методик [3; 4], точность которых не превышала 0,7 К для ночных и 0,5 К для дневных условий.

Ниже для примера, приведены серии карт-схем температуры поверхности воды оз. Байкал в 2010 и 2012 гг. На приведённых сериях карт наблюдается существенная внутригодовая и межгодовая изменчивость в распределении температуры поверхности озёр. Наибольшая межгодовая изменчивость в распределении температуры поверхности оз. Байкал наблюдается в августе, на который в целом приходится и наибольший прогрев озера. Поэтому для анализа межгодовой изменчивости температурного режима данного водоёма наиболее оправдано изучение вариаций температуры воды на поверхности в именно в время наибольшего прогрева озера.

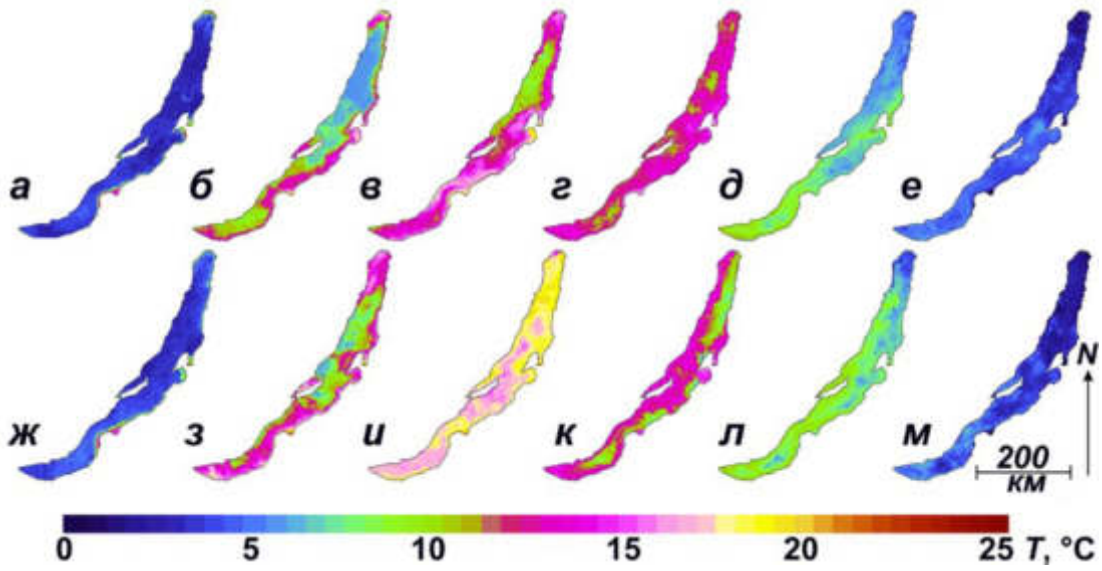


Рис. 4. Распределение температуры поверхности воды оз. Байкал в 2010 г.:
а – 10 июня; *б* – 18 июля; *в* – 8 августа; *г* – 1 сентября; *д* – 2 октября; *е* – 7 ноября и в 2012 г.:
ж – 10 июня; *з* – 14 июля; *и* – 11 августа; *к* – 4 сентября; *л* – 4 октября; *м* – 3 ноября

Ниже представлены карты распределения температуры, соответствующие наибольшему прогреву воды поверхности оз. Байкал, отобранные для каждого года за период 1998–2015 гг., которые иллюстрируют существенную межгодовую изменчивость (рис. 5).

Максимальные значения температуры на поверхности в открытых частях изучаемых акваторий существенно изменяются от года к году. За период исследования её значения изменялись в Южной котловине оз. Байкал от 13,5 (в 2010 г.) до 20,3 °С (в 2015 г.), в Центральной котловине оз. Байкал – от 15,1 (в 2006 г.) до 19,8 °С (в 2015 г.), в Северной котловине оз. Байкал – от 12,0 (в 2009 г.) до 20,3 °С (в 2015 г.).

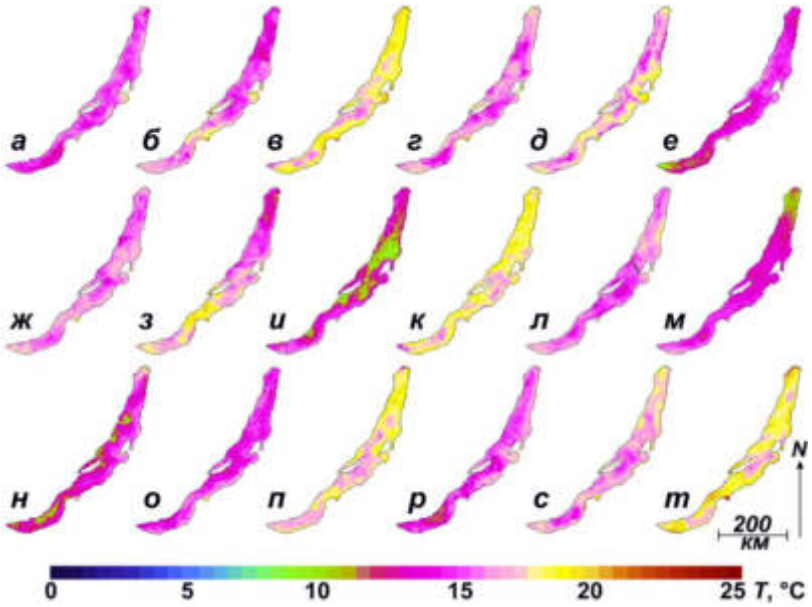


Рис. 5. Распределение температуры поверхности воды в оз. Байкал:
30.08.1998 (*а*), 2.08.1999 (*б*), 8.08.2000 (*в*), 12.08.2001 (*г*), 8.08.2002 (*д*), 28.08.2003 (*е*), 18.08.2004 (*ж*), 3.08.2005 (*з*), 15.08.2006 (*и*), 15.08.2007 (*к*), 13.08.2008 (*л*), 1.09.2009 (*м*), 23.08.2010 (*н*), 17.08.2011 (*о*), 11.08.2012 (*п*),30.08.2013 (*р*), 29.7.2014 (*с*), 21.08.2015 (*т*)

Еще одним экологически значимым параметром оз. Байкал является прозрачность воды, связь которой с содержанием в воде взвесей и растворенных веществ различного происхождения относит прозрачность к важнейшим физическим показателям качества воды [7]. В рамках исследования были получены региональные зависимости величины условной прозрачности D_s, м, от нормализованного альбедо 1 канала AVHRR A_1, %: линейная зависимость $D_s = -a_s \cdot A_1 + b_s$ – для периода с начала июня по середину июля и с середины сентября по конец октября со среднеквадратической ошибкой равной 1,9 м и коэффициентом детерминации равным 0,82, а также зависимость $D_s = c_s - d_s \cdot (f_s - A_1)^k$ – для периода с середины июля по середину сентября со значением среднеквадратической ошибки равным 0,9 м и коэффициентом детерминации 0,66, что является удовлетворительным результатом. С использованием данных зависимостей были составлены карты распределения условной прозрачности в поверхностном слое оз. Байкал в период с июня по октябрь 1998–2015 г. Ниже приведён пример распределения прозрачности в 2012 и 2013 гг. (рис. 6).

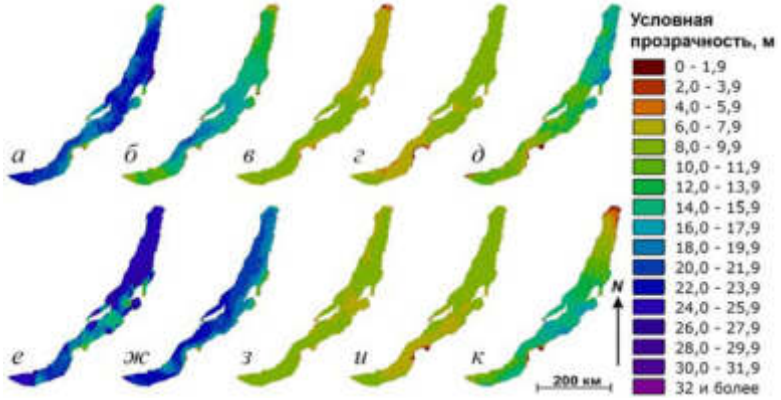


Рис. 6. Распределение условной прозрачности воды в поверхностном слое озера Байкал по данным AVHRR в 2012 г.: *а* – 13 июня; *б* – 1 июля; *в* – 28 июля; *г* – 1 сентября; *д* – 6 октября и 2013 г.: *е*– 10 июня; *ж*– 26 июня; *з* – 26 июля; *и* – 31 августа; *к* – 14 октября

Согласно спутниковым данным, за период с июня по октябрь прозрачность воды в поверхностном слое озера менялась от менее чем 0,1 м – в непосредственной близости от дельты р. Селенги, что обусловлено выносом продуктов размыва р. Селенгой, до 27,5 м – в глубоководных районах озера. По соотношению степени загрязнения воды с условной прозрачностью [7] вода в поверхностном слое озера Байкал в целом относится к очень чистой в течение всего анализируемого периода с июня по октябрь, однако в мелководных заливах, таких, как залив Провал, в сентябре-октябре в отдельные годы позволяет по величине условной прозрачности отнести воду в поверхностном слое к умеренно загрязненной, загрязненной или даже к грязной.

Таким образом, теоретическая и практическая значимость выполненного исследования заключается в том, что основные выводы и положения могут быть применимы в практической реализации дистанционного контроля экологически значимых гидрофизических параметров таких крупных внутренних водоёмов, как оз. Байкал. Материалы, полученные по данным AVHRR, являются незаменимым инструментов в изучении Байкала, и в зависимости от поставленных задач могут играть или основную, или вспомогательную роль в исследовании.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-29-05045.

Список литературы

1. *Матвеев Л. Т.* Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. Л. : Гидрометеоиздат, 1976. 640 с.
2. *Мишон В. М.* Гидрофизика. Воронеж : Изд-во ВГУ, 1979. 308 с.
3. *Могилев Н. Ю.*, Гнатовский Р. Ю. Исследование режима температуры поверхности озера Байкал с использованием регулярной спутниковой информации // География и природные ресурсы. 2002. № 2. С. 136–142.
4. *Сутырина Е. Н.* Дистанционные методы оценки температуры поверхности воды оз. Байкал // Естеств. и техн. науки. 2006. № 5. С. 163–165.
5. *Сутырина Е. Н.* Изучение внутренних водоемов и водосборов с применением данных дистанционного зондирования Земли. Иркутск : Изд-во ИГУ, 2014. 133 с.
6. *Сутырина Е. Н.* Изучение параметров ледово-термического режима озера Байкал с использованием дистанционных методов // ИнтерКарто/ИнтерГИС, 2017. Т. 23, № 3. С. 52–62.
7. *Шитиков В. К.*, Розенберг Г. С., Зинченко Т. Д. Количественная гидроэкология: методы системной идентификации. Тольятти : ИЭВБ РАН, 2003. 463 с.
8. *Arst H.*, Sipelgas L. In situ and satellite investigations of optical properties of the ice cover in the Baltic Sea region // Proc. Estonian Acad. Sci. Biol. Ecol. 2004. Vol. 53 (1). P. 25–36.
9. *Barton I. J.* Satellite-derived sea surface temperatures: Current status // J. Geoph. Res. 1995. Vol. 100. P. 8777-8790.
10. Solar radiation and albedo regime in ice-covered lakes: Early spring / M. Petrov, R. Zdorovennov, N. Palshin, A. Terzhevik // Proc. 8th Workshop on Physical Processes in Natural Waters. Lund. 2004. P. 31–38.
11. *Singh P.*, Singh V. P. Snow and Glacier Hydrology. Dordrecht, Boston, London : Kluwer academic publishers, 2001. 756 p.
12. Cyclonic circulation and upwelling in Lake Baikal / E. Troitskaya [et al.] // Aquatic Sciences. 2015. Vol. 77, Issue 2. P. 171–182. DOI: 10.1007/s00027-014-0361-8.

УДК 551.501.86

Использование данных спутниковой мультиспектральной съемки при анализе облачных систем полярных циклонов

Н. В. Федосеева (fednat@mail.ru), Ю. В. Ефимова (luluef@mail.ru),
В. О. Лопуха (Svejov24@yandex.ru)

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург

Аннотация. Работа посвящена исследованию облачных систем полярных циклонов над морями российской Арктики по данным спутниковой мультиспектральной съемки, синоптических карт: приземных, высотных. Рассматривается мезомасштабный полярный циклоны за срок 1–2 сентября 2009 г. Снимки получены при помощи спектрорадиометра MODIS, установленного на борту спутников Terra и Aqua в видимом и инфракрасном диапазонах длин волн. Данные синоптических карт получены при помощи АПК Oscar. Для анализа облачных систем полярных циклонов по данным дистанционного зондирования, применяются RGB модели цветового синтеза. Комплексный анализ спутниковых изображений позволил проанализировать микрофизический состав облачности полярных циклонов на разных стадиях их развития. Предложенные методы цифровой обработки данных могут использоваться при анализе поля облачности, в том числе и в условиях полярной ночи. Дальнейшее изучение условий возникновения и эволюции мезомасштабных циклонов актуально ввиду активного освоения русской Арктики и нестабильностью погодных условий в зоне возникновения полярных циклонов, что представляет большую опасность для авиации, судоходства и эксплуатации нефтедобывающих платформ.

Ключевые слова: мезомасштабные циклоны, полярные циклоны, мультиспектральное спутниковое зондирование, MODIS, TERRA, Oscar синоптические карты, спутниковые изображения, облачность.

Введение

Мезомасштабные вихри, образующиеся к полюсу от основной бароклинной зоны, получили название – полярные циклоны. Акватория Северо-Европейского бассейна является наиболее хорошо изученная область появления мезомасштабных полярных циклонов в Северном полушарии. Она благоприятна для формирования полярных циклонов ввиду значительной разницы температур в приводном слое. Такая разница усилена теплым атлантическим течением на севере и массивом дрейфовых льдов. Полярные циклоны над морями восточной части российской Арктики менее изучены, чем над западной её частью [8].

Арктический климат играет главную роль в частоте появлений и интенсивности полярных циклонов. Формирование новых областей, благоприятных для зарождения и развития мезомасштабных циклонов, связано с глобальным потеплением и сокращением площади ледяного покрова в морях Северного Ледовитого океана. К таким районам относятся Восточно-Сибирское, Чукотское море и море Лаптевых. Это связано с тем, что ранее акватории вышеперечисленных морей в течение всего года были покрыты льдом, сейчас же летом и осенью они полностью освобождаются от него [1].

Размер полярных циклонов варьируется от 100 до 1000 км, т. е. их размер весьма незначителен в сравнении с внетропическими циклонами. Этим объясняется тот факт, что мезомасштабные циклоны трудно обнаружить в поле давления.

Для мезомасштабных полярных циклонов характерен короткий срок жизни, относительно крупномасштабных атмосферных вихрей. В среднем он составляет от нескольких часов до 3 суток, при условии малоподвижности и нахождения над водной поверхностью они могут существовать в течении более продолжительного времени.

Процесс их зарождения и развития проходит быстро и характеризуется резким падением давления. Из-за малого количества метеорологических станций, сложно определить давление на уровне море в центре мезомасштабного полярного циклона. Выделение полярных циклонов в отдельный подтип вызвано тем, что они относятся к морским системам со скоростью приземного ветра, превышающей 15 м/с. Средние значения скорости ветра, лежат в пределах 18,5–23,5 м/с, иногда достигая ураганной силы, при сильной конвергенцией ветра в нижних слоях и дивергенции в верхних слоях атмосферы [6].

Проявляемый к полярным циклонам интерес связан в первую очередь с внезапным и резким ухудшением погоды в зоне их возникновения и возможным участием этих мезовихрей в формировании глубинных водных масс в районах частого мезомасштабного циклогенеза. Осадки и облачность в таких мезовихрях распространяются по горизонтали на 150–250 км, по вертикали до 3 км. Такие возмущения не имеют экстремальных высот из-за их малых размеров и короткого времени существования. Для нижних слоев атмосферы в области полярных циклонов характерна неустойчивая термическая стратификация, вызванная перемещением холодного воздуха на относительно теплую подстилающую поверхность [2; 5].

Исследование полярных циклонов особенно актуально ввиду интенсивного освоения российской Арктики и возникновения в арктических морях России новых районов формирования мезоциклонов, вызванных резким уменьшением за последние годы площади ледового покрова Северного Ледовитого океана. Данные мультиспектральной спутниковой съемки, благодаря ее глобальности и высокой периодичности, являются лучшим инструментом для мониторинга полярных циклонов, в отличие от синоптических карт и численных моделей прогнозов погоды. Применение метода цветового синтезирования спутниковых изображений, основанного на использовании дальних ИК каналов, позволяет анализировать эволюцию облачной системы полярных циклонов в условиях как дневной, так и ночной съемки, и полярной ночи, что особенно актуально в рассматриваемом регионе.

Классификация, условия образования и развития полярных циклонов

Традиционно принято выделять два типа облачных систем полярного мезомасштабного циклона – системы в виде спирали и в виде запятой, помимо этого, встречаются более сложные типы облачных структур [3; 8]. В процессе эволюции облачного мезовихря может происходить трансформация облачной системы, имеющей форму запятой, в спиралевидную форму. В этих облачных вихрях можно наблюдать «глаз» бури, аналогично тропическому циклону, однако таких экстремальных значений давления и скорости ветра не отмечается [8].

Кроме морфометрической характеристики облачных вихрей полярных мезомасштабных циклонов, проводится классификация и по ряду других признаков. В основу синоптической классификации положен принцип определения местоположения мезоциклона относительно крупномасштабных синоптических систем [7]. Наиболее часто используется классификация, учитывающая синоптические условия и механизмы формирования полярных мезомасштабных циклонов (табл. 1) [11].

Таблица 1

Классификация, учитывающая синоптические условия и механизмы формирования полярных мезомасштабных циклонов

Группа	Название
1	Системы реверсивной кривизны
2	Барические ложбины
3	Фронты в погранслое атмосферы
4	Холодные депрессии (включая вихревые системы)
5	Облачные запятые
6	Бароклинные волны – системы прямых сдвигов
7	Орографические полярные циклоны

К основным механизмам образования мезовихрей над поверхностью моря относятся:

Бароклинная неустойчивость. Характеризуется динамической волновой неустойчивостью атмосферного потока в поле силы Кориолиса с широтным градиентом температуры и вертикальным градиентом скорости ветра, при этом источником энергии формирующихся возмущений является потенциальная энергия.

Термическая конвекция. Холодная, сухая воздушная масса, перемещаясь с поверхности льда на более теплую поверхность моря, становится теплой и влажной, при этом процесс образования облачности сопровождается выделением скрытого тепла и приводит к развитию глубокой конвекции и образованию мезоциклона. Разница температур воздуха и подстилающей поверхности составляет порядка 20 ° [11].

Баротропная неустойчивость. Такой вид неустойчивости потока связан с горизонтальным сдвигом ветра и возникновением мелкомасштабных вихрей сдвига, которые при наличии определенных условий способны трансформироваться в полярный мезомасштабный циклон.

Условная неустойчивость второго рода. Процесс взаимодействия и взаимного усиления мелкомасштабной влажной конвекции с образованием кучевой облачности и циклонической циркуляции, которая приводит конвергенцию воздуха к центру, приводя к взаимному усилению циркуляции и конвекции. При этом источником энергии служит высвободившееся в процессе конденсации тепло. Однако такой механизм не является основным при образовании полярных мезоциклонов [4].

Циклогеострофичность полярных циклонов оценивается по вкладу цикло и геострофических компонент в уравнении движения. Поскольку в высоких широтах сила Кориолиса близка по значению центробежной силе, полярные циклоны занимают промежуточное положение между геострофическими и циклострофическими вихрями.

Для образования полярных мезоциклонов необходимо наличие форсирующего механизма, например, холодной ложбины или холодного циклонического ядра на уровне 500 гПа при температуре ниже –40 °С [9].

Процесс трансформации мезомасштабного вихря в полярный мезомасштабный циклон вследствие динамического форсинга происходит быстро. Стадии развития полярных циклонов строго не определяются. Традиционно выделяют три стадии эволюции полярного циклона: формирование, максимальное развитие и заполнение.

Полярный циклон 1–2 сентября 2009 г. над морем Лаптевых

Облачная запятая, обнаруженная при анализе спутниковых изображений в срок 1 сентября 2009 г., в районе моря Лаптевых, образовалась в верхней тропосфере под влиянием вихревого движения. Внутренняя её часть имеет четкую границу, внешняя наоборот имеет размытый край, сформированный выбросами перистых облаков (рис. 1).

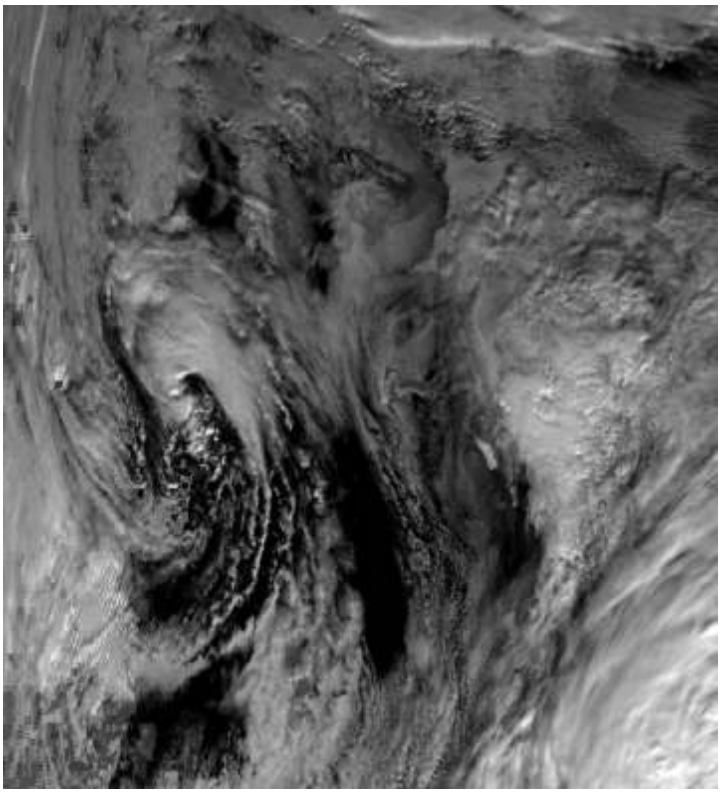


Рис. 1. Облачная запятая над морем Лаптевых, 1 сентября 2009 г., (*а*
) Спутниковое изображение в видимом диапазоне 3:30 UTC, MODIS, спутник Terra

В ходе исследования была проанализирована синоптическая ситуация. Для этого был использован архив барических карт, как приземных, так и высотных, полученных при помощи АПК Oscar. Циклон обнаруживается 1 сентября, 00 UTC, 78°20′58′′ N, 114°31′17′′ E в море Лаптевых. На приземной синоптической карте замкнутых изобар в зоне мезовихря не наблюдается (рис. 2, *а*). Штормовой циклон зафиксирован в малоградиентном поле обширного циклона, располагающегося над морем Лаптевых, арктическом побережьем, Новосибирскими островами и на востоке Северного Ледовитого океана. В поле ветров из-за недостаточной сети станций мезовихрь практически не виден, однако в тыловой части циклона наблюдаются ветра севевро-западного направления (рис. 2, *д*).

В результате анализа карты относительной топографии можно сделать вывод о том, что циклон, в момент обнаружения, находится в очаге холода (рис. 2, *г*). На синоптической карте АТ850 (рис. 2, *б*) облачная запятая также наблюдается в области очага холода.

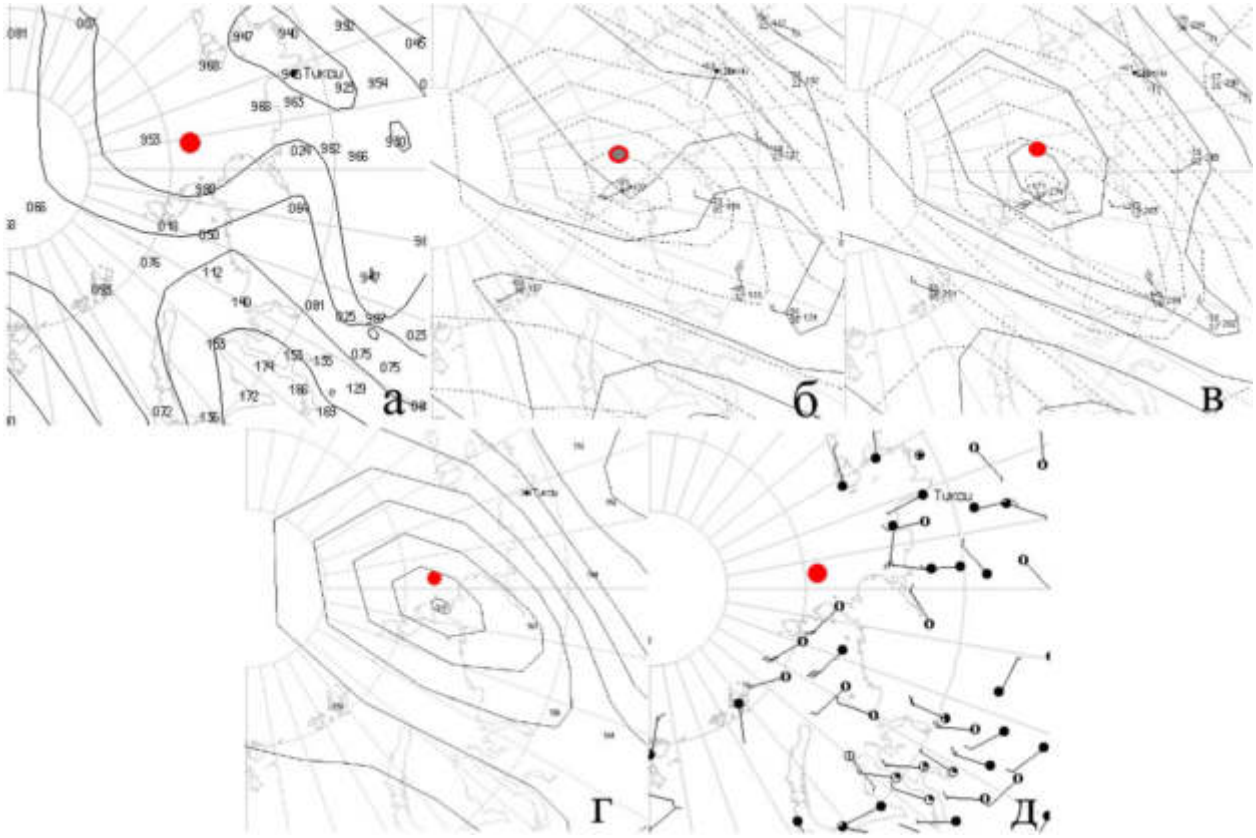


Рис. 2. (*а*) Приземная карта, 00 UTC, (*б*) Карта АТ850, 00 UTC, (*в*) Карта АТ700, 00 UTC, (*г*) Карта ОТ500/1000, 00 UTC, (*д*) Карта ветров, 00 UTC. Прерывистые линии – изотермы, непрерывные – изогипсы, красная точка – положение вихреобразования

На рисунке 3 приведены цветосинтезированные изображения, полученные на основании данных датчика MODIS в оптическом, среднем и тепловом ИК диапазонах спектра, позволяющие проанализировать микрофизический состав облачности полярного циклона в стадии зарождения в море Лаптевых. В соответствии с разработанной шкалой цветовых соответствий (рис. 4), внутренняя часть облачной запятой состоит преимущественно из крупных ледяных кристаллов облачности верхнего яруса, внешнюю составляют водяные облака, состоящие из холодных мелких капель.

Через 12 часов синоптическая ситуация становится классической для зарождающего циклона так как он находится на границе ложбины холода и гребня тепла (начальная стадия развития, молодой циклон). Можно предположить, что мезоциклон активно развивается, возможно, после произошедшей в середине суток регенерации. Анализ термического поля карты АТ850 подтверждает данное заключение (рис. 5).

На рисунке 6 представлен снимок того же полярного циклона в стадии максимального развития с четко выраженным безоблачным «глазом». В процессе развития облачность полярного мезовихря приобретает спиралевидную форму, по ее периферии наблюдаются массивы кучевообразной облачности, при этом верхняя граница облачности снижается, облачность верхнего яруса рассеивается.

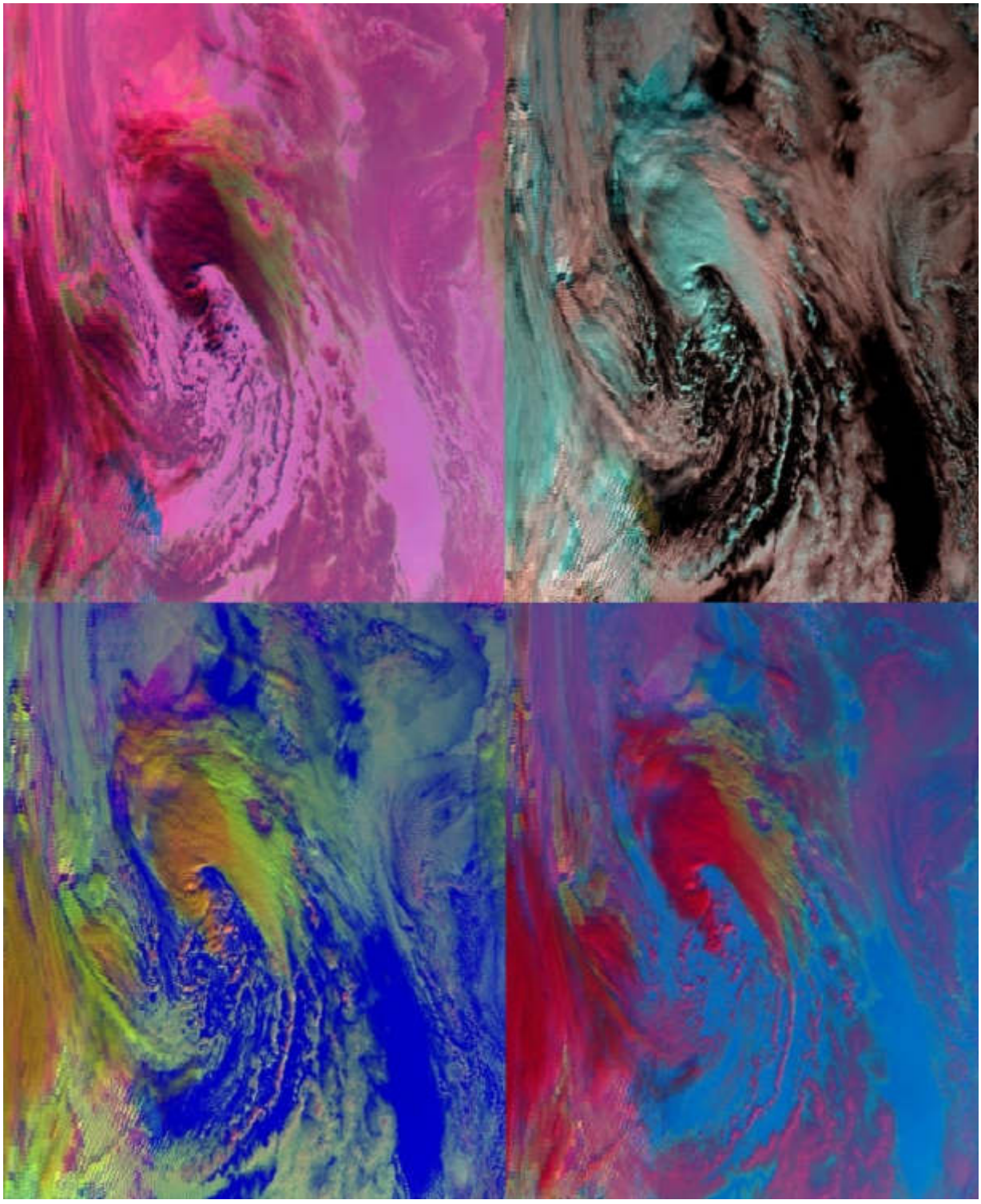


Рис. 3. Полярный циклон в стадии зарождения, 1 сентября 2009 г. 3:30 UTC, MODIS (Terra):
сверху слева – RGB модель 1 с использованием псевдоканала в видимом диапазоне спектра и каналов среднего и дальнего ИК диапазонов, сверху справа – RGB модель 2 с использованием каналов оптического диапазона, снизу слева – RGB модель 3 с использованием каналов оптического и теплового диапазонов, снизу справа – RGB модель 4 с использованием каналов видимого, среднего и дальнего

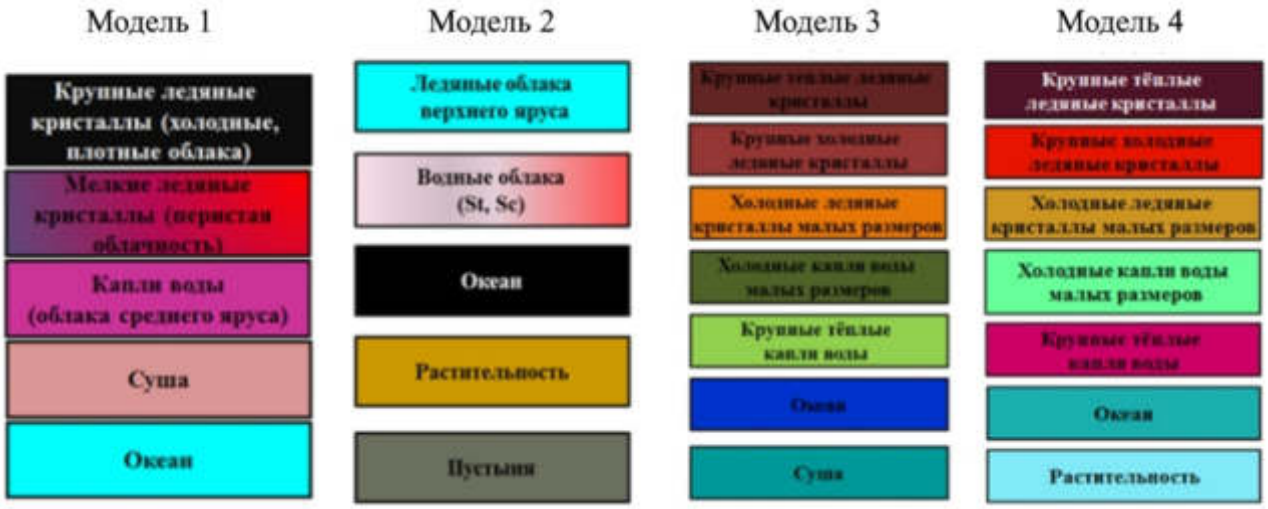


Рис. 4. Цветовые соответствия микрофизического состава облачности на спутниковом изображении, полученном в условиях дневной съемки, с применением RGB моделей

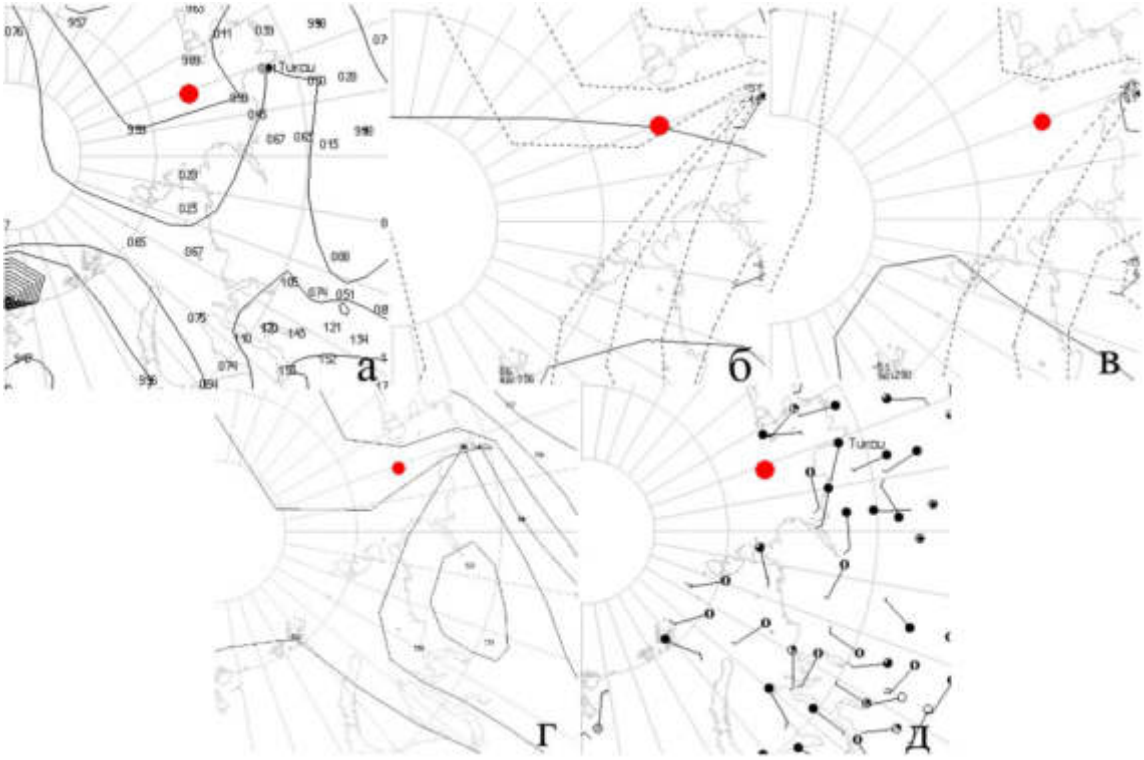


Рис. 5. (*а*) Приземная карта, 18 UTC, (*б*) Карта АТ850, 12 UTC, (*в*) Карта АТ700, 12 UTC, (*г*) Карта ОТ500/1000, 12 UTC, (д) Карта ветров, 15 UTC. Прерывистые линии – изотермы, непрерывные – изогипсы, красная точка – положение вихреобразования

Полученный снимок за 1 сентября 18:50 UTC (рис. 6) выполнен в условиях ночной съемки. Благодаря использованию RGB модели в которой применяются каналы в дальней ИК части спектра, возможно дешифрировать микрофизический состав облачного образования (рис. 4).

В соответствии с разработанной шкалой цветовых соответствий (рис. 7), большую часть облачного массива составляют холодные, плотные водяные облака с вкраплениями перистой облачности, при этом жидкостная доля облачности увеличилась по сравнению с предыдущей стадией.

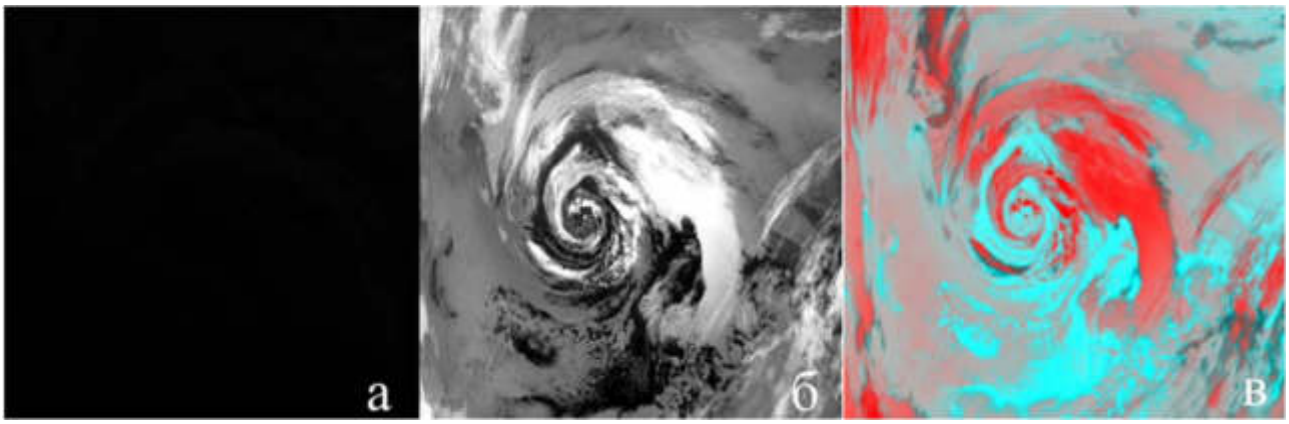


Рис. 6. Полярный циклон в стадии максимального развития, 1 сентября 2009 г. 18:50 UTC, MODIS (Aqua): (*а*) Спутниковое изображение в видимом диапазоне, (*б*) Спутниковое изображение в дальнем ИК диапазоне, (*в*) RGB модель 5 с использованием псевдоканалов в среднем и дальнем ИК диапазонах



Рис. 7. Цветовые соответствия микрофизического состава облачности на спутниковом изображении с применением RGB модели 5, полученным в условиях ночной съемки

2 сентября 2009 г., в 5:50 UTC полярный циклон находился в стадии заполнения (рис. 8). Анализ синоптических карт (рис. 9) показывает, что циклон так же не имел замкнутых изобар и находился в малоградиентном поле обширного заполняющегося циклона. Поле ветра не является показательным из-за отсутствия данных. На карте относительной топографии область обнаружения циклона располагается в передней части очага холода. Данные анализа синоптических карт косвенно подтверждают определяемую по спутниковым снимкам стадию заполнения мезомасштабного полярного циклона.

Применение моделей цветового синтеза позволяет установить, что конвективная спирали облачность в основном состоит из жидких капель воды (рис. 10).

Заключение

В ходе работы была исследована облачная система мезомасштабного полярного циклона в районе моря Лаптевых, наблюдающегося в период 1–2 сентября 2009 г. На основании синоптических карт, приземных и высотных, полученных при помощи АПК Oscar, был проведет анализ синоптической ситуации в районе сцены снимка. который частично подтвердил наличие полярного мезовихря над морем Лаптевых. На основании снимков, полученных при помощи мультиспектрального спектрорадиометра MODIS, установленного на борту спутников Terra и Aqua, с последующим применением RGB моделей цветового синтеза, был проведен комплексный анализ микрофизического состава облачности полярных циклонов на разных стадиях его развития. Выполненный анализ продемонстрировал, что на завершающих стадиях развития мезовихря в его облачной системе преобладают конвективные форм облачности, в то время как на начальном этапе его формирования наблюдается, преимущественно, облачность верхнего яруса. Предложенные методы цифровой обработки данных могут использоваться при анализе эволюции поля облачности мезомасштабного циклона, в том числе, в условиях полярной ночи.

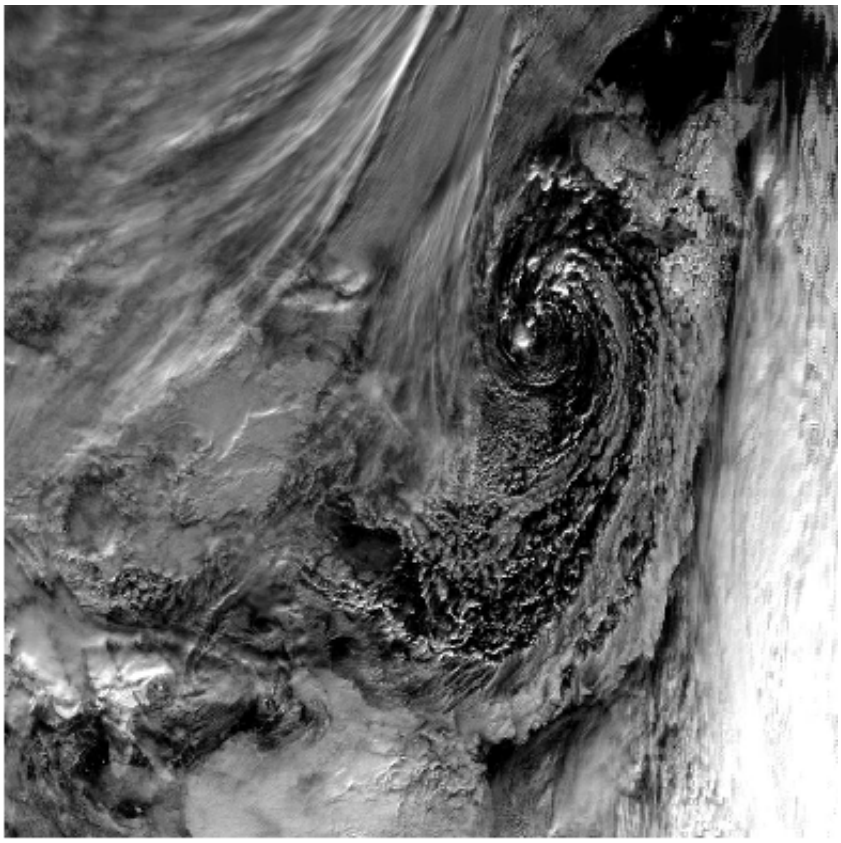


Рис. 8. Полярный циклон в стадии заполнения,
2 сентября 2009 г. 5:50 UTC, MODIS (Terra)

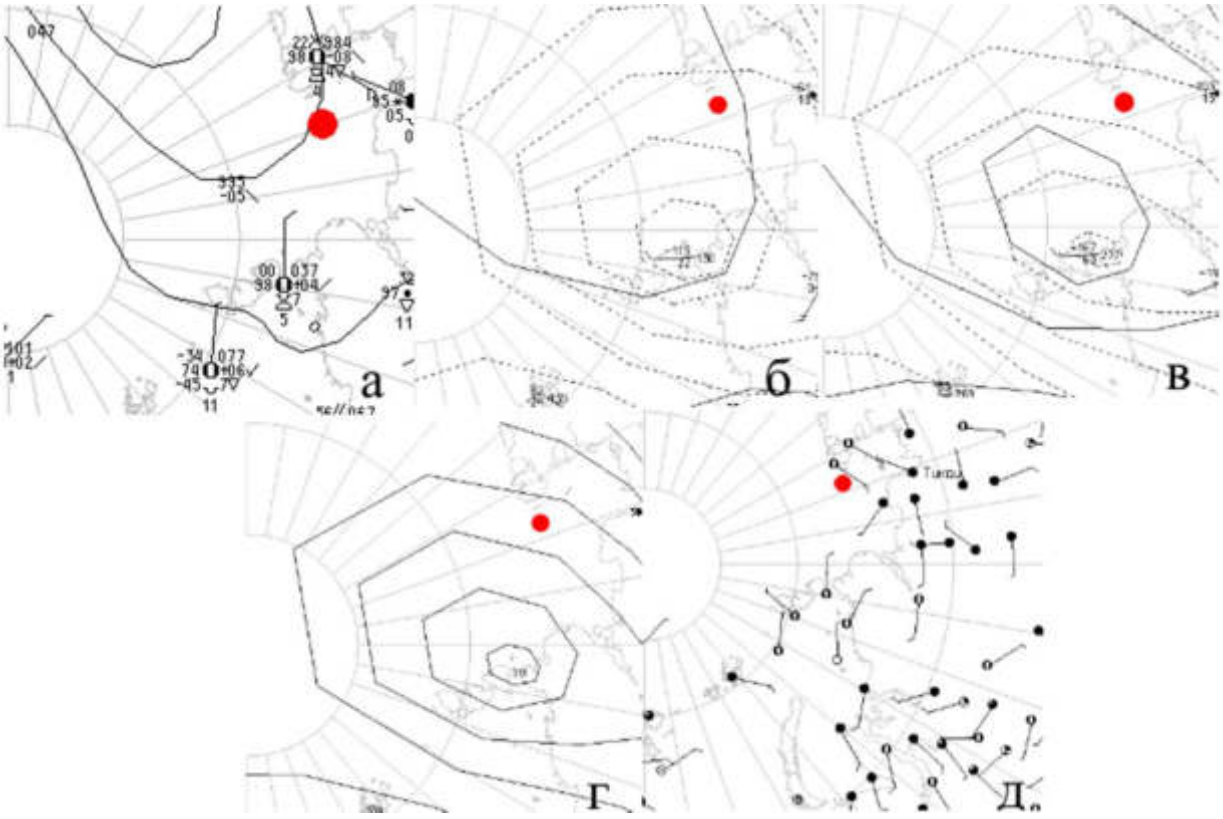


Рис. 9. (*а*) Приземная карта, 18 UTC, (*б*) Карта АТ850, 12 UTC, (в) Карта АТ700, 12 UTC, (*г*) Карта ОТ500/1000, 12 UTC, (*д*) Карта ветров, 15 UTC. Прерывистые линии – изотермы, непрерывные – изогипсы, красная точка – положение вихреобразования

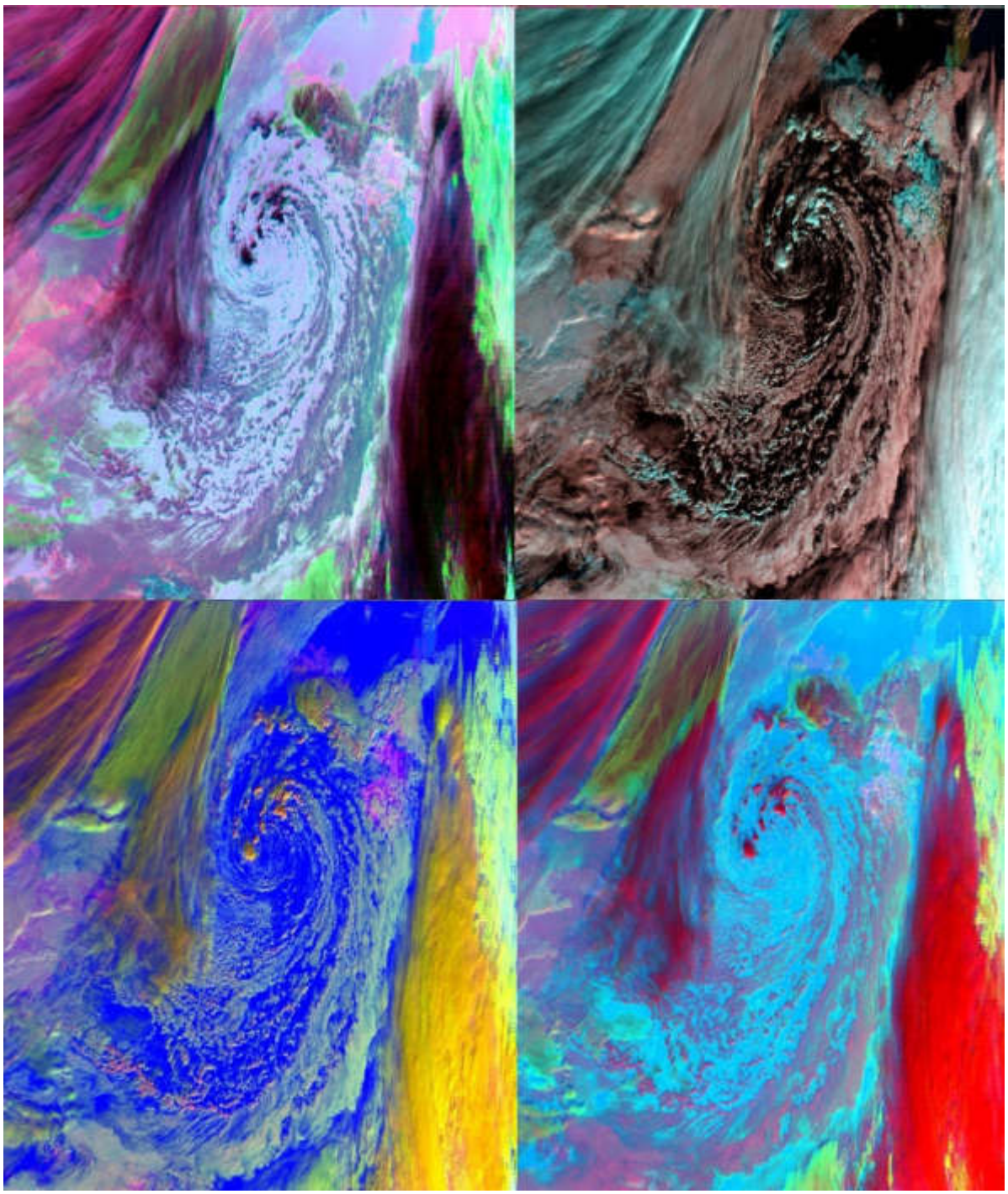


Рис. 10. Полярный циклон в стадии заполнения, 2 сентября 2009 г. 5:50 UTC, MODIS (Terra): сверху слева – RGB модель 1 с использованием псевдоканала в видимом диапазоне спектра и каналов среднего и дальнего ИК диапазонов, сверху справа – RGB модель 2 с использованием каналов оптического диапазона, снизу слева – RGB модель 3 с использованием каналов оптического и теплового диапазонов, снизу справа – RGB модель 4 с использованием каналов видимого, среднего и дальнего

Список литературы

1. Заболотских Е. В., Гурвич И. А., Шапрон Б. Новые районы распространения полярных циклонов в Арктике как результат сокращения площади ледового покрова // Исследование Земли из космоса – дистанционные исследования атмосферных процессов в Арктике. 2015. № 2. С. 64–77.

2. Лагун В. Е., Язев А. И. Глобальное распределение и временная изменчивость параметров циклонических возмущений в атмосфере // Докл. РАН. 1994. Т. 334, № 5. С. 642–645.

3. Луценко Э. И. Мезомасштабный циклогенез над арктическими морями по спутниковым наблюдениям // Тр. ААНИИ. 1999. Т. 441. С. 202–213.

4. Emanuel K. A., Rotunno R. Polar lows as arctic hurricanes // Tellus. 1989. Vol. 41A. P. 1–17.
5. Forbes G. S., Lottes W. D. Classification of mesoscale vortices in polar aistreams and the influense of the large-scale environment on their evolutions // Tellus. 1985. Vol. 37A. P. 132–155.
6. Forsythe, J. M., Haynes J. M. CloudSat Observes a Labrador Sea Polar Low // Bull. Amer. Meteor. Soc. 2015. Vol. 96(8). P. 1229–1231.
7. Lystad M. Polar Lows Project // Final Report. Oslo : The Norwegian Meteorogical Institute, 1986. 196 p.
8. Rasmussen E. A., Turner J. Polar Lows: Mesoscale Weather Systems in the Polar Regions. Cambridge : Cambridge University Press., 2003. 612 p.
9. Rasmussen E. A., Cederskov A. Polar lows: a critical appraisal // In Proccedings, International Symposium on the life Cicles of Extratropical Cyclones. 27 June 1 July 1994. Bergen, Norway. 1994. Vol. 3. P. 199–203.
10. Turner J., Lachlan-Cope T. A., Thomas J. P. A comparison of Arctic and Antarctic mesoscale vortices // J. Geophys. Res. 1993. Vol. 98, N D7. P. 13019–13034.
11. Wilhelmsen K. Climatological study of gale-produsing polar lows near Norway // Tellus. 1985. Vol. 37A. P. 451–459.

UDC 551.557+551.524.7

Developments of Doppler wind Lidar and all solid-state sodium temperature/wind lidar at YanQing Station

Guotao Yang (gtyang@swl.ac.cn), Lifang Du, Xuewu Cheng, Yuan Xia, Faquan Li, Jihong Wang, Yong Yang

National Space Science Center, CAS, State Key Laboratory of Space Weather, Beijing, China

Abstract. An Doppler wind Lidar and an all solid-state sodium temperature/wind lidar have been developed at Yan-Qing Station, Beijing, China. Here we give the introductions of these two lidars.

Keywords: temperature, horizontal wind, Doppler wind Lidar, all solid-state sodium temperature/wind lidar.

An Doppler wind Lidar and an all solid-state sodium temperature/wind lidar have been developed at YanQing Station, Beijing, China (40°N, 116°E). Here we give the introductions of these two lidars.

The Doppler wind Lidar is used to measure horizontal winds at 15–35 km. An injection seeded YAG laser was used to generate narrow linewidth laser pulse at 532nm. Frequency stabilization was achieved through absorption of iodine molecules. The frequency of the seed laser was locked to iodine molecular absorption line 1109 which is close to the upper edge of the absorption range, with long-time (44 h) frequency-locking accuracy being 0,5MHz. When the temporal and spatial resolutions were respectively set to 100 s and 96 m, the wind velocity measurement error of the horizontal wind field at the attitude of 15–35 km was within ~5 m/s, the results showed that the wind measurement Doppler Lidar implemented in Yanqing, Beijing was capable of continuously detecting in the middle and low atmospheric wind field at nighttime.

The all solid-state sodium temperature/wind lidar is used to measure the temperature and horizontal winds at 80–110 km. The 589 nm pulse laser was produced by two injection seeded 1064 nm and 1319 nm Nd:YAG pulse lasers using the sum-frequency generation (SFG) technique. A fiber amplifier is implemented to boost the seed power at 1064 nm, enabling a robust, all-fiber-coupled design for seeding laser unit, absolute laser frequency locking, and cyclic three-frequency switching necessary for simultaneous temperature and wind measurements. The all-fiber-coupled injection seeding configuration together with the solid-state Nd:YAG lasers make the Na Doppler lidar more compact and greatly reduce the system maintenance, which is conducive to transportable and unattended operation. A preliminary observational result obtained with this solid-state sodium Doppler lidar was also reported in this paper.