СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ В РОССИИ

Материалы III Всероссийской научно-практической конференции
Иркутск, 25–27 ноября 2020 г.



ISBN 978-5-9624-1874-2

УДК 551.5(470)(063)
ББК 26.23(2Р)л0
С56

Редколлегия:
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 : материалы III Всероссийской научно-практической конференции. Иркутск, 25–27 ноября 2020 г. / ФГБОУ ВО «ИГУ». – Иркутск : Издательство ИГУ, 2020. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Загл. с этикетки диска.
https://doi.org/10.26516/978-5-9624-1874-2.2020.1-465
ISBN 978-5-9624-1874-2

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», «Влияние климатических изменений на трансформацию природных и социально-экономических условий», «Современные информационные системы в гидрометеорологии», «Региональные особенности атмосферных процессов», «Современные методы и средства гидрометеорологических наблюдений», «Актуальные проблемы подготовки кадров в сфере гидрометеорологии».
Предназначены для специалистов в области гидрометеорологии, работников научных и образовательных учреждений, аспирантов и студентов.

Статьи публикуются в авторской редакции. Авторы статей несут полную ответственность за содержание статей, за соблюдение законов об интеллектуальной собственности и за сам факт их публикации. Мнение и выводы авторов статей могут не совпадать с мнением редакции и членов редколлегии.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Иркутский государственный университет»
664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1; тел. (3952) 52-19-00
Издательство ИГУ
664074, Иркутск, ул. Лермонтова, 124; тел. (3952) 52-18-53; e-mail: izdat@lawinstitut.ru
Подписано к использованию 20.11.2020. Тираж 30 экз. Объем 51,3 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», 2020

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ В РОССИИ

Материалы III Всероссийской научно-практической конференции

Иркутск, 25–27 ноября 2020 г.

ISBN 978-5-9624-1874-2

ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет»
Географический факультет
ФГБУ «Иркутское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды»
НПЦ «Мэп Мейкер»
ФГБУН Институт солнечно-земной физики СО РАН

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ В РОССИИ

Материалы III Всероссийской научно-практической конференции
Иркутск, 25–27 ноября 2020 г.

ISBN 978-5-9624-1874-2

СОДЕРЖАНИЕ

СЕКЦИЯ «ПОГОДА И КЛИМАТ. МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ»

Доброхотов А. В., Козырева Л. В. Пространственное распределение суммарного испарения растительной поверхности с использованием модели SEBAL и наземных метеорологических измерений 7

Зайко П. О. Влияние ассимиляции данных доплеровского метеорологического локатора в мезомасштабную численную модель WRF-ARW на прогноз осадков на территории Республики Беларусь 14

Klevtsova Yu. Yu. On the Inviscid Limit of Stationary Measures for the Stochastic System of the Two-Layer Quasi-Solenoidal Lorenz Model for a Baroclinic Atmosphere 24

Кононова Н. К. Колебания циркуляции атмосферы Северного полушария в период 1899–2019 гг. и связь с ними опасных природных процессов в Сибири в 2019 г. 27

Кочугова Е. А., Шутова А. Е. Цикличность атмосферных осадков и их сезонные изменения на территории Иркутской области 36

Кочугова Е. А., Яковлева А. С. Роль атмосферной циркуляции в формировании температурных аномалий в январе на территории Азиатской России 42

Латышева И. В., Денисов А. В. Современные проблемы в определении облачности на территории Иркутской области 48

Латышева И. В., Латышев С. В., Уварова А. А. Исследование вертикальной структуры и горизонтальной динамики тропических и внетропических циклонов по выходным данным прогностической модели GFS 56

Латышева И. В., Савватеева К. В. Оценка климатической уязвимости оз. Байкал в современный период 64

Мазуркин П. М., Кудряшова А. И. Прогнозирование июльской температуры приземного воздуха для Перми 73

Мазуркин П. М. Особенности динамики температуры приземного воздуха Арктики на острове Тикси и в Мурманске 78

Серых И. В., Сонечкин Д. М. Использование глобальных связей для долгосрочного прогноза Эль-Ниньо – Ла-Нинья 90

Смульский И. И. Среднегодовые палеотемпературы на поверхности Земли 98

Ташилова А. А., Ашабоков Б. А., Кешева Л. А., Теунова Н. В. Отклик температурного режима юга России на основные крупномасштабные атмосферные циркуляции северного полушария 108

Ташилова А. А., Ашабоков Б. А., Кешева Л. А., Теунова Н. В. Прогноз средней годовой температуры на юге ЕТР на 2019–2028 гг. 114

Фёдоров В. М., Фролов Д. М. О возможном влиянии меридионального градиента инсоляции на тенденции изменения глобального климата 120

Холопцев А. В., Кононова Н. К., Подпорин С. А. Вторжения арктического воздуха и ледяной покров Арктики в весенние сезоны XXI в. 126

Чевычелов А. П., Горохов А. Н. Изменение климата и пирогенетические трансформации мерзлотных почв Якутии 134

Черниговская О. А., Кижнер Л. И. Туманы на территории Томской области 143

СЕКЦИЯ «МОНИТОРИНГ, МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ СУШИ»

Антонова Т. И., Сутырина Е. Н. Опыт экстраполяции кривой расходов р. Ии с привлечением данных радарной съемки 147
Давыденко Е. В. Режим уровней воды озер Кольского полуострова 152
Евсеева А. А. Использование системы эталонных створов в мониторинге и оценке качества поверхностных вод (на примере водотоков бассейна Верхнего Иртыша) 157
Захарова М. В. Состояние загрязнения поверхностных вод Калужской области 167
Лебедева Л. С. Зимний сток рек зоны мерзлоты Восточной Сибири 174
Михайлов В. В., Сутырина Е. Н. Изучение протекания термобара в проливе Малое Море (оз. Байкал) в 2020 г. по данным радиометра AVHRR 177
Опекунов А. Ю., Янсон С. Ю., Опекунова М. Г., Кукушкин С. Ю. Минералого-геохимический состав толщи техногенных осадков рек Екатерингофка, Охта, Смоленка (Санкт-Петербург) 181
Потапова Е. В. Комплексное управление прирусловыми территориями рек 190
Потапова Е. В., Абрамова А. В., Зандакова Т. И. ООН в решении вопроса обеспечения человечества чистой водой 193
Старожилов В. Т. Модели высотно-ландшафтных комплексов водосборов Сихотэ-Алинской области как основы мониторинга и моделирования состояния водных объектов суши 196
Сутырина Е. Н., Андреева С. А. Анализ изменения стока рек на территории Усть-Ордынского Бурятского округа 204
Химченко Е. Е., Островский А. Г., Клювиткин А. А. Внутригодовая изменчивость квазиинерционных внутренних волн в Черном море 209
Шаликовский Д. А. О возможности учета азональных факторов при определении нормы стока неизученных рек в зависимости от их порядка 214
Шинкарева Г. Л., Ерина О. Н., Терешина М. А., Соколов Д. И., Руденко А. Ю., Лычагин М. Ю. Закономерности загрязнения Москвы-реки биогенными и потенциально токсичными веществами от истока до устья (по данным 2019 г.) 218

СЕКЦИЯ «ОПАСНЫЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ И ПРОЦЕССЫ»

Авдеев С. М. «Новороссийская бора» и ее генезис 227
Алексеева А. А., Васильев Е. В., Лосев В. М., Бухаров В. М. Современные тенденции и перспективы прогноза опасных конвективных явлений погоды 232
Антипина А. А., Георгиева А. В., Добчинова А. Ц. Опасные явления погоды для авиации в районе аэродрома Иркутск 242
Антипина А. А., Георгиева А. В., Добчинова А. Ц. Исследование неустойчивости Кельвина – Гельмгольца в Иркутской области 247
Леонов И. И., Соколихина Н. Н. Метеорологические условия образования гололедно-изморозевых отложений на территории Иркутской области 253

Линникова С. А., Олемской С. В. Исследование ветрового режима на аэродромах Иркутской области и Республики Бурятия 260
Любицкий Ю. В. Штормовые нагоны на российском побережье Японского, Охотского и Берингова морей 264
Нагуманова А. С. Особенности распределения пыльных бурь по территории России 274
Нечепуренко О. Е., Горбатенко В. П., Константинова Д. А., Пустовалов К. Н. Сопряженность положения грозовых ячеек с высокими значениями индексов неустойчивости атмосферы на юго-востоке Западной Сибири 278
Петриченко С. А. Некоторые особенности использования модели WRF-ARW для прогноза перемещений и интенсивности тропических циклонов 286
Полозок А. А., Фомин В. В., Фомина И. Н. Пространственные характеристики ветрового волнения в Азовском море при разных фазах движения циклона 296
Синюкович В. Н., Чернявская И. А., Шелемба С. С. Наводнение на южных притоках Байкала в июле 2019 года 302
Смирнов И. А., Дронова Е. А. Влияние максимальных за год суточных сумм осадков на изменение уровней и расходов воды в реках Иркутско-Черемховской равнины в теплое время года на примере реки Ия близ города Тулуна 307
Созаева Л. Т. Особенности рассеяния и ослабления инфракрасного излучения частицами сажи 312
Чижикова Н. А., Голосов В. Н., Ермолаев О. П., Мухарамова С. С. Тренды эрозионно-опасных дождей на территории Европейской части России за период 1966–2019 гг. 316

СЕКЦИЯ «ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ НА ТРАНСФОРМАЦИЮ ПРИРОДНЫХ И СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ»

Гайдукова Е. В., Шаночкин С. В., Винокуров И. О. Оценка изменения продолжительности отопительного сезона в Санкт-Петербурге 323
Коновалова Т. И. Влияние климатических изменений на трансформацию геосистем геодинамически активных территорий (методология исследования и картографирования) 330

СЕКЦИЯ «СОВРЕМЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ В ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ»

Вязилов Е. Д. Развитие перспективных информационных систем для гидрометеорологического обеспечения потребителей 338
Грищенко М. Ю., Михайлюкова П. Г. Сопоставление наземных и космических температурных данных за 2015–2018 годы для территории острова Кунашир (Большая Курильская гряда): первые результаты 347
Давлетшин С. Г., Коршунова Н. Н., Трофименко Л. Т., Разуваев В. Н. Электронный научно-прикладной справочник «Климат России» 351

Никулина И. В., Никонова Е. В., Романюк В. А., Дорофеева Д. В. Организация хранения и обработки пространственных гидрометеорологических данных на основе веб-геоинформационных платформ 359

СЕКЦИЯ «РЕГИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ АТМОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ»

Базарова А. С., Базаров А. В., Атутов Е. Б., Башкуев Ю. Б. Региональные особенности изменения индекса рефракции в Бурятии, Якутии и Монголии за последние 45–60 лет 366

Васильев М. С., Бороев Р. Н., Пестрякова Л. А. Динамика метеоэлементов в полярных широтах Якутии во время крупных Форбуш-понижений галактических космических лучей 372

Власов Д. В., Еремина И. Д. Влияние параметров дождей на интенсивность вымывания из атмосферы потенциально токсичных элементов в Москве 380

Девятова Е. В. Облачность на юге Восточной Сибири по данным ECMWF ERA-Interim и NCEP/NCAR Reanalysis 1 389

Корец М. А., Прокушкин А. С. , Буренина Т. А. Пространственно-временные тенденции изменения средних показателей температуры воздуха и количества осадков в бассейне Среднего Енисея (зона тайги) на основе данных Climatic Research Unit (CRU TS V.3.22) 394

Лощенко К. А. Исследование динамики снежного покрова на территории Иркутской области во взаимосвязи с крупномасштабными циркуляционными факторами 398

Новикова С. А. Оценка уровня загрязнения атмосферного воздуха г. Усолья-Сибирского 405

СЕКЦИЯ «СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ»

Балагуров А. М. Качество радиозондовых данных 413

Бутуханов В. П. Вертикальные потоки озона в приводном слое атмосферы вблизи береговой зоны оз. Байкал 424

Данченков М. А., Волков Ю. Н. Мониторинг проекта АРГО 432

Островский А. Г., Волков С. В., Зацепин А. Г., Кочетов О. Ю., Швоев Д. А. Автономная ледовая океанологическая станция 438

Сутырина Е. Н. Применение данных тепловой инфракрасной съемки для оценки характеристик «острова тепла» г. Братска 442

СЕКЦИЯ «АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПОДГОТОВКИ КАДРОВ В СФЕРЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ»

Бархатова О. А. Некоторые аспекты в подготовке гидрологов 446

Каверин А. В., Резаков Г. Р., Бочкарев Н. П. К вопросу об актуальности углубленной экологизации образования в сфере гидрометеорологии 454

Сутырина Е. Н. Опыт проведения учебной гидрометрической практики в дистанционном формате 461

ПОГОДА И КЛИМАТ. МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ

УДК 551.511.61

Пространственное распределение суммарного испарения растительной поверхности с использованием модели SEBAL и наземных метеорологических измерений

А. В. Доброхотов (dobralexey@gmail.com), Л. В. Козырева (4ludak@gmail.com)

Агрофизический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург

Аннотация. Предложен комплексный метод определения пространственного распределения суммарного испарения на растительной поверхности. Метод основан на энергобалансовой модели SEBAL с использованием данных дистанционного зондирования в оптическом и тепловом диапазонах съемки и наземных метеорологических измерениях. Для апробации метода в 2016 г. были проведены полевые эксперименты на кормовых травах в пос. Бугры Ленинградской области (60°05'09" с. ш., 30°25'34" в. д.) с применением данных спутника LandSat-8 и автоматизированного мобильного полевого агрометеорологического комплекса (АМПАК).

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, LandSat-8, суммарное испарение, SEBAL, АМПАК.

Материалы и методы

Методы дистанционного зондирования земной поверхности открывают широкие возможности для оценки территориального распределения составляющих энергетического баланса. Особенно перспективными являются методы, сочетающие в себе данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с наземными наблюдениями. Данные ДЗЗ позволяют определить пространственное распределение искомых величин, в то время как наземные измерения необходимы для калибровки данных ДЗЗ и построения физико-математических моделей.

Определение суммарного испарения, являющегося составляющей энергетического и водного балансов, является одной из важнейших задач мониторинга агроэкосистем. Для определения суммарного испарения по данным ДЗЗ и наземным метеорологическим измерениям была использована модель SEBAL (The Surface Energy Balance Algorithm for Land) [1], основанная на уравнении энергетического баланса и идеи нахождения контрольных точек «горячего» (минимальное суммарное испарение) и «холодного» (максимальное суммарное испарение) пикселей.

Апробация метода расчета составляющих энергетического баланса была произведена на полях с посевом кормовых трав в пос. Бугры Ленинградской области (координаты: 60°05'09" с. ш., 30°25'34" в. д.). Для определения пространственного распределения суммарного испарения были использованы спутниковые снимки LandSat-8. Были использованы следующие даты пролета спутника: 06.05.2016, 15.05.2016, 31.05.2016. Наземные метеорологические измерения и верификация расчета составляющих энергетического баланса были выполнены с помощью автоматизированного мобильного полевого агрометеорологического комплекса (АМПАК) [3] (рис. 1). Комплекс измеряет следующие физические величины с интервалом 90 с: аэродинамическая температура (датчик HEL-705-U-1-12-C2, Honeywell International, Inc.), влажность воздуха (датчик HIH-4602-C, Honeywell International, Inc) на двух высотах, атмосферное давление (MPX4115AP, Honeywell International, Inc.), скорость ветра (датчик Windgeschwindigkeits sensor, HIM), радиометрическая температура растительной поверхности (датчик Optris GmbH, CT LT), радиационный баланс поверхности (Балансомер, АФИ), суммарная радиация (Пиранометр Янишевского), объемная влажность почвы на глубине 10 см (датчик Decagon Devices 10HS), температуры почвы на трех глубинах.

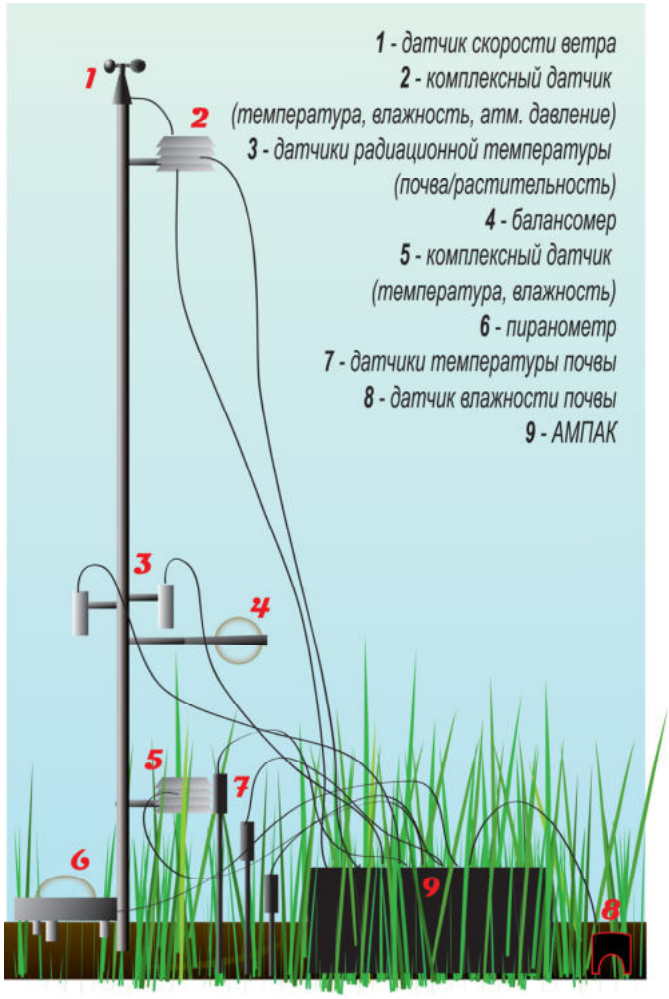


Рис. 1. Автоматизированный мобильный полевой агрометеорологический комплекс (АМПАК)

Предобработка и обработка спутниковых снимков была проведена с помощью геоинформационной системы GRASS, находящейся в открытом доступе. Первый этап включает в себя радиометрическую калибровку, атмосферную коррекцию, выделение из расчетной области участков воды и облаков и классификацию земной поверхности по типу покрытия. Ниже приведены основные шаги обработки спутниковых снимков.

- Радиометрическая калибровка. Необходима для преобразования «сырых» значений сенсоров спутника в реальные физические величины, такие как отражательная способность и яркостная температура.
- Атмосферная коррекция. Необходима для учета влияния атмосферы на полученные значения.
- Выделение из расчетной области воды и облаков позволяет избежать грубых ошибок при осреднении, поиске максимумов и минимумов по всей карте.
- Классификация земной поверхности. Позволяет получить информацию об участках растительности и оголенной почвы, необходимую в дальнейших расчетах.

После предварительной обработки спутниковых снимков расчетный этап выполняется в следующем порядке:

Расчет карты суммарного альбедо по эмпирической зависимости (1), полученной автором [5], с помощью растрового калькулятора (встроенный модуль GRASS):

$$\alpha = 0{,}356\alpha_2 + 0{,}130\alpha_4 + 0{,}373\alpha_5 + 0{,}085\alpha_6 + 0{,}072\alpha_7 - 0{,}0018, \qquad (1)$$

где α – альбедо подстилающей поверхности [–], нижний индекс обозначает номер канала спутника LandSat-8.

Нормализованный относительный индекс растительности (NDVI) для спутника LandSat-8 рассчитывался по формуле:

$$NDVI = \frac{\alpha_5 - \alpha_4}{\alpha_5 + \alpha_4} \qquad (2)$$

Радиационная температура поверхности рассчитывалась как:

$$T_s = \frac{T_я}{1 + \left(\frac{10{,}8 \cdot T_я}{14380} \cdot \ln(\varepsilon)\right)} \qquad (3)$$

где T_s – радиационная температура поверхности [K], $T_я$ – яркостная температура поверхности [K], ε – излучательная способность [–]. Излучательная способность рассчитывалась в зависимости от индекса NDVI [2] (модуль GRASS – *i.emissivity)*.

Радиационный баланс R_n рассчитывался в зависимости от географического положения, времени, рельефа местности, индекса NDVI, излучательной способности, температуры поверхности с помощью модуля GRASS i.eb.netrad [1].

Поток тепла в почву G рассчитывался в зависимости от альбедо, NDVI, температуры поверхности, радиационного баланса с помощью модуля i.eb.soilheatflux [1].

Аэродинамическое сопротивление r_{ah} рассчитывалось по формуле:

$$r_{ah} = \frac{\ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right)}{u_* k} \quad (4)$$

где z_2 – высота измерения скорости ветра, z_1 – высота над слоем вытеснения растительности (принимается равной 0,1 м), u_* – динамическая скорость [м/с], k – постоянная Кармана (=0,41).

Динамическая скорость u$_*$ рассчитывалась как:

$$u_* = \frac{k u_{200}}{\ln\left(200 / z_{0m}\right)} \quad (5)$$

где u_{200} – скорость ветра на высоте 200 м (высота, на которой влияние подстилающей поверхности на скорость ветра несущественно), z_{0m} – параметр шероховатости для количества движения [м], рассчитывается в зависимости от NDVI с помощью модуля GRASS i.eb.z0m.

Скорость ветра на высоте 200 м рассчитывается как:

$$u_{200} = \frac{u_w \ln\left(200 / z_{0mw}\right)}{\ln\left(z_2 / z_{0mw}\right)} \quad (6)$$

где u_w – скорость ветра, измеренная метеорологическим комплексом АМПАК; z_{0mw} – параметр шероховатости для количества движения, определенный для места расположения метеостанции.

Турбулентный поток тепла H рассчитывался как:

$$H = \frac{\rho C_p dT}{r_{ah}} \quad (7)$$

где ρ – плотность воздуха [кг/м^3]; C_p – удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении [Дж/кг·К]; dT – градиент температуры воздуха. Градиент температуры воздуха dT определяется с помощью построения уравнения линейной регрессии от температуры поверхности T_s с использованием контрольных точек «горячего» и «холодного» пикселей [1].

Поток тепла в почву G рассчитывался в зависимости от времени, температуры поверхности, альбедо, NDVI, радиационного баланса с помощью модуля GRASS i.eb.soilheatflux.

Значения мгновенного скрытого потока тепла λET (суммарное испарение) определялись как остаточный член уравнения энергетического баланса:

$$\lambda ET = R_n - H - G \quad (8)$$

Пересчет мгновенного суммарного испарения λET [Вт/м^2] в суммарное испарение за час ET_{hour} [мм/час] происходит по следующей формуле:

$$ET_{hour} = \frac{0{,}035\lambda ET}{24} \quad (9)$$

Расчет суммарного испарения за день ET_{day} выполнялся по формуле [4]:

$$ET_{day} = \frac{ET_{hour} \cdot 2N_E}{\pi \sin(\pi \cdot t / N_E)} \quad (10)$$

N – период времени между восходом и закатом, ч; t – интервал времени между восходом и временем пролета спутника, ч.

Результаты и обсуждение

В результате выполнения вышеописанного алгоритма был построены тематические карты пространственного распределения суммарного испарения 6, 15, 31 мая 2016 г. (рис. 2–4).

Результаты расчетов суммарного испарения по наземным измерениям комплексом АМПАК и по данным ДЗЗ с использованием наземных метеорологических измерений представлены в таблице.

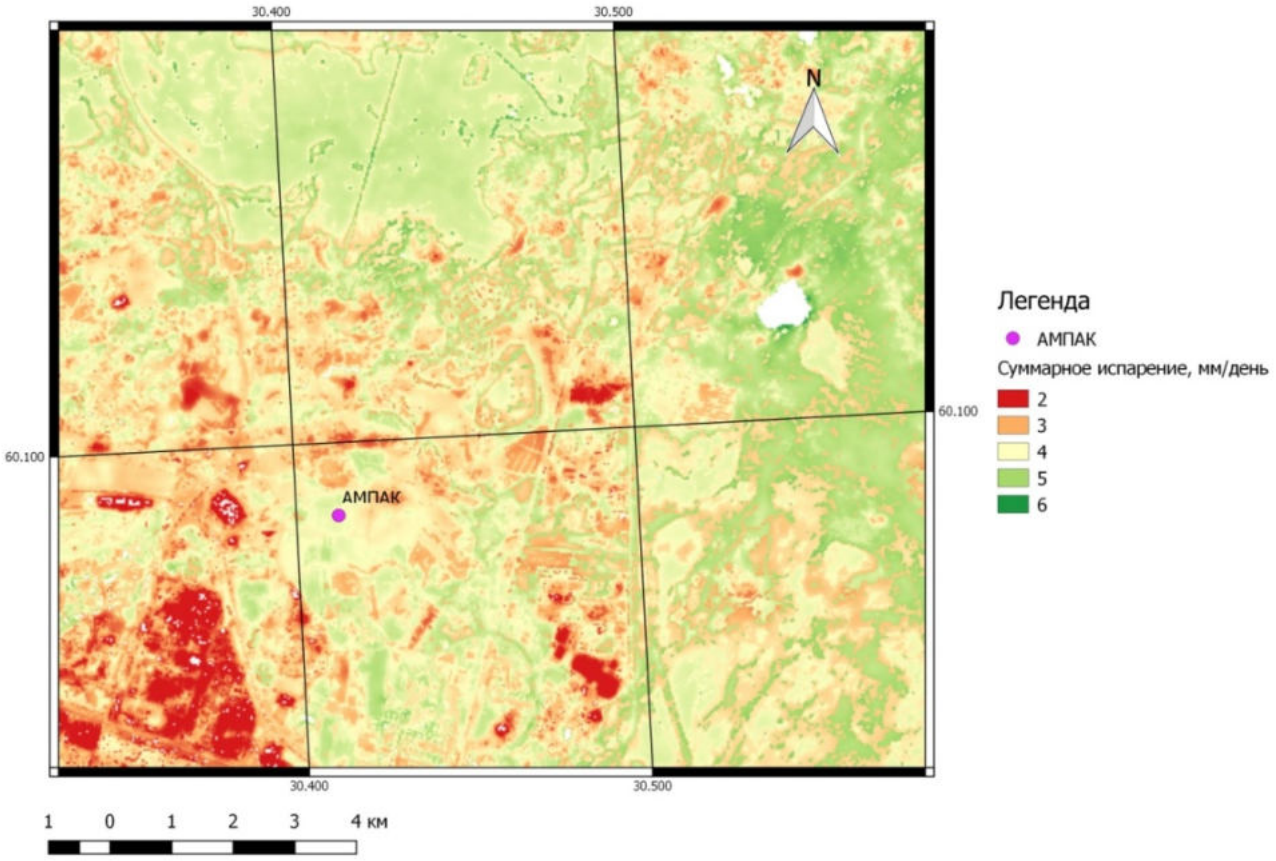


Рис. 2. Суммарное испарение, пос. Бугры Ленинградской области, 6 мая 2016 г.

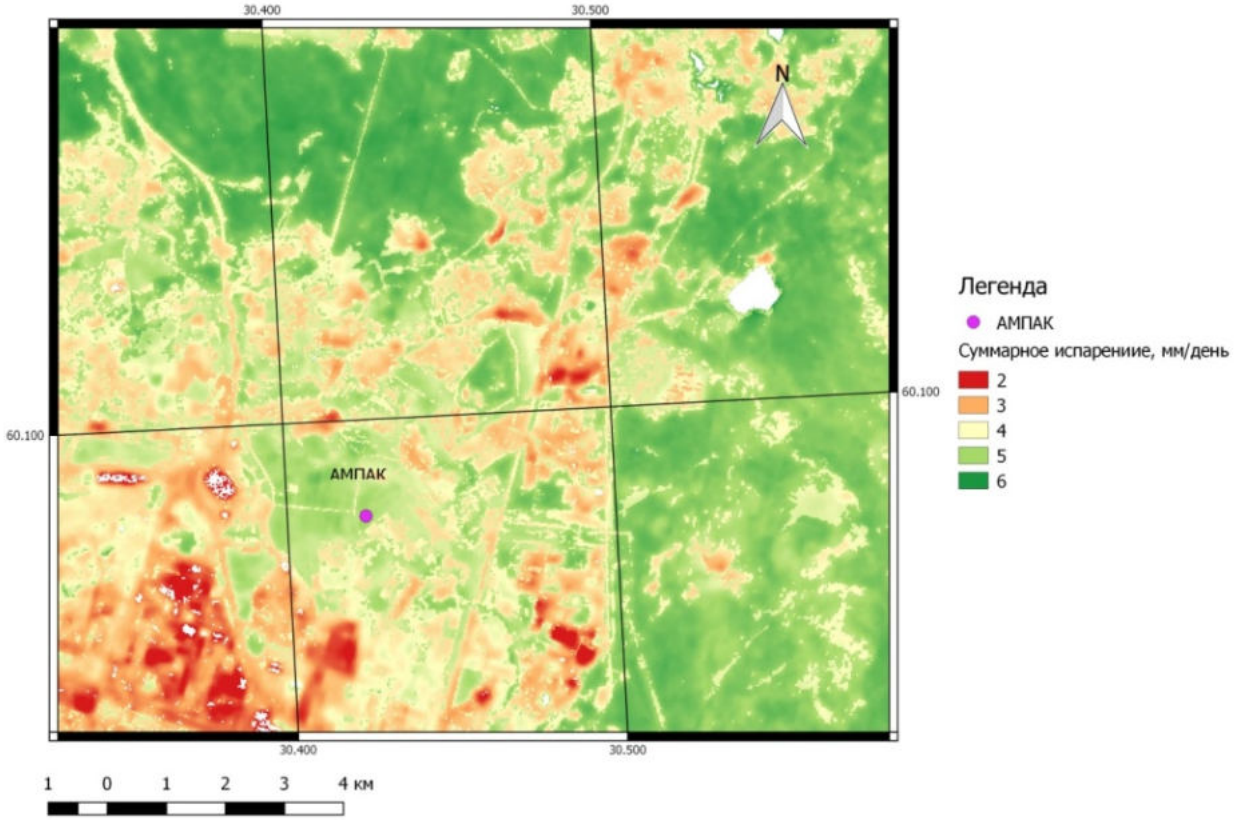


Рис. 3. Суммарное испарение, пос. Бугры Ленинградской области, 15 мая 2016 г.

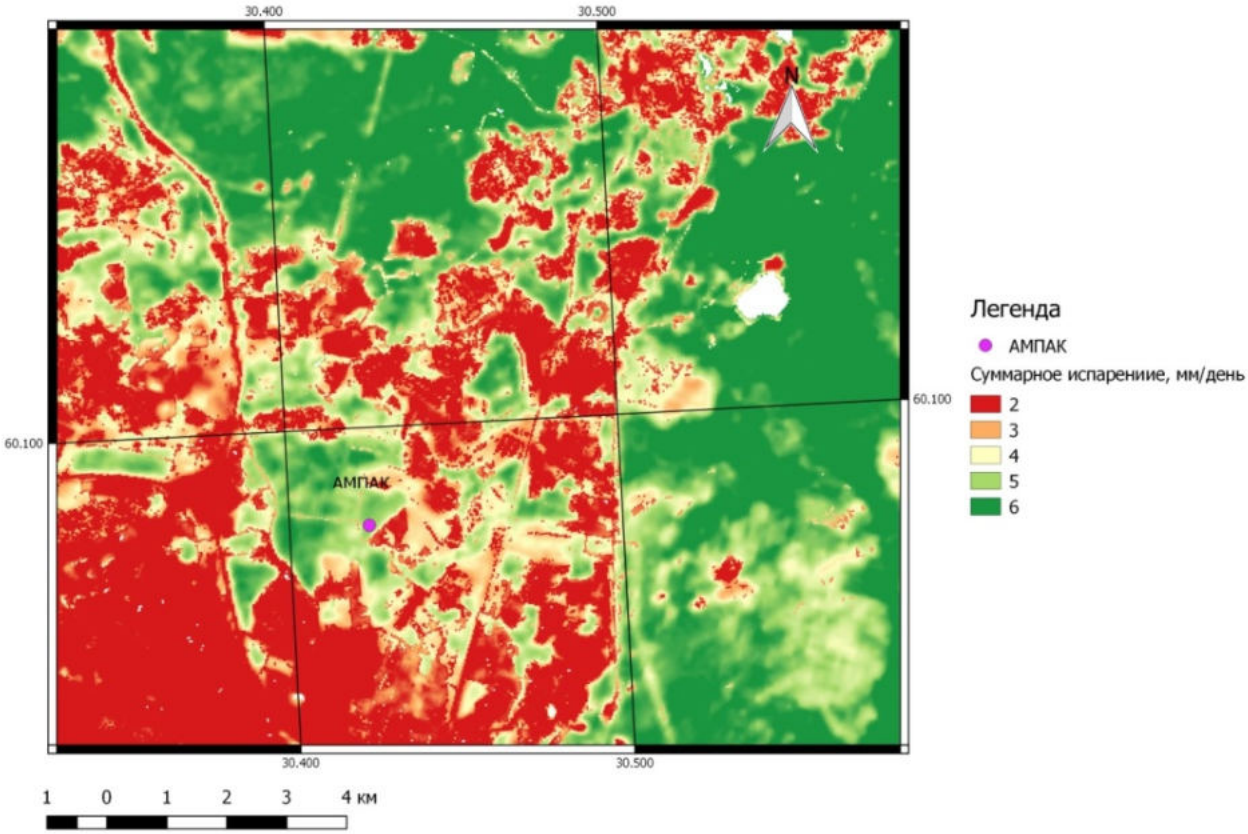


Рис. 4. Суммарное испарение, пос. Бугры Ленинградской области, 31 мая 2016 г.

Таблица

Сравнение составляющих энергетического баланса рассчитанных с использованием датчиков комплекса АМПАК с результатами расчета с использованием спутниковых данных LandSat-8

	06.05.2016		15.05.2015		31.05.2015	
	АМПАК	ДЗЗ	АМПАК	ДЗЗ	АМПАК	ДЗЗ
Температура поверхности, С°	23,5	23,6	22,5	20,2	21,1	21
Аэродинамическое сопротивление, с/м	88,8	90,3	84,4	93,9	28,1	25,1
Турбулентный поток тепла, Вт/ м^2	48	47,3	36,4	21,6	-34,5	58
Скрытый поток тепла, Вт/м^2	324,7	311,2	375	351,5	378	342
Суммарное испарение за час, мм/час	0,47	0,45	0,55	0,51	0,55	0,49
Суммарное испарение за день, мм/день	4,37	4,22	5,3	4,92	5,71	5,01

Использование данных ДЗЗ в совокупности с наземными метеорологическими измерениями позволяет получать значения пространственного распределения составляющих энергетического баланса. Перспективным является упрощение локальной калибровки моделей энерго- и масообмена для уточнения эмпирических зависимостей и всестороннего использования моделей в различных сферах землепользования, сельского хозяйства, гидрометеорологических и экологических исследованиях. Также для задач мониторинга перспективной видится задача распространения составляющих энергетического баланса и суммарного испарения на весь вегетационный период.

Работа выполнена по госзаданию № 0667-2014-0005.

Список литературы

1. *Bastiaanssen W. G. M.* Estimation of Land surface parameters by remote sensing under clear-sky conditions. PhD thesis. Wageningen University, Wageningen, Netherlands, 1995. 271 p.

2. *Caselles, V., Coll C., Valor E.* Land surface emissivity and temperature determination in the whole HAPEX-Sahel area from AVHRR data // International Journal of Remote Sensing. 1997. Vol. 18, N 5. P. 1009–1027.

3. *Efimov A. E., Sitdikova Yu. R., Dobrokhotov A. V., Kozyreva L. V.* Monitoring evapotranspiration in an agricultural field and determination of irrigation rates and dates by automated mobile field agrometeorological complex // Water Resources. 2018. Vol. 45, N 1. P. 133–137.

4. Estimation of daily evapotranspiration from one time-of-day measurements / R. D. Jackson, J. L. Hatfield, R. J. Reginato, S. B. Idso, Jr, P. J. Pinter // Agricultural Water Management. 1983. Vol. 7, N 1–3. P. 351–362.

5. *Liang S.* Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I: Algorithms // Remote sensing of environment. 2001. Vol. 76, N 2. P. 213–238.

УДК 551.509.313

Влияние ассимиляции данных доплеровского метеорологического локатора в мезомасштабную численную модель WRF-ARW на прогноз осадков на территории Республики Беларусь

П. О. Зайко (Polly_LO@tut.by)[1,2]

[1]Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь
[2]Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды, г. Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Представлены результаты оценки влияния ассимиляции отражаемости и радиальной скорости, с сети белорусских доплеровских метеорологических локаторов (ДМРЛ), в численную мезомасштабную модель WRF-ARW (Weather Research and Forecasting) на прогноз осадков на территории Республики Беларусь. Автором разработана двухуровневая система контроля и подготовки радиолокационных данных для их усвоения в модель WRF-ARW на основе метода трехмерного вариационного усвоения (3D-VAR). Были промоделированы случаи выпадения осадков в трех пространственных разрешениях (9, 3 и 1 км) на территории Беларуси в летний и зимний период с усвоением радиолокационных данных и без усвоения, с помощью адаптированной системы ассимиляции в Белгидромете. Результаты статистической и объект-ориентированной оценки промоделированных случаев позволяют говорить об уменьшении ошибки прогноза скорости ветра на 10 м, а также об уточнении прогноза местоположения центров выпадения осадков, ориентации и структуры облачных систем в варианте с усвоением.

Ключевые слова: численный прогноз погоды, WRF-ARW, система ассимиляции (усвоения) данных, доплеровский метеорологический локатор (ДМРЛ), объективный анализ, оценка.

Введение

Численный прогноз погоды успешно позволяет моделировать опасные явления (ОЯ) погоды конвективного масштаба (ливни, грозы, шквалистое усиление ветра и т. д.). Именно конвективные ОЯ наносят наибольший экономический ущерб сельскому и лесному хозяйству, транспорту Беларуси [4].

Прогноз конвективных явлений является одной из основных задач численного прогноза и требует построения более точных начальных и граничных условий для последующего моделирования. Основным способом уточнения начальных данных для модели является ассимиляция (усвоение) метеорологических данных [6]. Ассимиляция данных представляет собой процесс построения уточненного начально состояния атмосферной системы с помощью привлечения дополнительных наблюдений, учета ошибок прогноза и наблюдений, и их последующего согласования. При усвоении наблюдений производится обязательный контроль качества информации, корректировка исходных данных с помощью математических методов и последующее согласование полей.

Ведущие мировые метеорологические центры (Météo-France, MetOffice и др.) и Консорциумы (HIRLAM, COSMO, ALADIN и др.), производят моделирование погодных процессов и используют для уточнения начальных данных

наземные и аэрологические, спутниковые, радиолокационные, самолетные наблюдения с территорий стран участников.

Ассимиляция данных доплеровских метеорологических локаторов (ДМРЛ) представляет наибольший интерес, в связи с возможностью получения поля ветра, информации об облаках, грозовых ячейках и их микрофизической структуре в высоком временном (10 мин) и пространственном разрешении (250 км) на территории Беларуси.

В связи с тем что Республика Беларусь не входит в состав крупных метеорологических Консорциумов усвоение радиолокационных данных с сети белорусских ДМРЛ (Минск-2, Гомель, Витебск) является национальной задачей.

В 2014 г. в Белгидромете была создана национальная система мезомасштабного прогноза на основе модели WRF-ARW, позволяющая моделировать прогнозы высокого пространственного разрешения (3 км) для территории страны. Кроме того, в Белгидромете разработана технология мезомасштабного прогноза для территории Беларуси, включающая системы контроля и подготовки наземных, аэрологических и радиолокационных для последующего усвоения в адаптированную систему ассимиляции на основе трехмерного вариационного метода (3D-VAR).

Основной целью статьи была оценка влияния усвоения горизонтальной отражаемости и радиальной скорости с сети белорусских ДМРЛ на прогноз осадков мезомасштабной модели WRF-ARW по территории Беларуси. Для оценки влияния ассимиляции радиолокационных данных на результаты прогноза был проведен ряд численных экспериментов, включающих случаи выпадения осадков в различные сезоны года на территории Беларуси.

Материалы и методы

В 2016 г. в рамках научно-исследовательской работы в Белгидромете были разработаны первые адаптированные компоненты системы ассимиляции метеорологических данных, включающие усвоение наземных (50 станций Беларусь + 1700 станций Европа) и аэрологических данных методом Кressмана в систему мезомасштабного прогнозирования на базе модели WRF-ARW в Белгидромете. В систему усваивались давление на уровне моря и станции, температуры и точки росы на 2 м, скорости и направления ветра, абсолютная высота изобарических поверхностей 1000, 850, 700, 500 гПа и др., температура, дефицит точки росы, скорость и направление ветра на соответствующих изобарических поверхностях. Ассимиляция данных наблюдений позволила уменьшить ошибку прогноза приземного давления по модели WRF-ARW на +24 ч на 8 %, а также сократить количество ложных тревог в прогнозе осадков [2].

Второй этап включал разработку компонента адаптированной системы ассимиляции в Бедгидромете, позволяющего усваивать наблюдения ДМРЛ по территории Беларуси. Разработка технологии ассимиляции радиолокационных данных включала: создание системы контроля и подготовки радиолокационных данных для последующей ассимиляции и реализацию адаптированной системы ассимиляции радиолокационных данных в мезомасштабную численную модель WRF-ARW на базе метода 3D-VAR в Белгидромете.

На территории Беларуси установлено 3 ДМРЛ с двойной поляризацией (Минск-2, Гомель, Витебск) (рис. 1), в будущем планируется установка ДМРЛ в г. Брест и г. Гродно. ДМРЛ позволяют получать уникальную информацию о распределении ветра и влагозапасе, производя съемку в двух режимах (отражаемость, скорость) в реальном времени (10 мин), и в радиусе 250 км, на 34 уровнях, охватив большую часть страны. В качестве основных параметров для усвоения используются горизонтальная отражаемость (DBZH), радиальная скорость (VRAD) и ширина спектра (WRAD).

Одной из важнейших задач в технологии ассимиляции радиолокационных наблюдений является контроль качества и подготовки данных. Это связано со спецификой радиолокационных наблюдений: получаемые метеорологическим локатором эхо-сигналы могут формироваться не только метеорологическими целями (облака, осадки и т. д.), но и не метеорологическими объектами (насекомые, птицами, самолеты, здания, горы, электромагнитные излучатели и т. д.) [1; 5; 7].

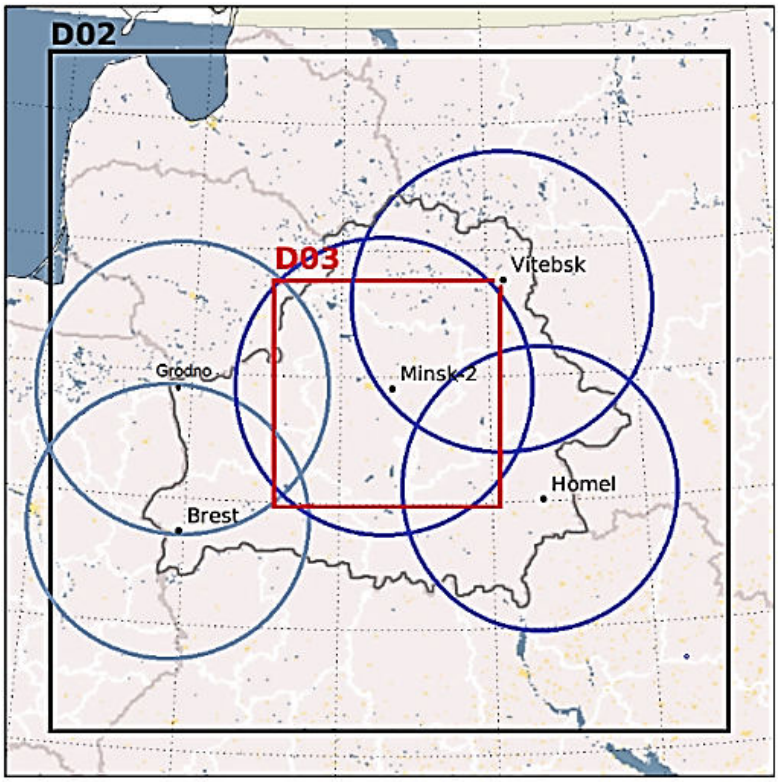


Рис. 1. Карта расположения и охвата территории ДМРЛ (Минск-2, Гомель, Витебск), ДМРЛ Брест и Гродно (планируемые), относительно моделируемых в численном эксперименте областей (D02, D03)

Автором была разработана система контроля качества, использующая данные ДМРЛ в формате (ODIM HDF5): коэффициент отражаемости горизонтальной поляризации (DBZH), радиальную скорость (VRAD), ширину доплеровского спектра радиальных скоростей (WRAD), дифференциальную отражаемость (ZDR), коэффициент кросскорреляции (RHOV), дифференциальную фазу (PHIDP).

На первом этапе используется двухуровневая фильтрация на основе фильтра Габелла [7]. Алгоритм данного фильтра производит удаление помех от местных объектов (рельеф, здания и т. д.), имеющих значительную пространственную неоднородность и изменчивость распределения сигнала, что позволяет выделить не метеообъекты на основе анализа отражаемости. Затем анализируется пространственная непрерывность распределения сигнала в пределах ячейки наблюдений на превышение порогового значения, в результате чего шум считается не метеорологическим.

Второй метод контроля радиолокационных данных включает программы идентификации помех на основе нечеткой логики для характеристик двойной поляризации (fuzzy echo classification). Для анализа используются: дифференциальная отражаемость (ZDR); коэффициент корреляции между горизонтальной и вертикальной отражаемостями (RHOV); дифференциальная фаза (PHIDP); доплеровская скорость (VRAD); статическая карта помех. Для каждой из этих переменных алгоритм использует трапецеидальную функцию для определения принадлежности радиоэха к не метеорологическому. Затем производится расчет линейной комбинации степеней принадлежности на основе определенных заранее весов, при превышении комбинацией порогового значения эхо-сигнал считается не метеорологическим [5].

Далее отфильтрованные данные ДМРЛ проходят конечную подготовку для ассимиляции: преобразование в координаты системы моделирования WRF-ARW, пересчет компонент скорости ветра и горизонтальной отражаемость на реальные высоты и представление данных в формате, требуемом системой ассимиляции данных. Стоит отметить, что получаемая с ДМРЛ радиальная скорость частиц, не является синонимом реальной скорости ветра, и требует восстановления вектора полной скорости [1].

Ассимиляции радиолокационных данных в модель WRF-ARW

Радиолокационные данные ассимилируются методом 3D-VAR. Данный метод используется для ассимиляции наземных, спутниковых и радиолокационных наблюдений в системах ALADIN, HIRLAM, MetOffice и др. [6].

В основе метода лежит в минимизации функционала от искомого вектора состояния системы X. Этот функционал представляет собой степень несогласованности X с прогностическими данными и наблюдениями. Для минимизации функционала применяется метод сопряженных градиентов, который базируется на оценке изменения контрольных переменных (температура, удельная влажность, давление на уровне земли, завихренность и дивергенция) [6]:

$$J(X)=\frac{1}{2}\left(X-X^{f}\right)^{T}B^{-1}\left(X-X^{f}\right)+\frac{1}{2}\left(X^{obs}-HX\right)^{T}R^{-1}\left(X^{obs}-HX\right), \quad (1)$$

где X – вектор, представляющий искомое поле; X^{f} – поле прогноза по гидродинамической модели атмосферы; X^{obs} – вектор наблюдений; B – матрица ковариаций ошибок прогноза; R – матрица ковариаций ошибок наблюдений; H –

оператор наблюдений, связывающий наблюдения с истинным состоянием атмосферы.

Ассимиляция данных об отражаемости может производиться как напрямую в модель WRF-ARW через отношение между массовым содержанием дождевых капель (соотношение Маршалла – Палмера для дождевых капель), так и косвенно через оценку влажностных характеристик в облаке, включая снег, крупу и др. В разработанной системе ассимиляции применяется второй метод [6].

Ассимиляция данных о ветре производится путем пересчета радиальной скорости данных в переменные модели: радиальный ветер *Vr* можно определить, используя компоненты ветра (*u*, *v*, *w*), вертикальную скорость движения гидрометеоров (связанную с дождевыми каплями) *Vt*, и расстоянием от радара до данной точки. Вертикальная скорость *Vt* рассчитывается из массового содержания дождевых капель q_r с коррекцией высоты [6]:

$$Vr = u\frac{x - x^0}{r} + v\frac{y - y^0}{r} + (w - v_t)\frac{z - z^0}{r}, \quad (2)$$

$$v_t = 5,40\left(\frac{p_s}{\overline{p}}\right)^{0.4}\left(q_r\right)^{0.125}, \quad (3)$$

где *u*, *v*, *w* – компоненты скорости в декартовых координатах (м/с); *x, y, z* – местоположение радара; x^0, y^0, z^0 – положение наблюдения; *r* – расстояние между радаром и наблюдением; p_s – приземное давление; q_r – массовое содержание дождевой воды (г/кг), *p* – давление на станции.

Для оценки влияния ошибок прогноза модели WRF-ARW на результаты ассимиляции была построена ковариационная матрица фоновых ошибок прогноза модели за летний период 2017 г. и зимний 2020 г., на основе метода NMC (Пэрриш и Дербер), в котором предполагает, что статистическая структура ошибок прогноза изменяется незначительно в пределах 48 ч [6].

Вычислительный эксперимент

Для оценки влияния усвоения отражаемости и радиальной скорости на результаты прогноза модели WRF-ARW были промоделированы случаи выпадения сильных осадков на территории Беларуси летом 2017 г. и в зимний период 2020 г., зафиксированные ДМРЛ.

Применяемая для эксперимента модель WRF-ARW является негидростатической, используя схемы параметризации для описания физических процессов подсеточного масштаба (микрофизические, конвективные и др.), и способна воспроизводить конвективные облачные системы в высоком пространственном разрешении [8]. В качестве граничных и начальных данных для усвоения использовался прогноз глобальной модели GFS (Global Forecast System) [2]. Подготовленные радиолокационные наблюдения усваивались в срок близкий к исходному сроку прогноза (00 и 12 UTC) во временном окне ±1 ч, методом 3D-VAR [6]. Прогноз моделировался с заблаговременностью +24 ч, в трех пространственных разрешениях: 9, 3 и 1 км (рис. 2, табл.).

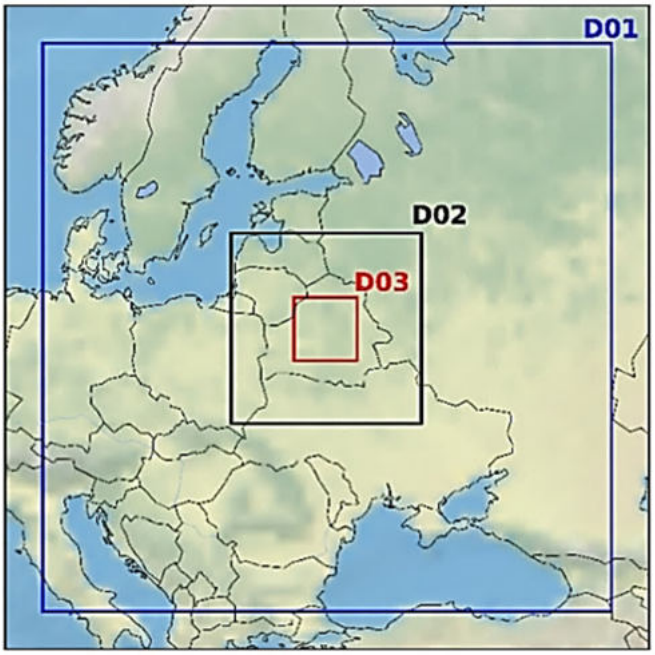


Рис. 2. Карта областей моделирования D01 (9 км), D02 (3 км), D03 (1 км)

Таблица

Описание основных параметров моделирования

ЧПП	WRF-ARW 4.0
Начальные и граничные условия	GFS (Global Forecast System), 3 ч, 0. 25°×0. 25°
Гор. и верт. разрешение	9 км (300×300), 3 км (300×300), 1 км (300×300). 40 Eta
Дни прогноза (исх. срок)/+24 ч. Окно усвоения	2017–08–10 (00 UTC), 2020–02–18 (12 UTC)/ ±60 мин
Параметризации процессов:	WSM6; Каина – Фритша
Метод ассимиляции данных. Радиолок. данные	3D-VAR. Отражаемость (250 км), радиальная скорость (150 км), 13 вертикальных уровней

Оценка результатов ассимиляции радиолокационных данных на прогноз численной модели WRF

Для оценки влияния ассимиляции данных ДМРЛ на прогноз проводилась статистическая и объект-ориентированная оценка (по данным ДМРЛ, MODE (Method for Object-Based Diagnostic Evaluation)) [3]. Именно метод MODE позволяет произвести не только количественную оценку («оправдался – 100 %», «оправдался – 50 %», «не оправдался – 0 %»), но и качественную (насколько близко было пространственное распределение поля осадков к реальному).

В качестве летнего варианта для представления был выбран случай 24 августа 2017 г. По северу-западу Беларуси наблюдалось выпадение сильных осадков, продуцируемых облачными системами фронтальных разделов южного циклона. Анализ карт высоты геопотенциальных поверхностей 850, 700, 500 и 300 гПа, позволил зафиксировать динамические структуры в виде высотного циклона на картах вариантов с усвоением (AS) и без (NA). При сравнении вариантов отмечается изменение положения барического центра и поля температуры на высотах в AS, что могло повлиять на время и интенсивность выпадения

осадков. Определение положения высотных фронтальных разделов является весьма интересной задачей, в связи с возможностью перемещения вдоль этих зон мощных циклонических образований. Продвижение холодного фронта по территории страны прослеживается и на картах распределения скоростей и направлений ветра AT850. Если в варианте без усвоения граница фронта более четкая, имеющая в северо-восточной части вихревую структуру, то в варианте с ассимиляцией фронт размыт.

Результаты оценки MODE прогноза с усвоением ДМРЛ за 00 UTC 24.08.2017 подтверждает более точный прогноз центров выпадения осадков в пределах страны. Основным видом информации для выделенных исходных объектов осадков являлись наблюдения ДМРЛ. На рис. 3 представлены результаты моделирования распределения и количества осадков за 12 ч на 24.08.2017 на +3 ч, +6 ч, +9 ч, +12 ч, +15 ч UTC и карты распределения поля смоделированной максимальной радиолокационной отражаемости за те же часы.

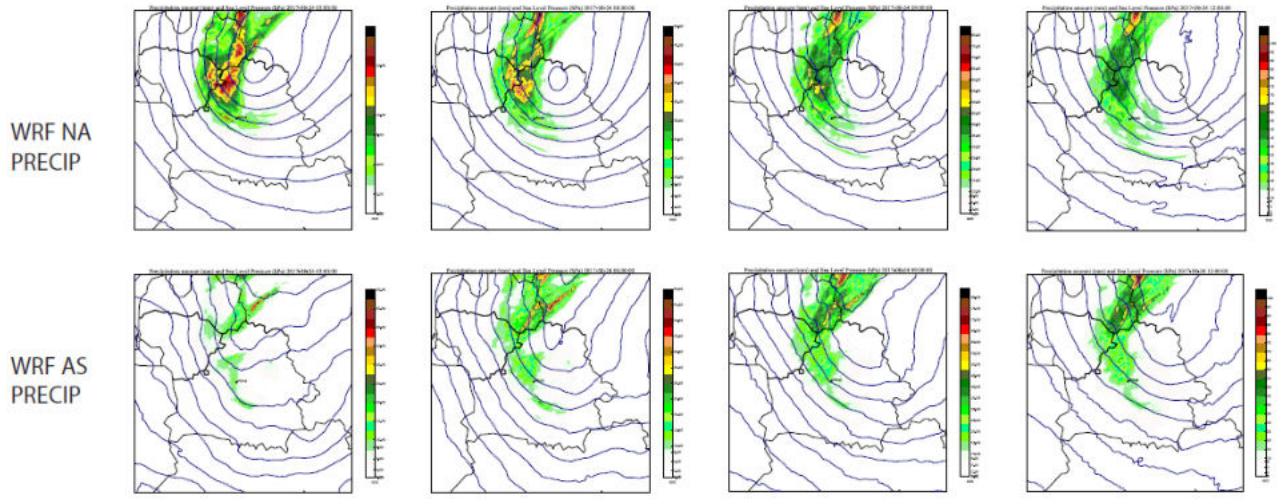


Рис. 3. Карты распределения зон выпадения осадков на +3 ч, +6 ч, +9 ч, +12 ч, +15 ч UTC, WRF NA PRECIP – без усвоения, WRF AS PRECIP – с усвоением, 24.08.2017

Анализ прогнозов 2 вариантов показал: прогноз без усвоения (NA) зафиксировал зоны осадков (объектов) на значительном удалении (более 100 км) от данных ДМРЛ. Оценка площади выделенных объектов показала, что вариант NA значительно переоценивает площади выпадения осадков. Несмотря на это, интенсивность осадков на +3 ч была значительно ниже (0,2 мм/ч), чем по данным ДМРЛ (6 мм/ч). Показатель отношения площадей наблюдаемых зон осадков к смоделированным для WRF AS (с усвоением) – 2,5, для WRF NA (без усвоения) – 0,4, что говорит о уменьшении показателя ложных тревог в варианте с усвоением. Местоположение объектов точнее смоделировал варианте с усвоением ДМРЛ: около половины объектов (4 шт.) находились на расстоянии менее 50 км от реальных. Величина скорости ветра один из наиболее сложных по прогнозированию параметров.

Анализ распределения ошибок прогноза скорости ветра на 10 м показал абсолютное улучшение в варианте с ассимиляцией (AS) (рис. 4): наименьшая средняя ошибка прогноза с ассимиляцией (AS) составила на +15 ч прогноза – 1,5 м/с, наибольшая на +18 ч – 3,6 м/с.

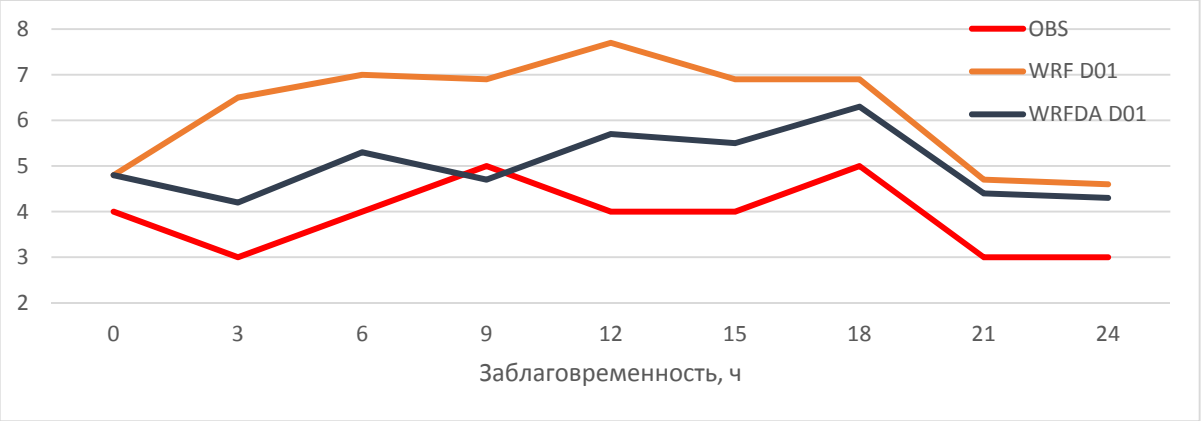


Рис. 4. График распределения прогноза скорости ветра на 10 м (м/с), OBS – наблюдения на ст. Верхнедвинск, WRF D01 – без усвоения, WRFDA D01 – с усвоением, 24.08.2017

В качестве второго случая моделирования было выбрано 18 февраля 2020 г. В данный день через территорию Беларуси и г. Минск проходил холодный грозовой фронт, что достаточно редкое явление в зимний период для территории страны. На метеостанции Минск выпадение осадков (3 мм) пришлось на первые 2 ч после ассимиляции данных ДМРЛ (Минск-2, Гомель, Витебск). Моделирование с усвоением данных ДМРЛ точнее отразило пространственную ориентацию фронта и зону выпадения осадков, что видно на карте радиолокационных наблюдений (рис. 5). Зона выпадения осадков визуализировалась в виде линейной структуры, вытянутой с севера на юг, таким же образом было в варианте с ассимиляцией. Вариант без усвоения смоделировал область в виде эллипсоидов с ориентацией с запад-восток. Кроме того, усвоение данных позволило более точно смоделировать область выпадения осадков восточнее границ Беларуси.

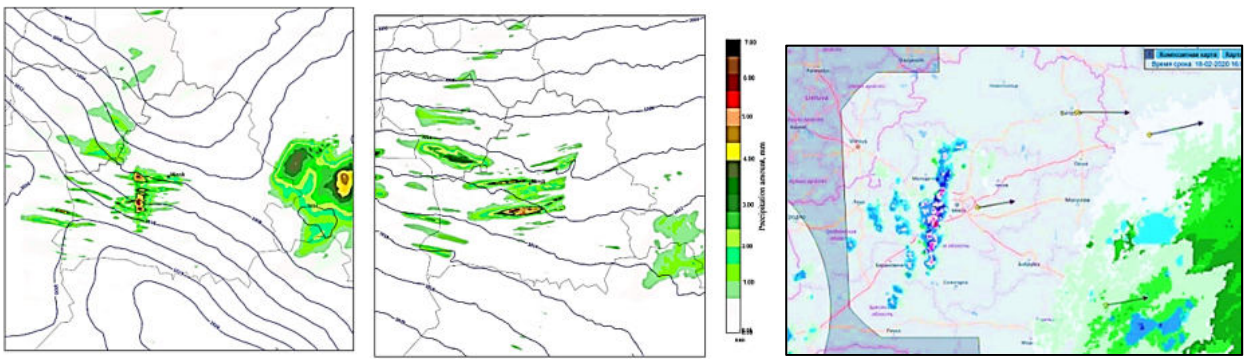


Рис. 5. Карты зон выпадения осадков область D02 на территории Беларуси 18.02.2020 20 UTC, линии – приземное давление, слева – с усвоением, середина – без усвоения, справа – композитная карта наблюдений ДМРЛ MeteoCube (Белгидромет)

В 16 ч UTC фронт проходил через территорию минской области, и на станции Столбцы были зафиксирован осадки и шквалистое усилие ветра. Вариант с ассимиляцией данных позволил уменьшить абсолютную ошибку прогноза скорости ветра на 10 м в первые 5 ч моделирования, затем ошибка варианта с усвоением была больше (рис. 6). Это может быть связанно с более ранним формированием конвективных систем, продуцирующих осадки относительно начального срока усвоения: первый час выпадения осадков с ассимиляцией – +3 ч, без ассимиляции – +6 ч.

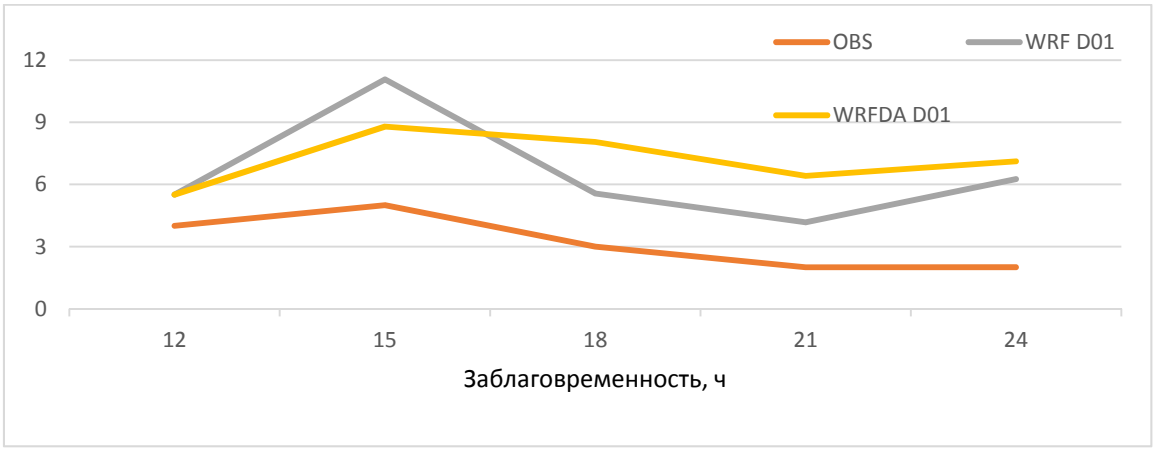


Рис. 6. График скорости ветра на 10 м (м/с) на станции Столбцы, OBS – наблюдения, WRF D01 – без ассимиляции, WRFDA D01– с ассимиляцией, 18.02.2020

Статистическая количественная оценка осадков на станции Столбцы говорит о превышении абсолютных значений для варианта с усвоением на +6 ч: наблюдалось – 0,6 мм, без усвоения – 0,59 мм, с усвоением – 1,39 мм.

Заключение

Автором были разработаны система контроля и подготовки данных белорусских ДМРЛ (Минск-2, Гомель, Витебск) для усвоения данных и адаптированная автоматизированная система ассимиляции радиолокационных данных в мезомасштабную модель WRF-ARW.

Разработанная система контроля и подготовки данных использует ступенчатую фильтрацию помех радиолокационных полей с помощью метода Габелла и фильтра нечеткой логики, а также производит расчет координат и подготовку формата данных для усвоения в модель WRF-ARW методом 3D-VAR [2; 5; 7; 8].

Для оценки влияния усвоенных радиолокационных данных на результаты численного прогноза проведен ряд вычислительных экспериментов, включающий моделирование случаев выпадения ливневых осадков на территории Беларуси летний (2017 г.) и зимний (2020 г.), с ассимиляцией радиолокационных данных и без.

Ассимиляция отражаемости и радиальной скорости повлияла на уменьшение ошибки прогноза скорости ветра на 10 м, уточнение положения центров выпадения осадков на первых часах прогноза для летнего варианта. Объект-ориентированная оценка показала, что усвоение данных позволило спрогнози-

ровать центры выпадения осадков на меньшем удалении от наблюдаемых, а также дать более точный прогноз интенсивности осадков. Несмотря на это оба варианта (с усвоением и без) имели ложные тревоги. В зимний период моделирование с ассимиляцией позволило отразить положение и ориентацию грозового фронта ближе к реальному и уменьшить ошибку прогноза скорости ветра на ранних часах прогноза. Несмотря на это на более поздних часах вариант без усвоения дал меньшую ошибку прогноза осадков и скорости ветра.

Предварительный анализ результатов работы адаптированной системы ассимиляции радиолокационных данных, говорит о возможности ее использования для целей сверх краткосрочного прогноза, а также для уточнения местоположения конвективных систем в летний период. Сейчас система требует более детального тестирования для случаев конвективного выпадения осадков на территории страны в летний период.

Список литературы

1. Информационные возможности допплеровских метеорологических радиолокаторов с двойной поляризацией / И. А. Готюр [и др.] // Ученые записки РГГМУ. 2013. № 32. С. 66–83.

2. *Зайко П. О.* Система усвоения наземных и аэрологических наблюдений в мезомасштабную численную модель WRF-ARW в Белгидромете // Природные ресурсы. 2019. № 1. С. 89.

3. *Травов А. В., Зарипов Р. Б., Павлюков Ю. Б., Шумилин А. А.* Использование радиолокационной информации при оценке прогноза погоды с высоким разрешением // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. М., 2018. С. 60–86.

4. Седьмое национальное сообщение Республики Беларусь в соответствии с обязательствами по Рамочной конвенции ООН об изменении климата. URL: https://unfccc.int/sites/default/files/ resource/92104765_Belarus-NC7–1-AI_BLR_NC7.pdf (дата обращения: 15.03.2020).

5. On the use of dual-polarized c-band radar for operational rainfall retrieval in mountainous areas / Gianfranco Vulpiani, Mario Montopoli, Luca Delli Passeri, Antonio G. Gioia, Pietro Giordano, and Frank S. Marzano // Journal of Applied Meteorology and Climatology. 2012. Vol. 51, N 2. P. 405–425. doi:10.1175/JAMC-D-10-05024.1.

6. Survey of data assimilation methods for convective-scale numerical weather prediction at operational centres / N. Gustafsson [et al.] // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2018. 144. P. 1218–1256.

7. *Morin E., Gabella M.* Radar-based quantitative precipitation estimation over Mediterranean and dry climate regimes // J. Geophys. Res. 2007. Vol. 112. P. 1–13.

8. A description of the Advanced Research WRF Version 3: NCAR Techn. Note / eds. Skamarock W. C. Boulder [et al.] // National Center for Atmospheric Research. 2008. P. 125 p.

УДК 517.956.8

On the Inviscid Limit of Stationary Measures for the Stochastic System of the Two-Layer Quasi-Solenoidal Lorenz Model for a Baroclinic Atmosphere

Yu. Yu. Klevtsova (yy_klevtsova@ngs.ru)[1,2]

[1]Siberian Regional Hydrometeorological Research Institute', Novosibirsk
[2]Siberian State University of Telecommunications and Information Sciences, Novosibirsk

Аннотация. It was obtained the sufficient conditions on the right-hand side and the parameters of the Lorenz model for a baroclinic atmosphere with white noise perturbation for existence of a unique stationary measure of Markov semigroup defined by solutions of the Cauchy problem for this system, for the exponential convergence of the distributions of solutions to the stationary measure as t goes to infinity and for the existence a limiting point for any sequence of the stationary measures for this system when any sequence of the kinematic viscosity coefficients goes to zero. A similar result was obtained for the equation of a barotropic atmosphere and the two-dimensional Navier-Stokes equation.

Ключевые слова: The two-layer quasi-solenoidal Lorenz model for a baroclinic atmosphere, White noise perturbation, Existence of a unique stationary measure, Exponential convergence of distributions of solutions to the stationary measure, Inviscid limit of stationary measures, The two-dimensional Navier-Stokes equation

1. Main Results

We consider the system of equations for the quasi-solenoidal Lorenz model for a baroclinic atmosphere

$$\frac{\partial}{\partial t}\mathbf{A}_1\mathbf{u} + \nu\mathbf{A}_2\mathbf{u} + \mathbf{A}_3\mathbf{u} + \mathbf{B}(\mathbf{u}) = \mathbf{g}\,,\ t > 0\,, \tag{1}$$

on the two-dimensional unit sphere S centered at the origin of the spherical polar coordinates (λ,φ), $\lambda\in[0,2\pi)$, $\varphi\in\left[-\frac{\pi}{2},\frac{\pi}{2}\right]$, $\mu=\sin\varphi$. Here $\nu>0$ is the kinematic viscosity, $\mathbf{u}(t,x,\omega)=(u_1(t,x,\omega),u_2(t,x,\omega))^{\mathrm{T}}$ is an unknown vector function and $\mathbf{g}(t,x,\omega)=(g_1(t,x,\omega),g_2(t,x,\omega))^{\mathrm{T}}$ is a given vector function, $x=(\lambda,\mu)$, $\alpha\in\Omega$, (Ω,P,F) is a complete probability space,

$$\mathbf{A}_1=\begin{pmatrix}-\Delta & 0\\ 0 & -\Delta+\gamma I\end{pmatrix},\ \mathbf{A}_2=\begin{pmatrix}\Delta^2 & 0\\ 0 & \Delta^2\end{pmatrix},\ \mathbf{A}_3=\begin{pmatrix}-k_0\Delta & 2k_0\Delta\\ k_0\Delta & -(2k_0+k_1+\nu\gamma)\Delta+\rho I\end{pmatrix},$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{u})=\left(J(\Delta u_1+2\mu,u_1)+J(\Delta u_2,u_2),J(\Delta u_2-\gamma u_2,u_1)+J(\Delta u_1+2\mu,u_2)\right)^{\mathrm{T}}.$$

Also, $\gamma,\rho,k_0,k_1\ge 0$ are numerical parameters, I is the identity operator, $J(\psi,\theta)=\psi_\lambda\theta_\mu-\psi_\mu\theta_\lambda$ is the Jacobi operator and $\Delta\psi=((1-\mu^2)\psi_\mu)_\mu+(1-\mu^2)^{-1}\psi_{\lambda\lambda}$ is the Laplace-Beltrami operator on the sphere S. A random vector function $\mathbf{g}=\mathbf{f}+\boldsymbol{\eta}$ is taken as the right-hand side of (1); here $\mathbf{f}(x)=(f_1(x),f_2(x))^{\mathrm{T}}$ and $\boldsymbol{\eta}(t,x,\omega)=(\eta_1(t,x,\omega),\eta_2(t,x,\omega))^{\mathrm{T}}$ is a white noise in t. In [1] and in the present work it was obtained for existence of a unique stationary measure of Markov semigroup defined by solutions of the Cauchy problem for (1) and for the exponential convergence

of the distributions of solutions to the stationary measure as $t - +\infty$ the sufficient conditions on the right-hand side of (1) and the parameters ν, γ, ρ, k_0, k_1:

$$k_0 < \inf_{i=1,2,\ldots,i_*} \varsigma(i),\ \varsigma(i) = \frac{2}{(\mathrm{j}(i)-\gamma)^2}\left(3\nu\,\mathrm{j}^2(i)(\mathrm{j}(i)+\gamma)+\chi(\mathrm{j}(i))\right.$$

$$\left.+\sqrt{\left(3\nu\,\mathrm{j}^2(i)(\mathrm{j}(i)+\gamma)+\chi(\mathrm{j}(i))\right)^2+(\mathrm{j}(i)-\gamma)^2\left(\nu^2\,\mathrm{j}^3(i)(\mathrm{j}(i)+\gamma)+\nu\,\mathrm{j}(i)\chi(\mathrm{j}(i))\right)}\right), \quad (2)$$

$$\chi(y) = (k_1+\nu\gamma)(y^2+\gamma y)+\rho(\gamma+y),\ \mathrm{j}(y) = y(y+1),\ y \geq 0;$$

$$i_* = \left[\frac{c_*}{(1+\sqrt{2})\nu}\left(\sqrt{1+\frac{2c_*}{(1+\sqrt{2})\nu}}+1\right)^{-1}\right] \geq 1,\ c_* = \begin{cases}\varsigma(1), & \text{if } \gamma \neq 2,\\ \varsigma(2), & \text{if } \gamma = 2,\end{cases}$$

$[r]$ – the integer part of r.

In the present work it was also proven the theorem (for definitions of H^p, $p \in Z$, see the third paragraph of [1], for definitions of H^p for all $p \in \mathbb{R}$, see publication [30] in [1]).

We denote by $P(X)$ the family of probability measures on the measurable topological space X with its Borel sigma-algebra.

Consider the Hilbert space l_2 of real number sequences $\{b_i\}_{i=1}^{\infty}$ with finite norm

$$b = \|\{b_i\}_{i=1}^{\infty}\|_{l_2} = \left(\sum_{i=1}^{\infty} b_i^2\right)^{1/2} < \infty$$

and consider the following subset of l_2:

$$l_2^+ = \{\{b_i\}_{i=1}^{\infty} \in l_2 : b_i \geqslant 0, i = 1,2,5\ \}.$$

Let $\{E_i\}_{i=1}^{\infty}$ be an orthonormal basis for the space H^0. We take the random vector function η, given by

$$\boldsymbol{\eta}(t,x,\omega) = \frac{\partial}{\partial t}\boldsymbol{\zeta}(t,x,\omega), \qquad \boldsymbol{\zeta}(t,x,\omega) = \sum_{i=1}^{\infty} b_i \beta_i(t,\omega) E_i,$$

where $\{b_i\}_{i=1}^{\infty} \in l_2^+$ and $\{\beta_i(t,\omega)\}_{i=1}^{\infty}$, $t \geqslant 0$, is a sequence of independent real Brownian motions with respect to some right continuous filtration $\{F_t\}_{t \geqslant 0}$ such that all the P-nullsets of the σ-algebra F lie in F_0.

Let

$$\mathbf{f} = \nu \mathbf{f}', \qquad b_i = \sqrt{\nu} b_i',\ i = 1,2,5\ ,$$

$\mathbf{f}'$ and $\{b_i'\}_{i=1}^{\infty}$ are independent of ν.

Theorem

Let $\gamma, \rho, k_0, k_1 \geq 0$ be such that inequality

$$k_0 \leq \min\left\{4k_1, \frac{4(2+\gamma)}{(2-\gamma)^2}(2k_1+\rho)\right\} \quad (3)$$

is satisfied, let $\{b_i'\}_{i=1}^{\infty} \in l_2^+$ and let $\mathbf{f}' \in H^{-1}$. Then there exits a stationary measure $\mu_\nu \in P(H^2)$ such that $\mu_\nu(H^3) = 1$ for system (1) for all $\nu > 0$ and for any sequence of the probability measures $\{\mu_{\nu_n}, \nu_n - 0, n - +\infty\}$ there exits a limiting point μ in the

sense of weak-* convergence in $P(H^{3-\varepsilon})$, where $\varepsilon \in (0,1]$ is an arbitrary real number and $\mu\left(H^3\right)=1$.

Note that if (3) is satisfied and $\nu > 0$ then (2) is also satisfied.

A similar result is obtained for the equation of a barotropic atmosphere and the two-dimensional Navier-Stokes equation. A comparative analysis with some of the available related results is given for the latter.

2. Conclusion

It is well known that in practice, the kinematic viscosity coefficient in the system (1) is extremely small. Hence, it is important to study the behavior of stationary measures at small values ν. We proved that limiting measures exist and indicated in which space their supports lies.

3. Acknowledgments

The author is grateful to V. P. Dymnikov and V. N. Krupchatnikov for posing the problem, to A. R. Shirikyan, V. V. Nersesyan for helpful discussions.

References

1. *Klevtsova Yu. Yu.* On the rate of convergence as t → +∞ of the distributions of solutions to the stationary measure for the stochastic system of the Lorenz model describing a baroclinic atmosphere // Sb. Math. Turpion Ltd. 2017. Vol. 208, N 7. P. 929–976.

УДК 551.583

Колебания циркуляции атмосферы Северного полушария в период 1899–2019 гг. и связь с ними опасных природных процессов в Сибири в 2019 г.

Н. К. Кононова (NinaKononova@yandex.ru)[1,2]

[1]Институт географии РАН, г. Москва
[2]Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН, г. Севастополь

Аннотация. Колебания циркуляции атмосферы Северного полушария рассмотрены за весь период наличия синоптических карт в типизации Б. Л. Дзердзеевского, В. М. Курганской и З. М. Витвицкой. Особое внимание уделено последнему периоду, в котором чередуются между собой в основном две группы циркуляции: меридиональная северная и меридиональная южная. Это создает максимальный межширотный воздухообмен и способствует частой смене погоды и возникновению экстремумов температуры воздуха. Соседство разнородных воздушных масс обусловливает обострение атмосферных фронтов, штормовые и ураганные ветры и выпадение экстремального количества осадков, что может привести к падению деревьев, сносу крыш, обрыву проводов и наводнениям.

Ключевые слова: циркуляция атмосферы, Северное полушарие**,** группы циркуляции, элементарный циркуляционный механизм (ЭЦМ), экстремумы, опасные природные процессы

Введение

Работа является продолжением целого ряда предыдущих. В ней особое внимание мы обратим на 2019 г., в который продолжительность меридиональной северной группы циркуляции увеличилась по сравнению с 2018 г. на 45 дней и достигла 230 дней за год, а продолжительность меридиональной южной группы сократилась на 50 дней и стала 118 дней. Однако это значение выше ее средней многолетней продолжительности. Постараемся также оценить связь с изменением характера циркуляции атмосферы метеорологических экстремумов и катастрофических событий 2019 г.

Материалы и методы

Работа выполнена в типизации, разработанной под руководством Б. Л. Дзердзеевского [3]. Календарь последовательной смены элементарных циркуляционных механизмов (ЭЦМ) с суточным разрешением и выполненные по нему расчеты [4] дают возможность отслеживать изменения характера циркуляции атмосферы по месяцам, циркуляционным сезонам, по годам и циркуляционным эпохам. Анализ этих изменений приведен в работе. Конкретные случаи метеорологических экстремумов взяты с сайтов Новости погоды [9] и Погода и климат [11]. Данные о случаях опасных природных процессов и их продолжительности во всех регионах России взяты с сайта ВНИИГМИ-МЦД [1]. Анализ всех этих данных позволил составить картину экстремальности 2019 г. на фоне многолетних колебаний циркуляции атмосферы.

Результаты

На рис. 1. представлен многолетний ход суммарной годовой продолжительности всех четырех групп циркуляции атмосферы Северного полушария за 1899–2019 гг. Видно, что в 2019 г. продолжительность меридиональной северной группы увеличилась до 230 дней, а меридиональной южной уменьшилась до 118 дней. Наибольшее значение продолжительности меридиональной северной группы циркуляции составляет 278 дней в году и отмечалось в 1915 г., в северную меридиональную эпоху [4]. Продолжительность 230 дней в году при средней 197 дней отмечалась, кроме 2019 г., еще в 1902 и 2015 гг. Средняя продолжительность меридиональной южной группы циркуляции составляет 51 день, так что продолжительность 2019 г. на 67 дней превышает среднюю.

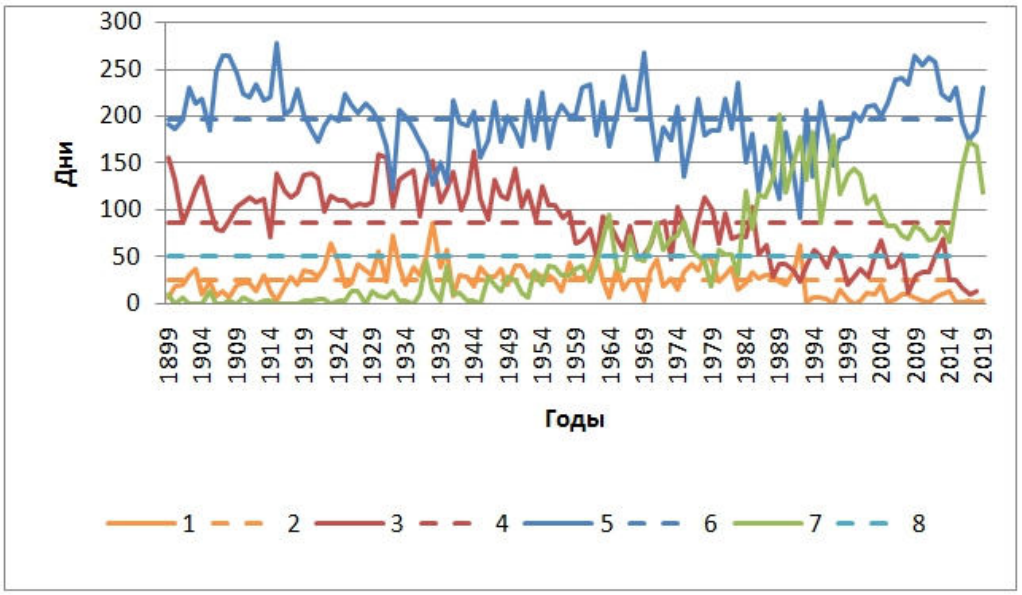


Рис. 1. Продолжительность групп циркуляции за период 1899–2019 гг.

Продолжительность группы нарушения зональности, средняя продолжительность которой составляет 86 дней и наибольшей была в зональную циркуляционную эпоху, в 1930–1940-е гг. колебалась на одном уровне с меридиональной северной и составляла в 1931 г. 159 дней, а в 1945 г. 163 дня. К 2019 г. она уменьшилась до 13 дней. Продолжительность зональной группы, которая в среднем составляет 25 дней, наибольшей тоже была в зональную циркуляционную эпоху и составляла в 1932 г. 73 дня, а в 1938 г. 86 дней. К 2019 г. она уменьшилась до 4 дней.

В зональную эпоху атлантические и тихоокеанские циклоны в отсутствие блокирующих полос высокого давления, соединяющих арктический антициклон с субтропическими, перемещались по северным окраинам континентов, а на континентах формировались стационарные антициклоны, отметившиеся жестокими засухами в 20–40-х гг. [8; 10]. Такой антициклон, располагаясь обычно на юго-востоке Европейской части, быстро приводит к иссушению воздуха при его прогревании (в течение 2–3 дней). При этом вдоль южной и юго-западной периферии антициклона происходит вынос сухого и горячего воздуха в виде

суховеев. Особенно сильная засуха наступает, когда антициклон подпитывается воздушной массой азорского антициклона, двигающегося с запада. Эти массы, перемещаясь через всю Европу, теряют свою влагу и приходят на Европейскую часть абсолютно сухими. В этих случаях засуха может захватывать одновременно Украину и бассейн Волги, нанося колоссальный ущерб [6]. Так, в 1946 г. засуха охватила более 50 % посевных площадей Советского Союза и, соответственно, вызвала страшный голод [12; 2].

Другим следствием такого характера циркуляции атмосферы явились суровые морозы конца 30-х – начала 40-х гг., когда среднесуточная температура воздуха опускалась в Москве и Нижнем Поволжье ниже -40°. В этом случае причиной сильных морозов на Европейской территории страны было развитие мощного западного отрога стационарного сибирского антициклона [5].

На рис. 2 показано изменение продолжительности групп циркуляции в отклонениях от их средних величин, при этом близкие по характеру циркуляции группы (зональная и нарушение зональности) объединены в общую зональную группу.

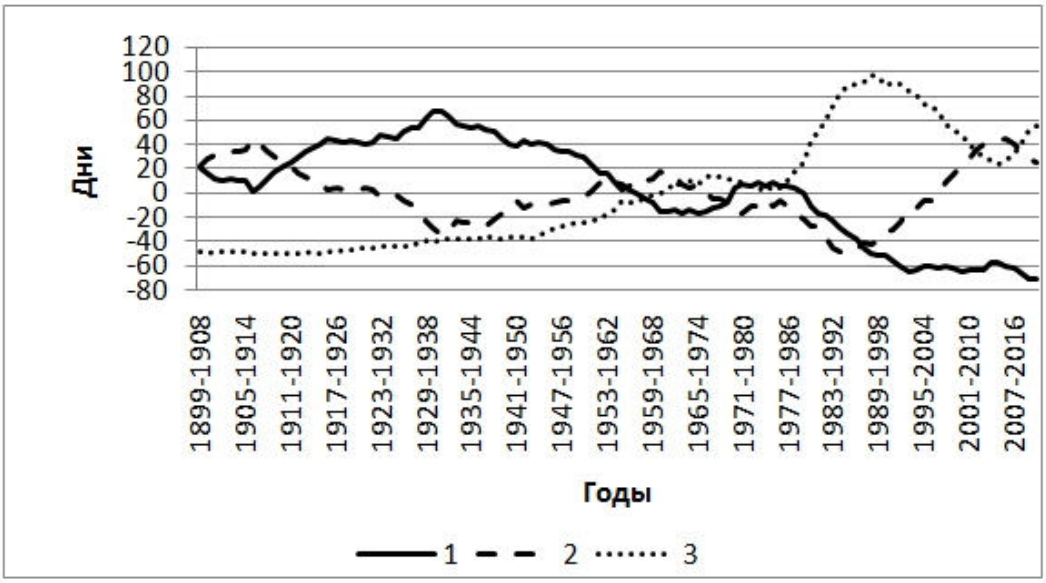


Рис. 2. 10-летние скользящие средние отклонений продолжительности групп циркуляции от их средних за 1899–2019 гг.: *1* – зональная + нарушение зональности, *2* – меридиональная северная, *3* – меридиональная южная

На графике четко видны три циркуляционные эпохи: меридиональная северная (1899–1915 гг., зональная (1916–1956 гг.) и меридиональная южная (1957 г. – настоящее время). В начале третьей эпохи был период, когда продолжительность меридиональной южной циркуляции была выше средней многолетней, но меридиональная северная в самом начале эпохи была несколько продолжительнее меридиональной южной, а зональная в 1970–1980 гг. сравнялась с ней. Тогда это происходило вблизи средней многолетней продолжительности. Сейчас похожее явление между меридиональными группами происходит при продолжительности 20–60 дней. Возможно, это переход к новой, меридио-

нальной северной циркуляционной эпохе, хотя сейчас по 10-летним скользящим растет продолжительность меридиональных южных процессов.

На рис. 3 показано изменение соотношения зональных и меридиональных процессов на полушарии.

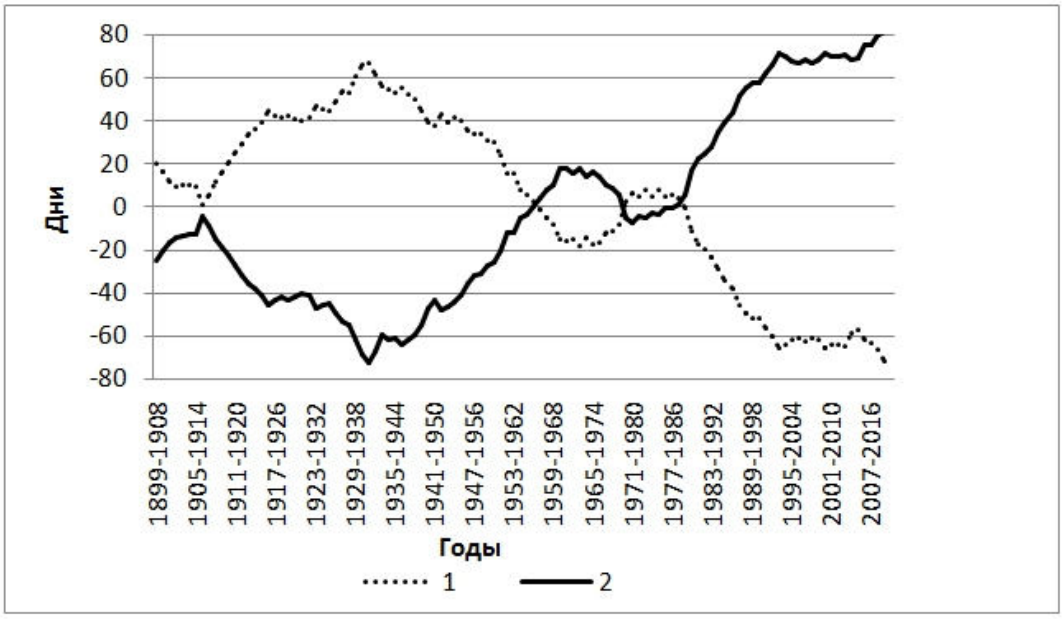


Рис. 3. Отклонения суммарной годовой продолжительности зональных (зональные + нарушения зональности) и меридиональных (северные + южные) процессов от их средних значений за 1899–2019 гг. (10-летние скользящие средние)

Как видно на рис. 3, в первой половине XX в. господствовали зональные процессы. После переходного периода с 1977–1986 гг. продолжительнее стали меридиональные. В настоящее время их продолжительность превышает среднюю (248 дней) на 82 дня и составляет 330 дней. Такая экстремальная продолжительность смены северных потоков южными приводит к экстремальному межширотному обмену [14], который в свою очередь проявляется крайней неустойчивостью атмосферы: частой сменой погоды, ростом повторяемости метеорологических экстремумов и опасных природных процессов. Приводим соотношение групп циркуляции в разные месяцы 2919 г. (табл.).

Таблица

Продолжительность групп циркуляции в 2019 г.

Группы	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль
Зональная	0	0	3	0	0	0	0
Нарушение зональности	2	2	2	0	0	1	2
Меридиональная северная	25	2	10	30	31	15	18
Меридиональная южная	4	19	16	0	0	14	10
Группы	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Год	
Зональная	0	0	0	0	0	4	
Нарушение зональности	0	2	0	2	0	13	
Меридиональная северная	14	21	15	16	28	230	
Меридиональная южная	17	7	16	12	3	118	

Как видно из табл. 1, в апреле и мае отмечалась только меридиональная северная циркуляция, при этом 22 дня в апреле и 18 дней в мае отмечался ЭЦМ 12а (рис. 4) с четырьмя одновременными арктическими вторжениями и столькими же выходами южных циклонов. Это самый турбулентный ЭЦМ. С ним связано большинство экстремумов весной.

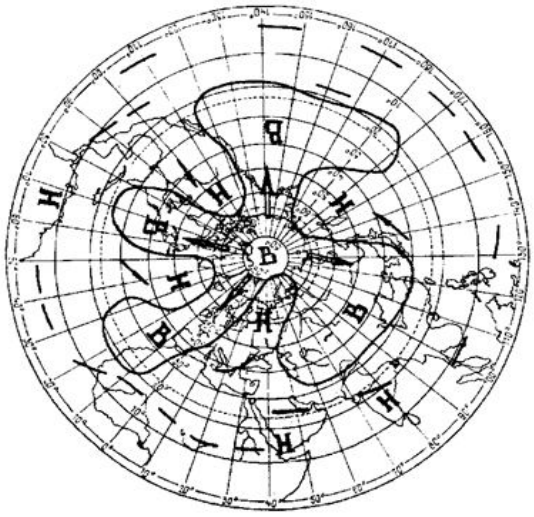


Рис. 4. Динамическая схема ЭЦМ 12а [13]

Соседство холодных и теплых воздушных масс, смена периодов тепла и холода сопровождается развитием конвективной неустойчивости, формированием грозовых облаков, ливнями, грозами, градом.

В поселках под Новосибирском, в Советском районе, в ночь на 5 апреля при ЭЦМ 12а стала прибывать вода. Затопило участки, хозяйственные постройки, жилые дома. 19 мая 2019 г. при ЭЦМ 12а в Магадане выпало 27 мм осадков, что составило 65 % месячной нормы.

Наиболее опасным летним ЭЦМ является ЭЦМ 13л (рис. 5), при котором при циклоне на полюсе южные циклоны одновременно выходят в четырех секторах Северного полушария.

Так, 16 июня при ЭЦМ 13л в центре Красноярского края выпало 80 мм за 12 ч, больше месячной нормы. На западе и севере Иркутской области в тот же день выпало 43 мм осадков, из них 39 мм за 2 ч. Ливень сопровождался градом 10 мм в диаметре. В тот же день на Курильских островах выпало 56 мм осадков за 12 ч. 19 июня при том же ЭЦМ в Хабаровском крае выпало 48 мм осадков, что сопоставимо с месячной нормой. На Камчатке в тот же день и в центре Приморья на следующий выпало по полумесячной норме осадков. 1 июля при ЭЦМ 13л в Нижнеудинске Иркутской области выпало 48 мм осадков. Это селеопасный район. По счастью, обошлось без селей. В тот же день в Абакане, Хакасия, выпало больше полумесячной нормы осадков. 15 июля при том же ЭЦМ на станции Агинское Забайкальского края выпало 55 мм осадков за 55 мин при месячной норме 89 мм. В Амурской области 21 июля при том же ЭЦМ выпало 86 мм осадков, в Приморском крае – 109 мм.

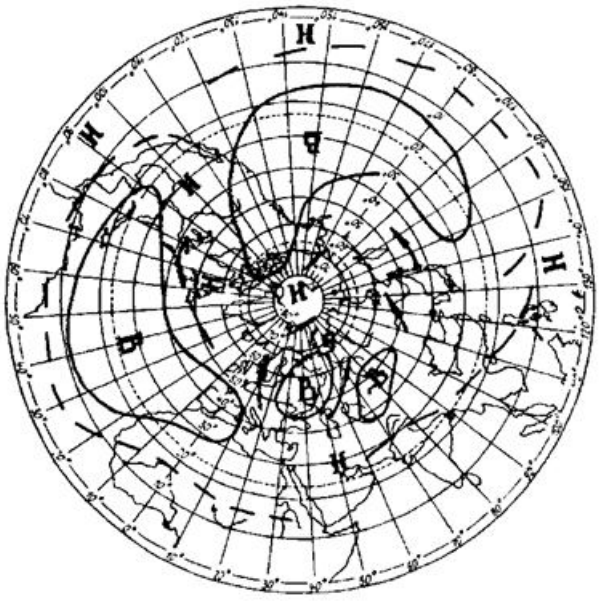


Рис. 5. Динамическая схема ЭЦМ 13л [13]

Необычное состояние циркуляции атмосферы привело к развитию опасных природных процессов.

Пожары

Сведения о нарастании пожарной опасности в Сибири и на Дальнем Востоке стали поступать еще во второй половине апреля. Причиной тому стало отсутствие осадков и сильные ветры. К 1 июня на севере Иркутской области, в Бурятии, Забайкальском крае и на западе Камчатского края она стала уже высокая, местами чрезвычайная. В Иркутской области огонь охватил 448,4 тыс. га. Из них в зоне мониторинга – 41 возгорание площадью 339 тыс. га, сообщили в правительстве Приангарья [9; 11]

В июне – июле природные пожары разгорелись в центре Красноярского края. К 24 июля площадь лесных пожаров в Сибири составляла 1,3 млн га, из них на Красноярский край приходилось 850 тыс. га. На 26 июля площадь лесных пожаров в Красноярском крае, Иркутской области, Бурятии, Забайкалье и Якутии превысила 3,5 млн га. Дым от лесных пожаров Сибири достиг Ульяновской области [9; 11].

Наводнения

Самым страшным бедствием 2019 г. стало наводнение в Иркутской области. С 10 по 23 июня стоял ЭЦМ 13л. 16 июня на севере и западе Иркутской области прошли сильные дожди, выпало до 43 мм. 18 июня выпало еще 39 мм. Это сильно повысило влажность почвы. Сильные и очень сильные дожди не прекращались и в последующие дни. Мощный циклон с 25 по 29 июня при ЭЦМ 12бл, 6 и 9а (рис. 6) прошел в бассейнах рек Уда, Ия, Ока и Белая. Сумма выпавших осадков за 4 дня составила 3,7 месячных норм. Ситуацию усугубило то, что дожди совпали с запоздавшим снеготаянием в восточных Саянах.

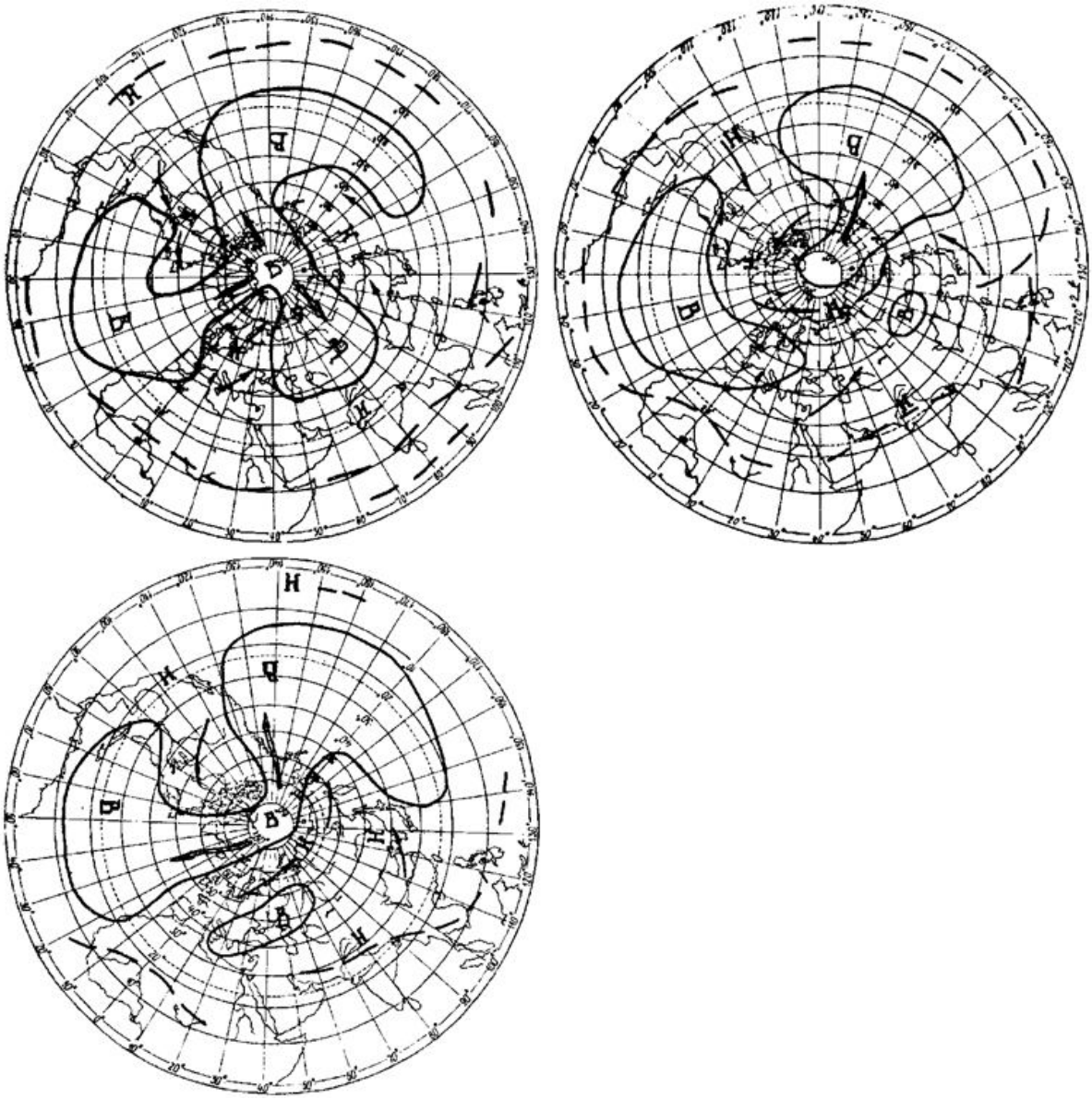


Рис. 6. Динамические схемы ЭЦМ 12бл (вверху слева), 6 (вверху справа) и 9а (внизу) [13]

Первые признаки наводнения отметило утром 24 июня Министерство по чрезвычайным ситуациям по Иркутской области на своем сайте: подъем уровня воды и подтопления в низинах. В ночь с 25 на 26 июня в Нижнеудинском районе начался стремительный подъем уровня воды в реках. За Удой и Ангарой поднялись реки Большая Белая, Ия, Ока, Бирюса, Иркут – за ночь площадь подтоплений выросла на сотни километров, а реки стали местами на три метра выше критической отметки. Режим ЧС ввели сначала в Тайшетском районе, а затем расширили уже до территории всей Иркутской области.

Большая вода пришла сразу в 20 населенных пунктов Нижнеудинского, Тайшетского, Тулунскогого районов. Из-за сильных дождей и резкого подъема уровня воды в реках, по состоянию на утро, 28 июня, было подтоплено уже более 2000 жилых домов и 2500 приусадебных участков. Для сравнения, еще сутки назад в воде были 700 домов.

Паводками повреждено 13 автомобильных мостов (два из них на федеральной трассе) и подтоплено 16 участков дорог местного значения. Погибли посевы, утонул скот, погибло 25 человек.

Наводнение в Амурской области

Через месяц после наводнения в Иркутской области произошло наводнение в Амурской. Циклон, пришедший из Китая, стал причиной сильных дождей и гроз в Амурской области. 21 и в ночь на 22 июля при ЭЦМ 13л количество выпавших осадков достигло 86 мм. 23 июля на севере Приамурья, в Селемджинском районе, из-за разлившихся после дождей рек оказался под водой Норский заповедник. Вода прибывала стремительно, эвакуировали людей и домашних животных, судьба диких неизвестна.

Изменение повторяемости опасных природных процессов в XXI в.

В ВНИИГМИ-МЦД создан специализированный массив сведений, включающий с 1991 г. все неблагоприятные и опасные условия погоды и явления в России, которые нанесли социальный и экономический ущерб [1]. На рис. 7 приведены изменения повторяемости опасных гидрометеорологических явлений по данным ВНИИГМИ-МЦД за 2000–2018 гг.

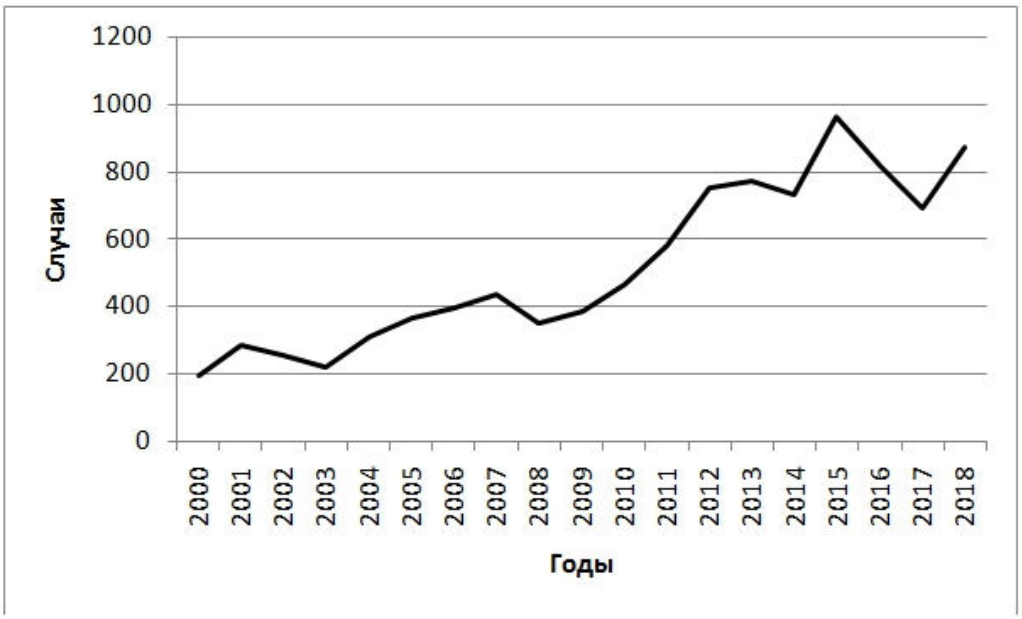


Рис. 5. Суммарное годовое число дней с опасными гидрометеорологическими явлениями и комплексами неблагоприятных метеорологических явлений, нанесших социальные и экономические потери

Ежегодный прирост составляет от 30 до 200 дней. Более 70 % ОЯ приходится на теплый период (апрель – октябрь), когда активизируются конвективные процессы.

Заключение

Проведенный анализ показал экстремальность 2019 г. по характеру циркуляции атмосферы. Он показал также, что 2019 г. является хорошим примером влияния неустойчивого характера атмосферы на погодные экстремумы и опасные природные процессы. Поскольку межширотный обмен в последние 40 лет неуклонно растет, будет расти и повторяемость экстремальных ситуаций, и опасных природных процессов.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований Института географии РАН, проект № 0148-2019-0009.

Список литературы

1. ВНИИГМИ-МЦД. 2019. URL: http://meteo.ru/pogoda-i-klimat

2. *Волков И. М.* Засуха, голод 1946–1947 гг. // История СССР. 1991. № 4. С. 28–36.

3. *Дзердзеевский Б. Л., Курганская В. М., Витвицкая З. М.* Типизация циркуляционных механизмов в северном полушарии и характеристика синоптических сезонов // Труды научно-исследовательских учреждений Главного управления гидрометеорологической службы при Совете Министров СССР. Серия 2, Синоптическая метеорология. Вып. 21. Центральный институт прогнозов. М., Л. : Гидрометиздат, 1946. 80 с.

4. *Кононова Н. К.* Колебания циркуляции атмосферы Северного полушария в XX – начале XXI века. 2019. URL: http://www.atmospheric-circulation.ru

5. *Кононова Н. К.* Изменение температуры и осадков в Восточной Сибири в первой половине XX века (в связи с изменением характера циркуляции атмосферы) // Известия Всесоюзного географического общества. 1963. Т. 95, вып. 2. С. 164–168.

6. *Кононова Н. К.* Характеристика экстремальных засух середины XX века // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2018. Т. 2, вып. 2. С. 29–55.

7. *Кононова Н. К.* Изменения глобальной циркуляции атмосферы в период 1899–2018 гг. // Фундаментальная и прикладная климатология. 2019. № 4. С. 120–138.

8. *Мещерская А. В., Блажевич В. Г.* Каталоги площадей комплекса осадки – температура для основных сельскохозяйственных районов юга ЕТС, Северного Казахстана и Западной Сибири // Метеорология и гидрология. 1977. № 9. С. 76–84.

9. Новости погоды. 2019. URL: http://www.meteonovosti.ru

10. *Педь Д. А.* О показателе засухи и избыточного увлажнения // Труды Гидрометцентра СССР. 1975. Вып. 156. С. 19–38

11. Погода и климат. 2019. URL: PogodaiKlimat.ru.

12. *Растянников В. Г., Дерюгина И. В.* Урожайность хлебов в России. 1795–2007. М. : ИВ РАН, 2009. 252 с.

13. *Савина С. С., Хмелевская Л. В.* Динамика атмосферных процессов северного полушария в XX столетии // Материалы метеорологических исследований / Межведомственный геофизический комитет при Президиуме Академии наук СССР. 1984. № 9. 146 с.

14. *Савина С. С., Хмелевская Л. В.* Элементарный циркуляционный механизм как показатель межширотного обмена в тропосфере // Циркуляционные механизмы современных колебаний климата. М. : Наука, 1987. С. 6–24.

УДК 551.577.3(571.53)

Цикличность атмосферных осадков и их сезонные изменения на территории Иркутской области

Е. А. Кочугова (kochugovae@mail.ru), А. Е. Шутова (shutovaar@yandex.ru)

Иркутский государственный университет, г. Иркутск

Аннотация. Рассмотрен региональный аспект проблемы современного изменения климата на примере Иркутской области. Статистическими методами исследована периодичность атмосферных осадков. Подтверждено наличие циклов продолжительностью 2–5, 5–7 и 9–11 лет. Для станций Иркутск, Инга, Нижнеудинск, Червянка, Тайшет и Тулун выявлена периодичность с масштабом 30–35 лет. Рассмотрены сезонные особенности изменений атмосферных осадков.

Ключевые слова: атмосферные осадки, Иркутская область, циклы, вейвлет преобразования, изменение климата, сезоны года.

Мы живем в современном мире, где процветает экономика, промышленная и хозяйственная деятельность человека, и почти каждая сфера и образ нашей жизни зависит от погодных условий. Начиная с последней четверти XX в. климат претерпевает постоянные колебания. Такое непостоянство климатической системы приводит к росту числа природных и техногенных катастроф, которые приводят к значительному материальному ущербу и ставят под угрозу безопасность населения. В связи с этим изучение текущей климатической изменчивости, особенно в регионе, характеризующемся наиболее стремительными и резкими изменениями, позволит ученым дать прогнозы на будущее, избежать или смягчить последствия чрезвычайных природных ситуаций.

При этом атмосферным осадкам уделяется особое внимание, так как их значительные колебания способны инициировать природные и техногенные чрезвычайные ситуации, а изменения отражаться на всем режиме увлажнения. В июле 2019 г. в Иркутской области из-за обильных и продолжительных дождей затопило несколько населенных пунктов. Тогда за сутки (27 июля) в Тулунском районе выпало 104 мм осадков [8], что составляет примерно месячную норму. Эта ситуация, а также переход региона от маловодного к многоводному периоду [5; 6], сподвигла нас проанализировать поведение атмосферных осадков на территории Иркутской области, чтобы ответить на ряд вопросов. Существует ли цикличность колебаний атмосферных осадков? Чем обусловлены циклы? Каков временной масштаб этих колебаний? Что способствует проявлению циклов и какую опасность они могут представлять для человека?

В поисках ответов на эти вопросы мы проанализировали временные ряды атмосферных осадков 17 метеорологических станций, расположенных на территории Иркутской области и обеспечиваемых равномерное покрытие изучаемой территории (рис. 1).

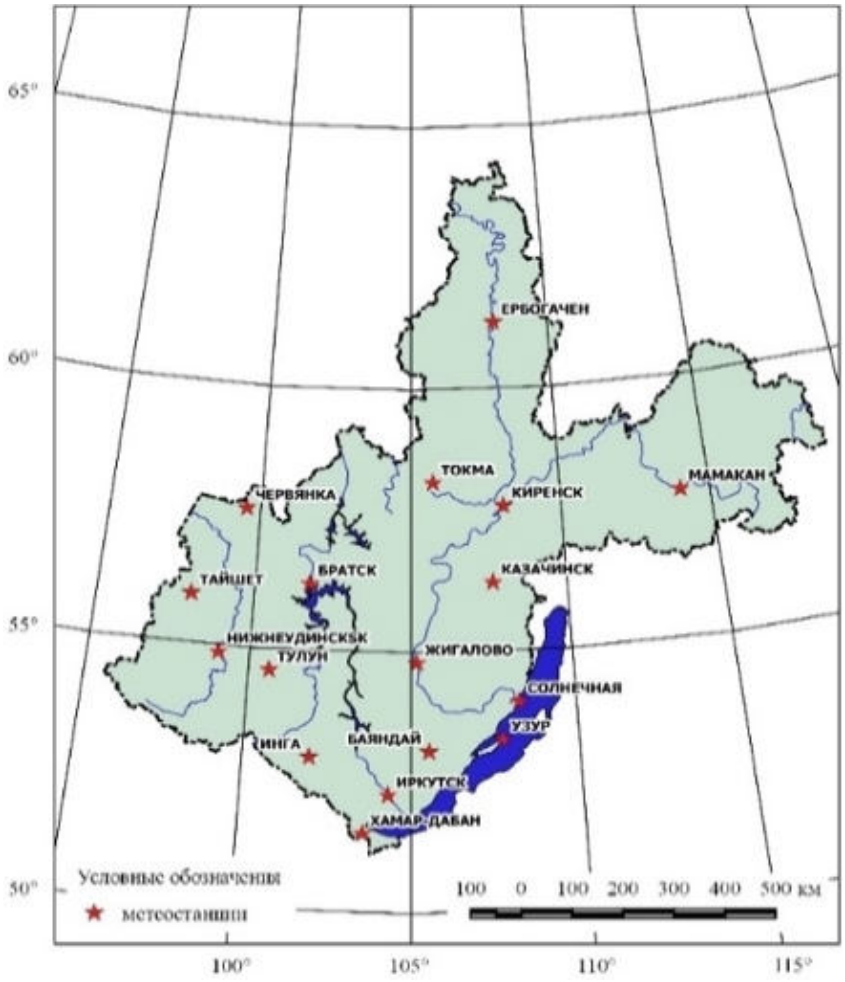


Рис. 1. Карта-схема расположения метеостанций Иркутской области, на основе которых проводился анализ

Исходным материалом для выполнения исследования послужили данные наблюдений за количеством атмосферных осадков месячного разрешения. Средняя продолжительность временных рядов составила 80 лет, что достаточно для получения достоверных оценок [3]. Наиболее длинные ряды наблюдений имеют метеорологические станции – Иркутск (127 лет), Тулун (110 лет), Баяндай (105 лет), Тайшет (93 года).

Колебания климатических характеристик на межгодовых и декадных интервалах времени играют важную роль в формировании сезонных климатических аномалий в умеренных широтах. Физическая природа квазипериодических колебаний до настоящего времени неясна. Например, межгодовые колебания осадков, имеющие циклический характер, могут быть обусловлены воздействием на климатическую систему таких факторов, как колебания солнечной постоянной, скрытые ритмы в частоте извержений вулканов и т. д.

Для оценки их периодичности мы использовали несколько статистических методов: спектральный анализ, скользящих средних и вейвлет-преобразования. Для выявления цикличности методом скользящих средних был выбран пятилетний период осреднения (рис. 2), так как он более характерен для умеренных широт [4]. Каждый из этих методов имеет свои достоинства и недостатки. Так, традиционный метод выявления колебаний в рядах наблюдений −

преобразование Фурье, обладает существенным недостатком: анализируемые функции (гармоники), покрывают всю временную ось, поэтому с его помощью может быть получена информация о характерных частотах и интенсивностях для исследуемого процесса, но не о временной локализации и характерных масштабах скрытых периодичностей (рис. 3). Эффективным методом, устраняющим указанный недостаток, является вейвлет-преобразование исследуемой функции (рис. 4).

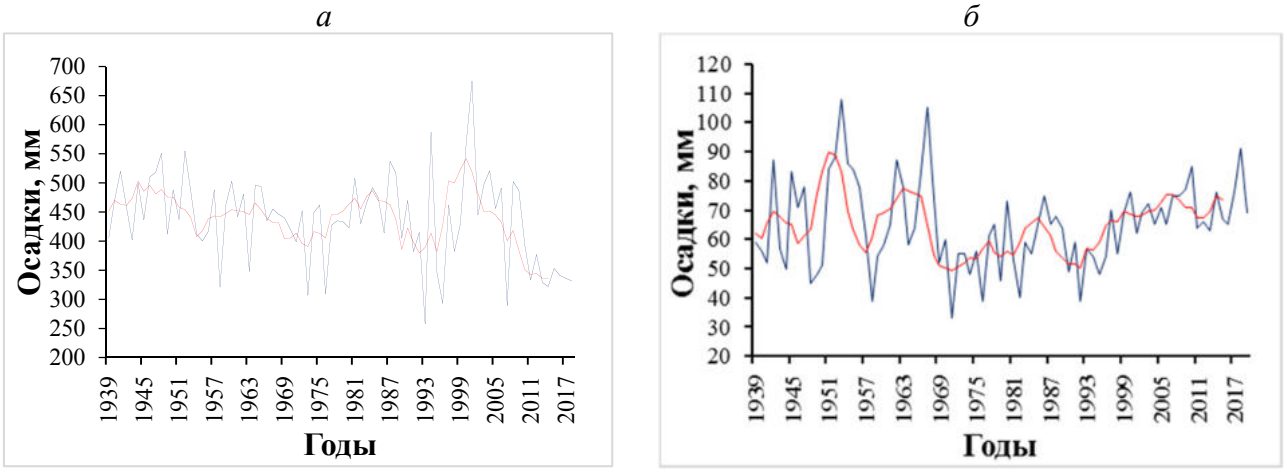


Рис. 2. Многолетний ход атмосферных осадков и их сглаженных значений (красная линия соответствует 5-летнему сглаживанию) на метеорологических станциях а) Инга за теплый период года; б) Жигалово за холодный период года

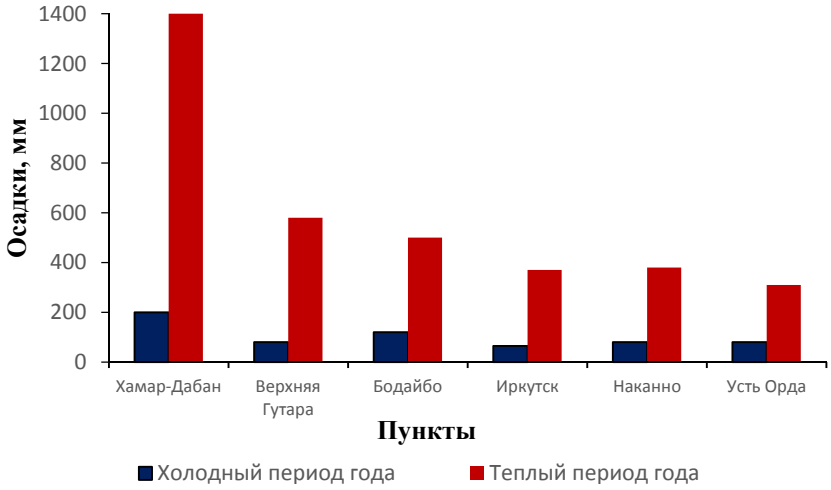


Рис. 3. Распределение атмосферных осадков на отдельных метеорологических станциях Иркутской области

Благодаря методу скользящих средних на территории Иркутской области была выявлена периодичность с масштабами 2 года, 5–7 и 9–10 лет. Полученный результат хорошо согласуется с выводами О. А. Дроздова [2]. Для наглядного представления на графиках (рис. 2) представлены временные ряды количества осадков за теплый и холодный периоды года. По графикам можно судить о том, что в разные периоды года наблюдаются циклы одинаковой продолжительности. Деление года на теплый и холодный обусловлено особенно-

стями атмосферной циркуляции над исследуемой территорией, которые определяют сезонный ход атмосферных осадков: с максимальным количеством осадков в теплый период года (апрель – октябрь) и минимальным – в холодный (ноябрь – март), что наглядно видно из гистограммы (рис. 3).

а *б*

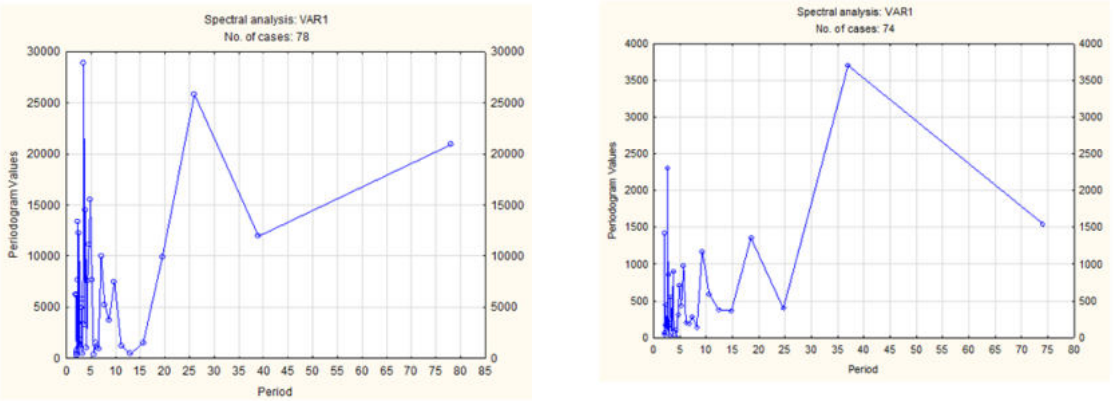


Рис. 4. Спектральная плотность сумм осадков на метеорологических станциях: а – Непа за теплый период года; б – Червянка за холодный период года

Также были построены периодограммы (рис. 4), с помощью которых мы смогли оценить период колебаний временного ряда уже более современным методом. Проведенные исследования многолетних вариаций атмосферных осадков с помощью этого метода помогли выявить наличие периодичностей с масштабами от 2 до 7 лет и больше 10 лет. Выявить локализованные спектральные характеристики атмосферных процессов можно используя методы, основанные на математическом аппарате вейвлет-преобразования. Смысл этого метода заключается в разложении по базису сигнала (функции). Каждая из функций этого базиса характеризует как определенную пространственную (временную) частоту, так и ее локализацию в физическом пространстве [1]. Такое преобразование дает наиболее наглядную картину результатов эксперимента и позволяет очистить исходные данные от шумов. Применение этого метода позволило нам выявить на всех станциях без исключения, характерные для теплого периода года циклы продолжительностью от 2–5 лет, а также 7 и 10–11 лет (рис. 5).

а *б*

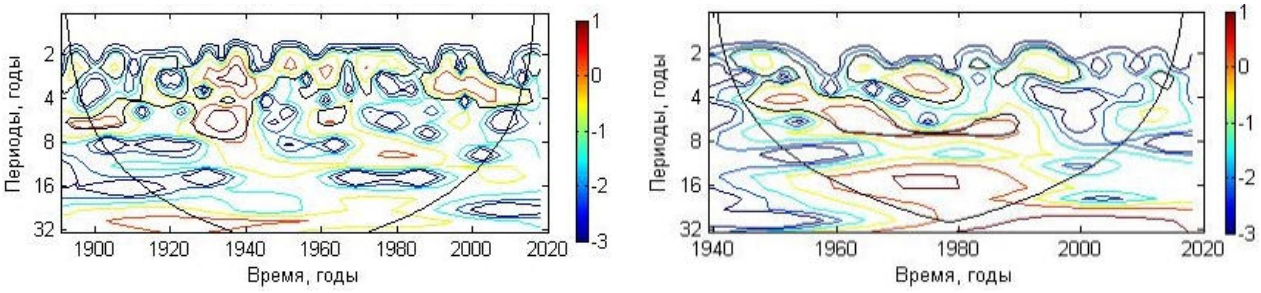


Рис. 5. Вейвлетное преобразование плотности потока месячных сумм атмосферных осадков за теплый период года: а) ст. Иркутск; б) ст. Ербогачен

Обобщая полученные результаты, можно сказать, что на территории Иркутской области атмосферные осадки в основном имеют цикличность от 2–5

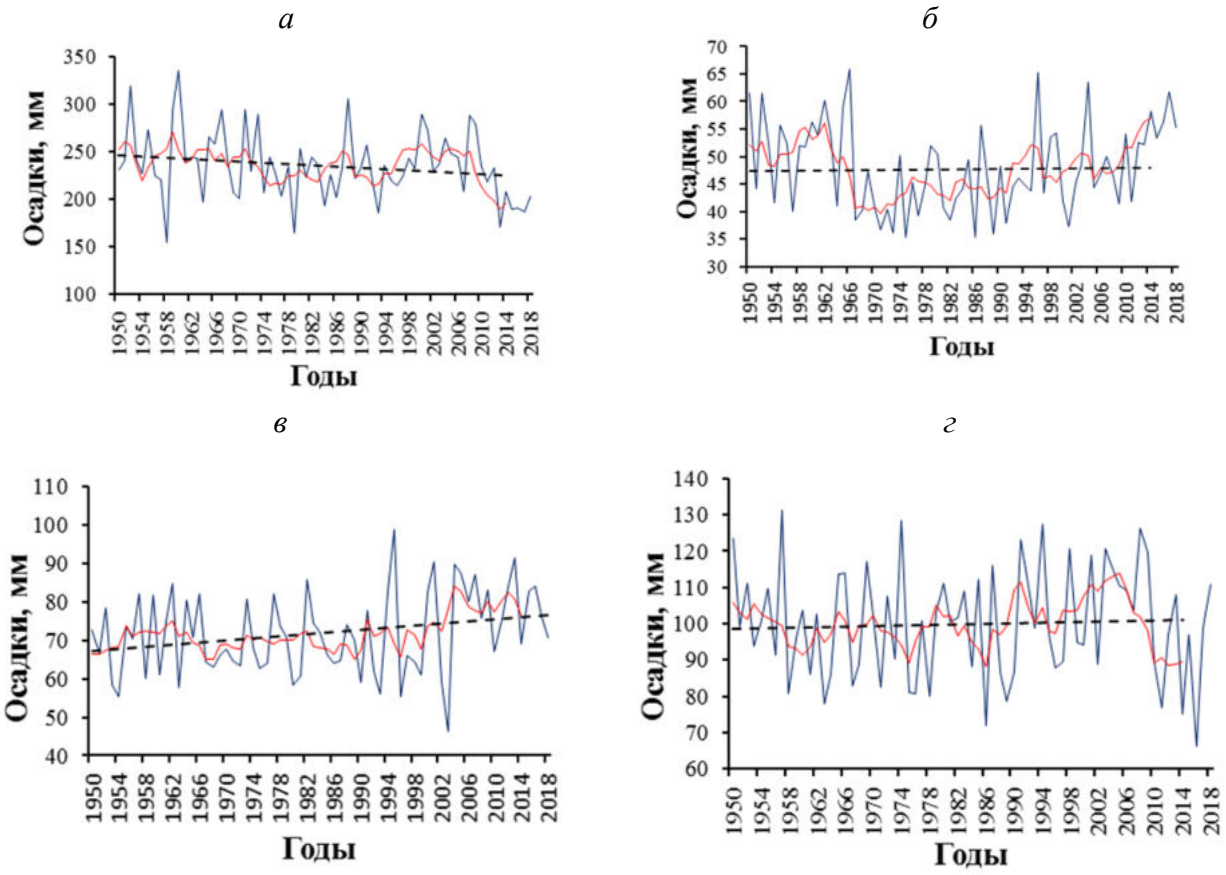
лет; 5–7 лет; 9–11 лет. Длительность таких циклов, вероятно, зависит от солнечной активности. Результат хорошо согласуется с выводами О. А. Дроздова, который исследовал циклы температуры воздуха и атмосферных осадков и связывал их с циклами солнечной активности [4].

На нескольких станциях, таких как ст. Иркутск, ст. Инга, ст. Нижнеудинск, ст. Червянка, ст. Тайшет и ст. Тулун выявляются 30–35 летние циклы. Эти циклы относятся уже в внутривековым, близких к циклам, ранее выявлявшихся Э. Брикнером, А. В. Шнитниковым [7]. Эти циклы не связаны с воздействием солнечной активности. Они обусловлены колебаниями, возникающими в системе морских течений, полярных льдов и сопровождающими их особенностями атмосферной циркуляции.

Анализ сезонных изменений атмосферных осадков по территории Иркутской области был выполнен на примере временного интервала с 1950 по 2018 г. На рис. 6 представлен временной ход атмосферных осадков для четырех сезонов года, построенный на основе регионально осредненных данных наблюдений на 17 метеорологических станциях Иркутской области. Полученные результаты мы сравнили с материалами работы Э. Г. Богдановой и др. «Атмосферные осадки». Выбор данной работы [2] был обусловлен тем, что в ней были выявлены временные и пространственные изменения количества атмосферных осадков по нескольким регионам России [2], выполненные по данным наблюдений за длительный период с 1936 по 2010 г. При региональных оценках изменений в годовых трендах отчетливо выделялся отрицательный ход атмосферных осадков в Восточной Сибири, в основном за счет существенного уменьшения количества летних осадков на территории Восточной Сибири, куда входит Иркутская область, что хорошо согласуется с нашими результатами (рис. 6).

В целом по Иркутской области тренд сезонных сумм осадков положителен, за исключением летнего сезона. В этот период года осредненный по территории тренд составляет -3,3 мм/10 лет. Весной рост количества осадков происходит со скоростью 1,3 мм/10 лет. Однако, рассматривая тенденции изменения, на каждой станции отдельно, весна как переходный период между зимним и летним типами атмосферной циркуляции, отличается очень пестрой картиной распределения областей увеличения и уменьшения количества осадков. Зимой и осенью наблюдается слабый рост (0,07 и 0,34 мм за 10 лет соответственно).

Анализируя полученные результаты, можем сделать вывод, что цикличность атмосферных осадков на территории Иркутской области в среднем составляет 5–7 лет; 10–11 лет; 30–35 лет. Эти особенности изменчивости увлажнения необходимо учитывать при планировании хозяйственной деятельности в регионе. Анализ временного распределения осадков по Иркутской области показал, что в теплый период года отмечается уменьшение сумм осадков, за исключением весеннего периода, когда наблюдается интенсивный рост осадков не только на территории области, но и в других регионах России.



Рису. 6. Временной ряд и линейный тренд (красная линия соответствует 5-летнему сглаживанию) сезонных сумм осадков осредненных по всей территории Иркутской области за период с 1950 по 2018 г.: *а* – летний сезон; *б* – зимний сезон; *в* – весенний сезон; *г* – осенний сезон. Дополнительными пунктирными линиями показаны линейные тренды

Реки Восточной Сибири имеют смешанное питание (дождевое, снеговое и грунтовое). В основном преобладает снеговое и дождевое питание. Также для режима рек Иркутской области характерны весенние половодья, и такой рост осадков в весенний период года, суммируясь с половодьем, сможет привести к значительным наводнениям, которые принесут большие материальные ущербы и человеческие жертвы. Чтобы избежать таких последствий, необходимо знать, предсказывать и контролировать процессы, происходящие в атмосфере.

Список литературы

1. *Астафьева Н. М.* Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физических наук. 1996. Т. 116, № 11. 244 с.

2. *Богданова Э. Г., Гаврилова С. Ю., Ильин Б. М.* Атмосферные осадки // Труды ГГО. 2014. Вып. 573. С. 39–64.

3. *Дашко Н. А.* Курс лекций по синоптической метеорологии. Владивосток : ДВГУ, 2005. 523 с.

4. *Дроздов О. А.* Циклические колебания осадков и температуры, используемые в сверхдолгосрочных прогнозах, в формировании которых возможно участие солнечной активности // Труды ГГО. 1975. Вып. 354. С. 5–13.

5. *Кичигина Н. В.* Опасность наводнений на реках Байкальского региона // География и природные ресурсы. 2018. № 2. С. 41–51.

6. *Никитин В. М., Осипчук Е. Н.* Озеро Байкал: риски маловодных и многоводных периодов // География и природные ресурсы. 2016. № 5. С. 67–76.

7. *Шнитников А. В.* Внутривековая изменчивость компонентов общей усложненности. Л. : Наука, 1969. 244 с.

8. Наводнение в Тулуне. URL: https://19rus.info (дата обращения: 09.09.2020).

УДК 551.524(5)

Роль атмосферной циркуляции в формировании температурных аномалий в январе на территории Азиатской России

Е. А. Кочугова (kochugovae@mail.ru), А. С. Яковлева (alekso.yakovleva99@mail.ru)

Иркутский государственный университет, г. Иркутск

Аннотация. Исследованы изменения температуры воздуха на территории Сибирского сектора Северного полушария (60–120° в. д.) за многолетний период (1947–2018 гг.). Рассмотрено распределение крупных положительных и отрицательных аномалий температуры воздуха. Очаги наибольшей повторяемости крупных отрицательных аномалий расположены на юге и юго-западе района исследований. На основе анализа элементарных циркуляционных механизмов по типизации Б. Л. Дзердзеевского установлена зависимость между атмосферной циркуляцией и распределением аномалий температуры приземного воздуха.

Ключевые слова: атмосферная циркуляция, аномалия температуры воздуха, Сибирский сектор, изменение климата, элементарные циркуляционные механизмы.

Изменение крупномасштабной атмосферной циркуляции считается вероятным механизмом генерации колебаний регионального климата. В статьях [2; 6] установлено, что изменчивость атмосферной циркуляции может объяснять от 54 до 82 % изменчивости температуры в Сибири в различные месяцы года. Понимание этого механизма требует сравнительного анализа особенностей пространственной изменчивости полей аномалий температур и циркуляционных условий атмосферы.

В связи с этим особый интерес вызывает оценка вклада крупномасштабной атмосферной циркуляции в изменчивость температуры приземного воздуха, на примере центрального месяца зимнего сезона. Анализ, выполненный на примере зимнего сезона, позволит нам уменьшить влияние трансформации воздушных масс, обусловленной неоднородностью свойств подстилающей поверхности, на циркуляционные процессы, так как исследуемая территория полностью покрыта сезонным снежным покровом.

В современной климатологии широко представлены публикации, опирающиеся как на индексы, рассчитываемые по точечным данным (NAO, SOI, SCAND и др.), и отражающие развитие аномалий циркуляции в атмосфере, так типизации атмосферных процессов, основанные на анализе пространственных закономерностей распределения барических образований (индексы Каца, Гирса, Дзерзеевского и т. д.). Благодаря структуре и накопленному материалу, из набора различных типизаций атмосферных процессов, для нашего исследования была применена классификация циркуляционных механизмов Северного полушария по Б. Л. Дзердзеевскому.

Для установления региональных связей между атмосферной циркуляцией и пространственно-временным распределением аномалий температуры приземного воздуха были использованы: календарь последовательной смены элементарных циркуляционных механизмов (ЭЦМ) [3; 5] и данные метеорологических наблюдений за температурой воздуха [1] суточного разрешения 49 реперных

климатических станций, расположенных на территории Сибирского сектора Северного полушария за период с 1947 по 2018 г.

Под Сибирским сектором в статье следует понимать азиатскую часть России, заключенную между 60 и 120° в. д. Эта территория ограниченна с западной стороны цепью Уральских гор, а на востоке – Верхоянским хребтом и Алданским нагорьем. Естественной северной границей является Северный Ледовитый океан, а южная территория включает в себя районы Казахстана и Монголии.

Данная территория характеризуется сложными климатическими особенностями, которые определяются физико-географическим положением, удаленностью от океанов, наличием горных цепей, множеством рек и озер, а также особенностями циркуляции атмосферы.

Климат Сибирского сектора Северного полушария характеризуется как умеренно континентальный и резко континентальный. Его континентальность усиливается при перемещении на восток.

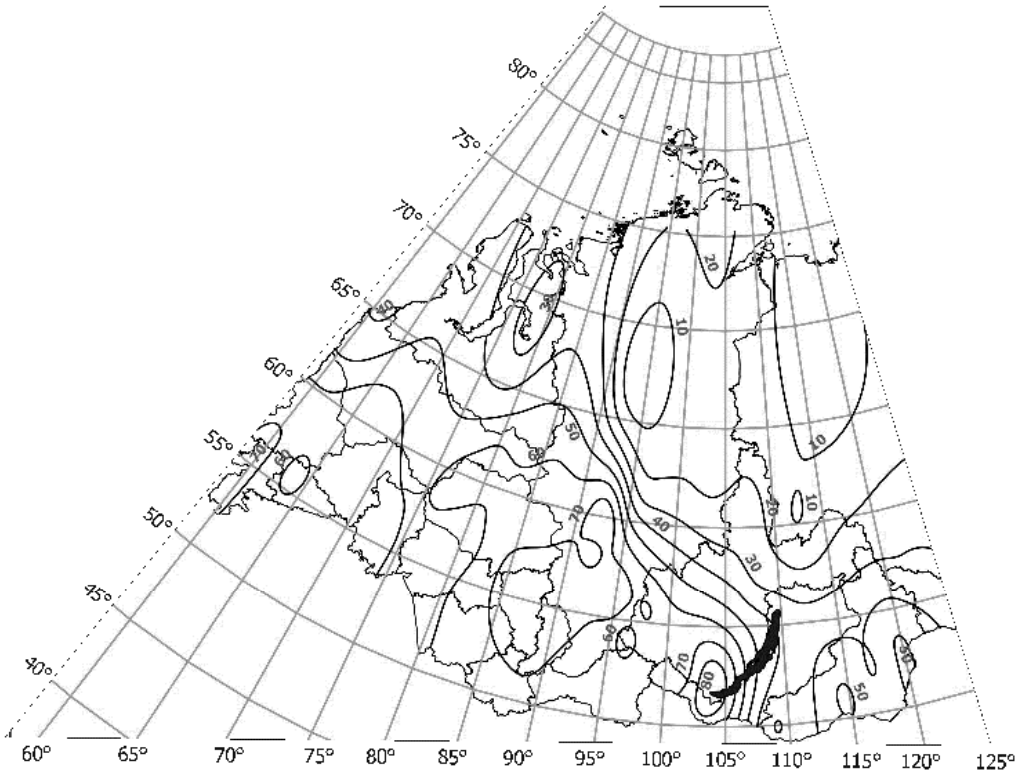
Зимой практически над всей Сибирью стоит ясная, солнечная, морозная погода почти без ветров и осадков. Формированию такого климата способствуют особенности циркуляции атмосферы и рельеф, характеризующийся глубокими котловинами и речными долинами, в которых застаивается и еще больше охлаждается воздух. Продолжительность зимнего периода увеличивается с юга на север, а климат меняется с мягкого влажного на сухой морозный. Так, средняя температура за зимние месяцы изменяется по территории от –14 и –20 °С на юге до –28 и –32 °С и менее на севере. Наиболее сильные морозы наблюдаются в условиях узких долин и котловин Западной Якутии и в полярных районах Красноярского края. Очаги холода расположены на станциях Сухана и Агата, где ежегодно можно наблюдать понижение температуры воздуха ниже –50 °С.

Как известно для оценки экстремальности температурного режима используют как абсолютные, так и относительные показатели. В качестве относительного показателя широко применяется величина среднеквадратического отклонения (σ). Этот статистический параметр учитывает изменчивость температуры воздуха, которая существенно различается в разных регионах России и дает возможность осреднять индексы суровости зим, независимо от географического положения регионов. Последнее приобретает особую актуальность, когда исследуемая территория находится в разных климатических зонах, характеризуется сложными орографическими условиями и значительной протяженностью (около 6600 км с севера на юг и 1050 км с запада на восток).

Для оценки масштаба температурной аномалии мы использовали величины кратные одной σ. Аномалия считалась крупной при отклонении среднемесячной температуры воздуха от нормы на величину, превышающую стандартное отклонение $|\sigma| \le |\Delta t| < |2\sigma|$, и очень крупной – при отклонении $|2\sigma| \le |\Delta t| < |3\sigma|$, и экстремально крупной – более 3σ, где Δt – отклонение суточной температуры от вычисленной средней арифметической за весь рассматриваемый период.

На рис. 1 представлено распределение суммарного числа случаев с очень крупными отрицательными и положительными аномалиями за исследуемый период.

а



б

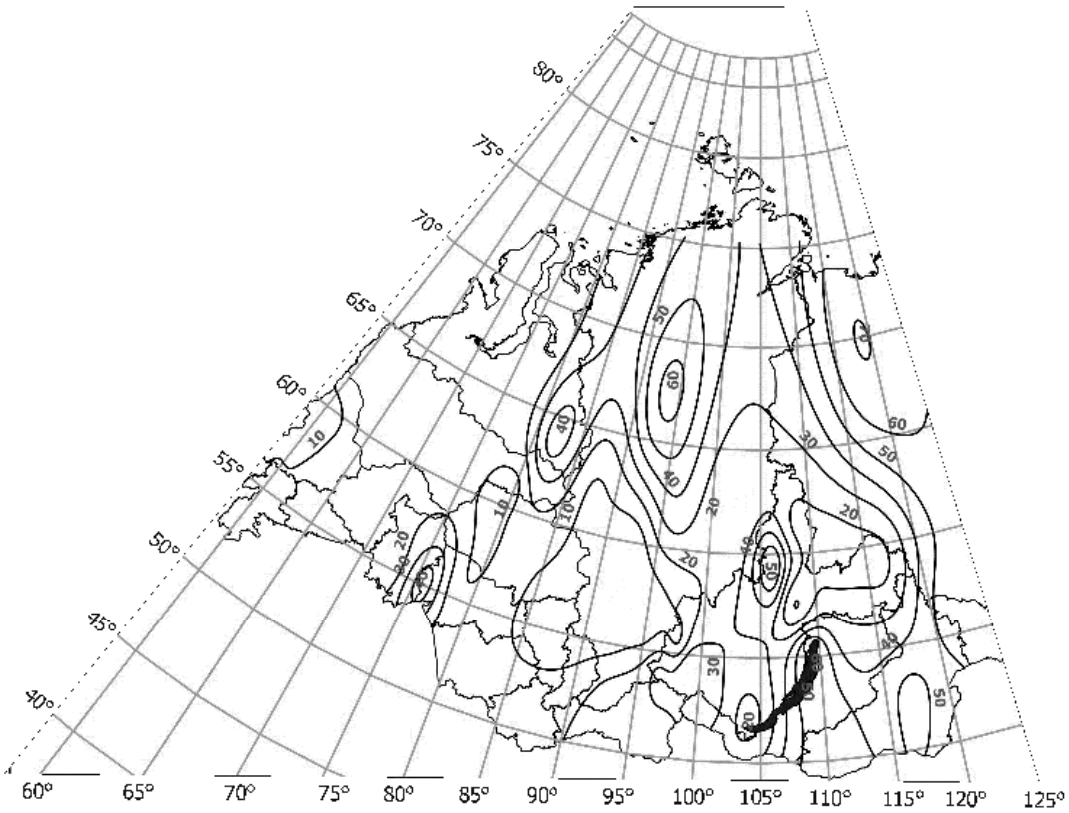


Рис. 1. Пространственное распределение суммарного числа случаев с очень крупными отрицательными (а) и положительными (б) аномалиями температуры в январе 1947–2018 гг.

На территории Сибирского сектора отрицательные аномалии наблюдаются в 2 раза чаще, чем положительные. Наибольшее количество случаев с очень крупными отрицательными аномалиями отмечалось на метеорологических станциях: Леуши, Иркутск, Екатеринбург. В целом для пространственного распределения крупных отрицательных аномалий характерен широтный ход (рис., *а*). На севере территории их количество не превышает 20. Очаг наибольшей повторяемости крупных отрицательных аномалий расположен на юге Иркутской области. Анализируя их временное распределение, можно выделить суровые зимы 1946/1947, 1965/1966, 1968/1969 и 2000/2001 гг. Максимум повторяемости крупных аномалий наблюдался зимой 1968/1969 гг. В эту зиму очень крупные отрицательные аномалии наблюдались практически на всей территории исследования.

Пространственное распределение очень крупных положительных аномалий показано на рис., *б*. Довольно редко положительные аномалии наблюдаются в западной части Сибирского сектора, где их число за рассмотренный период не превысило 10. На территории республики Саха-Якутия расположился очаг наибольшего числа случаев с положительными аномалиями (60 случаев).

Метеорологические станции Сухана, Удское, Агинское, Агата, Сретенск и Кыра выделена нами как пункты, где случаи с резкими повышениями температуры наблюдаются часто. Рассматривая временное распределение положительных аномалий, следует выделить теплые зимы на территории Сибирского сектора: 1948/1949, 1961/1962, 1980/1981, 1994/1995, 2001/2002, 2006/2007, 2015/2016 гг.

Экстремально крупные аномалии на территории Сибирского сектора фиксируются редко. Так, за весь рассматриваемый период экстремально крупные положительные аномалии наблюдались в 59 случаях, а отрицательные – в 54, что составляет около 4 % от общего числа случаев.

Очень важным представляются вопросы: в какой мере крупномасштабная циркуляция может объяснить особенности современного потепления на территории Сибири? Какие атмосферные процессы определяют частоту, интенсивность положительных и отрицательных аномалий?

Для анализа связи температурных аномалий с крупномасштабной циркуляцией атмосферы в данном исследовании была применена классификация циркуляционных механизмов Северного полушария по Б. Л. Дзердзеевскому [5]. Ее основной единицей является – ЭЦМ, под которым следует понимать типовой циркуляционный процесс, в течение которого сохраняется географическое положение барических образований и направление их перемещения [4].

За период с 1947 по 2018 г. очень крупные температурные аномалии в центральный месяц зимнего сезона на территории Сибирского сектора Северного полушария наблюдались на фоне 30 ЭЦМ. При этом всего в типизации выделен 41 подтип ЭЦМ.

В таблице представлено распределение очень крупных положительных и отрицательных аномалий температуры, обусловленных различными группами циркуляции. Группы циркуляции выделены согласно [3].

Таблица

Количество случаев с очень крупными положительными и отрицательными аномалиями, наблюдающихся на фоне отдельных групп циркуляции, выделенных для Сибирского сектора Северного полушария

Количество случаев с аномалиями	Группы циркуляций					
	Широтная западная	Долготная северная	Широтная западная и стационарное положение	Долготная северная и стационарное положение	Долготная северная и широтная восточная	Долготная северная и широтная западная
Очень крупные положительные	124	26	509	429	140	15
Очень крупные отрицательные	85	75	723	1097	321	148

Данные таблица хорошо показывают, что аномалии температуры чаще всего наблюдаются при широтной западной со стационарным положением и долготной северной со стационарным положением группах циркуляции. На долю этих групп приходится 74 % от всех случаев с аномалиями температуры.

Отметим, что очень крупные положительные аномалии чаще все наблюдались на фоне 13 з (228 случаев), 7 бз (144 случая), 11а (107 случав) и 12 бз (104 случая) ЭЦМ. Отличительной особенностью 13з ЭЦМ является то, что мощный стационарный антициклон занимает весь Евразийский материк, а направления потоков в умеренных и высоких широтах близки к меридиональным. Интересно отметить, что этот же тип ЭЦМ примерно в 2 раза чаще формирует очень крупные отрицательные аномалии.

Кроме того, формирование очень крупных отрицательных аномалий происходит на фоне 12 бз (220 случаев), 11б (209 случаев) и 8 гз (165 случая) ЭЦМ. Указанные подтипы характеризуются блокирующими процессами, оказывающими большое влияние на погодные процессы. Продолжительность процессов блокирования колеблется в широких пределах (от нескольких суток до нескольких недель), поэтому они способны определять широкий спектр аномальных погодных процессов.

Таким образом, подход к объяснению аномальных зим в последние десятилетия принципиально изменился. Основная роль в этом вопросе отводится стационарным антициклонам, особенно блокирующим высотным образованиям и связанным с ними особенностями циркуляции атмосферы. На территории Сибирского сектора Северного полушария аномалии температуры чаще всего наблюдаются при широтной западной со стационарным положением и долготной северной со стационарным положением группах циркуляции. На долю этих групп приходится 74 % от всех случаев с температурными аномалиями.

Список литературы

1. Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – мировой центр данных. URL: meteo.ru (дата обращения: 10.07.2020).

2. Влияние атмосферной циркуляции на температурный режим Сибири / В. П. Горбатенко, И. И. Ипполитов, М. В. Кабанов, С. В. Логинов, Н. В. Поднебесных, Е. В. Харюткина // Оптика атмосферы и океана. 2011. Т. 24, № 1. С. 15–21.

3. Колебания циркуляции атмосферы северного полушария в XX – начале XXI века. URL: atmospheric-circulation.ru (дата обращения: 10.09.2020).

4. *Кононова Н. К.* Изменения циркуляции атмосферы Северного полушария в XX–XXI столетиях и их последствия для климата // Фундаментальная и прикладная климатология. 2015. № 1. С. 54–70.

5. *Кононова Н. К.* Классификация циркуляционных механизмов Северного полушария по Б. Л. Дзердзеевскому. М. : Воентехиниздат, 2009. С. 70–72.

6. *Черенкова Е. А.* Региональные особенности изменения летней температуры в Западной Сибири во второй половине XX – начале XXI века // Известия РАН. Серия географическая. 2016. № 4. С. 52–61.

УДК 551.501

Современные проблемы в определении облачности на территории Иркутской области

И. В. Латышева (ababab1967@mail.ru)[1], А. В. Денисов (deni.aleksej.86@mail.ru)[2]

[1]Иркутский государственный университет, г. Иркутск
[2]Иркутское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, г. Иркутск

Аннотация. Проведен анализ методических аспектов в определении форм и высоты нижней границы облаков. На примере территории Иркутской области обозначены существующие проблемы, показана необходимость учета современных тенденций изменений климата, динамики развития синоптических процессов и спутниковых данных при определении форм облаков и высоты их нижней границы.

Ключевые слова: Иркутская область, облака, глубокая конвекция, космические снимки, атмосферные фронты.

Введение

Определяемые на метеорологических станциях и постах облака – видимая совокупность взвешенных в атмосфере и находящихся в процессе непрерывной эволюции капель и/или кристаллов, которые являются продуктами процессов конденсации и/или сублимации водяного пара. Фазовое строение, водность облаков и их развитие по вертикали определяется совокупным распределением температуры, влажности и вертикальных движений как внутри, так и вне облака [1].

Облачность является важнейшим фактором, регулирующим приход солнечной и тепловой радиации, а выпадающие из облаков осадки определяют приходную часть в уравнении водного баланса, что важно учитывать в прогнозах погоды и климата. В процессах зарождения и эволюции облаков проявляются атмосферные явления различных пространственно-временных масштабов: макромасштабные, мезомасштабные и микромасштабные синоптические процессы. Впервые на взаимосвязь разнообразия облачных форм с постоянно изменяющимися погодными условиями указал в 1817 г. немецкий климатолог Г. Дове, заметивший также, что «облако – не предмет, а процесс».

Попытка классификации облаков по внешнему виду была предпринята в 1776 г. известным французским метеорологом-любителем Жаном Батистом Ламарком. Первый атлас облаков был издан в 1896 г. после обсуждения этой идеи в 1891 г. на Международной конференции в Мюнхене. В России первый Международный атлас облаков издан в 1898 г., второе издание относится к 1933 г., в атласе облаков 1940 г. число снимков облачности возросло с 30 до 75 и впервые было представлено 22 снимка, сделанных с самолетов и аэростатов. В последующих изданиях 1957, 1978 и 2011 гг. приводилось уточнение классификации и описание облаков различных ярусов [2].

Регулярные и достоверные наблюдения за формами облаков и их видоизменениями способствуют своевременному обнаружению опасных и неблагоприятных гидрометеорологических явлений, поэтому важна правильность распознавания форм облаков, которая при визуальном методе наблюдений напря-

мую зависит от квалификации техника-метеоролога. В этой связи очень важно, чтобы дежурный техник-метеоролог учитывал физический механизм образования облаков различных форм и синоптические процессы при распознавании облаков фронтального происхождения. Следует учитывать, что характерной особенностью фронтальных облаков является их многослойность, что при наличии сплошной нижней облачности не позволяет определить облака верхнего и среднего ярусов. Кроме того, на некоторых участках фронтальной поверхности возникают мезопроцессы, под влиянием которых образуются мезомасштабные системы облаков, которые характеризуются спецификой параметров облачности на разных участках и относительно коротким жизненным циклом. Отдельные облака кучевых форм внутримассового происхождения вследствие быстрого испарения влаги либо при усилении нисходящих движений иногда очень быстро разрушаются, а при благоприятных условиях, наоборот, возможно развитие взрывной конвекции.

В этой связи существенно дополняют наблюдения наземной метеорологической сети спутниковые данные. Однако при дешифрировании снимков облачности имеются свои погрешности [5]. Например, погрешность определения внутримассовых облаков возрастает зимой, когда при наличии устойчивого снежного покрова такие облака плохо различаются на фоне снега в видимой области спектра. Более достоверную оценку можно получить путем сопоставления данных визуальных наблюдений с синоптическим анализом приземных и высотных карт погоды. Но и в этом случае, возможны сложности при определении форм облачности в условиях быстрого развития мезомасштабных процессов [6].

Результаты исследований

В настоящее время на метеорологической сети Росгидромета, несмотря на накопленный опыт и развитие методического сопровождения, существует проблема точности визуального определения техником-метеорологом наблюдаемых форм облачности и высоты ее нижней границы (ВНГО).

Территория Иркутской области имеет большую меридиональную протяженность и крайне неоднородный рельеф, который проявляется в процессах деформации облачных полей [4]. Анализируя накопленный опыт практической работы на метеостанциях автором статьи – Денисовым А. В., можно сказать, что при определении форм облачности наблюдатель ориентируется, в основном на Атлас облаков, не всегда учитываются физический механизм образования и эволюция различных форм облаков и типы определяющих их развитие синоптических процессов. В качестве примера можно привести зимний период, когда в темное время суток при наличии слоистых облаков наблюдатель вместо них иногда отмечает высокослоистые облака, так как по внешнему виду ночью эти облака легко перепутать друг с другом. Если же учесть, что давление, приведенное к уровню моря, составляет более 1030 гПа, атмосферное давление на уровне станции не испытывает заметного падения, наблюдалось образование изморози, то при этих факторах наблюдатель вряд ли бы отметил высокослоистые облака. Также слоистые облака иногда путают с кучево-дождевой облачностью, особенно в зимний период.

В качестве примера можно привести ситуацию 3–5 декабря 2015 г., когда при выпадении осадков на ряде станций в южных районах Иркутской области отмечали кучево-дождевую облачность. Анализ метеорологических факторов на примере г. Иркутска показал, что в рассматриваемый период был хорошо выражен суточный ход температуры воздуха (рис. 1, *а*), дефициты влаги варьировали от 1 °С в ночные и утренние часы до 3,9 °С – в дневные часы. Изменение атмосферного давления не превышало 1–2 гПа, причем преобладали тенденции незначительного падения давления на фоне роста температур (рис. 1, *б*). Ветровой режим характеризовался преобладанием слабого ветра и штиля, в направлении ветра выделялись господствующие в г. Иркутске ветры северо-западного и юго-восточного направлений и увеличение вклада ветра восточного направления (рис. 1, *в*). Однако анализ межсуточных вариаций температуры воздуха показал, что ее изменения не превышали 1,5 °С, что указывает на однородную воздушную массу.

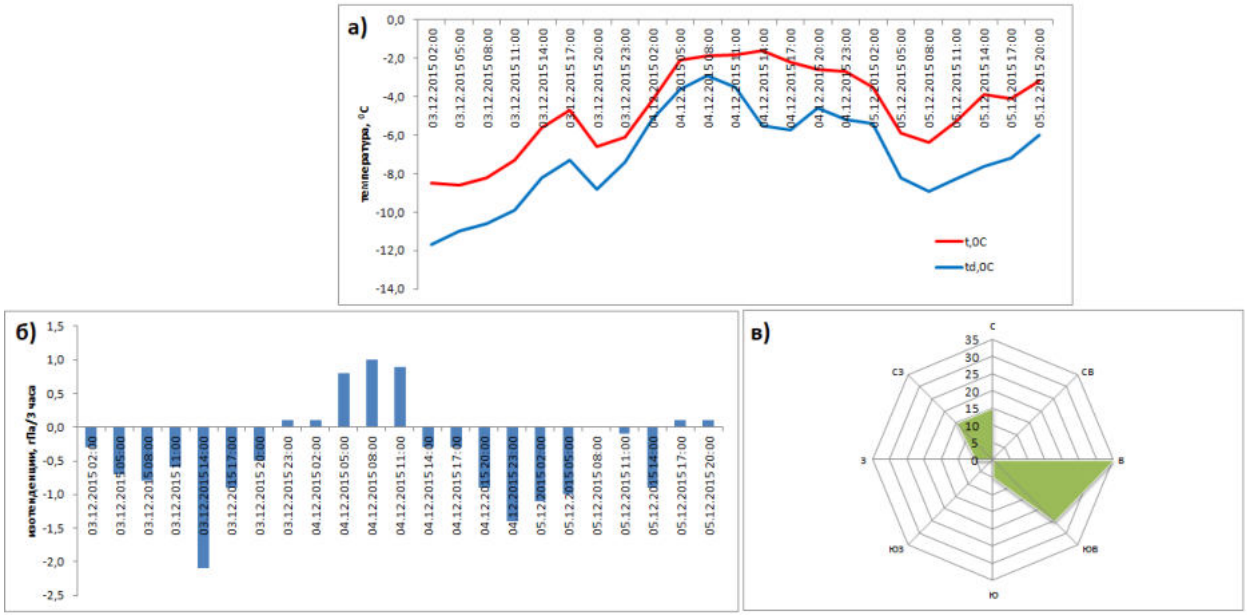


Рис. 1. Изменение метеорологических параметров на ст. Иркутск (по данным гр-5) температуры воздуха и температуры точки росы (*а*), изотенденций давления (*б*) и роза ветров (*в*) 3–5 декабря 2015 г.

Для подтверждения определяющей погодные условия в рассматриваемый период однородной воздушной массы были проанализированы приземные и высотные карты погоды в сроки 00 и 12 ВСВ (рис. 2). В средней и верхней тропосфере южные районы Иркутской области оказывались под влиянием северо-западных потоков в передней части высотного гребня. В то же время на уровне АТ-500 гПа (5 км) прослеживалась динамически значимая высотная фронтальная зона, а на уровне АТ-300 гПа (9 км) – струйное течение. 3 декабря 2015 г. в южных районах области после выпадения продолжительных осадков, с 26 ноября по 2 декабря, наблюдалась влажная воздушная масса, влияние барических ложбин и слабый ливневой снег. Погодные условия 4 декабря 2015 г. определялись влиянием антициклона, отмечался слабый ливневой снег с ухудшением видимости до 2–4 км, а 5 декабря 2015 г. влиянием теплого сектора циклона.

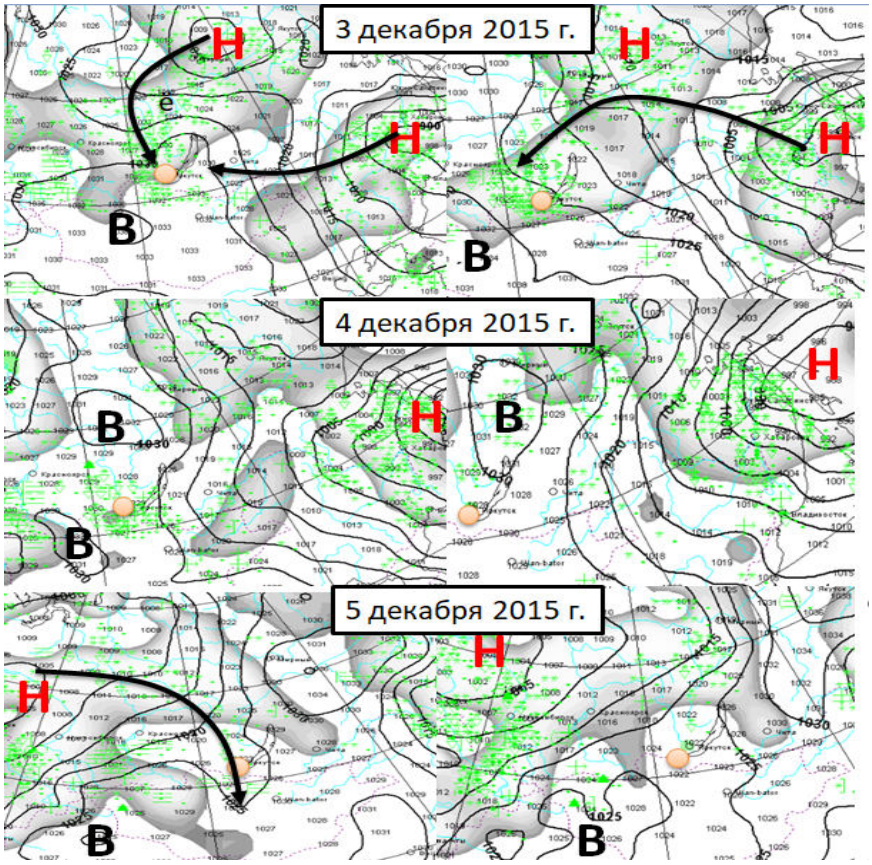


Рис. 2. Приземные синоптические карты в сроки 00 ВСВ (слева) и 12 ВСВ (справа) с 3 по 5 декабря 2015 г. (точкой отмечен г. Иркутск)

На рис. 3 приведены фотографии облачности, сделанные 3 и 5 декабря 2015 г. в Шелеховском районе Иркутской области. Хорошо видна облачность нижнего яруса – плотные слоисто-кучевые облака (Sc op), которые образуются при развитии волновых процессов под слоями инверсии и могут давать осадки в виде слабого снега.

Анализ космических снимков облачности в рассматриваемый период (рис. 4) подтверждает отсутствие фронтальной облачности на юге Иркутской области, на наличие слоисто-кучевой облачности указывает грядовый характер, облачность ориентирована в направлении господствующего ветра восточной четверти.

Следует отметить, что в декабре при незамерзшей поверхности оз. Байкал возможен вынос низкой облачности в южные районы Иркутской области при ветрах восточной четверти. В качестве примера можно привести случаи, отмечавшиеся 26.12.2017 (рис. 5, *а*) при развитии ложбины ныряющего циклона с северо-запада на южные районы Иркутской области (рис. 5, *б*) и 12.01.2017 (рис. 5, *в*), когда вынос облачности с южной оконечности озера происходил вдоль юго-западной периферии антициклона с центрами над Якутией и Магаданом (рис. 5, *г*). Возможно, в описываемом нами случае уплотнению слоисто-кучевой облачности и выпадению слабого ливневого снега в период с 3 по 5 декабря 2015 г. на юге Иркутской области также способствовал дополнительный вынос влаги и низкой облачности с южной оконечности оз. Байкал.

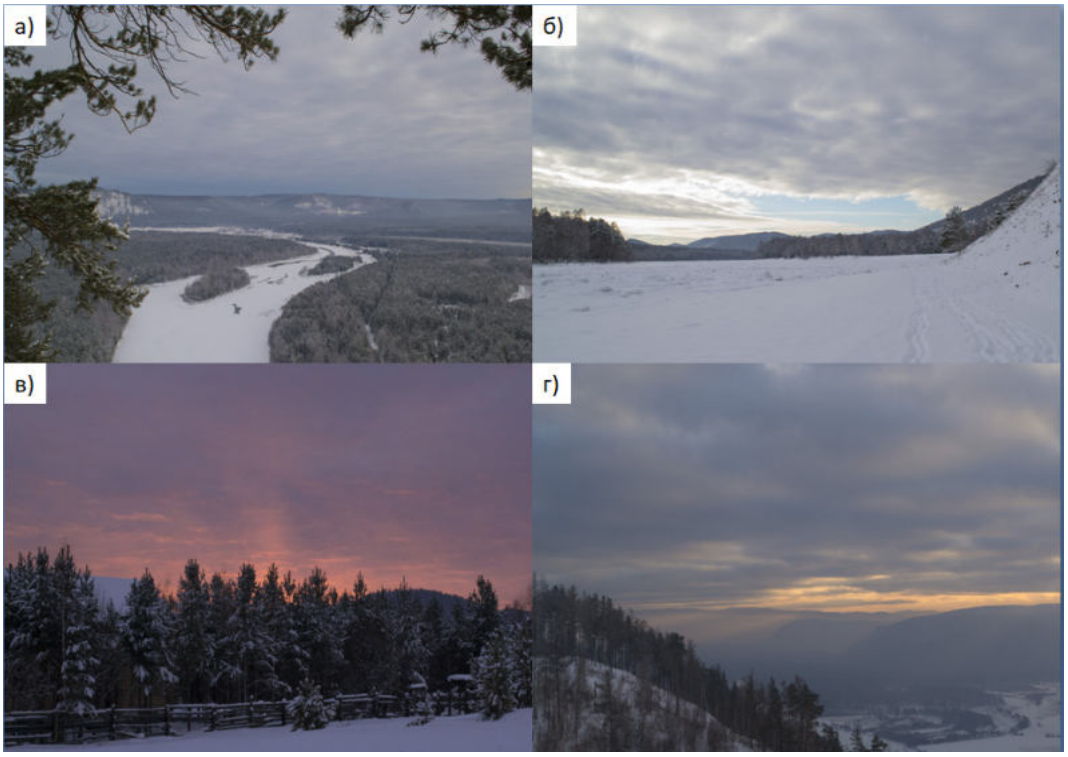


Рис. 3. Вид на восток-юго-восток с Шаманского утеса 03.12.2015 в 13.42 (*а*), вид на запад у подножья Шаманского утеса 03.12.2015 в 14.21 (*б*), вид на юго-запад в Шаманке 03.12.2015 в 16.56 (*в*) и вид на юго-запад в окрестностях пос. Чистые Ключи 05.12.2015 в 16.10 (*г*)

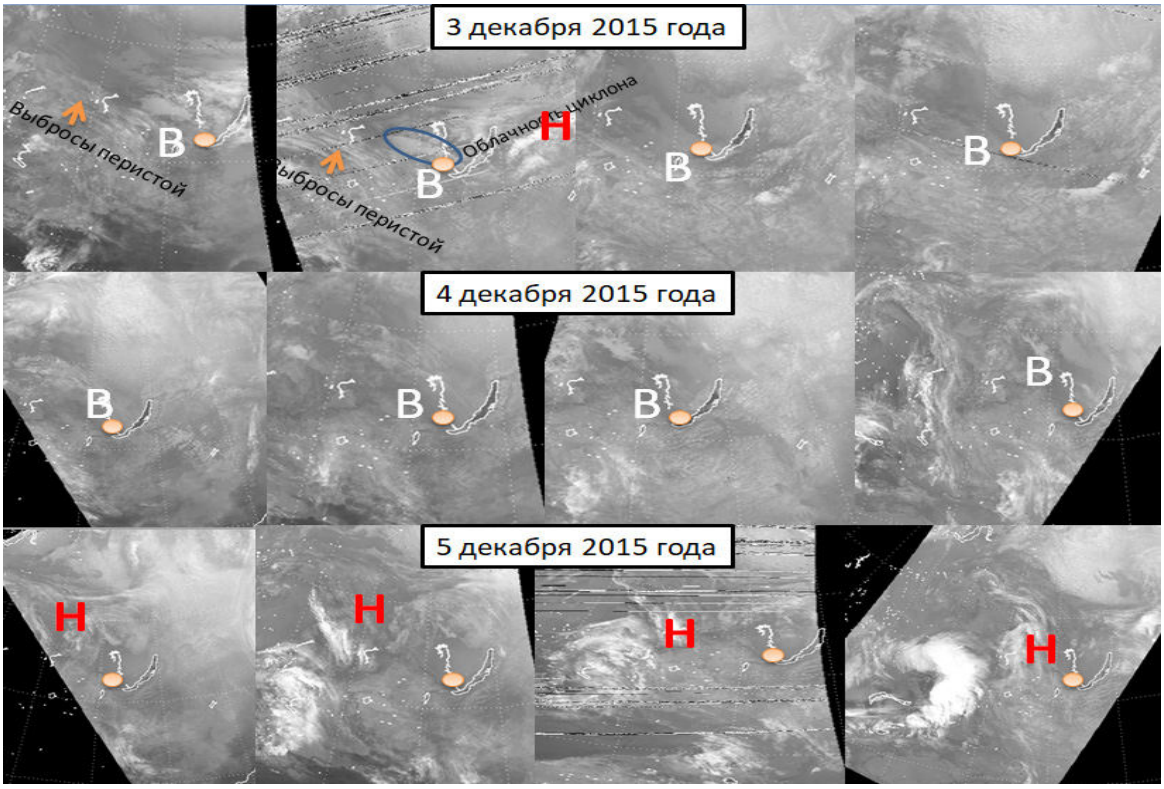


Рис. 4. Космические снимки облачности с 3 по 5 декабря 2015 г. по данным архива ИСЗФ СО РАН (точкой отмечен г. Иркутск)

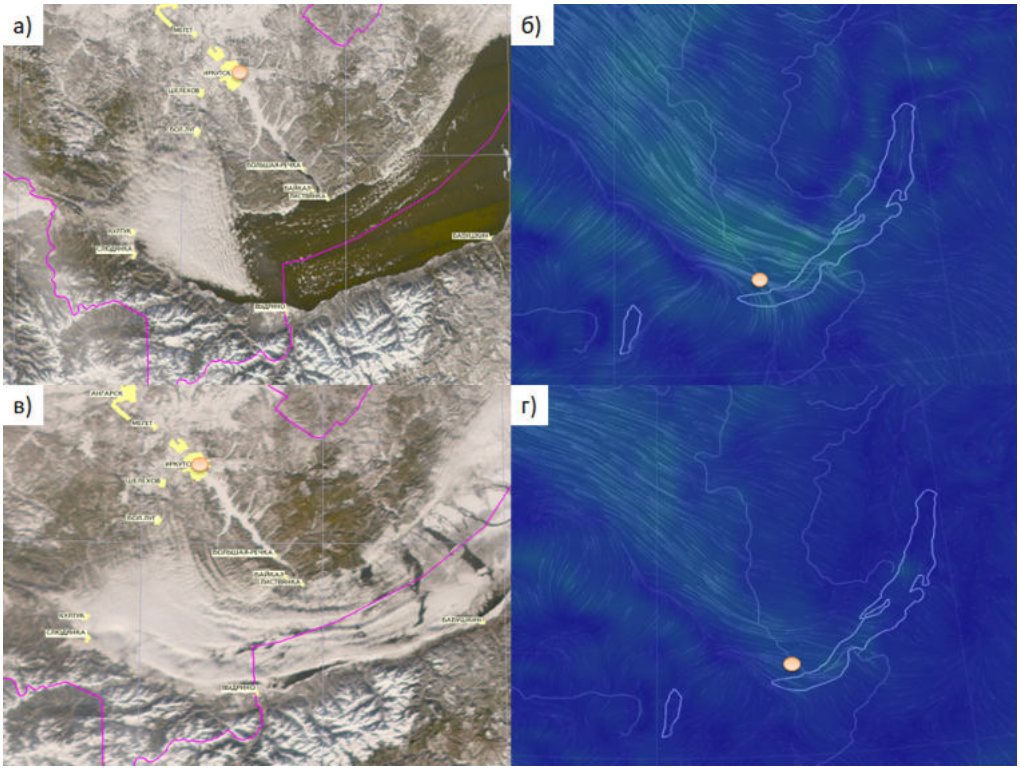


Рис. 5. Данные прибора MODIS спутника Aqua 26.12.2017 (*а*) и 12.01.2017 (*в*) и ветровые потоки в нижней тропосфере по данным модели GFS 26.12.2017 (*в*) и 12.01.2017 (*г*) (точкой отмечен г. Иркутск)

Одной из проблем в распознавании типов облаков является определение слоисто-дождевой облачности (Ns) (рис. 6, *а*), особенно, если при благоприятных условиях в ней формируются вторичные верхние разделы и кучевые облака, которые называют «облаками затопленной конвекции». При наличии таких мезоциркуляционных процессов возрастает интенсивность осадков и при выпадении ливневых осадков наблюдатели вместо слоисто-дождевых часто ставят кучево-дождевые формы облаков. Если проанализировать данные синоптических карт и архивные данные по формам облаков, то преобладающими на территории Иркутской области и других регионов России являются кучево-дождевые облака, даже в зимний период года. Это означает, что имеет место развитие конвективной облачности по вертикали либо при наличии термической или свободной конвекции, которая, как правило, формируется в теплый период года при неустойчивой стратификации в условиях достаточного прогрева подстилающей поверхности над сушей или в холодный период года над более теплой водной поверхностью. Также кучево-дождевая форма облаков характерна для развития вынужденной конвекции при прохождении холодных фронтов II рода, которые в отличие от холодных фронтов I рода, характеризуются большей скоростью смещения и большим углом наклона фронтальной поверхности. Также она отмечается при прохождении окклюдированных циклонов и развитии облачности при наличии динамически значимой высотной фронтальной зоны. В отличие от кучево-дождевой облачности слоисто-дождевая облачность получает развитие при адвекции тепла в зоне теплых фронтов и упорядоченном подъеме теплого воздуха по клину холодного в зоне холодных фронтов I рода.

Современные тенденции изменения циркуляционных и климатических условий на территории Иркутской области характеризуются не только повышением температур, но и увеличением повторяемости меридиональных форм циркуляции [4]. В этой связи возрастает вероятность развития глубокой влажной конвекции (рис. 6, *б*), для возникновения которой необходимо [3; 7]: наличие динамического вынуждения, в результате которого осуществляется подъем воздушных частиц до уровня свободной конвекции; неустойчивость или слабая устойчивость атмосферы; наличие достаточной влажности в приземном слое. При развитии глубокой влажной конвекции нередко возникают суперячейковые или мультиячейковые грозовые облака, которые сопровождаются выпадением сильных ливневых осадков, шквальным усилением ветра, градом. Примером активного развития градовых процессов на фоне повышения температур в Иркутской области можно назвать прошедшее лето 2020 г.

Необходимо отметить, частыми «спутниками» инверсионного распределения температур в Иркутской области, особенно в холодный период года, являются низкие слоистые облака и туманы, которые затрудняют распознавание возможного наличия облаков среднего и верхнего ярусов (рис. 6, *в*). Наряду с тропосферными облаками в северных районах Иркутской области можно наблюдать самые высокие облачные образования в земной атмосфере, которые возникают в мезосфере на высотах 70–95 км – серебристые или полярные мезосферные облака (рис. 6, *г*).

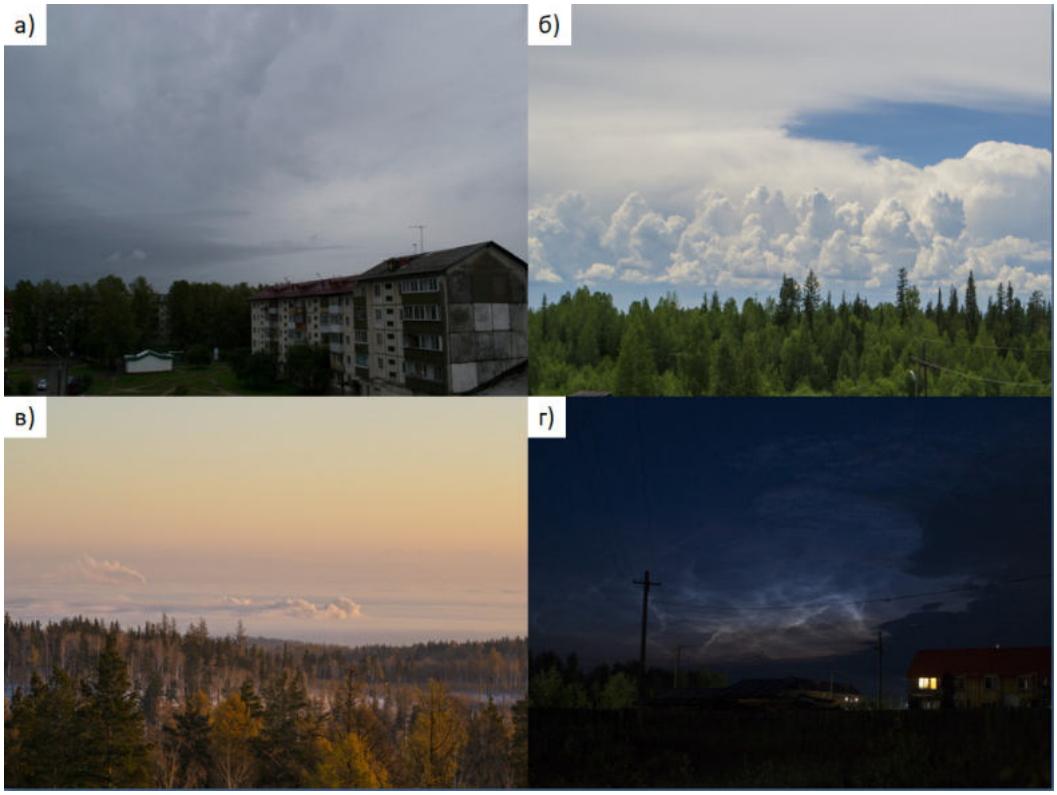


Рис. 6. Слоисто-дождевые облака в г. Шелехов 23.08.2020 в 18.53 (*а*),
кучевые мощные и кучево-дождевые облака к юго-востоку от пос. Кунерма 03.07.2018 (*б*),
слоистые облака и клубы дыма от ТЭЦ 07.11.2016 (*в*), серебристые облака 05.07.2018
в пос. Кунерма (55°с. ш., 108 °в. д.)

Выводы

Таким образом, территория Иркутской области характеризуется резко-расчлененным рельефом, который оказывает влияние на характер крупномасштабных атмосферных процессов и формирование мезомасштабных форм атмосферной циркуляции. Совокупность указанных факторов проявляется в видоизменениях фронтальной облачности на фоне локального и/или тропосферного фронтогенеза и фронтолиза, а также развитии внутримассовых облаков в однородной воздушной массе. В этой связи возникает необходимость в составлении регионального атласа облаков, что, конечно, облегчит работу, особенно, начинающих наблюдателей. Современные тенденции изменений климата проявляются в динамике развития облаков, например, быстром развитии глубокой конвекции. Остается открытым вопрос об определении форм облачности при развитии мезоциркуляционных ячеек в системе слоистообразных облаков.

Второй, не менее важной проблемой на территории Иркутской области, является отсутствие на большинстве метеорологических станций инструментальных измерений высоты нижней границы облаков (ВНГО), что сказывается в точности штормовых сообщений по низкой облачности, когда ее высота фактически составляет 200 м и ниже. Такая информация представляет интерес в первую очередь для прогнозирования условий взлета и посадки воздушных судов при наличии низкой облачности в районах аэродромов и при полетах в горных районах. Решить указанные проблемы частично можно с помощью приборов фото или видеофиксации с периодичностью каждые 1 или 3 ч, данные с которых поступали бы в УГМС в онлайн-режиме по сети Интернет, либо высылались почтой в начале следующего месяца с другими материалами станции, в соответствующий отдел. Также на «сомнительную» форму облаков могут обращать внимание инженеры-синоптики при обосновании прогнозов погоды, где учитывается история развития и характер синоптического процесса во взаимосвязи с наблюдаемыми на станциях формами облаков. Перспективно зондирование нижних слоев атмосферы с помощью коптеров в пределах высоты пограничного слоя, использование наблюдателями в качестве консультативной информации спутниковых данных и синоптических карт, которые оперативно выпускаются Гидрометцентром России и подразделениями Росгидромета.

Список литературы

1. Атлас облаков / Федер. служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет), Гл. геофиз. обсерватория им. А. И. Воейкова; [Д. П. Беспалов [и др.] ; ред. Л. К. Сурыгина]. СПб. : Д’АРТ, 2011. 248 с.

2. *Ватиашвили М. Р.* Состояние полей облачных систем и опасные явления погоды // Науки о Земле. 2019. №1. С. 91–116.

3. *Калинин Е. Д., Юсупов Ю. И.* Метод прогноза зон сильных конвективных осадков в холодный период года // Метеорология и гидрология. 2013. № 4. С. 19–28.

4. *Лощенко К. А., Латышева И. В.* Региональные особенности синоптических процессов на территории Иркутской области // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2016. Т. 11. С. 38–54.

5. *Сутырина Е. Н.* Определение параметров облачности и зон осадков по данным дистанционного спутникового зондирования // Труды Международной Байкальской молодежной научной школы по фундаментальной физике и конференции молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом». Иркутск, 2011. С. 350–352.

6. *Чернокульский А. В., Мохов И. И.* Сравнительный анализ характеристик глобальной и зональной облачности по различным спутниковым и наземным наблюдениям // Исследование Земли из космоса. 2010. №3. С. 12–29.

7. *Holton J. R.* An Introduction to Dynamic Meteorology. 4th ed. Elsevier Academic Press, 2004. P. 290–304.

УДК 551.515.1(571.53)

Исследование вертикальной структуры и горизонтальной динамики тропических и внетропических циклонов по выходным данным прогностической модели GFS

И. В. Латышева (ababab1967@mail.ru)[1], С. В. Латышев (srg.87@bk.ru)[2],
А. А. Уварова (anastasia. shestackova1998@yandex.ru)[1]

[1] Иркутский государственный университет, г. Иркутск
[2] Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск

Аннотация. Статья посвящена изучению характеристик тропических и внетропических циклонов по результатам численной модели GFS. Проанализированы вертикальные профили метеорологических величин над центром циклонов, исследована динамика их развития. Полученные результаты являются новыми и могут быть использованы для уточнения современных представлений о вертикальной структуре барических образований.

Ключевые слова: тропические циклоны, внетропические циклоны, вертикальные градиенты, температура воздуха, скорость ветра, атмосферные осадки.

Введение

Известно, что тропическая зона глобальной системы «океан-атмосфера» играет ключевую роль в динамике и эволюции синоптических и климатических процессов на Земле. При этом система «океан-атмосфера» тропической зоны обладает совершенно уникальным свойством генерации в глобальной циркуляции достаточно организованных и устойчивых мезомасштабных вихревых структур – тропических циклонов [2].

Исследования взаимодействия тропических циклонов с системой «океан–атмосфера» базируются на рассмотрении особенностей крупно- и мезомасштабных атмосферных процессов, начиная с океанической поверхности и тропосферы и закачивая озоносферой и ионосферой [1]. Наряду с вертикальной структурой большое внимание в оценке циклонической активности имеют сведения о траекториях смещения тропических циклонов, районах генезиса и затухания барических образований, продолжительности жизни циклонов и опасных явлениях погоды на разных стадиях их развития [3; 6].

Внетропические циклоны также представляют интерес с научной и практической точки зрения. Они играют важную роль в переносах тепла и влаги в средних широтах, являясь существенным компонентом циркуляции атмосферы. Необходимо отметить, что в последние годы возросло число случаев выхода глубоких циклонов из Северной Атлантики на Европу, что приводит к большому ущербу и человеческим жертвам [4].

Современные тенденции изменений климата проявляются в повышении тепло- и влагосодержания в океане и приземном слое атмосферы, что увеличивает вероятность возникновения тропических циклонов, которые являются наиболее разрушительными как по масштабу охвата территории, так и причиненному ущербу. Данные реанализов, спутниковый мониторинг и визуализация

результатов численного моделирования атмосферы и океана расширяют возможности в исследованиях процессов внетропического и тропического циклогенеза [5]. Представляет интерес сопоставление выходных данных численных моделей с наблюденными данными, а также сравнительная оценка вертикальной структуры и динамики тропических и внетропических циклонов.

Методы исследований

Основная задача исследования сводилась к сравнительному анализу горизонтальной и вертикальной динамики внетропических и тропических циклонов (на примере 2018–2019 гг.) по выходным данным прогностической модели GFS [7]. Рассматривались внетропические атлантические циклоны, которые достигли территории Иркутской области и отмечались в периоды: 02–09.01.2019, 10–13.01.2019, 14–17.02.2019, 13–18.05.2019, 29.06–04.07.2019 и 04–10.08.2019, тропические циклоны: Хагибис (Hagibis), Дориан (Dorian), Лекима (Lekima), Барбара (Barbara), Трами (Trami), Мангкнут (Mangkhut), Соулик (Soulik). Путем последовательного соединения центров циклонов от срока к сроку были построены траектории смещения центров циклонов и сопоставлены с данными спутникового мониторинга [8] (рис. 1).

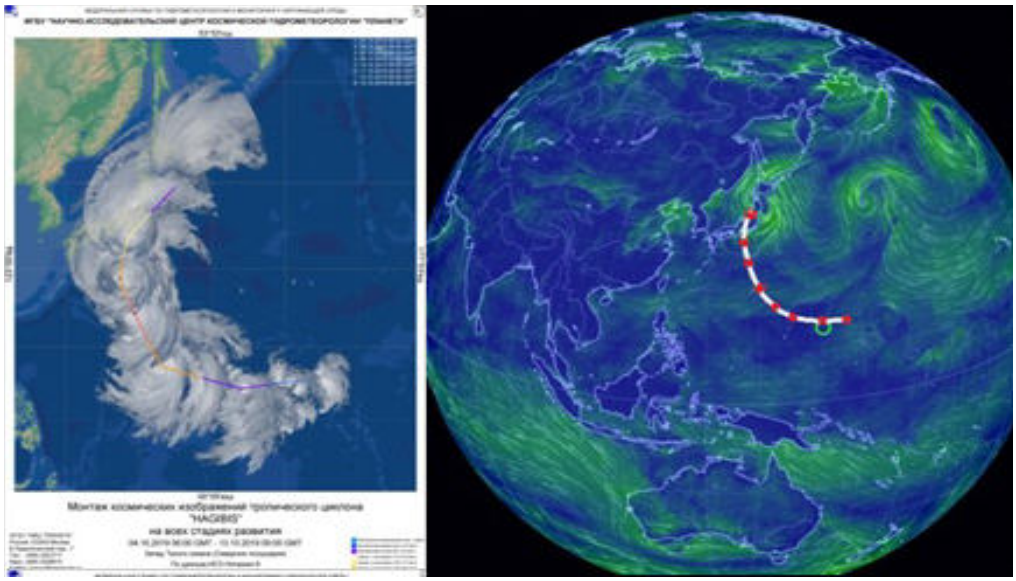


Рис. 1. Траектория смещения тропического циклона Хагибис в 2019 г. по спутниковым данным и по выходным данным модели GFS

Для исследования динамики циклонов проанализировано распределение минимального давления в центре циклонов (глубина циклонов), максимальных значений интенсивности атмосферных осадков и скорости ветра над центром тропического и внетропического циклона в течение его жизненного цикла (рис. 2).

Получены вертикальные профили температуры воздуха, скорости и направления ветра над центром циклонов на уровне стандартных изобарических поверхностей (до уровня 10 гПа – 26 км) (рис. 3). Рассчитаны вертикальные градиенты температуры воздуха и скорости ветра в период прохождения циклонами разных стадий развития.

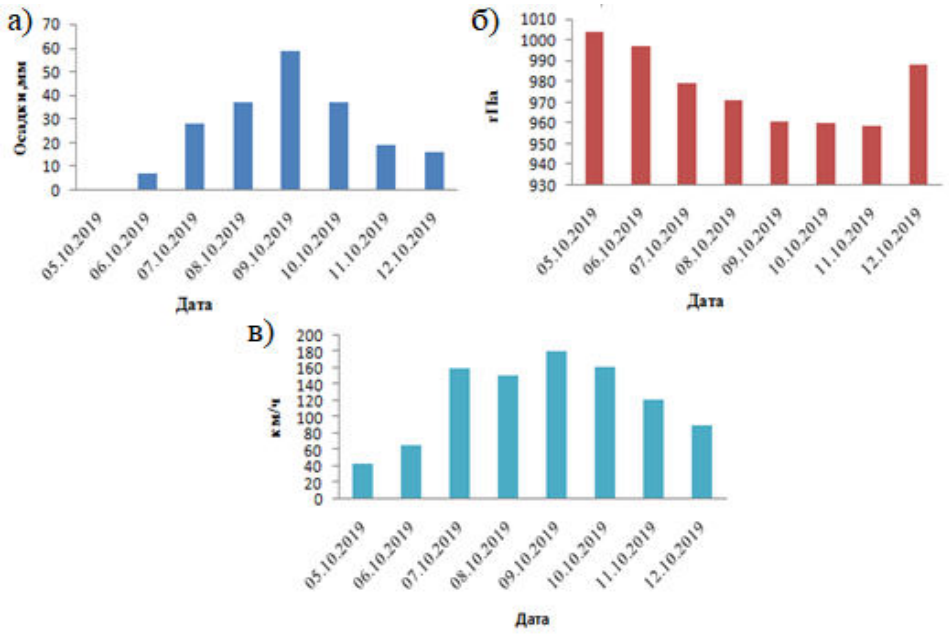


Рис. 2. Характеристики тропического циклона Хагибис:
(а) максимальная интенсивность осадков (мм/3 ч), (б) глубина циклона (гПа) и (в) максимальная скорость ветра (км/ч) по выходным данным модели GFS

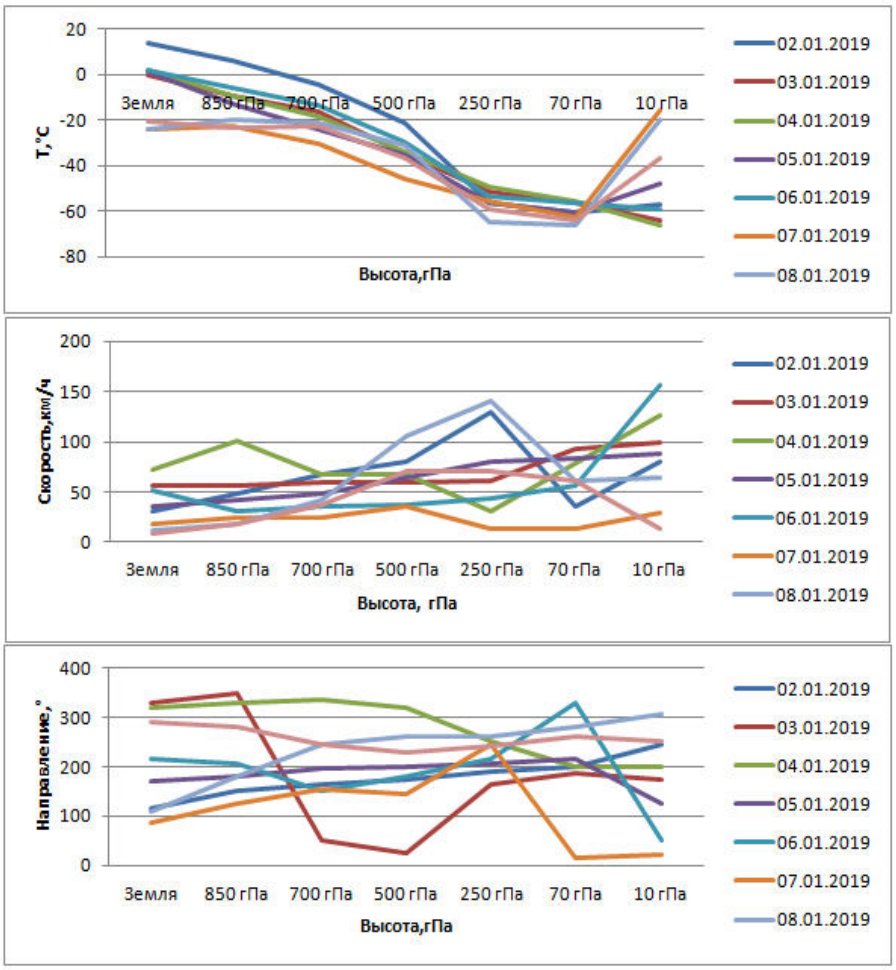


Рис. 3. Изменение с высотой над центром внетропического циклона 02–09.01.2019 температуры воздуха, скорости и направления ветра по выходным данным модели GFS

Результаты исследований

Наглядно различия характеристик тропических и внетропических циклонов характеризуют вариации метеорологических величин, которые рассчитывались как разности между максимальным и минимальным значениями в течение жизненного цикла циклона. Установлено, что в исследуемый период глубина тропических циклонов изменялась от 7 до 45 гПа, внетропических – от 4 до 37 гПа. Максимальные скорости ветра над центром тропического циклона от 32 до 137 км/ч и от 22 до 82 км/ч – для внетропического циклона. Соответственно интенсивность атмосферных осадков от 42 до 77 мм/ч и от 0,9 до 4,3 мм/3 ч (табл. 1 и 2).

Таблица 1

Характеристики тропических циклонов сезона ураганов 2018–2019 гг.
по выходным данным модели GFS

Циклон	Hagibis	Dorian	Lekima	Barbara	Trami	Mangkhut	Soulik
Изменение давления, гПа	45	29	20	10	34	31	7
Разность осадков, мм/3 ч	58,3	51,4	60,9	45,7	42,9	77,5	59,6
Изменение скорости, км/ч	137	88	83	32	70	85	106

Таблица 2

Характеристики внетропических циклонов в 2019 г.
по выходным данным модели GFS

Даты смещения	02.01–09.01	10. 01–13.01	14.02–17.02	13.05–18.05	29.06–04.07	04.08–10.08
Изменение давления, гПа	17	37	20	10	8	4
Разность осадков, мм/3 ч	4,3	2,2	1,4	3,2	2,9	0,9
Изменение скорости, км/ч	82	22	40	59	36	54

Выявлено хорошее сопоставление построенных по модели GFS траекторий смещения тропических циклонов с фактическими траекториями, полученными по данным космического мониторинга, что указывает на высокую достоверность результатов модели и возможность использования для исследования характеристик тропических циклонов, как в научных, так и учебных целях.

Установлено хорошее согласование глубины тропических циклонов с увеличением скорости ветра, увеличение интенсивности атмосферных осадков с изменениями запасов потенциальной энергии конвективной неустойчивости и усилением меридиональных южных потоков на разных уровнях тропосферы. Исследование динамики внетропических циклонов на примере 2019 г. показало, что максимальные значения скорости ветра и интенсивности атмосферных осадков отмечаются в период максимального развития циклонов.

Максимальные значения скорости ветра над центром тропических циклонов наблюдались на уровне 850 гПа (нижняя тропосфера), с высотой они убывали, до высоты поверхности 500 гПа незначительно, выше этого уровня они уменьшались быстрее, и на уровне 250 гПа скорость ветра примерно в два раза меньше, чем на уровне 500 гПа. Наибольшие скорости ветра над центром внетропического циклона отмечались вблизи тропопаузы и на уровне 500 гПа.

Анализ вертикальных градиентов температуры воздуха над центром тропических (рис. 4) и внетропических циклонов (рис. 5) показал следующее. Во всех слоях тропосферы состояние атмосферы у тропических циклонов оценивается как неустойчивое. Наибольшие значения вертикального градиента температуры воздуха отмечаются в средней тропосфере (700–500 гПа), т. е. в слое активного облакообразования (3–5 км), далее следует отметить слой 500–250 гПа (до уровня тропопаузы). По мере развития тропического циклона в нижней тропосфере неустойчивость ослабевает, хотя в циклоне Хагибис она возросла в последний день жизненного цикла. В целом, чем продолжительнее жизненный цикл тропического циклона, тем ближе по значениям вертикальные градиенты к влажнонеустойчивому. Возможно, малый жизненный цикл тропических циклонов Лекима и Барбара можно объяснить сравнительно низкими значениями параметра неустойчивости на начальной стадии развития циклонов.

Обращает внимание, что для внетропических циклонов в холодный период года вертикальные градиенты температуры воздуха были больше, чем в теплый период (рис. 5). По мере заполнения циклонов вертикальные градиенты температуры воздуха уменьшаются, за исключением циклона, который отмечался в августе 2019 г., в тропосфере имело место повышение градиентов температур. Максимальные значения вертикальных градиентов температур отмечаются, как и для тропических циклонов, в слоях 700–500 гПа и 500–250 гПа (слои активного облакообразования).

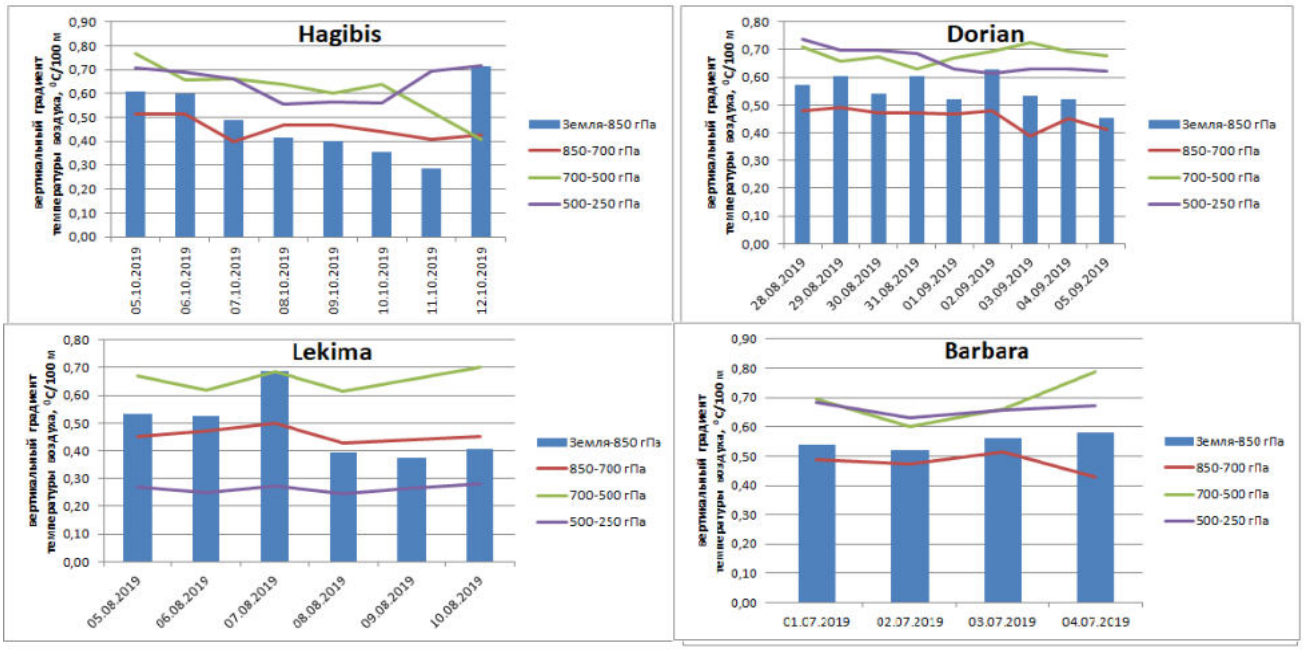


Рис. 4. Изменения вертикальных градиентов температуры воздуха тропических циклонов по выходным данным модели GFS

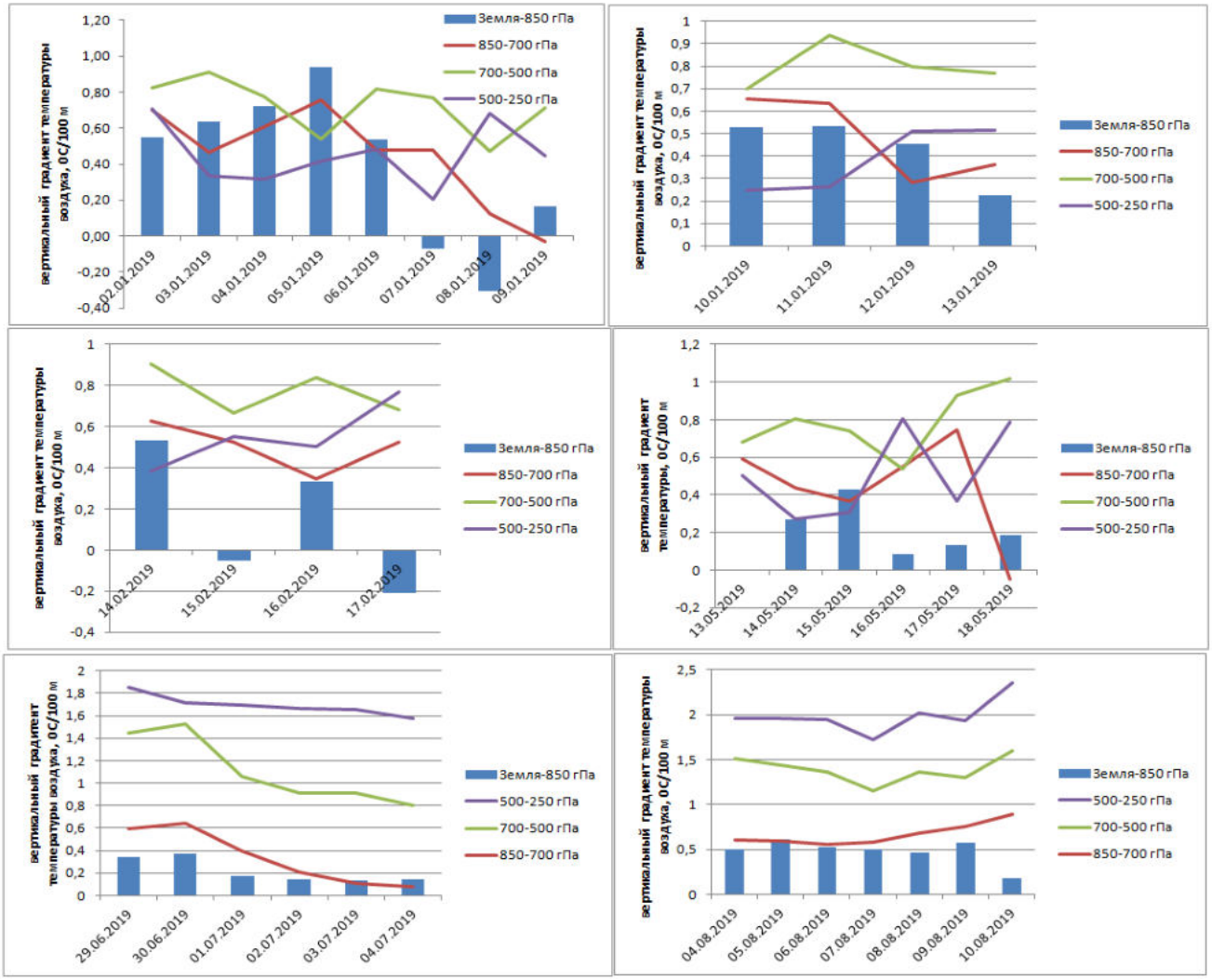


Рис. 5. Изменения вертикальных градиентов температуры воздуха внетропических циклонов по выходным данным модели GFS

В изменениях вертикальных градиентов скорости ветра установлено увеличение градиентов в нижней тропосфере и их ослабление в вышележащих слоях тропосферы (рис. 6). Возможно, ослабление градиентов скорости ветра с высотой поддерживает развитие упорядоченной конвекции. В случае если бы градиенты скорости ветра с высотой возрастали, то это способствовало бы более быстрому вовлечению в облачный слой окружающего воздуха, сглаживанию разности температур с окружающей средой, размыванию облачности, а, значит, и уменьшению количественных значений скрытой теплоты конденсации в самом облаке.

В изменениях вертикальных градиентов скорости ветра внетропических циклонов наибольшие значения в нижней тропосфере в четырех циклонах из шести рассмотренных отмечались в период, соответствующий максимальной скорости ветра у поверхности Земли. Наибольшие значения вертикальных градиентов скорости отмечались в основном в слое Земля-850 гПа. Интересно, что по мере заполнения циклона вертикальные могут как увеличиваться, так и уменьшаться (рис. 7).

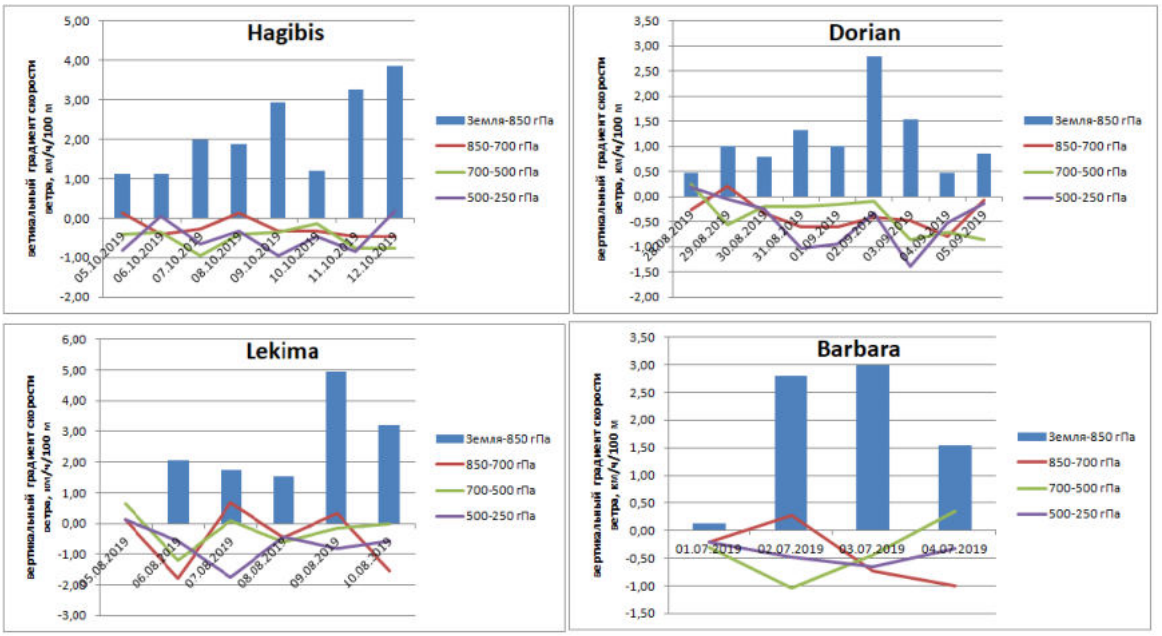


Рис. 6. Изменения вертикальных градиентов скорости ветра тропических циклонов по выходным данным модели GFS

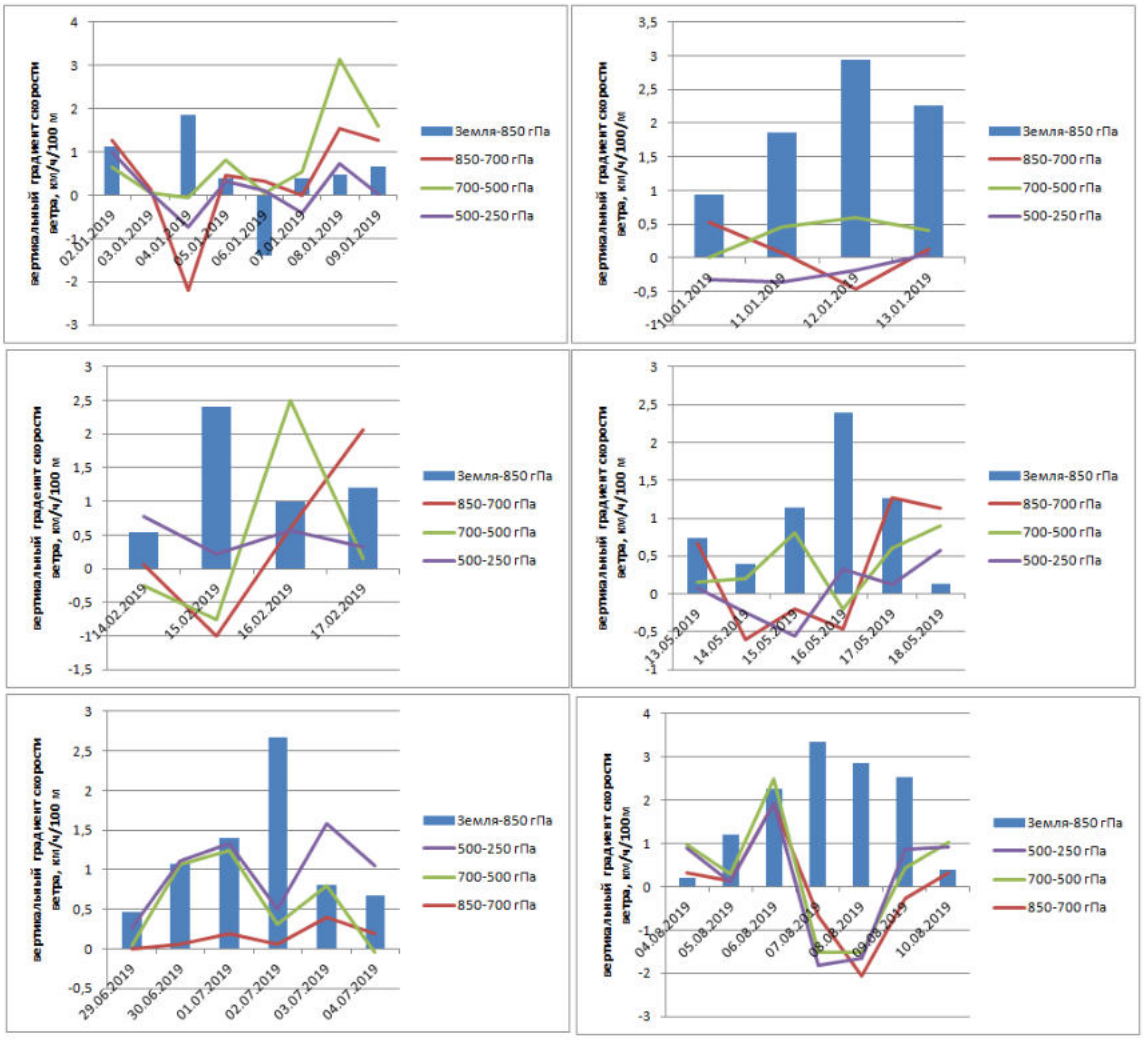


Рис. 6. Изменения вертикальных градиентов скорости ветра внетропических циклонов по выходным данным модели GFS

Выводы

В работе выполнено исследование характеристик тропических и внетропических циклонов на примере 2018 и 2019 гг. по данным модели GFS.

В период жизненного цикла циклонов вариации давления над центром тропических и внетропических циклонов были примерно одинаковыми, скорости ветра соответственно варьировали до значений (137 км/ч и 82 км/ч), но наиболее различалась интенсивность атмосферных осадков (42–77 мм/3 ч и 0,9–4,3 мм/3 ч).

Как в тропических, так и во внетропических циклонах, максимальные значения скорости ветра у поверхности Земли и интенсивности атмосферных осадков отмечаются в период максимального развития циклонов, а также при усилении меридиональных южных потоков на разных уровнях тропосферы.

Для тропических и внетропических циклонов максимальные значения вертикальных градиентов температур выявлены в слое активного облакообразования (700–250 гПа). Можно предположить, что на изменение глубины циклонов существенное влияние оказывают вариации температуры воздуха в средних и верхних слоях тропосферы.

Максимальные значения скорости ветра наблюдались в тропических циклонах на уровне 850 гПа (нижняя тропосфера), во внетропических вблизи тропопаузы и в средней тропосфере (500 гПа). Уровень нулевой изотермы в тропических циклонах был расположен вблизи высоты 500 гПа поверхности, внетропических в слое 700–500 гПа.

Список литературы

1. Проект «Геликс»: космический мониторинг системы океан-тропосфера-верхняя атмосфера в условиях крупномасштабного кризисного состояния / В. М. Балебанов, С. С. Моисеев, Е. А. Шарков, Е. А. Лупян, А. И. Калмыков, А. И. Забышный, А. К. Кузьмин, Н. К. Смирнов, В. Н. Цимбал, К. Н. Чиков // Исследования Земли из космоса. 1997. № 5. С. 823–835.

2. *Ванина-Дарт Л. Б., Шарков Е. А.* Основные результаты современных исследований физических механизмов взаимодействия тропических циклонов и ионосферы // Исследования Земли из космоса. 2016. № 3. С. 75.

3. *Мезенцева Л. И., Гришина М. А., Кондратьев И. И.* Траектория и глубина циклонов, выходящих на территорию Приморского края // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. 2019. № 4 (206). С. 29–38.

4. *Нестеров Е. С.* Экстремальные циклоны в атлантико-европейском регионе. М. : Гидрометцентр России, 2018. 104 с.

5. *Ростовцева В. В., Гончаренко И. В.* Оценка влияния тепловой стратификации тропосферы на активность тропического циклогенеза по данным спутниковой микроволновой радиометрии // Исследование Земли из космоса. 2014. № 2. С. 3.

6. Hoskins B. J., Hodges K. I. New perspectives on the northern hemisphere winter storm tracks // J. Atmos. Sci., 2002. Vol. 15. P. 1041–1061.

7. Глобальная карта ветров. URL: https://earth.nullschool.net/ru/ (дата обращения: 08.05.2020).

8. Мониторинг тропических циклонов по данным геостационарных ИСЗ. URL: https://planet.iitp.ru/Oper_pr/Meteo_Cyclone.html (дата обращения: 06.04.2020).

УДК 551.5

Оценка климатической уязвимости оз. Байкал в современный период

И. В. Латышева (ababab1967@mail.ru)[1], К. В. Савватеева (savvateeva.kseni@mail.ru)[2]

[1] Иркутский государственный университет, г. Иркутск
[2] Иркутское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, г. Иркутск

Аннотация. Выполнена оценка климатической уязвимости западного побережья и центральной части оз. Байкал и типизация синоптических процессов для случаев с максимальными и минимальными значениями индекса в различные календарные сезоны года. Исходным материалом для выполненного исследования послужили данные средних, минимальных и максимальных значений температуры воздуха, сумм атмосферных осадков и скорости ветра за 1997–2017 гг. Для синоптической типизации использованы кольцевые карты погоды и карты барической топографии, выполнен фронтальный анализ с учетом характеристик приземных атмосферных фронтов и высотных фронтальных зон.

Ключевые слова: оз. Байкал, климатическая уязвимость, атмосферные фронты, циклон, антициклон, высотная фронтальная зона.

Введение

Отрицательные последствия изменений климата на территории России проявляются в наблюдаемой тенденции повышения повторяемости опасных гидрометеорологических явлений (паводки, наводнения, снежные лавины, сели, ураганы и др.) и увеличения неблагоприятных и резких изменений погоды, которые в свою очередь приводят к огромному социально-экономическому ущербу. Если в начале 1990-х гг. в России ежегодно отмечалось 150–200 опасных явлений в год, то в последние несколько лет их число выросло до 250–300. По оценке Всемирного банка, ежегодный ущерб от воздействия опасных гидрометеорологических явлений на территории России составляет 30–60 млрд руб. [4].

Изучение современных особенностей климата представляет актуальность для сохранения уникальной территории оз. Байкал и имеет практическую значимость для дальнейшего развития рекреационной деятельности и туризма на Байкале [1]. В районе расположения байкальской котловины погодные условия складываются в результате проявления континентального климата и региональных особенностей общей циркуляции атмосферы над Восточной Сибирью, с одной стороны, и мезомасштабных особенностей циркуляции в котловине озера, с другой. Важнейшей климатообразующей составляющей байкальской котловины является резко выраженное различие между тепловым балансом водной массы озера с ее большой теплоемкостью и окружающих озеро горных склонов, быстро нагревающихся летом и охлаждающихся зимой [6].

Большое значение в формировании ветрового режима побережья и котловины озера Байкал играет сильная вытянутость котловины с юго-запада на северо-восток. Однако синоптические условия остаются первопричиной сильных ветров и опасных явлений погоды над Байкалом в холодное и в теплое время

года [5]. Рельеф земной поверхности может усиливать или уменьшать интенсивность атмосферных процессов, обострять или сглаживать термические и барические контрасты между озером и сушей. Все вышесказанное определяет большое разнообразие микроклиматических особенностей побережья оз. Байкал и необходимость их исследований в условиях меняющегося климата.

Методы исследований

Методика исследования климатической уязвимости была введена В. В. Оганесяном для долгосрочного планирования мер адаптации к изменениям климата [2]. Эффективные меры по предотвращению и сокращению ущерба от экстремальных погодных явлений зачастую требуют существенно большей заблаговременности, нежели индивидуальные оперативные прогнозы погоды, ограниченные теоретическим пределом предсказуемости. Для принятия действенных упреждающих мер адаптации требуются долгосрочные планы действий, основанные на научно обоснованных перспективных оценках изменений климата, включая оценки изменения климатической уязвимости территории.

Климатическая уязвимость характеризуется той степенью, в которой изменение климата может нанести ущерб отдельному потребителю, определенному сектору или всей экономике в целом. Подобные оценки могут быть проведены с помощью различных климатических индексов и их производных [3].

Объектом исследования выбрано западное побережье и центральная часть оз. Байкал, где в формировании синоптических и климатических особенностей существенно сказывается влияние подветренных склонов Приморского и Байкальского хребтов при господствующих ветрах северо-западного и западного направлений.

В работе для оценки климатической уязвимости западного побережья озера Байкал учитывалось совместное воздействие максимальных и минимальных температур, максимальных сумм атмосферных осадков и максимальных значений скорости ветра. Оценивался процентный вклад нормированных значений на средние значения экстремальных метеорологических параметров:

$$V_i = \left(\frac{|T\min| + |Tmax|}{|T\,min_{\text{ср}}| + |Tmax_{\text{ср}}|} + \frac{Pmax}{Pmax_{\text{ср}}} + \frac{Vmax}{Vmax_{\text{ср}}} \right) * 100\ \% \quad (1)$$

В качестве исходных данных использованы средние суточные значения метеорологических величин байкальских станций: Байкальск, Исток Ангары, Большое Голоустное, Сарма, Хужир, Узур, Большой Ушканий Остров, Солнечная. Данные предоставлены ФГБУ «Иркутское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» за период 1997–2017 гг.

Результаты исследований

Средние значения индексов климатической уязвимости в рассматриваемый период изменялись от 299 % на станции Узур в средней части озера Байкал до 393 % на станции Большое Голоустное, что на юго-западной оконечности озера. Наибольшая изменчивость данного показателя выявлена на станции Большое Голоустное (160 %), а наименьшая в Байкальске (14 %).

В годовом распределении на метеорологических станциях Солнечная, Узур и Большой Ушканий остров неблагоприятное воздействие метеорологических факторов наиболее выражено зимой, весной и осенью, в основном за счет перепадов температур и сильного ветра, а наименее выражено летом (рис. 1). На станциях Хужир и Байкальск климатическая изменчивость максимально проявляется в зимние месяцы, а на станциях Сарма и Исток Ангары годовой ход индекса климатической уязвимости практически не выражен. На станции Большое Голоустное максимальные значения индекса климатической уязвимости отмечаются в основном в теплый период года за счет вклада атмосферных осадков и экстремальных температур.

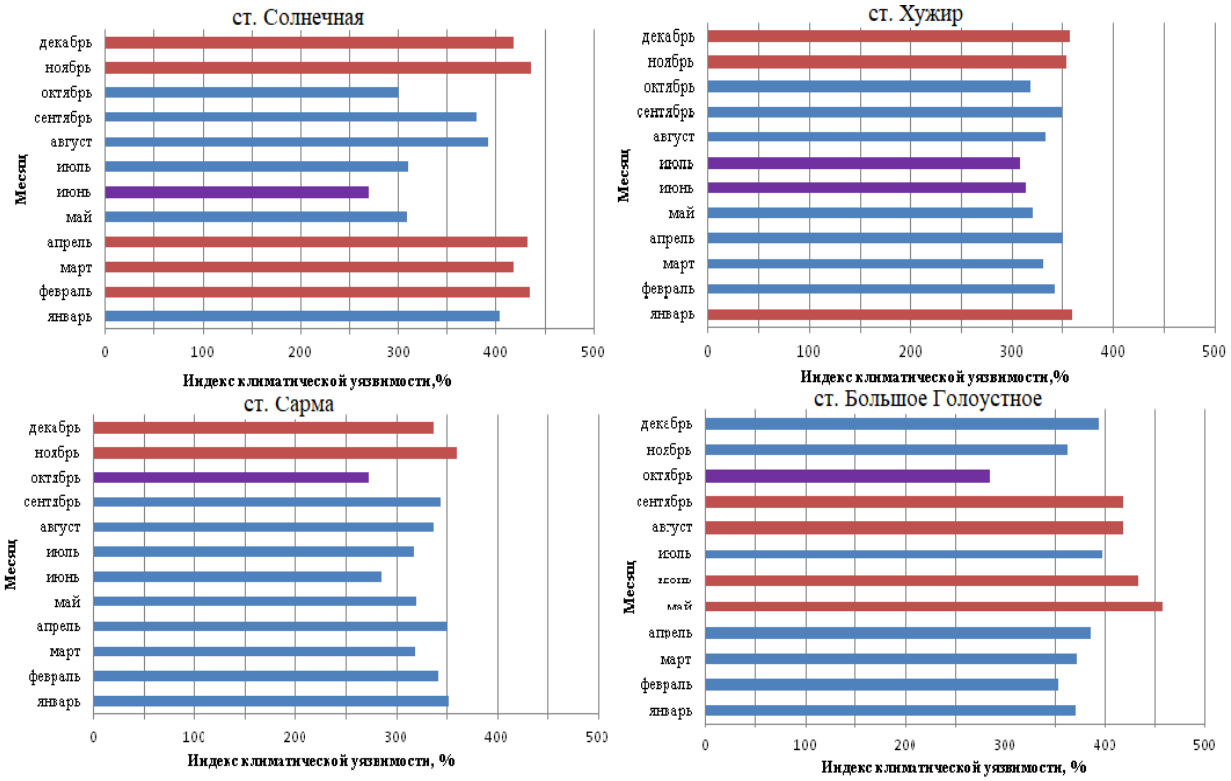


Рис. 1. Средние месячные значения индекса климатической уязвимости в 1997–2017 гг. на байкальских станциях

Для типизации синоптических процессов были выбраны месяцы с наиболее контрастными погодными условиями на исследуемой территории: для зимы – январь, для весны – апрель, для лета – июль, для осени – октябрь. Было проанализировано 3500 синоптических карт. Первоначально определялся тип погоды (циклональный или антициклональный), с подразделением в дальнейшем по типу атмосферных фронтов и наличию высотно-фронтальных зон на высоте АТ-500 гПа (5 км).

В январе при максимальных значениях индекса климатической уязвимости на байкальских станциях преобладал циклональный тип погоды как на высоте 5 км, так и у поверхности Земли (табл.), с частой сменой холодных и теплых атмосферных фронтов и высокой повторяемостью высотно-фронтальных зон или зон повышенных горизонтальных градиентов температуры и давления (рис. 1, 2).

Таблица

Повторяемость (%) синоптических условий в январе 2010 г. при максимальных значениях индекса климатической уязвимости (на примере ст. И. Ангары и Б. Голоустное)

Кольцевая карта погоды (приземная)					
Циклональный тип		Антициклональный тип		Из общего числа случаев по типам фронтов	
Ложбина	Циклон	Гребень	Антициклон	Теплый фронт	Холодный фронт
16	3	12	0	6	7
АТ-500 гПа (5 км)					
Циклональный тип		Антициклональный тип		ВФЗ	МБП
Ложбина	Циклон	Гребень	Антициклон		
18	3	10	0	10	21

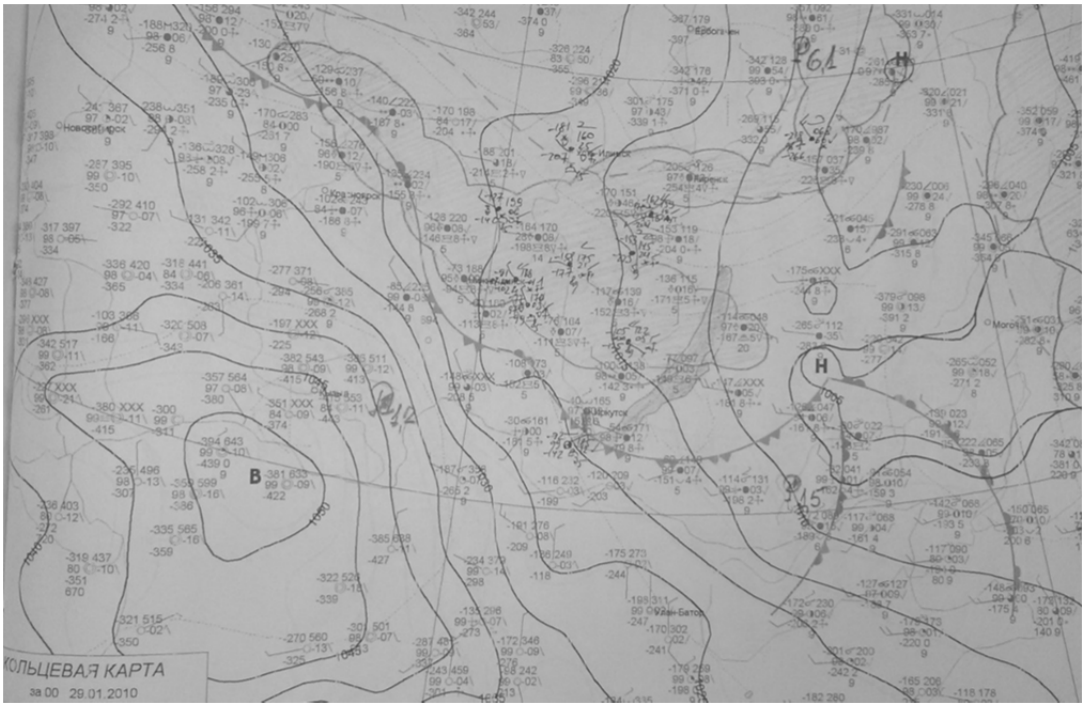


Рис. 1. Кольцевая карта погоды за 29.01.2010 (срок 00 ВСВ)

Атмосферные фронты в зимние месяцы нередко обостряются над озером за счет повышенных контрастов температур «вода – суша» (так как большая часть озера в этом время еще остается свободной ото льда). Повышенные термические и барические контрасты приводят к усилению ветра до штормовых значений и увеличению количества выпадающих осадков. Поэтому индекс климатической уязвимости повышается в зимний период и существенно зависит от влияния орографии и времени наступления ледостава.

Синоптические процессы, влияющие на погодные условия оз. Байкал весной, характеризуются увеличением повторяемости и скорости смещения атмосферных фронтов (рис. 3), а также частым влиянием динамически значимых высотных фронтальных зон (рис. 4). Однако если холодные фронты определяют повышенные значения индекса климатической уязвимости, особенно в средней части озера, то с прохождением теплых атмосферных фронтов в условиях фронтолиза его значения могут оставаться минимальными.

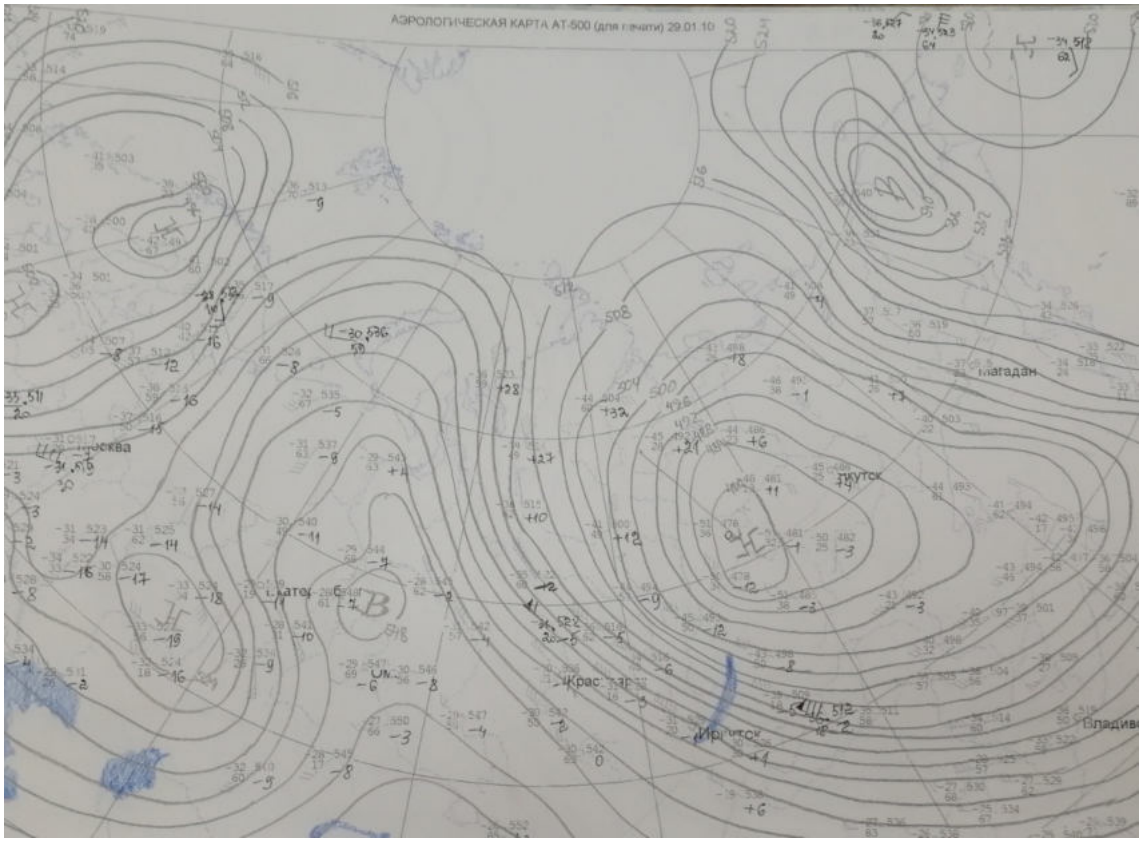


Рис. 2. Карта АТ-500 гПа за 29.01.2010 (срок 00 ВСВ)



Рис. 3. Кольцевая карта погоды за 27.04.2005 (срок 00 ВСВ)

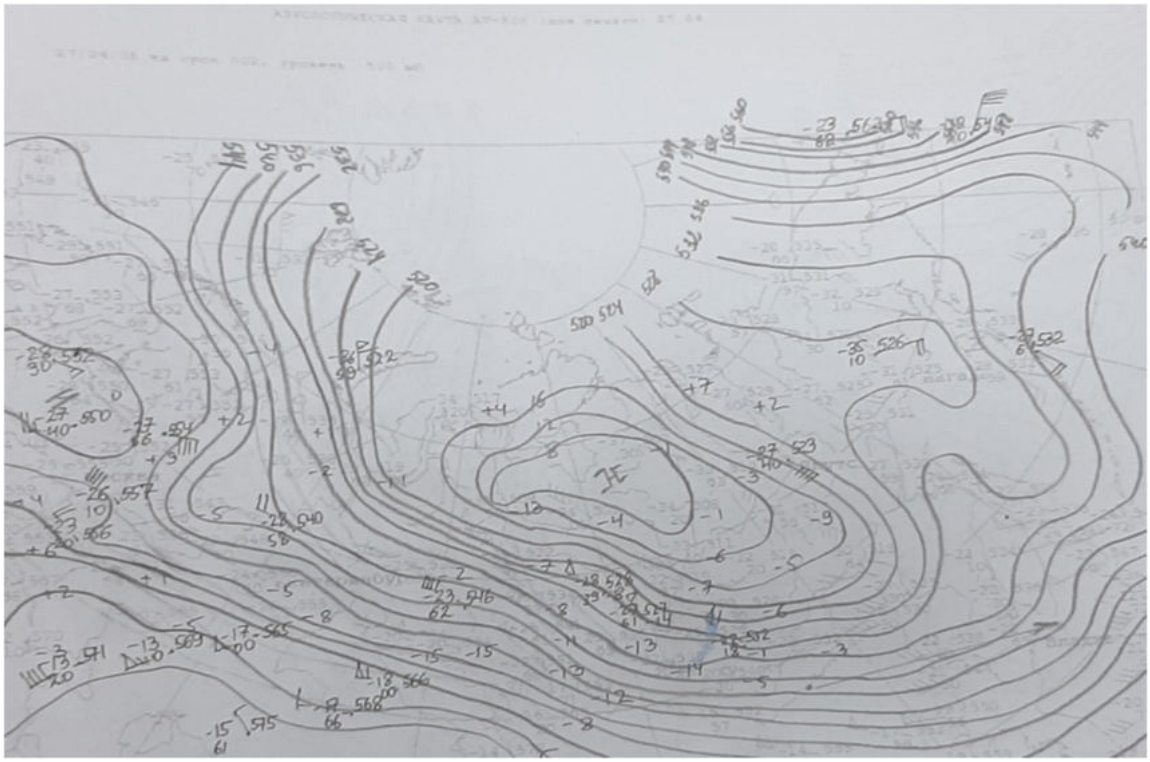


Рис. 4. Карта АТ-500 гПа за 27.04.2005 (срок 00 ВСВ)

Вторая половина лета на побережье озера Байкал обычно более комфортна по погодным условиям [5]. В этот период сглаживаются температурные контрасты «вода-суша», ветры усиливается в основном при образовании гроз и кучево-дождевой облачностью, кроме того, усиление ветра носит обычно кратковременный характер. Средние значения индекса климатической уязвимости в июле составляют 1,5–2,0, что ниже по сравнению с январем и апрелем (2,5–3,0). Индекс климатической изменчивости в июле может повышаться за счет сильных и очень сильных или продолжительных сильных дождей (рис. 5) при углублении циклонов и наличии блокирующего процесса на востоке (рис. 6), шквалистого ветра или сильной жары.

Осенний период для озера Байкал – это период частых штормовых ветров, преимущественно западного и северо-западного направлений. Осадки носят смешанный характер, дождь переходит в мокрый снег и снег, ухудшаются условия для навигации. После прохождения холодных фронтов и вторжения арктических воздушных масс на фоне высоко давления (рис. 7, 8) нередко образуется так называемое парение моря, которое также негативно влияет на условия судоходства.

Выводы

Побережье оз. Байкал за счет орографических особенностей и наличия большой водной массы отличается значительным изменением суточных и годовых амплитуд температуры воздуха, неравномерным выпадением атмосферных осадков, частым усилением ветра, особенно в осенне-зимний и весенний период.

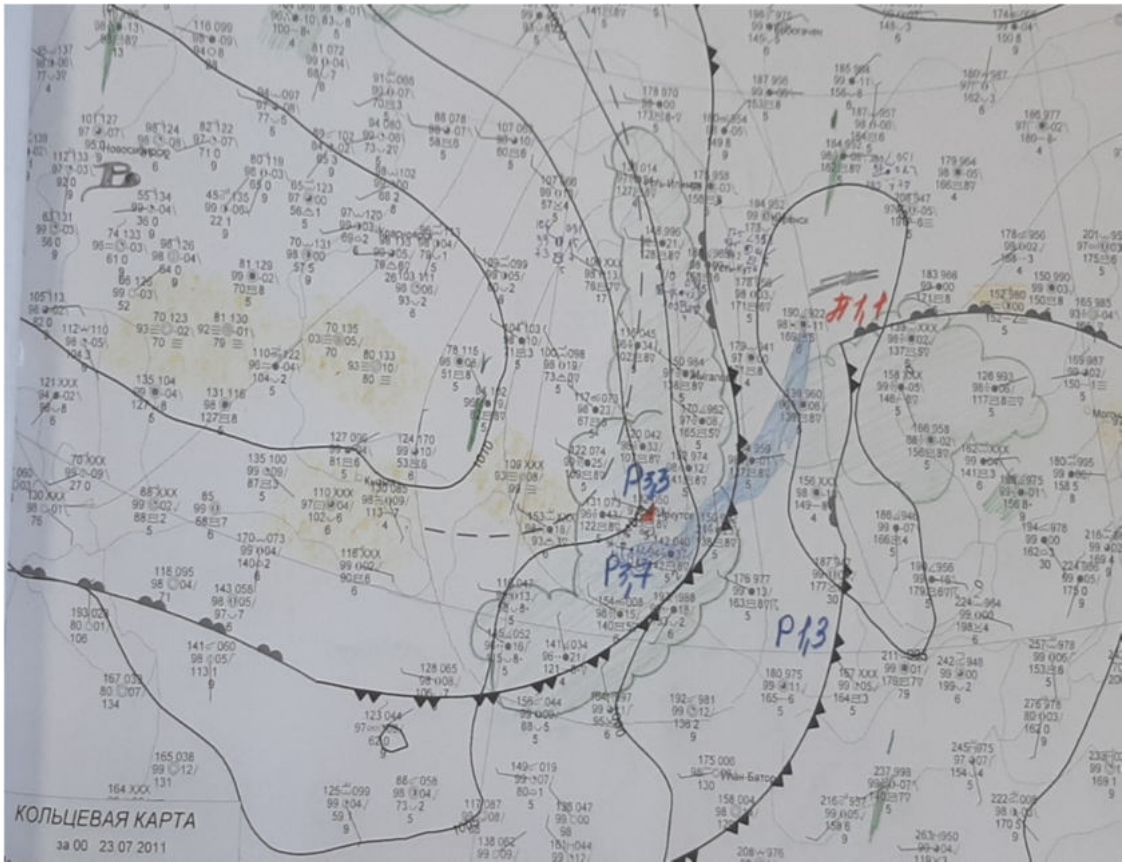


Рис. 5. Кольцевая карта погоды за 23.07.2011 г. (срок 00 ВСВ)

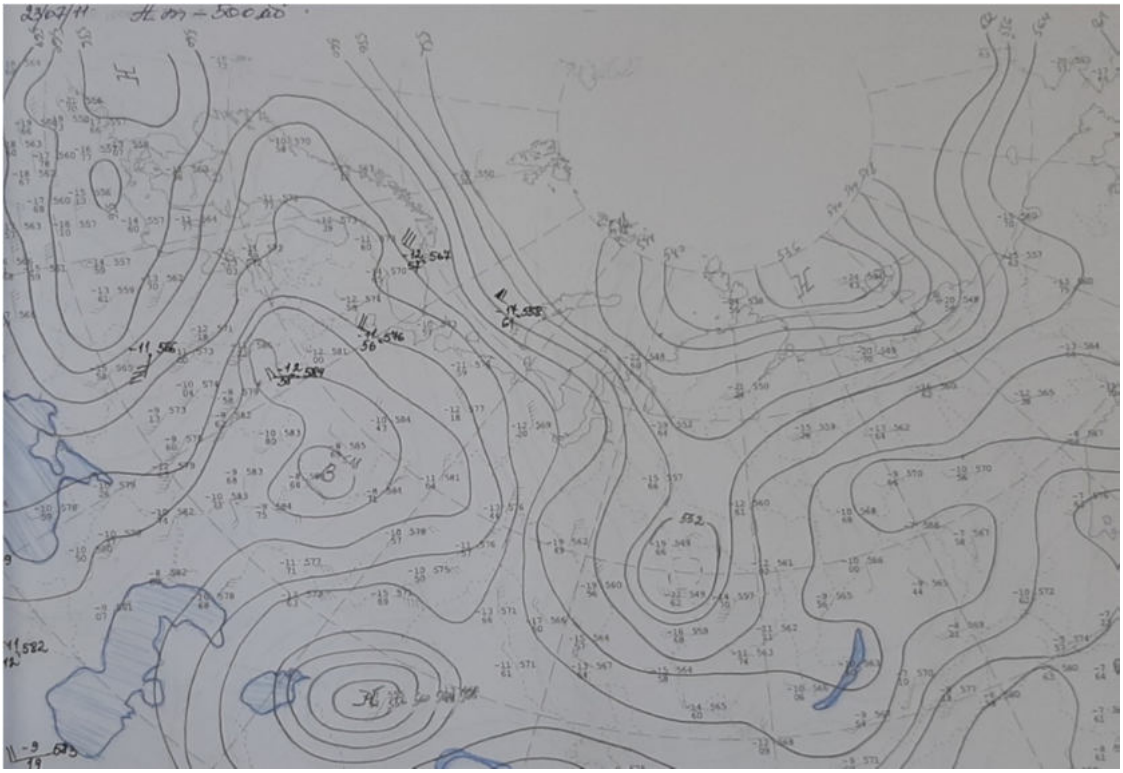


Рис. 6. Карта АТ-500 гПа за 23.07.2011 г. (срок 00 ВСВ)

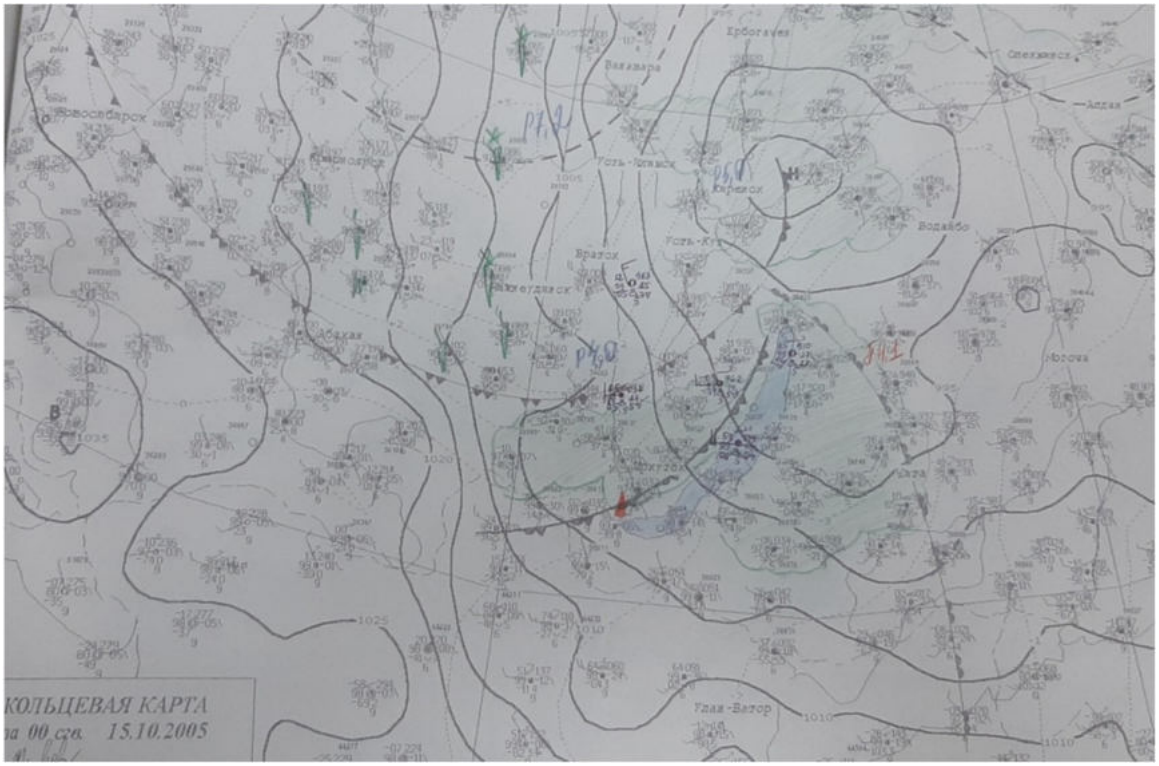


Рис. 7. Кольцевая карта погоды за 15.10.2005 (срок 00 ВСВ)

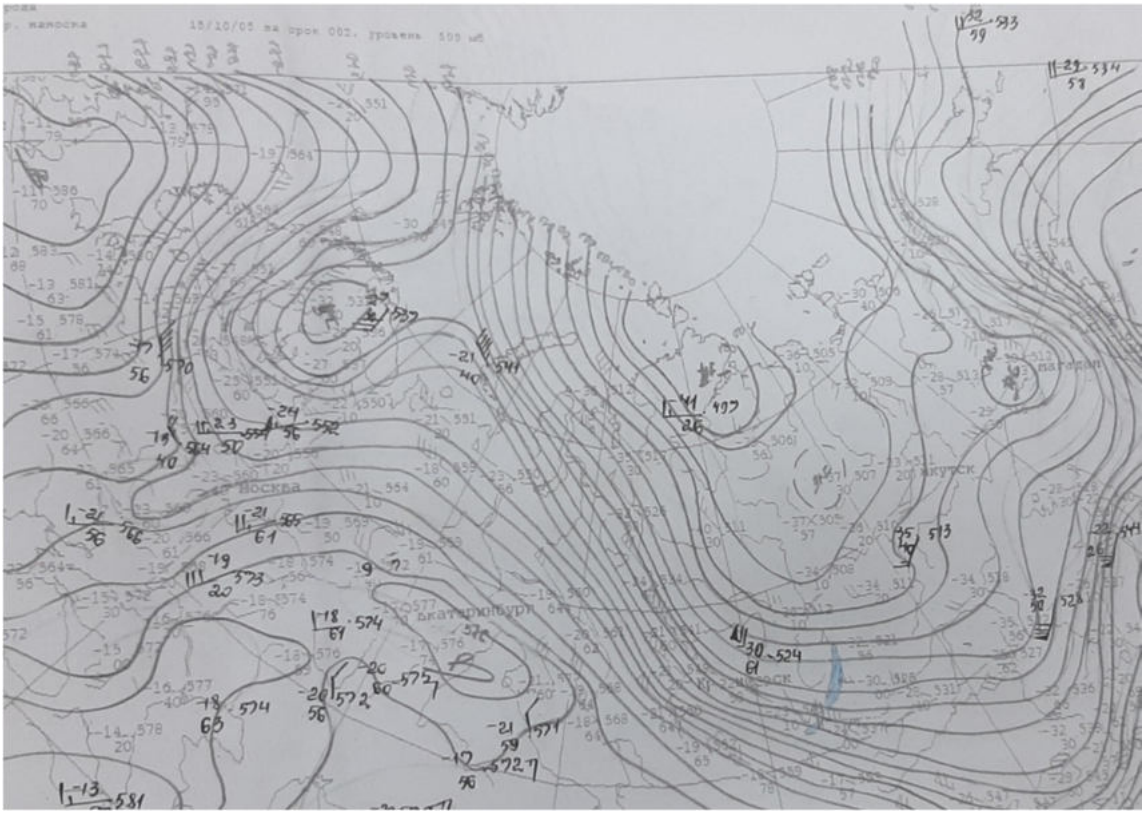


Рис. 8. Карта АТ-500 гПа за 15.10.2005 г. (срок 00 ВСВ)

Для оценки климатических условий западного побережья и средней части оз. Байкал рассчитан индекс климатической уязвимости, который учитывает совместное влияние на комфортность проживания и развитие рекреационной деятельности экстремальных значений температуры воздуха, атмосферных осадков и сильного ветра. Средние значения данного показателя варьировали в пределах от 299 % в средней части оз. Байкал до 393 % на юго-западной оконечности озера.

На станции Большое Голоустное за счет более выраженной изменчивости летних сумм атмосферных осадков и температур воздуха индекс климатической уязвимости достигает максимальных значений летом, на всех остальных исследуемых байкальских станциях в зимние месяцы, в основном за счет увеличения вклада сильного ветра и экстремальных температур воздуха. Однако следует отметить, что в последние годы в холодный период за счет уменьшения максимальных скоростей ветра отмечается тенденция ослабления негативного воздействия климата на условия проживания на побережье оз. Байкал.

На основе синоптического анализа выделены типы атмосферных процессов в периоды формирования максимальных и минимальных значений индекса климатической уязвимости на байкальских станциях. Выявлено, что данный показатель в юго-западной части озера имеет максимальные значения при прохождении циклонов и ложбин, сопровождающихся теплыми и холодными атмосферными фронтами с интенсивными осадками. В средней части оз. Байкал индекс климатической возрастает при усилении ветра до неблагоприятных и опасных значений при прохождении динамически значимых холодных фронтов. Минимальные значения индекса характерны не только для преобладающих полей антициклонального типа и малоградиентных барических полей, но и условий фронтолиза, которые чаще проявляются при прохождении теплых фронтов, особенно на подветренных склонах Прибайкальских горных хребтов.

Список литературы

1. Атлас Байкала / под ред. Г. И. Галазия. М. : Федеральная служба по геодезии и картографии России (ФСГ и КР СО РАН), 1993. 160 с.

2. *Оганесян В. В.* Методика расчета климатической уязвимости территории на основе безразмерных климатических индексов // Труды Гидрометцентра России. 2017. Вып. 366. С. 158–165.

3. *Оганесян В. В., Стерин А. М.* Расчет потенциального финансового ущерба от опасных и неблагоприятных метеорологических явлений на территории Российской Федерации в 1987–2017 гг.Метеорология и гидрология. 2019. № 12. С. 97–108.

4. *Оганесян В. В.* Климатические изменения как факторы для экономики России // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 3 (373). С. 161–184.

5. Опасные явления погоды на территории Сибири и Урала / под ред. С. Д. Кошинского, А. Д. Дробышевой. Л. : Гидрометеоиздат, 1986. Ч. 2. 242 с.

6. Структура и ресурсы климата Байкала и сопредельных пространств / под ред. Н. П. Ладейщикова. Новосибирск : Наука, 1977. 272 с.

УДК 551.524.32+551.4.06:911.52

Прогнозирование июльской температуры приземного воздуха для Перми

П. М. Мазуркин (kaf_po@mail.ru), А. И. Кудряшова (Little-one7@yandex.ru)

Поволжский государственный технологический университет, г. Йошкар-Ола

Аннотация. В рамках климатической геоморфологии на примере среднемесячной температуры приземного слоя воздуха для метеостанции в г. Перми за 1866–2019 гг. предложенным методом идентификации рассмотрена четырехчленная волновая модель, которая оказалась в сравнении с другими месяцами применимой с наименьшей погрешностью для июля.

Ключевые слова: температура воздуха, среднемесячная, 1866–2019 гг., вейвлеты, прогноз.

Введение

Беспрецедентная интенсификация экстремальных погодных условий мотивирует исследования для понимания долгосрочных климатических изменений [7]. Но при этом используется усредненные данные, например, за 10 лет. Поэтому во многих исследованиях применяются преобразованные ряды измерений. Математические методы ограничиваются только линейными трендами и усреднением данных.

Например, в статье [6] показана динамика температуры воздуха на поверхности суши в мире с 1880 г., дана так называемая «линейная объективная оценка». С позиций квантов климатического поведения [1; 2] в статье [6] «был проведен новый анализ среднегодовой глобальной температуры воздуха на поверхности Земли с 1880 года». Однако глобальные показатели также являются сгруппированными данными, поэтому необходимо принять вначале только точечные измерения. Нами приняты первичные измерения на метеостанции г. Перми по месяцам за 1866–2019 гг. (http://www.pogodaiklimat.ru/history.php?id=ru).

Сравнение изменчивости температуры поверхностного воздуха в трех связанных интеграциях модели «океан – атмосфера» за 1000 лет [5] также выполнено по линейным тенденциям. При этом измерения температуры поверхности являются самыми длинными во времени и надежными. Постепенно приходит понимание неизменности динамических рядов.

Временные ряды глобальной или региональной температуры поверхностного воздуха имеют основополагающее значение для исследований изменения климата [4]. Месячные и годовые перепады температур и их изменения были рассмотрены, например, в [3] на тибетском плато и его окрестностях за 1963–2015 гг.

Цель статьи – на примере среднемесячной температуры воздуха за 1866–2019 гг. в Перми показать возможности прогнозирования по асимметричным вейвлетам [1; 2].

Материалы и методы

Асимметричные колебания (вейвлет сигналы) в общем случае записываются волновой формулой [1; 2] вида

$$y_i = A_i \cos(\pi x / p_i - a_{8i}),\ A_i = a_{1i} x^{a_{2i}} \exp(-a_{3i} x^{a_{4i}}),\ p_i = a_{5i} + a_{6i} x^{a_{7i}}, \qquad (1)$$

где y – показатель (зависимый фактор), i – номер составляющей модели (1), m – количество членов в модели (1), x – объясняющая переменная (влияющий фактор), $a_1 \ldots a_8$ – параметры модели (1), принимающие числовые значения в ходе структурно-параметрической идентификации в программной среде CurveExpert-1. 40 (http://www.curveexpert.net/) по статистическим данным, A_i – амплитуда (половина) вейвлета (ось y), p_i – полупериод колебания (ось x). Количество составляющих может достичь 180 и более.

В таблице дан фрагмент массива данных среднемесячной температуры приземного слоя воздуха на высоте 2 м, полученные по измерениям на метеостанции в Перми.

За начало отсчета времени τ (лет) по динамическому ряду температуры был принят 1866 г. ($\tau = 0$). Для каждого месяца принимается свое конкретное время по выражению (Год – 1866) + месяц / 12. Здесь месяц принимается так: январь = 1; февраль = 2 и т. д. Тогда с января 1866 по декабрь 2019 г. прошло 154 года, поэтому ориентировочный прогноз можно выполнить на горизонт прогноза, равный основанию прогноза, т. е. до 2019 + 154 = 2173 года. Нами расчеты были выполнены до 2150 г.

Таблица

Среднемесячные данные температуры воздуха Перми за 1866–2019 гг., °С

Год	Январь		…	Июль		…	Декабрь	
	Время τ	Темпер. *t*		Время τ	Темпер. *t*		Время τ	Темпер. *t*
1866	0,0833	–9,6	…	0,583	19,4	…	1	–10,9
1867	1,0833	–15,3	…	1,583	19,6	…	2	–13,4
1868	2,0833	–18,8	…	2,583	19,3	…	3	–11,9
…	…	…	…	…	…	…	…	…
2017	151,0833	–15,1	…	151,583	17,5	…	152	–7,4
2018	152,0833	–11,2	…	152,583	20,5	…	153	–9,8
2019	153,0833	–11,3	…	153,583	16,9	…	154	–6,6

В таблице всего находится (2019–1965) 12 = 1848 месяцев. Оказалось, что все месяцы, кроме июля, имеют больший разброс значений остатков от модели температуры и поэтому требуют дополнительных вейвлетов.

Результаты и обсуждение. После идентификации в программной среде CurveExpert-1. 40 по всем месяцам была получена четырехчленная формула:

User-Defined Model:

y=a*exp(-b*x^c)+d*x^e-f*exp(-g*x)*cos(pi*x/0.5-h)+i*exp(j*x^0. 82779)*cos(pi*x/0. 25+k). (2)

Coefficient Data:

a =	2.60133354120E+002	b =	4.92829962543E+000
c =	2.55596303760E-002	d =	2.31697409124E-005
e =	2.28576076185E+000	f =	1.71650651281E+001
g =	6.33030185488E-004	h =	5.08198634266E-001
i =	3.58211474454E-001	j =	6.01150959834E-003
k =	1.29902485653E+000		

Здесь первые два члена образуют тренд. Вычислительными экспериментами было получено, что для условия $\tau = 0$ после 1850 г. характерен двухчленный тренд из-за того, что длина динамического ряда меньше 170 лет. Эта продолжительность времени равна длине в полтора цикла с периодом примерно 112 лет и более. Например, для г. Иркутска длина ряда начинается с 1820 г. и составляет 2019 – 1820 = 199 лет, что больше 170 лет. Поэтому для Иркутска первый член включает колебание с амплитудой в виде двухчленного тренда.

По другим месяцам, кроме июля, были получены значительные погрешности. Поэтому общая модель для января содержит более 120 членов (Иркутск). Из них 17 вейвлетов были получены по 12 месяцам, а еще более 100 волновых уравнений – для учета влияния космических тел, находящихся в секторе звездного неба при прохождении Земли за январь.

Таким образом, четырехчленная модель (2) по структуре становится базовой для любых географических точек поверхности Земли. Она дает малые погрешности только для июля месяца. При этом каждая часть формула (2) имеет свою физическую сущность.

Первая составляющая a*exp(-b*x^c) показывает снижение среднемесячной температуры воздуха Перми с 1866 по 2019 гг., т. е. за 154 года, от влияния космического холода. Начальное значение температуры в 1866 г. равно a = 1.84854147881E+000 ^{0}C для двухчленного тренда. С учетом прошедших 154 лет и еще трех членов формулы (2) начальное значение возросло до 260,1 °C. В итоге появляется необходимость в совместной идентификации всех более 100 членов общей модели (1), чтобы получить более точные значения параметров модели. Но для этого необходима специальная программная среда.

Второй член d*x^e степенного роста показывает влияние природно-антропогенных факторов, так как нельзя принимать суждения только об антропогенном влияние на климат. Третий член в виде волны с постоянным периодом в один год направлен из-за отрицательного знака на снижение температуры. При этом годичное колебание снижается по амплитуде. А четвертый член является принципиально новым и показывает постоянный полугодовой цикл колебания температуры воздуха. Причем амплитуда колебания возрастает с годами, что получается от снижения численности листьев растительного покрова из-за уничтожения человеком. С уменьшением площади и качества лесов и лугов температура воздуха повышается.

На рис. 1 приведены графики по отдельным членам и всей модели (2).

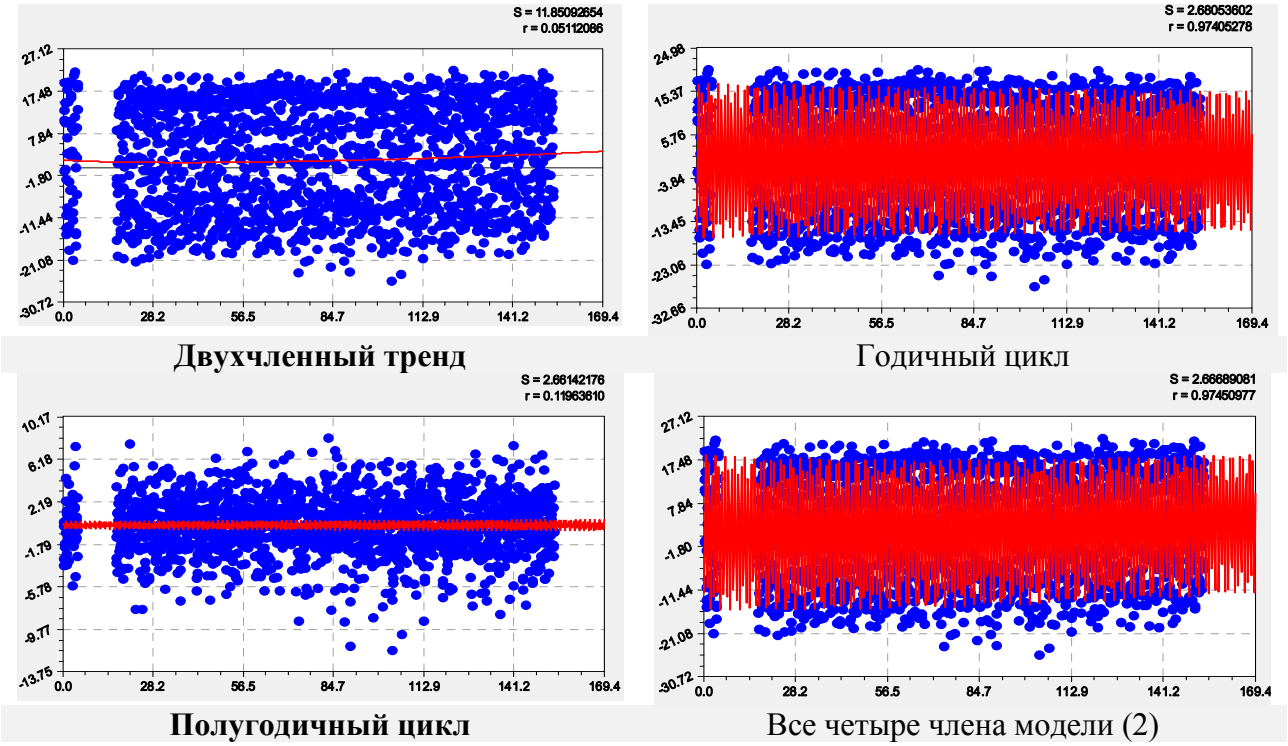


Рис. 1. Графики изменения температуры воздуха в Перми за 1866–2019 гг. в июле (в правом верхнем углу: S – стандартное отклонение; r – коэффициент корреляции)

Точечный график фактических значений температуры в июле дан на рис. 2. Затем показано распределение членов n ряда относительной погрешности Δ (%) по закону Гаусса:

$$n = 1 + 4{,}99495 \exp(-0{,}0072209(\Delta - 3{,}72207)^2), \quad (3)$$

где относительная погрешность учитывается через 1 %.

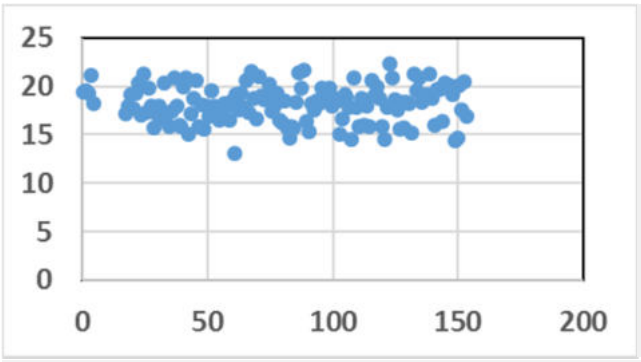
Относительная погрешность модели (2) изменяется от -34,24 до 19,72 %. В среднем для 142 значений июльской температуры относительная погрешность по модулю равна 8,46 %.

Прогноз по (2) показывает рост июльской температуры в Перми: 2020 – 18,5 °С; 2030 – 18,7 °С; 2040 – 19,0 °С; 2050 – 19,3 °С. В начале 2021 г. нужна новая итерация прогноза.

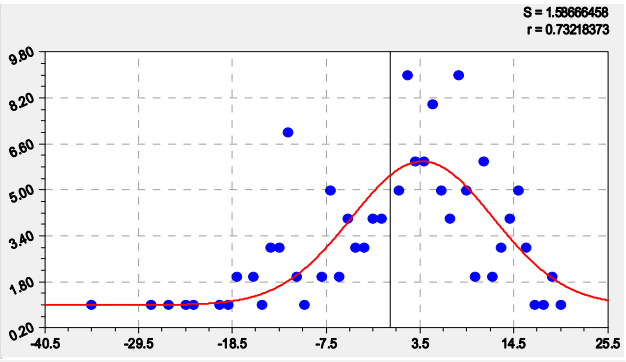
Заключение

Наиболее значимым с адекватностью по коэффициенту корреляции 0,9741 становится годичный цикл обращения Земли вокруг Солнца по месяцам.

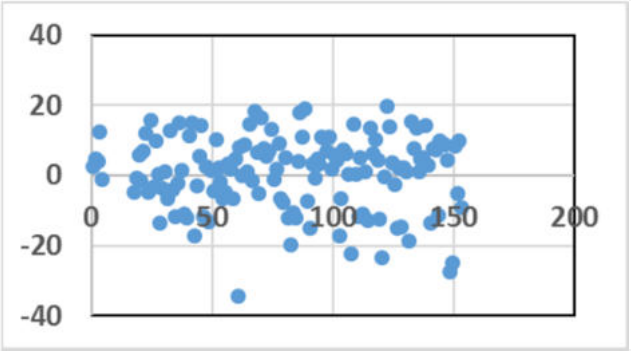
Если прогноз выполнить до 2150 г. (24,2 °С), то длина ряда измерений фактической температуры составит для Перми 2150 – 1866 = 284 лет. Эта продолжительность уже больше цикла 112-летнего колебания в 284 / 112 = 2,54 раза. В итоге возникает противоречие в прогнозировании, заключающееся в необходимости перехода от нелинейного тренда к волновому уравнению. Этот момент перехода должен наступить уже в 1866 + 170 = 2036 г. Тогда возникает только одна практическая рекомендация: ежегодно проводить повторную идентификацию и тем самым после каждого года корректировать прогнозы на будущее.



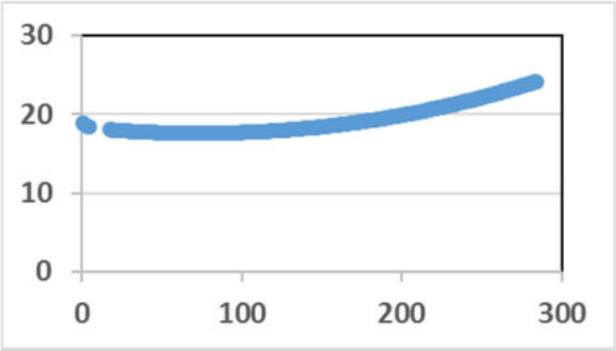
Фактические значения температуры в Перми



Распределение Гаусса погрешности (2)



Динамика погрешности модели (2) по годам



Прогноз температуры в июле до 2150 г.

Рис. 2. Графики динамики температуры воздуха в Перми и прогноз до 2150 г. в июле

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта: «19-45-240004р_а Прогноз эколого-экономического потенциала возможных «климатических» миграций в Ангаро-Енисейском макрорегионе в меняющемся климате XXI века».

Список литературы

1. *Мазуркин П. М., Кудряшова А. И.* Квантовая метеорология: факторный анализ трехчасовых измерений четырех метеорологических параметров за 2012–2018 годы // American Scientific Journal. 2019. N (24). P. 15–28.

2. *Мазуркин П. М., Кудряшова А. И.* Кванты поведения метеопараметров по трехчасовым измерениям в вегетационный период березы повислой // American Scientific Journal. 2019. N (24). P. 59–75.

3. Monthly and annual temperature extremes and their changes on the Tibetan Plateau and its surroundings during 1963–2015 / J. Ding [et al.]. URL: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6082912/.

4. *Li G. X., Zhou G.* Comparisons of time series of annual mean surface air temperature for china since the 1900s: observations, model simulations, and extended reanalysis. 2016. https://doi.org/10.1175/bams-d-16–0092.1.

5. *Stouffer R. J., Hegerl G., Tett S.* A Comparison of Surface Air Temperature Variability in Three 1000-Yr Coupled Ocean–Atmosphere Model Integrations // Journal of climate. 1999. VOL. 13 P. 513–537.

6. Global land surface air temperature dynamics since 1880 / J. Wang [et al.] // International Journal of Climatology. https://doi.org/10.1002/joc.5384.

7. Quantifying changes in spatial patterns of surface air temperature dynamics over several decades / D. A. Zappalà [et al.] // Earth Syst. Dynam. 2018. Vol. 9. P. 383–391. https://doi.org/10.5194/esd-9-383-2018.

УДК 551.524.32+551.4.06:911.52

Особенности динамики температуры приземного воздуха Арктики на острове Тикси и в Мурманске

П. М. Мазуркин (kaf_po@mail.ru)

Поволжский государственный технологический университет, г. Йошкар-Ола

Аннотация. На Северном морском пути России рассмотрены две географические точки – это метеостанции на о. Тикси и в г. Мурманске. В рамках климатической геоморфологии они отличаются тем, что над Мурманском имеется остров тепла, увеличивающий с ростом численности городского населения температуру приземного слоя воздуха. А в поселке на острове Тикси антропогенное влияние небольшое. При этом в г. Мурманске среднемесячная динамика температуры рассмотрена с 1918 по 2019 г. На о. Тикси рассмотрена посуточная динамика Т00 за один критический по 17 циклу солнечной активности 1937 г., а также средние июльские температуры за 1933–2019 гг. Предложенный нами метод идентификации позволил выявить модели в виде нелинейных трендов и асимметричных вейвлетов. Даны прогнозы среднемесячной температуры в июле на Тикси до 2105 г., а для Мурманска по двум моделям прогноз выполнен до 2120 г.

Ключевые слова: температура воздуха, суточная, месячная, закономерности.

Введение

В XXI в. глобальные средние температуры очень вероятно превысят максимальные уровни, восстановленные за прошлые 784 000 лет. Температуры из восьми ледниковых циклов обеспечивают независимую проверку текущих прогнозов потепления CMIP5 [9].

Временные ряды среднемесячной глобальной температуры поверхности (GST) с 1891 г. объяснены известными природными и антропогенными факторами воздействия, включая изменчивость климата, с использованием метода множественной регрессии. Проведено сравнение 40 моделей CMIP5 при прогнозировании GST. Относительный вклад различных факторов воздействия меняется во времени. Имеются два периода потепления (1911–1940 и 1976–1997 гг.). В 2001–2010 гг. роль в охлаждении сыграло сокращение солнечной радиации [8].

Анализ переходящих 15-летних тенденций показывает, что темпы потепления замедлились в период с 1999 по 2014 г. [7]. Глобальные температурные рекорды с 1901 по 2008 г. относятся к естественному колебанию: иногда вызывают потепление, иногда охлаждение [10]. Стало ясно, что охлаждающее действие (в основном Северное полушарие) было временным отвлечением. Когда подъем продолжался и в XXI в., проникая в глубины океана, это сигнализировало о глубоком изменении климатической системы. Ничего подобного не было на протяжении веков [16]. Рассмотрены факторы, которые могли бы влиять на замедления и естественные причины [17]. Данные калифорнийской засухи 2012–2015 гг. показывают, что частота суровых и жарких лет повысилась, чаще они не связаны с влажными годами [18].

Земля нагревалась беспрецедентными темпами в 1980-е и 1990-е гг. и быстрота потепления была совпадением с циклом 65 лет. Наблюдаемые тен-

денции глобальной средней температуры поверхности до одной трети потепления в конце XX в. могли быть следствием естественной изменчивости [19].

По [11], интенсивность острова тепла Москвы усилилась, причем несмотря на паузу в глобальном потеплении. Обнаружено, что по вертикали остров прослеживается до высоты 2 км. В летнее время нижняя часть острова тепла представляет собой сухости, а верхняя часть острова тепла – влажности. Зимой в нижней части острова тепла выделяется влажность [11].

Цель статьи – на примере температуры в двух точках Северного морского пути (рис. 1) показать возможности моделирования и прогнозирования среднемесячной температуры в июле на острове Тикси и г. Мурманске (имеется остров тепла) за все годы измерений на соответствующих метеорологических станциях.



Рис. 1. Северный морской путь России [1]

Материалы и методы

В докладе [2] отмечается, что коэффициент линейного тренда характеризует среднюю скорость изменения температуры в интервале времени. При этом 1976 г. выбран за начало потепления в соответствии с ходом глобальной температуры.

В предисловии руководителя Росгидромета по актуальности отмечается следующее [6, с. 3]. «Доклады МГЭИК не могут дать полной и детальной картины региональных оценок изменений климата для каждой страны, которые необходимы для выработки и реализации на национальном уровне практических мер по уменьшению антропогенного влияния на климатическую систему и смягчению последствий изменений климата. И в этой связи многими странами в дополнение к работе в рамках МГЭИК выполняются национальные оценки применительно к своей территории…». Территория России огромна и поэтому необходимо дополнительно проводить исследования в каждом субъекте Федерации.

В статьях [3; 4] приведены примеры моделирования динамических рядов приземной температуры по среднемесячным и среднесуточным данным. В [12] дан факторный анализ рядов из Антарктики.

Различные колебания (асимметричные вейвлет сигналы) в общем случае записываются волновой формулой [5; 13; 14]

$$y_i = A_i \cos(\pi x / p_i - a_{8i}),\ A_i = a_{1i} x^{a_{2i}} \exp(-a_{3i} x^{a_{4i}}),\ p_i = a_{5i} + a_{6i} x^{a_{7i}}, \qquad (1)$$

где y – показатель (зависимый фактор), i – номер составляющей модели (1), m – количество членов в модели (1), x – объясняющая переменная (влияющий фактор), $a_1 \ldots a_8$ – параметры модели (1), принимающие числовые значения в ходе структурно-параметрической идентификации в программной среде CurveExpert-1.40 (http://www.curveexpert.net/) по статистическим данным, A_i – амплитуда (половина) вейвлета (ось y), p_i – полупериод (ось x).

В итоге данная статья относится к квантовой метеорологии [15], позволяющей выделять кванты поведения метеопараметров в двух точках Земли.

Первые сутки месяца и январь на острове Тикси

Ряды приземной температуры были приняты с сайта http://www.aari.ru/main.php?lg=0&id=122. На климат сильное влияние оказывает солнечная активность [20]. Поэтому при моделировании мы применяли циклы солнечной активности с переменными амплитудой и периодом колебаний [3; 4; 12–15].

Для острова Тикси отобрали 17-й цикл солнечной активности, а в нем наибольшими количествами чисел Вольфа оказался 1937 г.

Отдельно в каждом месяце отбирали первые сутки с четырьмя измерения в 00, 06, 12 и 18 часов по Гринвичу. Из рис. 2 видно, что цикл вращения Земли вокруг самого себя не является определяющим фактором для моделирования. Однако время в часах сильно повышает изменчивость температуры из-за геоморфологических факторов. Именно такая высокая изменчивость заставляет провести моделирование методом идентификации по данным температуры приземного воздуха по измерениям за каждые три часа на каждой метеостанции.

Затем в табл. 1 вычисляли средние значения температуры за первые сутки, за месяц по времени Гринвича и в среднем за месяц по всем четырем измерениям. Но оказалось, что измерения были проведены через каждые 6 ч.

Таблица 1

Среднестатистическая температура воздуха на острове Тикси, °С

Месяц 1937 г.	Первые сутки	Время в сутках по Гринвичу, ч				В среднем за месяц	
		00	06	12	18	температура	станд. отклон.
I	–29,350	–27,777	–27,577	–27,545	–26,997	–27,474	**7,804**
II	–25,275	–25,068	–24,232	–24,918	–25,361	–24,895	7,288
III	–29,000	–29,235	–26,265	–28,013	–29,716	–28,307	7,229
IV	–21,275	–20,307	–16,397	–17,430	–20,550	–18,671	6,170
V	–8,600	–2,371	0,448	–0,137	–2,897	–1,248	7,404
VI	10,200	5,540	6,287	5,560	3,797	5,296	5,242
VII	8,425	9,177	10,197	10,926	3,797	9,457	6,264
VIII	14,100	9,168	10,923	9,826	6,990	9,227	4,171
IX	5,375	1,360	3,773	2,210	0,183	1,882	3,709
X	–3,250	–9,748	–8,706	–9,490	–10,584	–9,632	6,770
XI	–25,675	–21,947	–21,507	–21,820	–21,923	–21,799	5,207
XII	–17,375	–24,900	–25,058	–24,923	–25,268	–25,037	4,830

Для первого дня февраля получено среднее –25,275 °С. Стандартное отклонение максимальное 6,351 °С в сравнении с первыми сутками у всех 12 месяцев 1937 г.

Как видно из рис. 2, разброс по Гринвичу большой.

На рис. 3 приведены графики за максимальный по разбросу 7,804 °С январь 1937 г., а в табл. 2 приведены параметры модели (1).

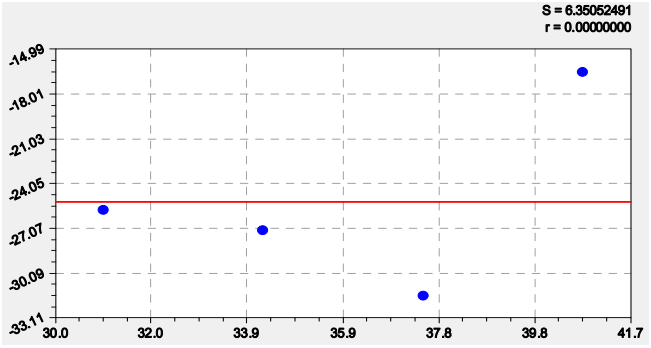


Рис. 2. Среднее в первые сутки февраля

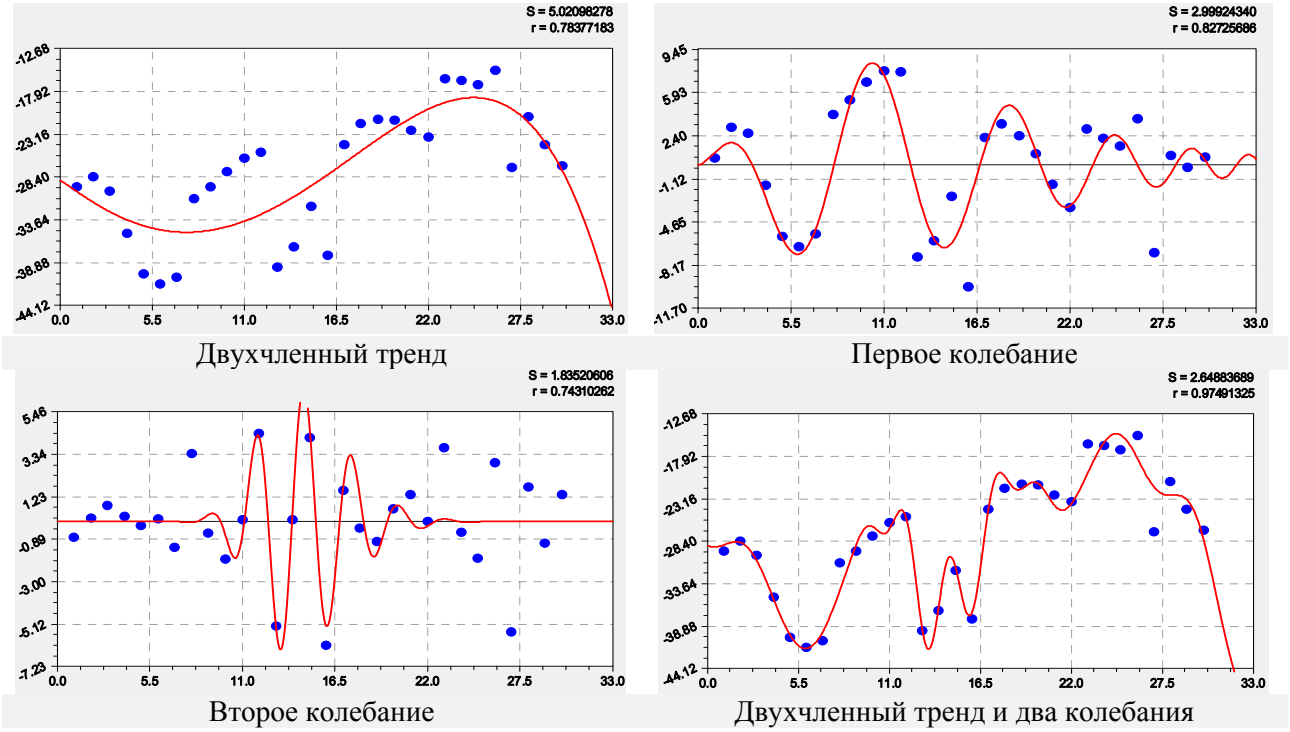


Рис. 3. Графики температуры воздуха на Тикси за январь 1937 г. по ряду Ta00

Таблица 2

Параметры (1) температуры воздуха на острове Тикси

Номер i	Вейвлет $y_i = a_{1i}x^{a_{2i}}\exp(-a_{3i}x^{a_{4i}})\cos(\pi x/(a_{5i}+a_{6i}x^{a_{7i}})-a_{8i})$								Коэфф. коррел. r
	Амплитуда (половина) колебания				Полупериод колебания			Сдвиг	
	a_{1i}	a_{2i}	a_{3i}	a_{4i}	a_{5i}	a_{6i}	a_{7i}	a_{8i}	
Параметры (1) за январь 1937 г. температуры воздуха в 00 ч по Гринвичу									
1	–28,98741	0	–0,019027	1,38925	0	0	0	0	0,9749
2	0,029876	2,61531	0	0	0	0	0	0	
3	5,45512e7	6,38913	18,13070	0,22448	5,30800	–0,0068048	1,62494	0,25947	
4	3,98375e6	86,60762	94,20943	0,35724	1,41562	0	0	1,08067	
Параметры (1) за июль по 2635 суткам с 01.07.1933 по 31.07.2017									
1	2,51527	0	1,78620e-5	1,39706	0	0	0	0	0,2116
2	8,13963	0	0	0	0	0	0	0	
3	2,23943e-6	1,27411	0	0	0	0	0	0	
4	3,20872	0	-2,23187e-5	1	182,4340	0	0	1,92761	
5	0,12068	0	-8,41180e-5	1	96,25385	0	0	–1,23342	

Всего после моделирования получилось еще 14 вейвлетов (1). После 18 членов остатки стали меньше погрешности измерений ±0,05 °С. Таким образом, время в месяцах становится определяющим при квантовании рядов температуры и других метеопараметров из-за того, что в каждом месячном секторе Вселенной космические тела влияют по-особому на климат Земли.

Среднесуточные температуры за июль на Тикси

С 01.07.1933 по 31.07.2017 (далее ряд обрывается) по 2635 сут. получена модель (1), параметры приведены в табл. 2.

Адекватность модели (1) динамики среднесуточной температуры приземного воздуха острова Тикси относится к уровню «закономерность отсутствует». Коэффициент корреляции 0,2116 намного ниже уровня 0,3.

Таким образом, анализ квантов времени показал, что наиболее адекватные модели (1) идентифицируются среднемесячными значениями температуры приземного слоя воздуха.

Среднемесячные температуры на Тикси за 1933–2019 гг.

Пятичленная модель (1) по 12 месяцам за 1933–2019 г. имеет адекватность (рис. 4) по коэффициенту корреляции 0,9800 по следующей формуле (запись для расчетов Excel).

User-Defined Model:

y=-a*exp(b*x^c)-d+e*x^f-g*exp(-h*x^i)*cos(pi*x/0.5-j)-k* *exp(-l*x)*cos(pi*x/0.25+m), (2)

Coefficient Data:

a = 8.62942505322E+000 b = 6.80004596391E-003 c=8.79444264528E-001
d = 3.69666178303E+000 e=5.33465510530E-006 f=3.09470726914E+000
g = 2.04926052691E+001 h=4.35094881174E-005 i=1.11547621928E+000
j = 6.87249274387E-001 k=1.91375734182E+000 l=1.16570148571E-003
m = 1.38107560986E+000

Первые два члена формулы (2) образуют распределение по закону Вейбулла $y = a - b\exp(-cx^d)$, но с отрицательным постоянным членом. Третий член является законом степенного роста, а все три члена образуют не волновой и явно нелинейный тренд. Такой тренд образуется из-за малой длины ряда, не дающий колебания. Четвертый и пятый члены являются бесконечномерными вейвлетами с постоянными полупериодами 0,5 (годичный цикл) и 0,25 лет (полугодичный цикл).

Но в основном все другие циклы получаются с переменным периодом колебания.

Главным по коэффициенту корреляции 0,9760 является годичный цикл.

Прогноз (рис. 5) был выполнен прямыми расчетами по формуле (2) в Excel.

Очень высока относительная погрешность модели (2) в пределах от 23,1 до –221,4 %. Более 30 % (норма для экологических исследований) из 87 равны для 29 точек (33,3 %). Такой разброс показывает небрежность в измерениях. По прогнозу можно отметить, что на острове Тикси в будущем ожидается потепление.

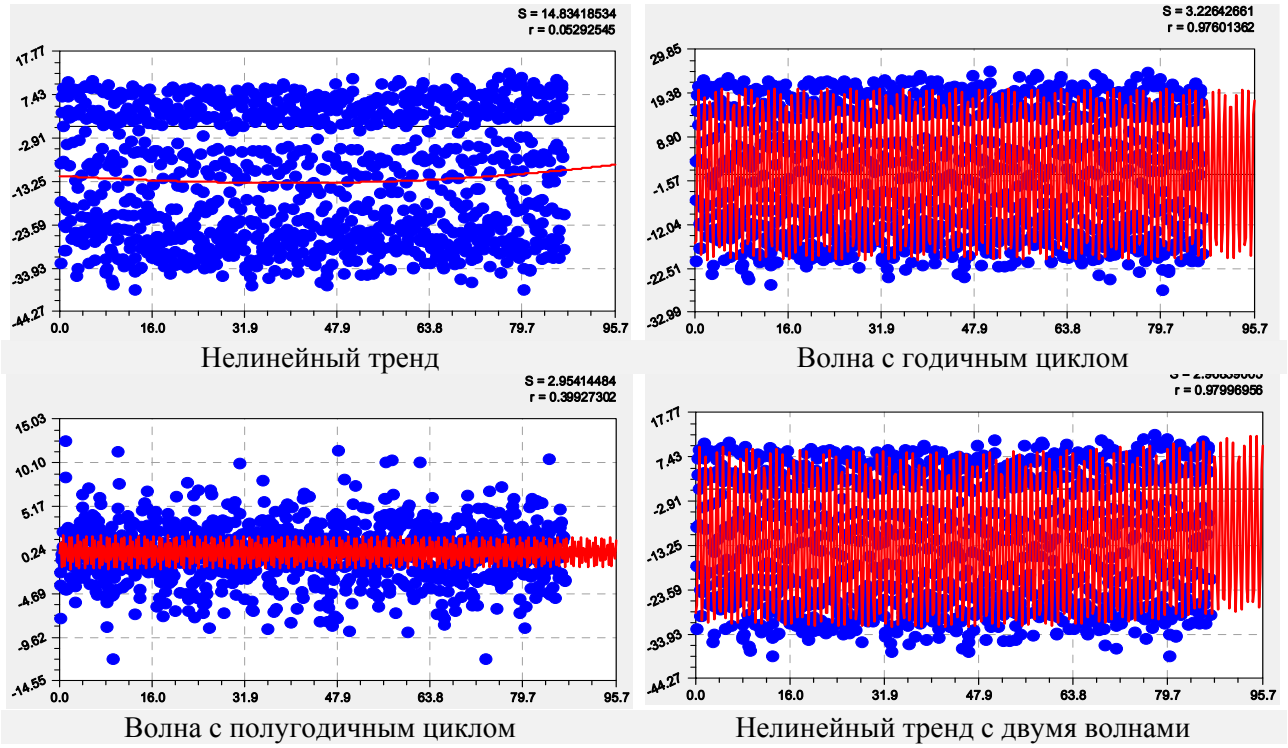


Рис. 4. Графики температуры воздуха на Тикси за 1933–2019 гг. по месяцам

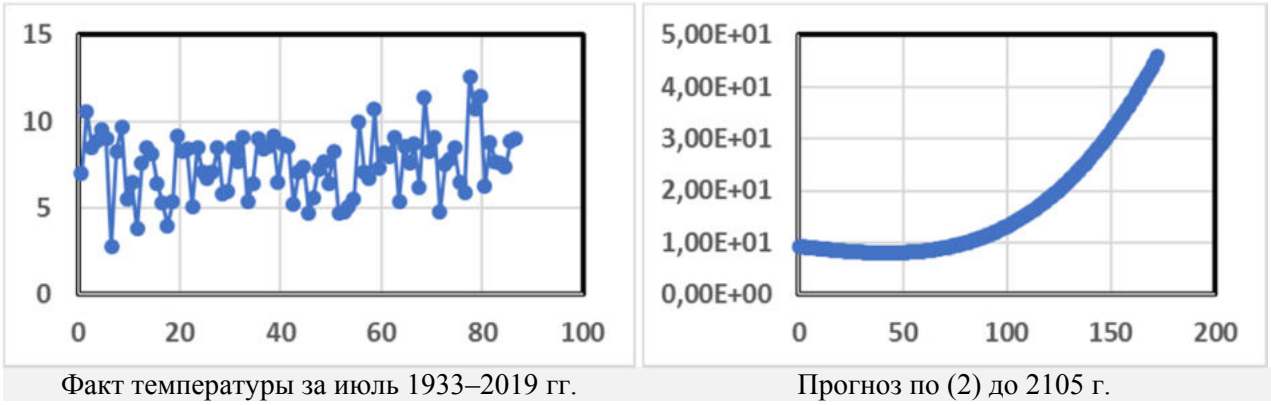


Рис. 5. Графики факта и прогноза температуры воздуха на Тикси до 2105 г.

Среднемесячные температуры Мурманска за 1918–2019 гг.

В таблице 3 дан фрагмент данных среднемесячной температуры в Мурманске.

Для 1918 г. температура была измерена только для октября.

За начало отсчета времени τ (лет) по динамическому ряду температуры воздуха был принят 1918 г. ($\tau = 0$). Из табл. 3 видно, что для каждого месяца принимается свое конкретное время по выражению (Год – 1918) + месяц / 12. Здесь месяц принимается так: январь = 1; февраль = 2 и т. д. Тогда с января 1918 по декабрь 2019 г. прошел 101 год, поэтому ориентировочный прогноз можно выполнить на горизонт прогноза, равный основанию прогноза, т. е. до 2019 + 101 = 2120 г. Были применены два сценария моделирования.

Таблица 3

Среднемесячные данные температуры воздуха Мурманска за 1918–2019 гг., °С

Год	Январь		…	Июль		…	Декабрь	
	Время τ	Темпер. *t*		Время τ	Темпер. *t*		Время τ	Темпер. *t*
1919	1,083	–9	…	1,583	13,1	…	2	–11,1
1920	2,083	–12,3	…	2,583	14,7	…	3	–5
1921	3,083	–13,1	…	3,583	10,8	…	4	–7,8
…	…	…	…	…	…	…	…	…
2017	99,083	–7,9	…	99,583	14,2	…	100	–8
2018	100,083	–9,4	…	100,583	18,1	…	101	–5,4
2019	101,083	–12,2	…	101,583	10,7	…	102	–4,5

Моделирование и прогноз по нелинейному тренду

Первый сценарий предполагает, что тренд может являться только многочленным уравнением, но без наличия колебаний. После идентификации (1) получена модель вида (рис. 6):

$$y=a*\exp(-b*x\hat{}c)-d+e*x\hat{}f*\exp(-g*x\hat{}h)-i*\exp(j*x\hat{}k)*\cos(pi*x/0.5-l)+ +m*\exp(-n*x\hat{}o)*\cos(pi*x/0.25-p), \quad (3)$$

Coefficient Data:

a =1.25878492208E+001 b = 1.89312841882E-005
c = 2.15212981923E+000 d = 1.18510955243E+001
e = 1.10314581940E-017 f = 1.06712054275E+001 g = 7.56158267402E-002
h = 1.02595100586E+000 i = 1.12012858817E+001 j = 9.72560142899E-004
k = 4.38339158092E-001 l = 6.53559336284E-001 m = 1.22524776773E+000
n = 4.81111038811E-003 o = 1.22450978997E+000 p = 1.14666084573E+000

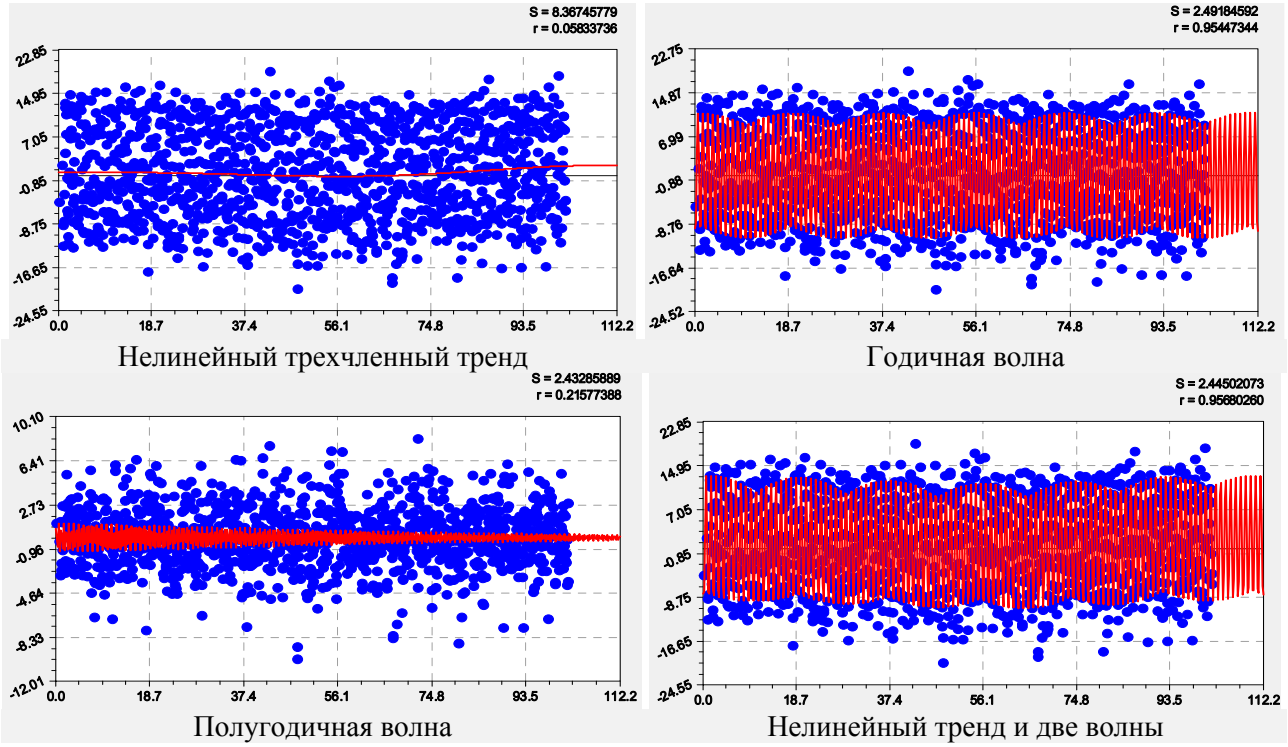
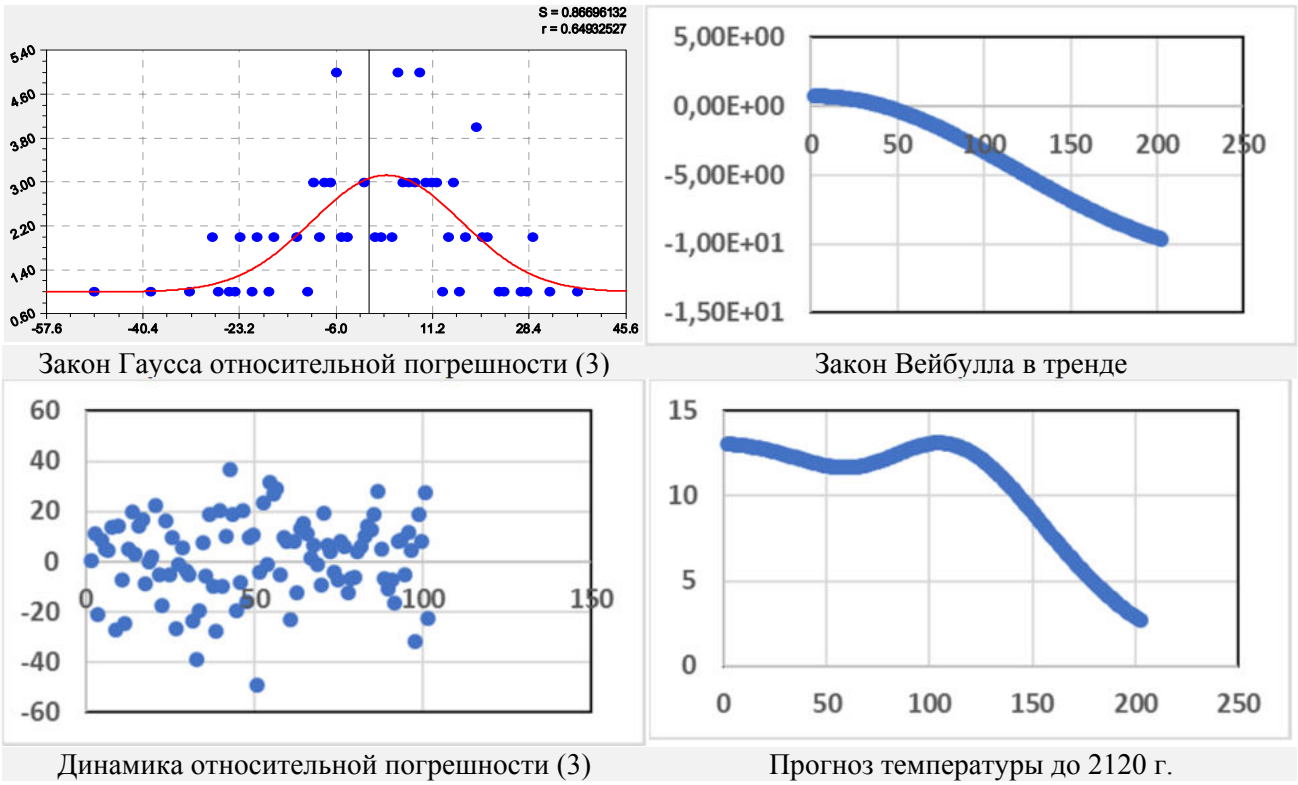


Рис. 6. Графики температуры воздуха в Мурманске за 1918–2019 гг. по месяцам

Адекватность модели (3) равна 0,9568. Первые два члена формулы (3) имеют закон Вейбулла $y = a - b\exp(-cx^d)$, но умноженный на –1. Третий член из закона степенного роста преобразуется в биотехнический закон [5], а все три члена образуют нелинейный тренд. Четвертый и пятый члены являются вейвлетами с постоянными полупериодами 0,5 и 0,25 лет.

Распределение относительной погрешности через 1 °С для 101 точки происходит (рис. 7) по формуле закона Гаусса

$$\Delta = 1 + 2{,}12651\exp(-0{,}0028542(t_{1^0C} - 2{,}93347)^2). \quad (4)$$



Закон Гаусса относительной погрешности (3) | Закон Вейбулла в тренде

Динамика относительной погрешности (3) | Прогноз температуры до 2120 г.

Рис. 7. Графики прогноза температуры воздуха в Мурманске за 1918–2120 гг.

График прогноза показывает совпадение с гипотезой [20] о глобальном похолодании в атмосфере, в частности на территории региона вокруг Мурманска.

Моделирование и прогноз по волновому тренду

По-видимому, из-за влияния цикличности Гольфстрима, получили волновой тренд (рис. 8):

User-Defined Model:

y=(a*exp(-b*x^2.34687171)-c+d*x^e*exp(-f*x^1. 0247780))*cos(pi*x/(g-h*x^i)-j)-k*exp(l*x^0.29421164)*cos(pi*x/0.5-m)+n*exp(-o*x^p)*cos(pi*x/0.25-q). (5)

Coefficient Data:

a =1.27650680738E+001 b = 7.39175300818E-006
c = 1.20084516008E+001 d = 1.07549711403E-017 e = 1.06668405350E+001
f = 7.55187356334E-002 g = 4.12300862005E+001 h = 1.69823746292E-002
i = 1.06149624770E+000 j = 1.11464823747E+000 k = 1.11367712512E+001

l = 3.56464584197E-003 m = 6.53578187697E-001 n = 1.22275086800E+000
o = 4.69854623565E-003 p = 1.22965304223E+000 q = 1.14916615865E+000

В модели (5) нелинейный тренд из модели (3) превращается в амплитуду нового климатического колебания. В 1918 г. период колебания был равен $2 \times 41{,}23 \approx 82{,}5$ года. Затем этот период уменьшается: в 2019 г. он стал равным 77,8 лет; к 2040 – 76,8 лет; к 2080 – 75,0 лет; к 2120 г. – 73,0 года. Учащение частоты колебания с 1918 по 2120 г. будет на 9,5 лет или на 11,5 %.

По коэффициенту корреляции вклад волнового тренда равен всего 0,0562. Годичный цикл имеет адекватность 0,9542. По-видимому, из-за снижения площади и качества растительного покрова всего региона полугодовая волна снижается по амплитуде за 1918–2019 гг. с 1,21 до 0,308 °С и имеет коэффициент корреляции 0,2116. Температурный эффект от лесов и лугов к 2120 г. по полугодовой волне снизится до 0,049 °С, т. е. в сравнении с 1918 г. произойдет снижение в 24,7 раза.

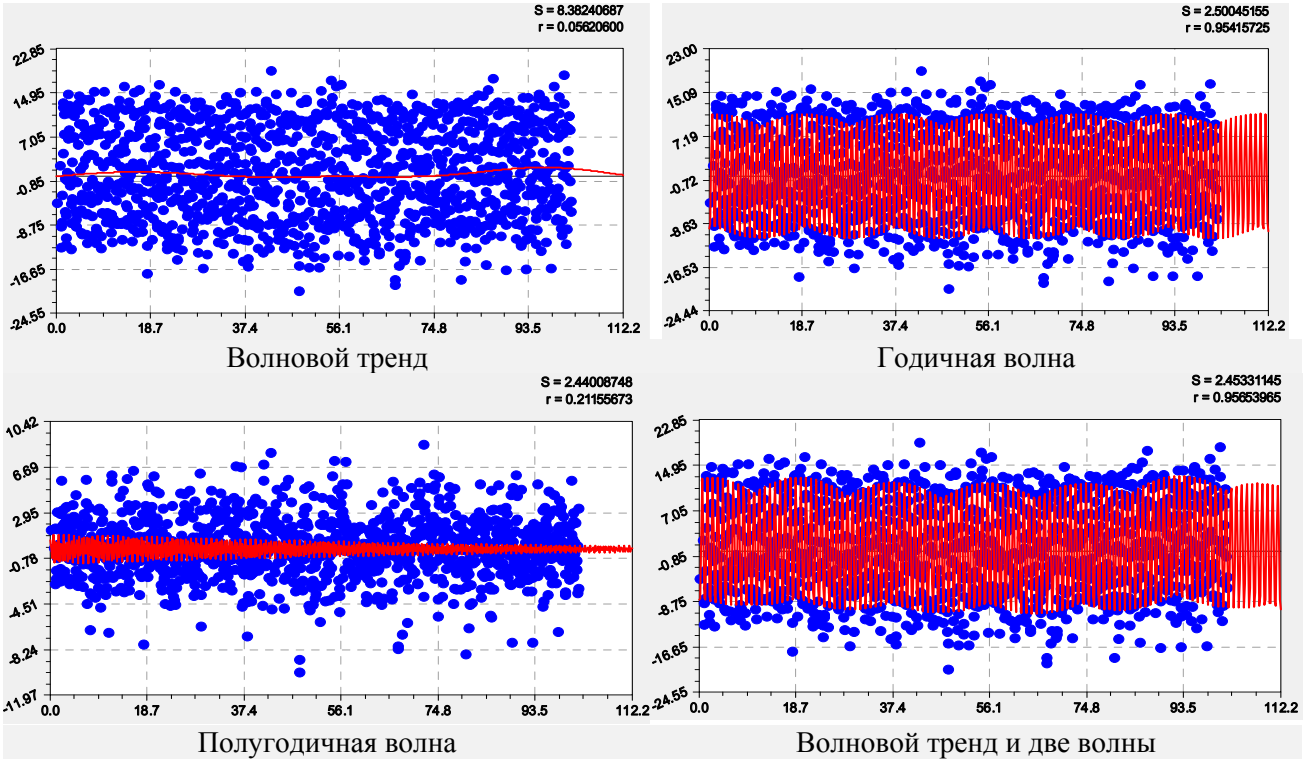


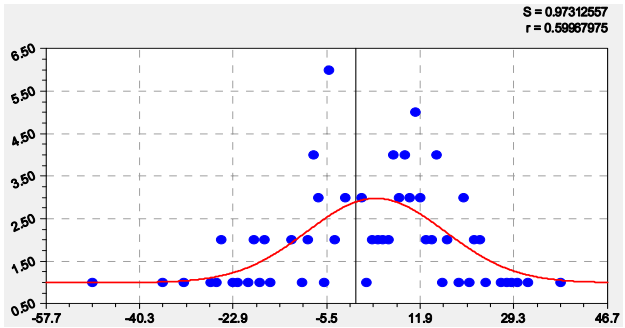
Рис. 8. Графики температуры воздуха в Мурманске с учетом волнового тренда

На рис. 9 приведены графики прогнозов.

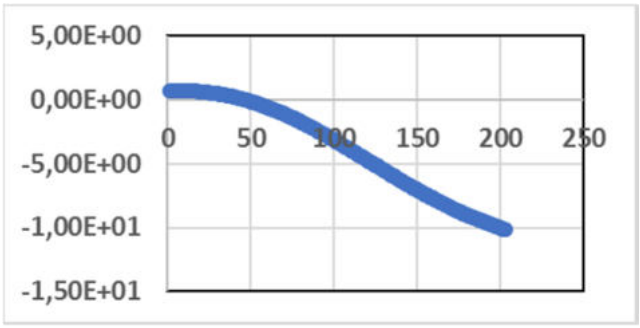
Распределение относительной погрешности через 1 °С для 101 точки происходит (рис. 11) по формуле закона Гаусса

$$\Delta = 1 + 1{,}97989 \exp(-0{,}0030244(t_{1^0C} - 3{,}62699)^2). \qquad (6)$$

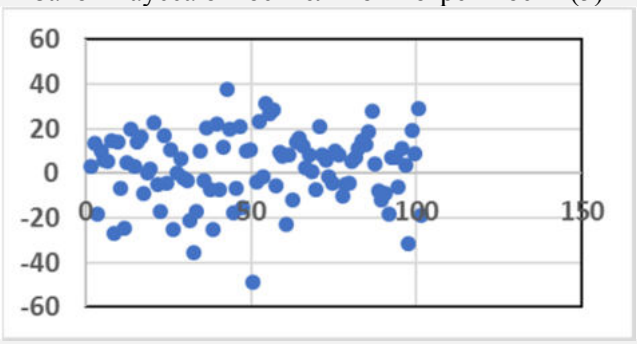
В июле снижение температуры приземного воздуха в Мурманске теоретически при 12,1 °С началось с 2012 г., когда фактическая температура в июле была равна 12,3 °С. В 2015 г. температура была равной 9,9 °С. Через четыре года (два биологических цикла по два года) в 2019 г. температура в июле была 10,7 °С. Этап похолодания продолжится до 2035–2042 гг. до температуры 10,5 °С.



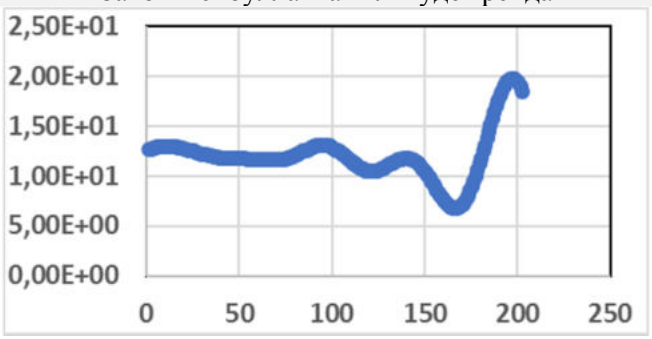
Закон Гаусса относительной погрешности (5)



Закон Вейбулла в амплитуде тренда



Динамика относительной погрешности (5)



Прогноз до 2120 г.

Рис. 9. Графики динамики температуры воздуха в Мурманске по модели (5)

Это похолодание 2012–2042 гг. совпадает с прогнозом Валентины Жарковой [20] на 2030–2040 гг. по солнечной активности, и цикл похолодания для Земли может оказаться малым ледниковым периодом.

На следующем этапе произойдет потепление в июле до 11,8 °С с 2042 по 2056–2059 гг. После этого снова похолодает, но уже до 6,7 °С к 2084 г. На четвертом этапе произойдет резкое потепление до 19,7 °С к 2114–2116 гг. А после снова начнется резкое похолодание. Климат Мурманска в будущем идет с увеличением амплитуды колебаний, т. е. с высокой вероятностью идет вразнос.

Заключение

Вычислительные эксперименты показали, что наиболее значимым становится годичный цикл обращения Земли вокруг Солнца по месяцам. При этом каждый месяц по среднесуточным данным может моделироваться до погрешности измерений.

Поэтому нужно идентифицировать общую закономерность (1) по среднемесячным данным за весь период проведения метеорологических измерений на метеостанции в данной географической точке.

Для Мурманска предпочтительней сценарий прогнозирования по модели, содержащей волновой тренд с переменными амплитудой и периодом колебания. Модель (5) показывает не только годичное и полугодичное возмущение температуры приземного воздуха, но и дает колебательное возмущение со снижением периода с 82,5 года в 1918 г. до 77,8 лет к 2019 г. и по прогнозу дальше снижение до 73,0 года к 2120 г.

По коэффициенту корреляции вклад волнового тренда равен всего 0,0562. Но именно он становится решающим, с учетом закона Вейбулла по распреде-

лению температуры. Годичный цикл оказывается с адекватностью по коэффициенту корреляции 0,9542 основным при моделировании по среднемесячным данным. Вычислительные эксперименты показали, что модель (5) можно дальше дополнять до 100 и более новыми вейвлетами. На добротных динамических рядах процесс идентификации оказался возможным продолжить до достижения остатков от последнего члена общей модели (1) погрешности измерений температуры $\pm 0{,}05$ °С. В итоге квантование температуры приземного воздуха на волновые составляющие в среднемесячной динамике оказалось вполне возможным для конкретной метеостанции. Это дает квантование поведения климата.

Последнее полугодовое колебание показывает изменение температуры от влияния растительного покрова. Из-за снижения площади и качества растительного покрова всего региона полугодовая волна снижается по амплитуде за 1918–2019 гг. с 1,21 до 0,308 °С и имеет коэффициент корреляции 0,2116. Температурный эффект от лесов и лугов к 2120 г. по полугодовой волне снизится до 0,049 °С, т. е. в сравнении с 1918 г. произойдет снижение в 24,7 раза.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта: «19-45-240004р_а Прогноз эколого-экономического потенциала возможных «климатических» миграций в Ангаро-Енисейском макрорегионе в меняющемся климате XXI века».

Список литературы

1. *Болтенков Д.* Холодная горячая точка: армия и флот возвращаются на арктические рубежи. (Опубликовано 27 июня 2016). URL: https://vpk-news.ru/articles/31210?utm_source=warfiles.ru (дата обращения: 11.12.2020).

2. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2018 год. М. : Росгидромет, 2019. 79 с.

3. *Мазуркин П. М.* Факторный анализ и прогноз месячной динамики температуры с 1879 по 2017 годы по данным Hadley centre Central England temperature (HadCET) // Точная наука. Кемерово : Плутон, 2019. Вып. 47. С. 17–36. URL: www.t-nauka.ru.

4. *Мазуркин П. М.* Факторный анализ и прогноз суточной динамики температуры с 2010 по 2018 год по данным Hadley centre Central England temperature (HadCET) // Точная наука. Кемерево : Плутон, 2019. Вып. 47. С. 37–50. URL: www.t-nauka.ru.

5. *Мазуркин П. М.* Экономико-статистическое моделирование : учеб. пособие с грифом УМО РАЕ. Йошкар-Ола : Поволжский ГТУ, 2016. 276 с.

6. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. М. : Росгидромет, 2008. 29 с.

7. Causes of variability in long-term warming. URL: https://www.metoffice.gov.uk/research/news/2018/causes-of-variability-in-long-term-warming-since-the-late-19th-century.

8. Causes of irregularities in trends of global mean surface temperature since the late 19th century // C. K. Folland [et al.] *Science advances*. 2018. Vol. 4, N 6. eaao5297. DOI: 10.1126/sciadv.aao5297.

9. Nonlinear climate sensitivity and its implications for future greenhouse warming / T. Friedrich [et al.] // Sci Adv. N 2 (11). e1501923. https://doi.org/10.1126/sciadv.1501923.

10. *Jenkins A.* The Ups and Downs of Global Warming. NASA Global Climate Change. URL: https://www.nasa.gov/topics/earth/features/upsDownsGlobalWarming.html.

11. “Heat island” of the Moscow agglomeration and the urban-induced amplification of of global warming // A. Kislov [et al.] // Vestnik MGU. Serija V, Geografia. 2017. URL: https://www.researchgate.net/publication/320057275.

12. *Mazurkin P. M.* Methods for the identification of asymmetric wavelets and factor analysis on the example of the monthly dynamics of the greenhouse gases of Antarctica // International Journal of Development Research. 2019. Vol. 09, Issue, 11. P. 31081–31098.

13. *Mazurkin P. M.* Wavelet Analysis Statistical Data // Advances in Sciences and Humanities. 2015. Vol. 1, N 2. P. 30–44. https://doi.org/10.11648/j.ash. 20150102.11.

14. *Mazurkin P. M.* Wavelet analysis of annual dynamics of maximum temperature from 1878 to 2017 and forecast data Hadley center Central England temperature (Hadcet) // International Journal of Current Research. 2019. N 11 (09). P. 7315–7324. https://doi.org/10.24941/ijcr.36626.09.2019.

15. *Mazurkin P. M., Kudryashova A. I.* Quantum meteorology (2019) International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM, 19 (5.1). P. 619–627. https://doi.org/10.5593/sgem2019/5.1/S20.077 (Scopus).

16. The Modern Temperature Trend. The Discovery of Global Warning. February 2019. URL: https://history.aip.org/climate/20ctrend.htm.

17. Study suggests three periods of global warming slowdown since 1891 due to natural temporary causes. By Bob Yirka, phys. org. URL: Https://phys.org/news/2018-06-periods-global-slowdown-due-natural.html.

18. Trends in atmospheric patterns conducive to seasonal precipitation and temperature extremes in California // D. L. Swain [et al.] // Sci. Adv. 2016. N 2. e1501344.

19. On the time-varying trend in global-mean surface temperature / Z. Wu [et. al.] // Clim dyn. 2011. Vol. 37. P. 759. URL: Https://doi.org/10.1007/s00382-011-1128-8.

20. *Zharkova V.* The solar magnet field and the terrestrial climate. URL: https://watchers.news/2018/11/11/valentina-zharkova-solar-magnet-field-and-terrestrial-climate-presentation/ (дата обращения: 01.03.2019).

УДК 551.583.1

Использование глобальных связей для долгосрочного прогноза Эль-Ниньо – Ла-Нинья

И. В. Серых (iserykh@ocean.ru), Д. М. Сонечкин (dsonech@yandex.ru)

Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва

Аннотация. Опираясь на предположение нехаотичности Эль-Ниньо – Южного колебания, исследуется его предсказуемость. При этом рассматривается недавно обнаруженная так называемая Глобальная атмосферная осцилляция (ГАО). Считая ГАО главной модой короткопериодных климатических вариаций, определяются индексы, характеризующие динамику и взаимосвязь внетропических и тропических компонент ГАО. Среди этих индексов находится один, с помощью которого оказывается возможным предсказывать Эль-Ниньо и Ла-Нинья с заблаговременностью в 12 месяцев, т. е. преодолевая весенний предел предсказуемости Эль-Ниньо. Затем с помощью вейвлетов выявляется диапазон временных масштабов, внутри которого имеют место наиболее тесные кросс-корреляции этого индекса-предиктора с индексом, характеризующим Эль-Ниньо – Южное колебание.

Ключевые слова: Прогноз Эль-Ниньо и Ла-Нинья, весенний предел предсказуемости, Глобальная атмосферная осцилляция, вейвлетный анализ, воздействие внешних сил, странный нехаотический аттрактор.

Введение

В работах [5–8; 13] была подвергнута проверке та точка зрения, что в возникновении пиков в спектрах процессов Эль-Ниньо – Южного колебания (ЭНЮК) повинны неравномерности вращения Земли. Проверка выполнена на доступных сейчас тщательно выверенных рядах инструментальных метеорологических наблюдений и их, так называемых, ре-анализах, т. е. рядах наблюдений, пропуски и внутренние несогласованности которых были исключены с помощью современных гидродинамических моделей общей циркуляции атмосферы. В результате все основные пики спектральной плотности в диапазоне временных масштабов от года до примерно десятилетия были соотнесены с тремя внешними периодическими воздействиями на климатическую систему: 1) Чандлеровским колебанием полюсов; 2) лунно-солнечной нутацией; 3) циклом солнечной активности. Главные периоды этих внешних воздействий составляют ~1,2, ~18,6 и ~11,5 года соответственно. По-видимому, они несоизмеримы друг с другом. Так что они воздействуют на климатическую систему, как бы, невпопад, и вместо хаоса порождают очень сложные, кажущиеся случайными вариации, среди которых наиболее известны «ритмы» ЭНЮК.

Коль скоро вышеуказанные периоды действительно несоизмеримы, уместно проверить гипотезу, что математическим образом этих короткопериодных вариаций климата является странный нехаотический аттрактор (СНА), обнаруженный математиками в конце XX в. в решениях простых нелинейных динамических систем, возбуждаемых двумя внешними силами с несоизмеримыми периодами. Гипотеза СНА привлекательна тем, что допускает предсказание будущего поведения рассматриваемой динамической системы без каких-либо ограничений, по крайней мере, в принципе.

Анализ, выполненный в [6–8; 13], показал, что пики в спектрах ЭНЮК и даже некоторых метеорологических процессов, развивающихся во внетропических широтах Земли, действительно имеют свойства, присущие спектрам СНА-динамики. Целью настоящей работы является продемонстрировать, что, благодаря СНА-характеру междугодовых климатических вариаций, Эль-Ниньо может быть предсказано с заблаговременностью более года. Что превосходит весенний предел предсказуемости существующих методов успешных прогнозов Эль-Ниньо.

Данные и методы

В [6–8; 13] было доказано, что ритмичность ЭНЮК не является изолированным региональным явлением, а есть часть некоторого общепланетарного процесса, названного по этой причине Глобальной Атмосферной Осцилляцией (ГАО) [1–3; 9–10; 14]. Пространственная структура ГАО была определена как средняя разность в среднемесячных полях давления на уровне моря и приповерхностной температуры, имеющих место при событиях Эль-Ниньо и противоположных им событиях Ла-Нинья. Ее можно охарактеризовать всего одним числом – Индексом ГАО, который вычисляется как алгебраическая сумма нормированных значений аномалий давления на уровне моря в десяти географических районах, совпадающих с экстремумами (максимумами и минимумами) в поле ГАО [14]. Индекс ГАО = (5° ю. ш. – 5° с. ш., 35°–25° з. д.) + (5° ю. ш. – 5° с. ш., 55°–65° в. д.) + (55°–65° с. ш., 95°–85° з. д.) + (65°–55° ю. ш., 95°–85° з. д.) + (5° ю. ш. – 5° с. ш., 145°–155° в. д.) – (45°–55° с. ш., 175°–165° з. д.) – (45°–55° с. ш., 15°–5° з. д.) – (55°–45° ю. ш., 15°–5° з. д.) – (55°–45° ю. ш., 175°–165° з. д.) – (5° ю. ш. – 5° с. ш., 95°–85° з. д.). При Эль-Ниньо этот индекс является положительным, а при Ла-Нинья – отрицательным.

Среди выбранных районов есть два, которые приходятся на канонические районы Южного Колебания. Это районы с координатами (5° ю. ш. – 5° с. ш., 145°–155° в. д.) и (5° ю. ш. – 5° с. ш., 95°–85° з. д.). Значения аномалий давления на уровне моря в этих районах сильно отличаются от нуля. Поэтому может показаться, что именно они определяют значения Индекса ГАО. Если бы это имело место в реальности, то Индекс ГАО был бы не более чем отличным от ранее предложенных индексов Южного Колебания.

Действительно, если подсчитать индекс Эль-Ниньо (будем называть его Расширенным Океаническим Индексом Эль-Ниньо – EONI) как средние аномалии приповерхностной температуры в приэкваториальной полосе Тихого океана (5° ю. ш. – 5° с. ш., 170°–80° з. д.), то кросс-корреляции между временными вариациями Индекса ГАО и EONI оказываются максимальными при нулевом фазовом сдвиге между этими вариациями, т. е. вариации происходят синхронно во времени. Величина этой максимальной кросс-корреляции очень велика (0,9) [11]. Учитывая, что исходные метеорологические данные, использованные в выбранном для анализа в данной работе NCEP/NCAR Reanalysis [12], отягощены ошибками наблюдений, которые должны уменьшать связь между рассматриваемыми индексами, можно заключить, что между процессами ГАО и Эль-

Ниньо на межгодовых периодах фактически имеется взаимно однозначная (функциональная) связь.

Чтобы убедиться, что процессы ГАО и ЭНЮК все же не являются тождественными, определим еще один индекс ГАО, обозначаемый далее, как внетропический индекс ГАО (EGAO). Этот индекс отличается от Индекса ГАО тем, что при его подсчете районы Южного колебания с координатами (5° ю. ш. – 5° с. ш., 145°–155° в. д.) и (5° ю. ш. – 5° с. ш., 95°–85° з. д.) исключаются из рассмотрения. Также из EGAO исключаются все остальные регионы, расположенные в тропиках: (5° ю. ш. – 5° с. ш., 35°–25° з. д.) и (5° ю. ш. – 5° с. ш., 55°–65° в. д.). Синхронная кросс-корреляция между индексом EGAO и EONI тоже оказывается очень велика (0,8) [13], но все же меньше, чем между Индексом ГАО и EONI.

Проведенное вейвлетное преобразование рядов EONI и EGAO позволило выяснить, вариации каких временных масштабов определяют эту большую кросс-корреляцию [4]. Из нее можно заключить, что динамика внетропических компонент ГАО и EONI, т. е. Эль-Ниньо, отнюдь не тождественна. Между этими процессами существует очень большое сходство в диапазоне временных масштабов от примерно года до примерно десятилетия. Однако поведение EGAO и EONI в масштабах нескольких десятилетий является различным.

Осцилляторный характер графиков кросс-корреляций EONI и EGAO свидетельствует, что синхронизация между внетропическими компонентами ГАО и ЭНЮК является фазовой. Можно считать, что она определяется внешним периодическим форсингом глобальной климатической системы за счет чандлеровского колебания полюсов Земли, воздействующим и на ГАО и на ЭНЮК [6–8; 13]. Это является очень важным заключением, ибо до настоящего времени было принято считать, что сами процессы ЭНЮК влияют на процессы, происходящие почти всюду на Земле, зачастую весьма далеко от приэкваториальной полосы Тихого океана. Иными словами, было принято истолковывать наличие тесных кросс-корреляций между различными индексами ЭНЮК и индексами внетропических атмосферных процессов в причинно-следственном смысле.

Однако еще много лет назад А. Н. Колмогоров предупреждал против истолкования синхронных корреляционных связей между различными переменными в терминах причин и следствий. При рассмотрении проблемы взаимосвязи между процессами ЭНЮК и внетропическими процессами в глобальной климатической системе естественно посчитать, что имеет место вынужденная синхронизация, когда обе подсистемы находятся под воздействием одной и той же внешней периодической силы. Такая синхронизация отличается от часто рассматриваемой внутренней синхронизации нелинейных осцилляторов, связанных друг с другом (известный эффект Гюйгенса). Конечно, процессы ЭНЮК взаимодействуют с внетропическими процессами. Однако эти взаимодействия являются очень слабыми, например, влияние Эль-Ниньо на процессы в Северной Атлантике или, наоборот, влияние Северной Атлантики на Эль-Ниньо. Скорее не взаимодействия между различными климатическими процессами, а общие внешние форсинги определяют наблюдаемую синхронизацию.

Как уже говорилось выше, одним из важных форсингов является чандлеровское колебание полюсов Земли. Как было установлено еще во второй половине XX в., это колебание возбуждает в атмосфере и океанах приливные волны, распространяющиеся с запада на восток противофазно в умеренных широтах обоих полушарий. Недавно, путем анализа спутниковых данных температуры и альтиметрии водной поверхности Тихого океана было показано, что волна северотихоокеанского «полюсного» прилива, после отражения от западных берегов Центральной Америки, возбуждает положительные аномалии температуры и уровня поверхности Тихого океана [13]. То есть аномалии характерные для Эль-Ниньо, которое является основным элементом ритмов ЭНЮК.

Континенты не являются непреодолимым препятствием для западно-восточного распространения атмосферных «полюсных» приливов. Поэтому можно ожидать, что в динамике внетропических компонент ГАО, коль скоро ГАО форсируется чандлеровским колебанием полюсов Земли, тоже будет наблюдаться западно-восточное смещение. При рассмотрении временных изменений пространственной структуры ГАО в полях давления на уровне моря и приповерхностной температуры такое смещение действительно было найдено [14]. После нескольких проб удалось определить индекс, величина которого наиболее четко представляет это смещение. Назовем этот индекс – предиктор Глобальной Атмосферной Осцилляции (PGAO). Он вычисляется как алгебраическая сумма средних нормированных аномалий приземного давления (P) и температуры (T) в 15 географических районах (рис. 1): PGAO = T(20°–50° с. ш., 160°–130° з. д.) + T(35°–25° ю. ш., 160°–80° з. д.) + T(65°–45° ю. ш., 150° в. д. – 160° з. д.) + T(65°–45° ю. ш., 60° з. д. – 0°) + T(40°–70° с. ш., 90° в. д. – 180°) – T(30° ю. ш. – 30° с. ш., 60° з. д. – 180°) – T(60°–31° ю. ш., 90°–120° в. д.) – T(31°–60° с. ш., 100°–40° з. д.) + P(50°–70° с. ш., 170° в. д. – 120° з. д.) + P(70°–50° ю. ш., 170° в. д. – 120° з. д.) + P(60° ю. ш. – 20° с. ш., 40°–80° в. д.) + P(30° ю. ш. – 30° с. ш., 70°–10° з. д.) – P(0°–40° с. ш., 120° в. д. – 120° з. д.) – P(45°–25° ю. ш., 120° в. д. – 60° з. д.) – P(50°–70° с. ш., 50°–90° в. д.).

Используя индекс PGAO, основанный на западно-восточном распространении ГАО, мы далее продемонстрируем возможность прогноза событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья с заблаговременностью примерно в 12 месяцев, т. е. с преодолением известного для традиционных прогнозов Эль-Ниньо весеннего предела предсказуемости.

Результаты

Для различных временных сдвигов были рассчитаны кросс-корреляции между PGAO и EONI [13; 14]. Основной максимум кросс-корреляций возникает, когда вариации PGAO предшествуют вариациям EONI примерно на 12 месяцев. Величина основного максимума кросс-корреляций очень велика (0,7). Используя это, можно предсказать значение EONI, т. е. возникновение Эль-Ниньо или Ла-Нинья, с приблизительно годовой заблаговременностью. Часть объясненной общей изменчивости EONI при этом составляет почти 50 %. Таким образом, этот прогноз может быть довольно успешным.

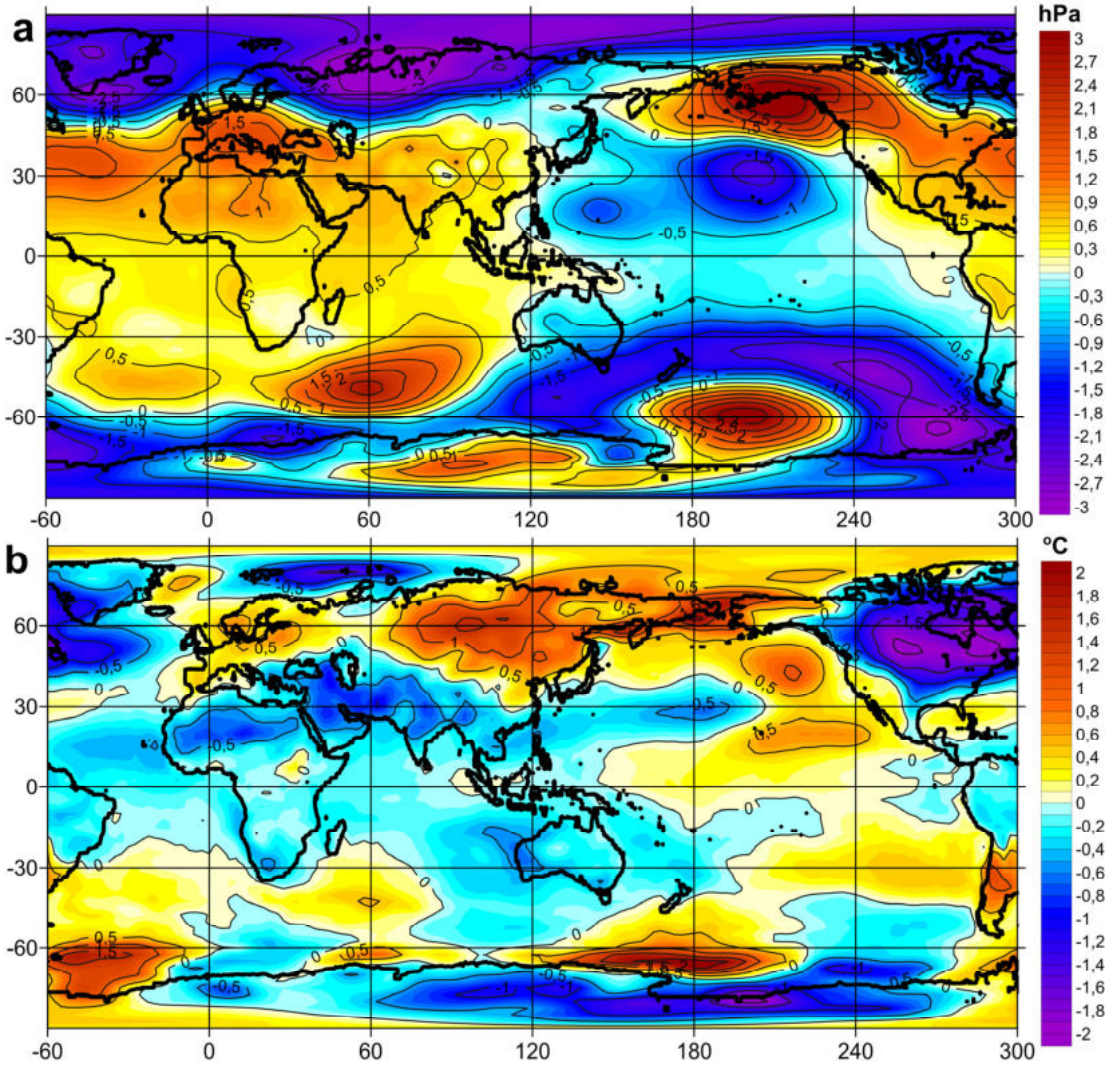


Рис. 1. Поля средних аномалий атмосферного давления на уровне моря (a) и температуры воздуха у поверхности (b) за 12 месяцев до кульминации событий Эль-Ниньо, когда пространственная структура Глобальной атмосферной осцилляции начинает трансформироваться из отрицательной в положительную фазу

Чтобы определить, как связи между PGAO и EONI зависят от временного масштаба, мы использовали технику кросс-вейвлетного анализа между временными рядами PGAO и EONI [4; 15]. В верхней части рис. 2 показаны временные ряды PGAO и EONI. Из них ясно видно, что почти все локальные максимумы и минимумы EONI запаздывают примерно на один год относительно максимумов и минимумов PGAO.

Кросс-вейвлетная диаграмма временных рядов PGAO и EONI, показанная на рис. 2 внизу, соответствует временному сдвигу ряда PGAO на 12 месяцев вперед. На ней можно увидеть слабые связи между PGAO и EONI в диапазоне короткопериодных временных масштабов (менее 2 лет). Это неудивительно, поскольку ряд PGAO сдвинут на 12 месяцев вперед, и поэтому все короткопериодные экстремумы исследуемых рядов оказались разнесены по времени. Но при этом существуют довольно сильные связи на временных масштабах вейвлетов более 2 лет, особенно в диапазоне от 2 до 10 лет.

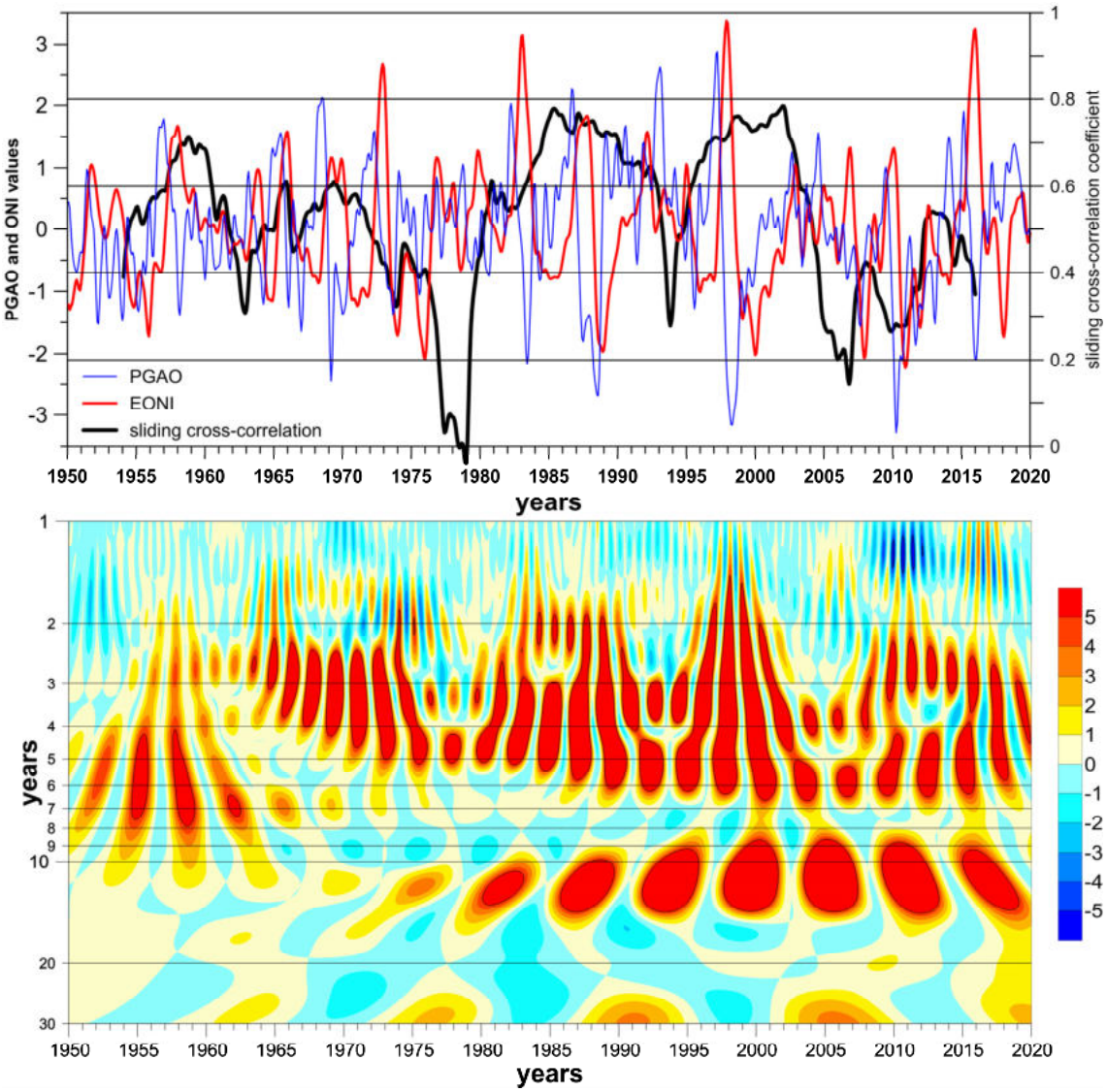


Рис. 2. Графики Расширенного Океанического Индекса Эль-Ниньо (EONI) (красный) и индекса-предиктора Глобальной Атмосферной Осцилляции (PGAO) (синий), сглаженные 5-месячным скользящем средним, детрендированные, центрированные и нормализованные на их стандартные отклонения за период 1950–2019 (вверху). Черная линия – значения скользящих кросс-корреляций этих индексов с окном 8 лет и PGAO смещенным вперед на 12 месяцев. Кросс-вейвлетная диаграмма этих индексов без фильтрации с PGAO смещенным вперед на 12 месяцев (внизу). Красные области диаграммы соответствуют синфазному поведению, а синие – противофазному поведению сопоставляемых вариаций

Следовательно, изменения во временных рядах PGAO и EONI на соответствующих временных масштабах находятся в фазе при условии, что временной ряд PGAO опережает временной ряд EONI. Другими словами, предсказания значений ряда EONI, основанные на значениях ряда PGAO, измеренных 12 месяцами ранее, были бы весьма успешными. Учитывая динамику ГАО и ЭНЮК как динамику СНА, возможно дальнейшее увеличение времени прогноза до нескольких лет, по крайней мере, в принципе.

Единственными исключениями являются интервалы календарных лет 1975–1980, 1993–1994 и 2003–2008, в которых на кросс-вейвлетной диаграмме рис. 2 преобладают слабые или даже отрицательные связи между PGAO и

EONI. Поэтому прогнозы, сделанные для этих интервалов, будут неудачными. К счастью, во все эти интервалы имели место только слабые события Эль-Ниньо и Ла-Нинья, а также нейтральные состояния. Таким образом, можно было бы ожидать, что предсказания сильных событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья всегда будут успешными.

Для конкретных прогнозов Эль-Ниньо и Ла-Нинья представляется полезным рассмотреть вопрос о том, насколько высоки значения скользящих кросс-корреляций между временным рядом PGAO и временным рядом EONI, вычисленными как единое целое, т. е. для всего диапазона временных масштабов. Такие скользящие кросс-корреляции временных рядов EONI и PGAO (PGAO сдвинут на 12 месяцев вперед) показаны на рис. 2 вверху. Можно видеть, что скользящие кросс-корреляции довольно высокие (0,6–0,8) в периоды сильных событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья. Сильные события Эль-Ниньо 1957/58, 1965/66, 1968/69, 1972/73, 1982/83, 1986/87, 1997/98, 2009/10 и 2015/16 прогнозируются успешно. Также успешно прогнозируются сильные события Ла-Нинья 1970/71, 1988/89, 1998/99 и 2010/11. Однако скользящие кросс-корреляции являются низкими, когда процессы ЭНЮК близки к нейтральным. В этих случаях некоторые экстремумы EONI не прогнозируются. Например, сбой в предсказании Эль-Ниньо 1976/77, что может быть связано с фазовым переходом Тихоокеанского десятилетнего колебания в эти годы [11]. Таким образом, подтверждается, что экстремумы процессов ЭНЮК более предсказуемы, чем их околонейтральные состояния.

Заключение

Пересмотрена общепринятая парадигма ограниченной предсказуемости изменений погоды и климата. Для этого используется предположение о странной нехаотичности короткопериодных (от одного года до одного десятилетия) климатических изменений. Это предположение уже использовалось ранее для анализа временных спектров Эль-Ниньо – Южного колебания (ЭНЮК) [5–8; 13].

В качестве основного сигнала короткопериодных климатических изменений рассмотрена недавно обнаруженная так называемая Глобальная Атмосферная Осцилляция (ГАО), которая включает в себя как процессы ЭНЮК, так и хорошо известные внетропические моды климатической изменчивости [1–3; 9–10; 14].

Определены индексы, характеризующие ГАО и ЭНЮК, в том числе индекс-предиктор ГАО (PGAO), временная эволюция которого предшествует временной эволюции индекса Эль-Ниньо (EONI) [14]. Используя вейвлет-технику для анализа кросс-корреляций между временными рядами PGAO и EONI, выявлены диапазоны временных масштабов, в которых существуют тесные связи между ГАО и ЭНЮК [4; 15].

Как продемонстрировано в ряде ранее опубликованных работ [5–8; 13], глобальная климатическая система на межгодовых периодах находится под влиянием нескольких внешних сил: 1) Чандлеровского колебания полюсов; 2) Лунно-солнечной нутации; 3) Цикла солнечной активности. Главные периоды этих внешних воздействий составляют ~1,2, ~18,6 и ~11,5 года соответственно. По-видимому, они несоизмеримы друг с другом.

Коль скоро это так, они воздействуют на климатическую систему, как бы, невпопад, и вместо хаоса порождают очень сложные, кажущиеся случайными вариации, математическим образом которых является странный нехаотический аттрактор.

Принимая во внимание эти силы, а также западно-восточное распространение пространственной структуры ГАО, оказалось возможным предсказать значение EONI с заблаговременностью приблизительно 12 месяцев, т. е. с преодолением весеннего предела предсказуемости Эль-Ниньо. Показана эффективность предсказаний Эль-Ниньо и Ла-Нинья с помощью PGAO в качестве единственного предиктора.

Список литературы

1. О проявлении эффекта Эль-Ниньо в Индийском океане / В. И. Бышев, Ю. А. Иванов, В. Г. Нейман, Ю. А. Романов, И. В. СерыхЮ, В. Е. Скляров, А. Д. Щербинин // Доклады Академии наук. 2008. Т. 418, № 3. С. 391–396.

2. О глобальном характере явления Эль-Ниньо в климатической системе Земли / В. И. Бышев, Н. В. Нейман, Ю. А. Романов, И. В. Серых // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2011. Т. 8, № 4. С. 200–208.

3. Роль Глобальной атмосферной осцилляции в формировании климатических аномалий Дальневосточного региона России / В. И. Бышев, В. Г. Нейман, В. И. Пономарев, Ю. А. Романов, И. В. Серых, Т. В. Цурикова // Доклады Академии наук, 2014. Т. 458, № 1. С. 92–96.

4. *Вакуленко Н. В., Серых И. В., Сонечкин Д. М.* Хаос и порядок в атмосферной динамике. Часть 3. Предсказуемость Эль-Ниньо // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2018. Т. 26, № 4. С. 75–94.

5. *Серых И. В., Сонечкин Д. М.* Хаос и порядок в атмосферной динамике. Часть 1. Хаотические вариации погоды // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика, 2017. Т. 25, № 4. С. 4–22.

6. *Серых И. В., Сонечкин Д. М.* Хаос и порядок в атмосферной динамике. Ч. 2. Междугодовые ритмы Эль-Ниньо – Южного колебания // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика, 2017. Т. 25, № 5. С. 5–25.

7. *Серых И. В., Сонечкин Д. М.* Сопоставление временных энергетических спектров индексов Эль-Ниньо – Южного колебания и глобальных полей температуры и атмосферного давления в приповерхностном слое // Фундаментальная и прикладная климатология. 2017. Т. 2. С. 144–155.

8. *Серых И. В., Сонечкин Д. М.* О проявлениях движений полюсов Земли в ритмах Эль-Ниньо – Южного колебания // Доклады Академии наук. 2017. Т. 472, № 6. С. 716–719.

9. *Серых И. В.* О динамике и структуре Глобальной атмосферной осцилляции в климатических моделях и реальности // Океанологические исследования, 2018. Т. 46, № 1. С. 14–28.

10. Global atmospheric oscillation in troposphere and lower stratosphere / И. В. Серых, Д. М. Сонечкин, В. И. Бышев, В. Г. Нейман, Ю. А. Романов // Системы контроля окружающей среды. 2018. № 13 (33). С. 70–78.

11. Multi-decadal oscillations of the ocean active upper-layer heat content / V. I. Byshev, V. G. Neiman, M. V. Anisimov, A. V. Gusev, I. V. Serykh, A. N. Sidorova, A. L. Figurkin, I. M. Anisimov // Pure and Applied Geophysics. 2017. Vol. 174, N 7. P. 2863–2878.

12. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project / E. Kalnay [et al.] // Bull. Amer. Meteor. Soc. 1996. Vol. 77. P. 437–471.

13. *Serykh I. V., Sonechkin D. M.* Nonchaotic and globally synchronized short-term climatic variations and their origin // Theoretical and Applied Climatology, 2019. Vol. 137. P. 2639–2656.

14. Global Atmospheric Oscillation: An Integrity of ENSO and Extratropical Teleconnections / I. V. Serykh, D. M. Sonechkin, V. I. Byshev, V. G. Neiman, Yu. A. Romanov // Pure and Applied Geophysics. 2019. Vol. 176, N 8. P. 3737–3755.

15. *Serykh I. V., Sonechkin D. M.* El Niño forecasting based on the global atmospheric oscillation // International Journal of Climatology. 2020. https://doi.org/10.1002/joc.6488.

УДК 551.581+551.583+523.2

Среднегодовые палеотемпературы на поверхности Земли

И. И. Смульский (JSmulsky@mail.ru)

Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, Федеральный исследовательский центр, г. Тюмень

Аннотация. На основании среднеширотных температур Земли, полученных разными авторами, предложен обобщенный профиль годовой температуры в современную эпоху. Представлены профили годовой инсоляции Земли в экстремальные эпохи на интервале последних 50 тыс. лет. Введена среднеширотная поверхностная теплоемкость Земли, которая определена по широтному изменению температуры и инсоляции в современную эпоху и по временному изменению инсоляции. С помощью теплоемкости определены профили среднеширотных палеотемператур в три экстремальные эпохи. Приведены оценки локальных палеотемператур.

Ключевые слова: Среднеширотная температура, инсоляция, теплоемкость, палеотемпература, палеоклимат, ледниковые периоды.

1. Введение

Количество солнечного тепла за год, или, по-другому, годовая инсоляция по широте Земли изменяется от максимального значения на экваторе до минимального – на полюсах. Поэтому среднегодовая температура на поверхности Земли также изменяется от максимальной на экваторе до минимальной на полюсах. Распределение годовой инсоляции по поверхности Земли, зависящее от параметров ее орбитального и вращательного движений, точно рассчитывается [5]. Согласно Астрономической теории изменения климата [6] со временем параметры орбиты и оси вращения Земли изменяются, что приводит к изменению распределения тепла, а, следовательно, и температуры по ее поверхности. Поэтому, если будет известна зависимость годовой температуры от годовой инсоляции, то по рассчитанным изменениям последней в отдаленную эпоху, можно будет определить изменение температуры по поверхности Земли в эту эпоху.

2. Изменение среднегодовой температуры по поверхности Земли в современную эпоху

Герхард Крамм и др [11] проанализировали все работы, начиная с 1852 г., по определению распределения годовой температуры по широте Земли, привели их к одним и тем же стандартным величинам и представили на одном графике в виде зависимости температуры от широты $t(\varphi)$. На основании этих данных методом последовательных приближений мы определили обобщенный профиль среднегодовой температуры $t_{o,i}(\varphi)$, рис. 1 показанный точками на рис. 1.

Величина $t_{o,i}(\varphi)$ является средней по всем долготам среднегодовой температурой приземного слоя воздуха на широте φ, т. е. это – среднеширотная температура. В каждой конкретной местности на широте φ локальная среднегодовая температура $t_l(\varphi)$ отличается от $t_{o,i}(\varphi)$.

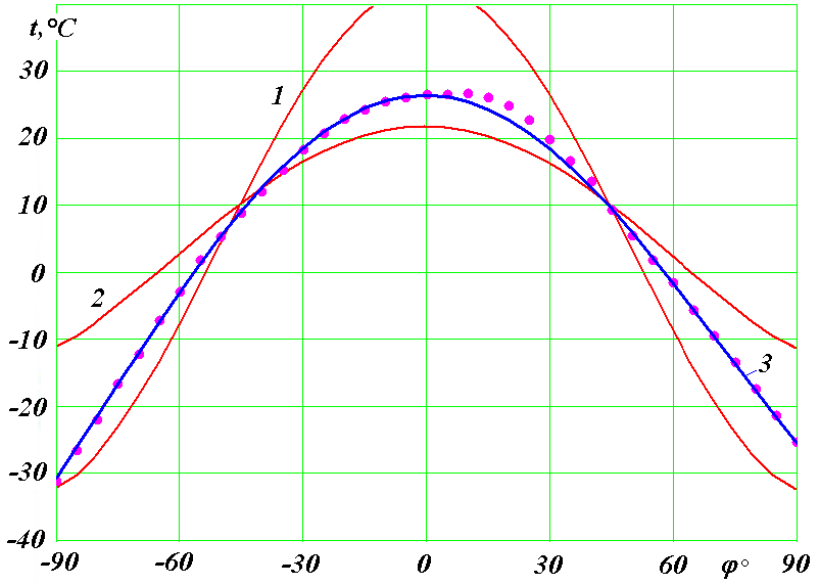


Рис. 1. Сравнение обобщенной среднегодовой температуры $t_{o,i}$ (точки) с зависимостями (1) Форбеса (Forbes) [7] (линии 1 и 2) и гармонической аппроксимацией (2) (линия 3): линия 1 представляет профиль температуры в предположении твердой поверхности Земли; линия 2 – поверхность Земли покрыта водой. φ = 90° – Северный полюс; φ = –90° – Южный полюс

Среднеширотную температуру $t_{o,i}(\varphi)$ мы определили через 5° в 37 точках, т. е. $t_{o,i}(\varphi)$, где $i = 1, 2, \ldots, I_f$; $I_f = 37$. Максимальное значение среднегодовой температуры равно $t_{o,17} = 26{,}71$°C на широте $\varphi_{17} = 10°$. На Южном полюсе температура имеет минимальное значение $t_{o,37} = -31.12$°C, в то время как на Северном полюсе $t_{o,1} = -25{,}3$°C. Обобщенное распределение температуры $t_{o,i}$ будем относить к современной эпохе 30.12.1949 с юлианским днем $JD_0 = 2432280{,}5$.

Более удобным для применения являлось бы распределение температуры в виде непрерывной зависимости, выраженной простой функцией. Например, в статье [11] обсуждается формула Форбеса (Forbes) [8]:

$$t_F(\varphi) = A + B\cdot(\cos\varphi)^m + C\cdot n\cdot\cos(2\varphi), \qquad (1)$$

где A = -10,8 °C; B = 32,9 °C; C = 21,2 °C; m = 1,25. Эту формулу Форбес предложил для Северного полушария. При этом коэффициент n = 1, если поверхность Земли является сушей, а для Земли, полностью покрытой океаном, n = 0.

На рис. 1 линиями *1* и *2* приведены температуры Форбеса $t_F(\varphi)$ согласно (1). Для Земли, полностью покрытой сушей, т. е. при n = 1 и линия *1* на рис. 2, изменения температуры от полюсов до экватора в два раза больше, чем для Земли, покрытой океаном (линия *2*). На широте 45° температуры у этих двух моделей температуры Земли совпадают между собой и со среднегодовой температурой $t_{0,i}$, обобщающей результаты наблюдения.

По аналогии с формулой (1), температура $t_{0,i}$ была нами аппроксимирована зависимостью, состоящей из двух гармоник:

$$t_{oa} = k_1 + k_2\cdot\sin(k_3\cdot\varphi + k_4) + k_5\cdot\sin(k_6\cdot\varphi + k_7), \qquad (2)$$

Значения коэффициентов приведены в таблице 1.

Таблица 1

Значение коэффициентов годовой температуры (2),

k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_7
–48,841 °С	47,840 °С	0,12389	0,81818	40,602 °С	1,2165	1,6566

На рис. 1 аппроксимирующая зависимость (2) показана линией *3*. Среднее ее отличие от индексированной годовой температуры $t_{0,i}$, составляет 0,44 °С, а наибольшее равно 2 °С на широте φ = 20°. Из графика температуры $t_{0,i}$ на рис. 1 следует, что на широтах Северного полушария от 10° до 30° годовая температура на 1–2 °С выше по сравнению с теми же широтами Южного полушария. По-видимому, это обусловлено тем, что в Северном полушарии сушей занята большая часть поверхности Земли по сравнению с Южным полушарием. Аппроксимирующую зависимость (2) применялась нами для проверки различных вычислений.

Представленные Герхардом Краммом и др. [11] 15 зависимостей по широте φ среднегодовой температуры имеют некоторый разброс. Чтобы оценить достоверность этих зависимостей авторы [11] рассчитали по ним среднегодовые температуры Земли t_E и полушарий: Северного (t_{NH}) и Южного (t_{SH}). Эти температуры изменяются в Северном полушарии (t_{NH}) от 12,5 до 15,3 °С, в Южном (t_{SH}) – от 10,9 до 15,3 °С и для Земли в целом (t_E) – от 11,7 до 15 °С.

Следует отметить, что современное значение средней температуры Земли принято 15 °С. Согласно Герхарду Крамму и др. [11] это значение было предложена Ханном (Hann) [9] и Безольдом (Bezold) [14; 15]. В работе [11] значение t_E = 15°С получено по данным Феррела (Ferrel) [7], и оно является наибольшим.

Современные средние температуры Земли и полушарий для интервала 1991–2018 гг. получены тремя группами исследователей: 1) объединенными усилиями Метеобюро Хэдли-центра и Университета Восточной Англии (Ukmet Office Hadly Centre and University of East Climatic Reseach Unit) (HadCRU) [12] в виде набора HadCrut4; 2) Беркелей (Berkeley) набор [13]; 3) Институт космических исследований им. Годдарда в NASA (NASA Goddard Institute for Space Studdies) [10] в виде набора NASA GISS. В табл. 2 с ними сопоставлены температуры, рассчитанные нами по обобщенной температуре $t_{o,i}(\varphi)$. Как видно, они практически не отличаются от средней температуры Земли и полушарий, полученных современными авторами. Поэтому можно считать, что обобщенное распределение температуры по широте Земли $t_{0,i}$, основанное на всех имеющихся исследованиях, достоверно отображает широтное изменение температуры в современную эпоху.

Таблица 2

Средняя приземная температура Северного (t_{NH}) и Южного (t_{SH}) полушарий и Земли в целом (t_E) согласно работам современных авторов за период 1991–2018 гг. [11] и согласно обобщенному распределению температуры $t_{o,i}$

№, п/п	Наборы данных	Среднегодовая приземная температура полушарий и Земли в °С		
		t_{NH}	t_{SH}	t_E
1	HadCRUT4	15,2	13,7	14,4
2	Berkeley	–	–	14,5
3	NASA GISS	15,2	13,7	14,5
4	По обобщенной температуре $t_{o,i}$	15,10	13,73	14. 41

3. Распределение годовой инсоляции по широте Земли

Под инсоляцией Земли понимается количество тепла, поступающего от Солнца на 1 м^2 земной поверхности за определенный период времени, например за летнее (Q_s) или зимнее (Q_w) полугодия или за год в целом (Q_T). В настоящей работе будет рассматриваться годовая инсоляции Q_T. Первый вариант астрономической теории изменения климата, созданной почти 100 лет назад Милутином Милановичем [2], не учитывал эволюцию вращательного движения Земли. Поэтому изменения инсоляции Земли в этом варианте не могли объяснить изменения палеоклимата [1; 3]. В новой астрономической теории [5; 6] изменения инсоляции определялись с учетом эволюции вращательного движения Земли. Полученные в ней колебания инсоляции, как по амплитудам, так и по моментам наступления потеплений и похолоданий совпадают с соответствующими изменениями палеоклимата [4].

В работах [4–6] установлено, что в разные эпохи годовая инсоляции Q_T значительно изменяется по широте. Однако на широте 45º она практически неизменна и с точностью до 4 знаков равна $Q_{T0}^{45} = 9{,}932 \cdot 10^6$ кДж/м^2. Поэтому величина Q_{T0}^{45} может быть принята за характеристику облучения Земли Солнцем. Следует отметить, что это значение Q_{T0}^{45} расчитано при солнечной постоянной $J_0 = 2$ кал/(см^2·мин) = 1,3956 кВт/м^2, которое было использовано М. Миланковичем.

В дальнейшем будем рассматривать годовую инсоляцию в безразмерных единицах $Q_{Tu} = Q_T / Q_{T0}^{45}$. На рис. 2 безразмерная годовая инсоляции Q_{Tu} показана для четырех эпох за последние 50 тыс. лет назад (т. л. н.): современной ($T = 0$ kyr) и T = -15,88, -31,28 и 46,44 kyr, где 1 kyr – 1 тысяча лет. Последние три эпохи характеризуются тем, что в них были существенные изменения климата. В эпоху 15,88 т. л. н. в Западной Сибири была середина Сартанского оледенения, 31,28 т. л. н. максимум Каргинского теплого периода, а 46,44 т. л. н. середина Ермаковского ледникового периода [4]. Эти события также происходили в Европе и в Северной Америке, но там они имеют другие названия. Как следует из графиков на рис. 2, величина Q_{Tu} в высоких широтах, в частности на полюсах, изменяется от 0,361 для очень холодного периода 46,44 т. л. н. до 0,748 для очень теплого периода 31,28 т. л. н., т. е. больше чем в два раза. На экваторе изменения количества тепла за год значительно меньше: от $Q_{Tu} = 1{,}306$ в теплую эпоху 31,28 т. л. н. до $Q_{Tu} = 1{,}388$ в ледниковый период 46,44 т. л. н. Это изменение имеет обратное направление, т. е. в экваториальных широтах в холодные эпохи становится теплее. Как видим, основные изменения тепла проходят в высоких широтах.

Приведенная на рис. 2 годовая инсоляция $Q_{Tu}(\varphi)$ представляет в безразмерном виде удельное количество солнечного тепла, поступающего в течение года на единицу площади (1 м^2) Земли на широте φ. По инсоляции $Q_{Tu}(\varphi)$ были рассчитаны количества тепла для всей Земли (Q_{TuE}) и полушарий: Северного (Q_{TuNH}) и Южного (Q_{TuSH}). В табл. 3 они представлены для четырех эпох.

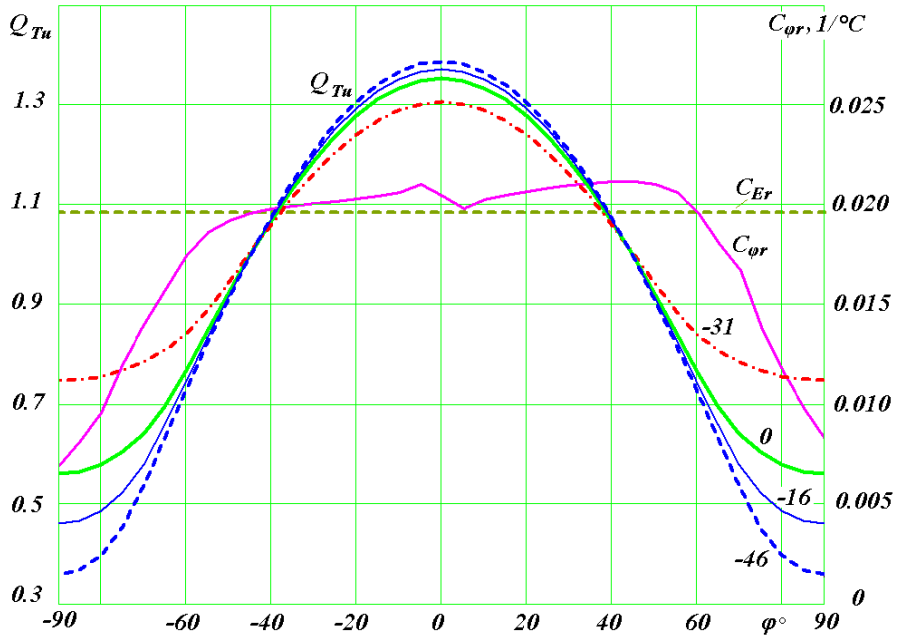


Рис. 2. Изменение по широте Земли φ безразмерной годовой инсоляции Q_{Tu} и относительной приповерхностной теплоемкости Земли $C_{\varphi r}$ в 1/°C. Инсоляции Q_{Tu}, показанные числами: 0, -16, -31, -46, относятся к современной эпохе T = 0 kyr и к трем экстремальным эпохам: T = -15,88; -31,28 и -46,44 kyr, соответственно. 1 kyr – 1 тысяча лет

Таблица 3

Безразмерные удельные годовые инсоляции Земли Q_{TuE} и полушарий Q_{TuNH} и Q_{TuSH} и среднегодовые температуры на экваторе и на полюсах Земли в четыре эпохи Т. Размерные инсоляции к Q_T отнесены к Q_{T0}^{45} = 9,932·10^6 кДж/м^2

T, kyr	Инсоляции Земли и полушарий			Температура в °С на экваторе и полюсах		
	Q_{TuE}	Q_{TuNH}	Q_{TuSH}	0°	90°	-90°
0	1,108676	1,108627	1,108725	26,5	–25,3	–31,1
–15,88	1,108723	1,108670	1,108775	27,4	–37,4	–45,6
–31,28	1,108677	1,108634	1,108720	24,2	–2,65	–4,09
–46,44	1,108601	1,108546	1,108655	28,2	–49,7	–60,2

Как видно из табл. 3, удельная годовая инсоляция Земли Q_{TuE} практически одинакова для всех эпох. В современную эпоху T = 0 kyr с точностью до 4 десятичных знаков она равна Q_{TuE0} = 1,1087. То есть безразмерная удельная годовая инсоляция Земли Q_{TuE0} составляет 1,1087 часть инсоляции на широте 45°, т. е. размерная удельная годовая инсоляция будет:

$$Q_{TE0} = 1{,}1087 \cdot Q_{T0}^{45}. \qquad (3)$$

Удельная годовая инсоляция по полушариям для всех эпох практически не отличается от Q_{TuE0}, за исключением Северного полушария самой холодной эпохи 46,44 т. л. н. Она на 0. 0002 меньше. Общее количество солнечного тепла за год в размерном виде по всей поверхности Земли $4\pi R_{Em}^2$ будет:

$$Q_{TEd} = 4\pi R_{Em}^2 \cdot Q_{TuE0} \cdot Q_{T0}^{45} = 5{,}6105 \cdot 10^{21} \text{ кДж/год}, \qquad (4)$$

где R_{Em} = 6367,5 км – средний радиус Земли.

4. Теплоемкость поверхности Земли

Из физики известно, что приращение количества тепла ΔQ, подводимое к телу, приводит к повышению его температуры на величину Δt:

$$\Delta t = \Delta Q/(m \cdot C), \quad (5)$$

где m – масса тела; C – удельная теплоемкость тела, т. е. теплоемкость на единицу его массы.

Зависимость (5) для температуры тела от количества тепла, подводимого к нему, используем в процессах инсоляции Земли. Так как годовое количество тепла $Q_T(\varphi)$ поступает неравномерно по широте Земли φ, то на каждой ее широте введем удельную теплоемкость поверхности Земли C_φ. Величина C_φ – это теплоемкость единицы поверхности Земли, например, 1 м^2. Поэтому аналогично (5) можно считать, что в современную эпоху на широте $\varphi_2 = \varphi_1 + \Delta\varphi$ за счет изменения количества тепла $Q_{T0}(\varphi_2)$ по сравнению с $Q_{T0}(\varphi_1)$ на широте φ_1 произойдет изменение температуры на величину

$$\Delta t_o = t_o(\varphi_2) - t_o(\varphi_1) = \frac{Q_{T0}(\varphi_2) - Q_{T0}(\varphi_1)}{C_{\varphi 1}}, \quad (6)$$

где индексом “1” в $C_{\varphi 1}$ обозначен первый вариант теплоемкости.

Средняя по широте φ приповерхностная теплоемкость Земли $C_{\varphi 1}$ обусловлена совокупностью физических, химических и географических свойств поверхности Земли на широте φ, к тому же осредненная по всем меридианам. Поэтому можно считать, что при неизменности этих свойств теплоемкость $C_{\varphi 1}$ в другую эпоху будет такой же. Тогда среднегодовую температуру $t(\varphi)$ в эпоху T можно определить с помощью теплоемкости по современной температуре $t_{o,i}(\varphi)$ и изменению тепла $Q_T(\varphi) - Q_{T0}(\varphi)$ так:

$$t(\varphi) = t_{o,i}(\varphi) + \frac{Q_T(\varphi) - Q_{T0}(\varphi)}{C_{\varphi 1}}, \quad (7)$$

где $t_{o,i}(\varphi)$ – распределение температуры по широте φ в современную эпоху; $Q_T(\varphi)$ – количество солнечного тепла, поступающего на Землю в эпоху T.

Согласно (6), в современную эпоху теплоемкость $C_{\varphi 1}$ можно рассчитать с помощью разностей тепла $Q_{T0}(\varphi_2) - Q_{T0}(\varphi_1)$ и температуры $t_{o,i}(\varphi)$ на этих широтах так:

$$C_{\varphi 1} = \frac{Q_{T0}(\varphi_2) - Q_{T0}(\varphi_1)}{t_o(\varphi_2) - t_o(\varphi_1)}, \quad (8)$$

где приземная теплоемкость $C_{\varphi 1}$ определяется на промежуточной широте $\varphi = 0.5(\varphi_1 + \varphi_2)$.

Далее будем рассматривать относительную теплоемкость

$$C_{\varphi r1,i} = C_{\varphi 1,i} / Q_{T0}{}^{45}. \quad (9)$$

Индекс “r” в $C_{\varphi r1,i}$ означает, что это – относительная величина. Измеряется она в 1/ºС.

По формулам (8)–(9) был определен первый вариант теплоемкости $C_{\varphi r1,i}$, а по формуле (7) были рассчитаны профили температуры для трех эпох: T = –15,88, –31,28 и –46,44 kyr. В высоких широтах $|\varphi| > 60°$ профили температуры имеют недостатки. Поэтому во втором варианте теплоемкость $C_{\varphi r2}$ определялась по годовой инсоляции в эквивалентных широтах φ_e. Для определения φ_e годовой инсоляции отдаленной эпохи сопоставляется такая современная широта, на которую поступает такое же количество тепла. Всем широтам теплой эпохи T = –31,28 kyr можно сопоставить современные широты, а, следовательно, и современные температуры, т. е. определить $t_{31}(\varphi_i)$ по $t_o(\varphi_{e,i})$. Тогда аналогично (8)–(9) приповерхностная теплоемкость по второму варианту запишется:

$$C_{\varphi r2,i} = \frac{Q_{Tu31}(\varphi_i) - Q_{T0u}(\varphi_i)}{t_{31}(\varphi_i) - t_0(\varphi_i)}, \qquad (10)$$

где $Q_{Tu31}(\varphi_i)$ и $t_{31}(\varphi_i)$ – безразмерная годовая инсоляция и температура в эпоху 31,28 т. л. н.

Таким образом, скорректированная приповерхностная теплоемкость Земли $C_{\varphi r,i}$ определяется выражениями (8)–(9) при $|\varphi| < 60°$ и формулой (10) при $|\varphi| > 60°$. Следует отметить, что при $|\varphi| < 60°$ теплоемкость по второму варианту $C_{\varphi r2}$ мало отличается от $C_{\varphi r1}$.

Средняя по поверхности Земли приповерхностная теплоемкость будет C_{Er} = 1,9633·10^{-2} 1/ºС. На рис. 2 профиль $C_{\varphi r} = C_{\varphi r,i}$ представлен сплошной линией. Теплоемкость C_{Er} приведена на рис. 1 пунктирной линией.

Приповерхностная теплоемкость в размерном виде $C_{\varphi,i}$ определяется умножением относительной теплоемкости $C_{\varphi r,i}$ на годовую инсоляцию Q_{T0}^{45} на широте $\varphi = 45°$, т. е.

$$C_{\varphi,i} = C_{\varphi r,i} \cdot Q_{T0}^{45}. \qquad (11)$$

С учетом (11) средняя по поверхности Земли теплоемкость в размерном виде будет

$$C_E = C_{Er} \cdot Q_{T0}^{45} = 1{,}95 \cdot 10^5 \text{ кДж/(м}^2 \text{ ºС)}. \qquad (12)$$

5. Среднегодовые температуры в прошедшие эпохи

При относительной теплоемкости $C_{\varphi r}$ температура в любую эпоху T на широте φ согласно (7) и (9) запишется так:

$$t(T,\varphi) = t_o(\varphi) + \frac{Q_{Tu}(T,\varphi) - Q_{Tu0}(\varphi)}{C_{\varphi r}}, \qquad (13)$$

где $Q_{Tu}(T,\varphi)$ – безразмерная годовая инсоляция в эпоху T на широте φ.

Рассчитанные по формуле (13) профили температуры представлены на рис. 3 для четырех эпох. В таблице 3 приведены значения температур на экваторе и на полюсах для этих четырех эпох. В экваториальной области годовые температуры отличаются на 4 ºС. На широте 45º температуры не меняются. После φ = 60º различие профилей нарастает и на полюсах они отличаются на 50–60 ºС.

Из рис. 3 видно, что наибольшие отличия температур от современной эпохи наблюдаются в теплую эпоху 31,28 т. л. н. и в холодную эпоху 46,44 т. л. н. Расчеты годовой инсоляции за 20 м. л. н. показали [6], что ее колебания могут лишь немного превышать колебания инсоляции этих эпох. Поэтому профили годовой температуры –31 и –46 на рис. 3 практически являются предельными. Согласно расчетам инсоляции за будущие 200 тыс. лет [3; 6] наиболее теплый период будет через 93,6 тыс. лет, а наиболее холодный – через 103,1 тыс. лет. Однако изменение годовой инсоляции будет существенно меньше, чем в эпохи 31,28 и 46,44 т. л. н. соответственно. Поэтому будущие изменения температур будут также находиться внутри диапазона температур, показанных линиями –31 и –46.

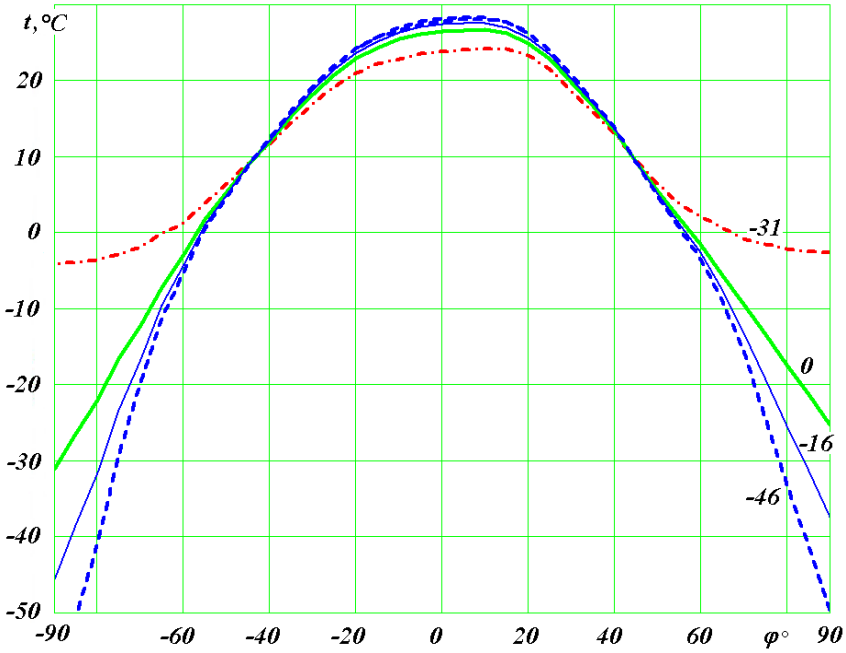


Рис. 3. Распределение по широте Земли φ среднегодовой приземной температуры t в °С для четырех эпох: профили температуры рассчитаны по поверхностной теплоемкости $C_{\varphi r}$ и годовой инсоляции Q_{Tu} (рис. 2)

6. Локальная среднегодовая палеотемпература

В современную эпоху на одной и той же широте φ локальная среднегодовая температура $t_{l0}(\varphi)$ может существенно отличаться от рассмотренной выше среднеширотной температуры. Например, на широте φ = 57º локальные среднегодовые температуры изменяются от +7 до –7 ºС при среднеширотной t_o = 0,4 ºС. Для современной эпохи введем разность локальной температуры над среднеширотной температурой

$$\Delta t_{l0}(\varphi) = t_{l0}(\varphi) - t_o(\varphi). \qquad (14).$$

В предположении, что в другую эпоху геофизические характеристики местности существенно не изменяться, локальную среднегодовую температуру оценим с учетом этой разности

$$t_l(\varphi) = t(\varphi) + \Delta t_{l0}(\varphi). \quad (15)$$

Для местностей, на широтах городов Тюмени и Москвы, по профилю $t_{o,i}$ были определены среднеширотные температуры $t(\varphi)$ для четырех эпох (табл. 4).

Таблица 4

Среднеширотные $t(\varphi)$ и локальные $t_l(\varphi)$ годовые палеотемпературы на широтах г. Тюмени и г. Москвы для четырех эпох

T, kyr	Температура, ºС			
	Тюмень, φ = 57,152199º		Москва, φ = 55,75222º	
	$t(\varphi)$	$t_l(\varphi)$	$t(\varphi)$	$t_l(\varphi)$
0	0,42	1,5	1,31	5
–15,88	–0,43	1,08	0,59	4,28
–31,28	2,97	4,05	3,45	7,14
–46,44	–1,07	0,01	0,05	3,74

По данным Гидрометцентра России среднегодовые температуры на метеостанциях г. Тюмени и г. Москвы (ВДНХ) за 1961–1990 гг. равны 1,5 и 5 ºС соответственно. В табл. 4 они приведены как локальные температуры $t_{l0}(\varphi)$ в эпоху $T = 0$. По формуле (14)–(15) рассчитаны разности $\Delta t_{l0}(\varphi)$ и локальные температуры $t_l(\varphi)$ в три экстремальные эпохи. Как видно из табл. 4, локальные температуры $t_l(\varphi)$ выше среднеширотных температур $t(\varphi)$ на 1,1ºС для г. Тюмени и на 3,7ºС для г. Москвы. По-видимому, в данных примерах это отличие в большей степени обусловлено городскими выделениями тепла, а не геофизическими характеристиками местности. Поэтому для оценки локальных палеотемператур необходимо брать современную локальную температуру на тех метеостанциях, где отсутствуют техногенные источники изменения их температуры.

Заключение

1. На основании анализа результатов разных исследователей по приземной температуре предложен обобщенный профиль среднеширотной годовой температуры в современную эпоху.

2. Введена теплоемкость поверхности Земли, которая определена с помощью двух методов.

3. На основании теплоемкости по современной температуре и инсоляции Земли определены профили среднеширотной палеотемпературы в три экстремальные эпохи за 50 т. л. н.

Настоящая работа выполнялась в рамках госзадания Рег. № НИОКТР АААА-А17-117051850061-9.

Список литературы

1. *Большаков В. А., Капица А. П.* Уроки развития орбитальной теории палеоклимата // Вестник Российской академии наук. 2011. Т. 81, № 7. С. 603–612.

2. *Миланкович М.* Математическая климатология и астрономическая теория колебаний климата. М. : Л. : ГОНТИ, 1939. 207 с.

3. *Смульский И. И.* Анализ уроков развития астрономической теории палеоклимата // Вестник Российской академии наук. 2013. Т. 83, № 1. С. 31–39. http://elibrary.ru/item.asp?id=18448265. doi:10.7868/S0869587313010118.

4. *Смульский И. И.* Новые результаты по инсоляции Земли и их корреляция с палеоклиматом Западной Сибири в позднем плейстоцене // Геология и Геофизика. 2016. Т. 57, № 7. С. 1393–1407. http://dx.doi.org/10.15372/GiG20160709.

5. *Смульский И. И.* Эволюция оси Земли и палеоклимата за 200 тысяч лет. Saarbrucken, Germany : LAP Lambert Academic Publishing, 2016. 228 с.

6. *Смульский И. И.* Новая Астрономическая теория ледниковых периодов. Riga, Latvia : LAP Lambert Academic Publishing, 2018. 132 с. http://www.ikz.ru/~smulski/Papers/InfNwATLP.pdf.

7. *Ferrel W.* Meteorological Researches. Govt. Print. Off., Washington DC, 1877.

8. *Forbes J. D.* Inquiries about Terrestrial Temperatures // Translation of the Royal Society of Edinburgh. 1859. Vol. 22. P. 75–92.

9. *Hann J.* Handbuch der Klimatologie. Englehorn, Stuttgart, 1897.

10. *Hansen J., Ruedy R., Sato M. and Lo K.* Global Surface Temperature Change // Reviews of Geophysics. 2010. Vol. 48. RG4004. https://doi.org/10.1029/2010RG000345.

11. *Kramm G., Dlugi R., Berger M., Molders N.* Meridional Distributions of Historical Zonal Averages and Their Use to Quantify the Global and Spheroidal Mean Near-Surface Temperature of the Terrestrial Atmosphere // Natural Science, 2020, 12, 80–124. doi: 10. 4236/ns. 2020. 123012.

12. Quantifying Uncertainties in Global and Regional Temperature Change Using an Ensemble of Observational Estimates: The HadCRUT4 Data Set / C. P. Morice, J. J. Kennedy, N. A. Rayner, P. D. Jones // Journal of Geophysical Research – Atmospheres. 2012. Vol. 117. D08101. https://doi.org/10.1029/2011JD017187.

13. Berkeley Earth Temperature Averaging Process / R. Rohde, R. Muller, R. Jacobsen, S. Perlmutter, A. Rosenfeld, J. Wurtele, J. Curry, C. Wickham, S. Mosher // Geoinformatics & Geostatistics: An Overview. 2013. Vol. 1, N 13. https://doi.org/10.4172/2327-4581.1000103.

14. *Von Bezold W.* Uber klimatologische Mittelwerthe fur ganze Breitenkreise // Sitzungsberichte der Koniglich Preussischen. Verlag der Akademie der Wissenschaften, Berlin, 1901. P. 1330–1343. https://books.google.com/books?id=JdcAAAAAYAAJ.

15. *Von Bezold W.* Uber Strahlungsnormalen und Mittellinien der Temperatur // Pernter J. M., Von Hann J. and Hellmann G. (eds.). Meteorologische Zeitschrift: Hann-Band zum vierzigjahrigen Redaktionsjubilaum J. Hann's von Freunden und Kollegen gewidmet, F. Vieweg, 1906. P. 279–287.

УДК 551.583

Отклик температурного режима юга России на основные крупномасштабные атмосферные циркуляции северного полушария

А. А. Ташилова[1], Б. А. Ашабоков[1, 2], Л. А. Кешева[1], Н. В. Теунова[1]

[1]Высокогорный геофизический институт, г. Нальчик
[2]Институт информатики и проблем регионального управления КБНЦ РАН, г. Нальчик

Аннотация. Приведены результаты исследований, посвященных выявлению основных крупномасштабных атмосферных циркуляций, которые оказывают влияние на изменчивость температурного режима юга России.

Ключевые слова: климат, температура, индексы атмосферной циркуляции, корреляция, регрессия

Проблемы современных изменений климата на Земле в последние десятилетия все больше беспокоят мировое сообщество. Они исследуются учеными всего мира и анализируются международными организациями. В Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата (РКИК ООН, 2004) по этому поводу отмечено: «изменение климата, которое прямо или косвенно обусловлено деятельностью человека, вызывающей изменения в составе глобальной атмосферы, и накладывается на естественные колебания климата, наблюдаемые на протяжении сопоставимых периодов времени» [6].

В работе [5] приводятся результаты расчетов, что в случае полного обезлесивания региона бассейна р. Амазонки (замены влажных тропических лесов травяным покровом) должен произойти спад испарения с подстилающей поверхности и осадков, но повышение температуры поверхности. Возникающее в таких условиях повышение приземной температуры воздуха окажется в пределах от 0,3 до 3 °С. Подобные изменения обусловлены главным образом повышением альбедо поверхности и уменьшением влажности почвы. Последствием связанного с этим уменьшения потоков энергии и водяного пара в атмосферу и ослабления влажной конвекции станет спад прогревания толщи атмосферы, что породит двоякого рода изменения атмосферной циркуляции: 1) изменения восходящих и нисходящих потоков воздуха в тропиках и субтропиках (ячейки циркуляции Гадлея); 2) изменения условий генерации планетарных волн (волн Россби), распространяющихся из тропиков в средние широты. Подобные вариации связаны с изменениями крупномасштабной атмосферной циркуляции в средних и высоких широтах.

Циркуляционные факторы определяются внутренней природой взаимодействия различных компонентов климатической системы и являются решающими для подвижных оболочек планеты – атмосферы и деятельного слоя океана. Крупномасштабные воздушные течения играют важную роль не только в формировании погоды и климата Земли, но также в формировании климатических аномалий вследствие резкого изменения циркуляционных процессов под действием как внешних, так и внутренних факторов [2].

В последние десятилетия наблюдается увеличение повторяемости крупномасштабных положительных аномалий приземной температуры воздуха из-за усиления циклонической активности в высоких широтах Евразии, связанное с изменениями крупномасштабной атмосферной циркуляции.

Установление факторов, которыми обусловлено изменение глобального и регионального климата, оценка вклада того или иного фактора в данный процесс остаются предметом острых научных дискуссий. В работах, посвященных изучению современного климата на юге России [1; 3; 4] отмечено, что с середины 1990-х гг. средняя температура воздуха во всех климатических зонах юга Европейской России, в том числе в высокогорной, значительно усилила скорость роста. Приведенные в работе [1] параметры линейных трендов температуры указывают на то, что по темпам повышения температуры в 1976–2018 гг. потепление на территории России в летний сезон не уступает, а на высокогорной станции Терскол значительно превышает зимний сезон.

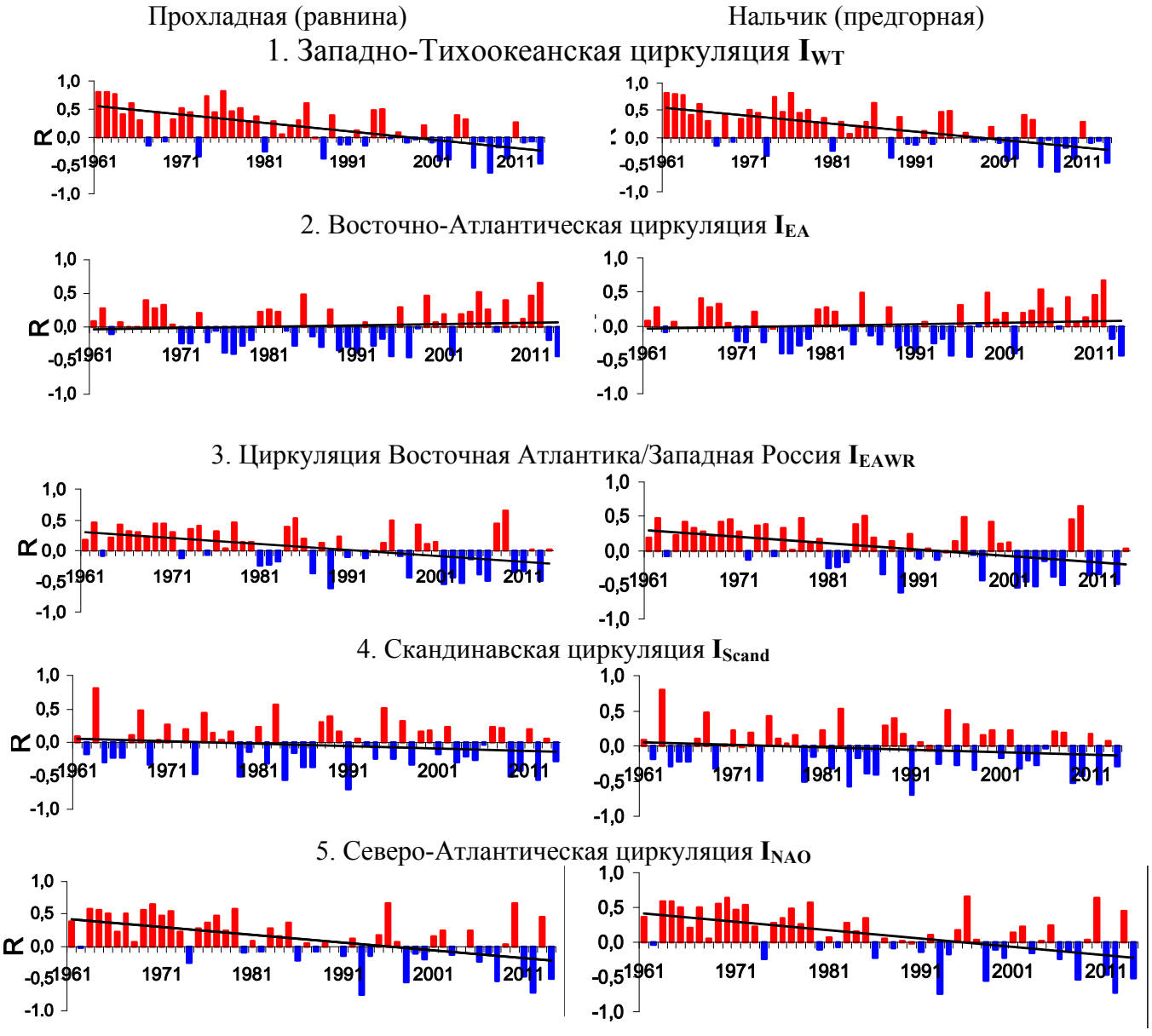
Изменение циркуляции могло внести вклад в формирование продолжительных периодов жаркой погоды (волны жары), наблюдавшиеся в последние летние сезоны. Влияние на столь удаленные районы, как европейская территория России, может осуществляться только через возмущения в поле давления и крупномасштабную циркуляцию. Для мониторинга климатических изменений и отражения влияния этих изменений на окружающую среду используются стандартизированные значения индексов циркуляции «телекоммуникационных моделей» по данным реанализа с сайта [7].

В работе приведены результаты исследований, посвященных выявлению основных крупномасштабных атмосферных циркуляций, которые оказывают влияние на изменчивость температурного режима юга России. Для анализа влияния крупных атмосферных циркуляций на температуры различных климатических зон юга России были использованы ряды среднемесячных индексов пяти *крупномасштабных атмосферных колебаний*: Западно-Тихоокеанская циркуляция I_{WT}, Восточно-Атлантическая циркуляция I_{EA}, Циркуляция Восточная Атлантика/Западная Россия I_{EAWR}, Скандинавская циркуляция I_{Scand} и Северо-Атлантическая циркуляция I_{NAO} по данным реанализа. Ряды среднемесячных средних, максимальных, минимальных температур в 1961–2015 гг. представляют термический режим всех климатических зон юга России: Прохладная (степная зона), Нальчик (предгорная), Ахты (горная), Терскол (высокогорная).

Основным методом статистической обработки исходных данных послужил корреляционный анализ между пятью режимами изменчивости атмосферной циркуляции (I_{WT}, I_{EA}, I_{EAWR}, I_{Scand} и I_{NAO}) со среднемесячными значениями приземной температуры (средней, максимальной, минимальной) на территории юга ЕТР. Процедура исследования заключалась в поэтапной обработке исходной информации Конечным продуктом исследования являются среднемесячные значения индекса корреляции R между температурой приземного воздуха за 1961–2015 гг. на юге России и индексами атмосферной

циркуляции. Высокий положительный коэффициент корреляции (R = 0,79–0,83) является результатом синхронного изменения положительной и отрицательной фаз индекса атмосферной циркуляции и годового изменения среднемесячных температур с января по декабрь. Анализ показал, что величина и направленность корреляционной связи индекса со средними, максимальными и минимальными температурами идентична, что также имеет место для всех м/станций, поэтому для других м/станций (Нальчик, Прохладная, Терскол) будем рассматривать коэффициенты корреляции индексов со *средними температурами.*

Значения коэффициентов корреляции R между среднемесячными индексами атмосферной циркуляции (I_{WT}, I_{EA}, I_{EAWR}, I_{Scand} и I_{NAO}) и средними температурами м/станций Прохладная, Нальчик, Ахты, Терскол на отрезке времени 1961–2015 гг. представлены в виде диаграмм на рис. 1.



а

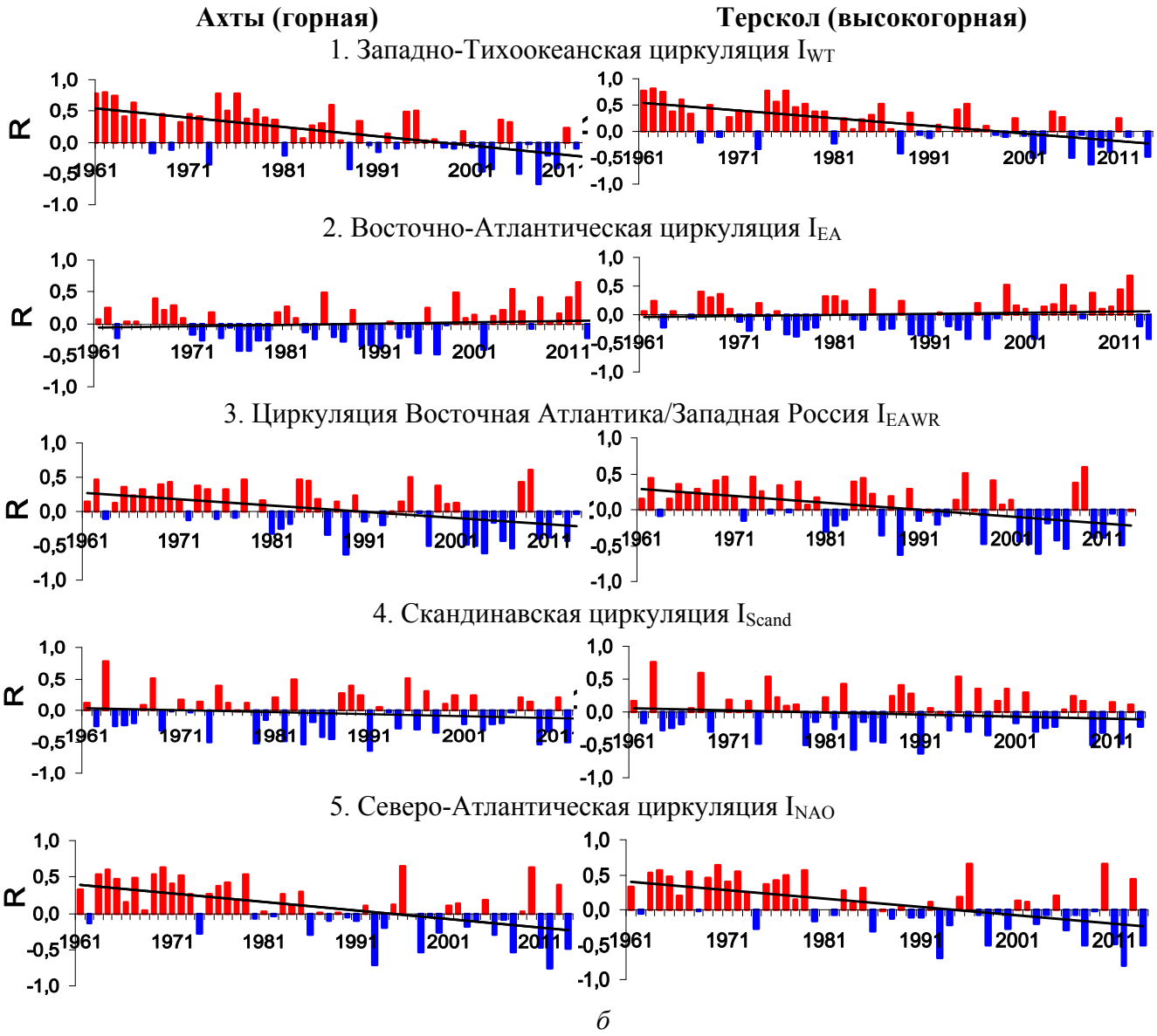


*Рис. 1. И*зменение значения коэффициента корреляции среднегодовых температур различных климатических зон юга ЕТР и индексов АЦ (I_{WT}, I_{EA}, I_{EAWR}, I_{Scand} и I_{NAO}): а) равнинная, предгорная зоны, б) горная, высокогорная зоны

Из рис. 1 видно, что с начала 1990-х гг. имела место высокая положительная корреляция индекса I_{WT} со среднемесячными температурами. Наибольшее значение корреляции R=0,74–:–0,79 было получено в 1961–1963 гг. Затем наблюдалось ослабление взаимосвязи между ними, а в 1974 г. имеет место резкое увеличение коэффициента корреляции до R = 0,74 с последующим его снижением. При этом, за редким исключением, связь оставалась положительной в течение базового периода 1961–1990 гг. С конца 80-х гг. XX столетия произошла смена направления корреляционной связи «температура-индекс» – она стала отрицательной из-за смены знака фазы индекса I_{WT}.

Корреляция индекса циркуляции I_{EA} с температурами менее выражена, чем с индексом I_{WT}. Общей тенденцией для средних, максимальных и минимальных температур является то, что наименьшее значение коэффициента кор-

реляции с индексами приходилось на начало 60-х гг. XX в. Затем имел место их рост и смена положительных коэффициентов R на отрицательные. Наибольшие положительные значения корреляций наблюдались в 2005г. (R = 0,54), в 2008 г. (R = 0,42), в 2011г. (R = 0,42) и максимальное значение R = 0,65 в 2012 г. С начала 2000-х гг. преобладает положительная корреляция между температурами и индексом Западно-Тихоокеанской циркуляции I_{WT}.

Величина коэффициента корреляция индекса циркуляции I_{EAWR} со средними температурами также менее выражена, чем с индексом I_{WT}, и за исследованный период имела значения от R = -0,62 (1989 г.) до R = +0,61 (2009 г.). С середины 90-х гг. имело место преобладание количества отрицательных коэффициентов корреляции над положительными. Исключение составили положительные значения корреляции в 2008 г. (R = 0,43) и 2009 г. (R = 0,612).

Менее выраженными являются закономерности корреляционной связи между индексом I_{Scand} и температурами. На рис. 1 видно, что происходит частая смена величины и направленности коэффициента корреляции индекса Скандинавской циркуляции и среднемесячных температур. Это, вероятно, объясняется тем, что Скандинавская циркуляция оказывает б*о*льшее влияние на северные территории.

Отрицательная корреляционная связь между индексом Северо-Атлантического колебания I_{NOA} и средней (R = –0,71), максимальной (R = –0,69) и минимальной (R = –0,64) температурами м/станций была максимальна по сравнению с другими индексами в 1993 г. (год с наибольшим количеством экстремумов ниже порогового значения температуры («холодных» экстремумов), 22), а максимальные положительные коэффициенты корреляции между ними наблюдались в 2010 г. (со средней (R = 0,63), максимальной (R = 0,63) и минимальной (R = 0,68) температурами), т. е. в году с наибольшим количеством «горячих» экстремумов (выше порогового значения температуры), 30), из чего можно сделать вывод о значительном влиянии Северо-Атлантического колебания на формирование экстремальных значений температур на юге ЕТР.

Выводы

По результатам исследований по выявлению отклика изменчивости температурного режима юга России на основные крупномасштабные атмосферные циркуляции Северного полушария, можно сделать следующие выводы:

1. Сила и направление корреляционной связи для каждой из пар «индекс крупномасштабной атмосферной циркуляции – температура» в равнинной, предгорной, горной и высокогорной зонах идентичны, что объясняет синхронный ход изменения температурного режима воздуха в разных климатических зонах юга России.

2. Наиболее сильная корреляционная связь ежемесячных индексов атмосферных циркуляций со среднемесячными температурами (средними, максимальными, минимальными) за 1961–2015 гг. наблюдается у Западно-Тихоокеанской циркуляции I_W (R = 0,8 в начале 60-х гг. и середине 70-х гг. прошлого столетия);

3. В случае трех индексов (I_{WT} , I_{EA} , I_{EAWR}) направление связи меняется с положительной на отрицательную с середины 90-х гг. XX в. – начала 2000-х гг.

4. В случае со Скандинавским индексом такой закономерности не наблюдается, происходит частая смена направления корреляционной связи (с частотой от 1 до 4 лет).

5. Северо-Атлантическое колебание (I_{NOA}) имеет наибольший (по абсолютной величине) отрицательный коэффициент корреляции R со средними, максимальными и минимальными температурами всех станций по сравнению с другими индексами в 1993 г. (год с максимальным количеством «холодных» экстремумов температуры, 22), положительный R – в 2010 г. (год с максимальным количеством «горячих» экстремумов температуры, 29). Это позволяет предположить, что влияние Северо- Атлантического колебания на формирование экстремальных значений температуры на юге России является достаточно сильным.

Список источников

1. *Ашабоков Б. А., Ташилова А. А., Кешева Л. А.* Тенденции изменения сумм осадков и средней температуры за периоды 1961–2011гг. и 1976–2011гг. на юге европейской территории России (ЕТР) // II Международная научная конференция с элементами научной школы «Инновационные методы и средства исследований в области физики атмосферы, гидрометеорологии, экологии и изменения климата». Ставрополь, 21–25 сентября, 2015 г. С. 140–146.

2. *Бардин М. Ю.* Антициклоническая квазистационарная циркуляция и ее влияние на аномалии и экстремумы температуры воздуха в западных областях России // Метеорология и гидрология. 2007. № 2. С. 5–16.

3. *Коваленко О. Ю., Бардин М. Ю., Воскресенская Е. Н.* Изменения характеристик экстремальной температуры воздуха в Причерноморском регионе и их связь с крупномасштабными климатическими процессами // Фундаментальная и прикладная климатология. 2017. № 2. С. 42–62.

4. Анализ изменчивости температуры на горной территории Северного Кавказа за 1961–2012 гг. / А. А. Ташилова, Л. А. Кешева, Н. В. Теунова, З. А. Таубекова // Метеорология и гидрология. 2016. № 9. С. 16–26.

5. *Gorshkov V. G., Gorshkov V. V., Makarieva A. M.* Biotic Regulation of the Environment. Key Issues of Global Change. Springer / PRAXIS. Chichester, U. K. 2000. 367 p. .

6. https://wwf.ru/upload/iblock/c4d/10yearsunfccc.pdf 15.12.2019 г.

7. http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc. 20.02.2020 г.

УДК 551.583

Прогноз средней годовой температуры на юге ЕТР на 2019–2028 гг.

А. А. Ташилова[1], Б. А. Ашабоков[1, 2], Л. А. Кешева[1], Н. В. Теунова[1]

[1]Высокогорный геофизический институт, г. Нальчик
[2]Институт информатики и проблем регионального управления КБНЦ РАН, г. Нальчик

Аннотация. На основе данных метеопараметров за период 1961–2018 гг., предоставленных Северо-Кавказским управлением по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, был проведен анализ и прогноз рядов средних годовых температур юга европейской территории России (ЕТР). В основе анализа и прогноза временных рядов лежит метод сингулярно-спектрального анализа, реализованный в программе Caterpillar-SSA. С помощью программы Caterpillar-SSA был осуществлен прогноз средних летних температур на юге ЕТР на период 2019–2028 гг.

Ключевые слова: средние годовые температуры, прогноз, сингулярно-спектральный анализ, главные компоненты, остатки модели, юг ЕТР.

Одним из важнейших факторов, способных оказать значительное влияние на социально-экономическое развитие общества и окружающую среду, становится глобальное изменение климата. В пятом отчете Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК, 2014) [1] отмечается, что потепление климатической системы в индустриальное время является неоспоримым. Многие изменения в климатической системе, наблюдаемые с 50-х гг. XX столетия, являются беспрецедентными в масштабах от десятилетий до тысячелетий. Установлены в том числе, увеличение концентраций парниковых газов; потепление атмосферы и океана; изменение количества атмосферных осадков и их распределения по земному шару; сокращение запасов снега и льда.

Тенденция глобального потепления в значительной степени наблюдается на юге европейской территории России (ЕТР), где рост средней годовой температуры (047 °С/10 лет) за последние 60 лет привел к многочисленным термическим и гидрологическим аномальным явлениям, устойчивому изменению сезонных осадков [2–4]. В связи с тем, что юг ЕТР является важнейшим производителем сельскохозяйственной продукции в РФ, большое внимание должно уделяться проблеме снижения климатических рисков в сельском хозяйстве. Для адаптации регионального аграрного сектора к изменению климата необходим прогноз агрометеорологических ресурсов (температуры, осадков) [5].

Объектом исследования в данной статье является прогноз средней годовой температуры по данным 20 метеостанций, представляющие различные климатические зоны юга ЕТР. Данные по м/станциям Ахты, Буйнакск, Владикавказ, Дербент, Изберг, Изобильный, Кизляр, Кисловодск, Краснодар, Майкоп, Махачкала, Моздок, Нальчик, Прохладная, Ростов-на-Дону, Сочи, Ставрополь, Теберда, Терскол, Черкесск за 1961–2018 гг. были предоставлены Северо-Кавказским управлением гидрометеослужбы.

Физико-географическое местоположение исследованных двадцати метеостанций представлено в табл. 1.

Существуют две основные цели анализа рядов метеопараметров: определение внутренней структуры ряда и прогнозирование (предсказание будущих значений временного ряда по настоящим и прошлым значениям). Метод спектрально-сингулярного анализа временных рядов, реализованный в программе Caterpillar-SSA («Гусеница»-SSA) [6–8] позволяет выделить разного рода закономерности в поведении временных рядов, зачастую априори не очевидные. Техническую основу метода составляет сингулярное разложение матрицы, столбцами которой являются вектора – отрезки ряда длины L, основного параметра метода, называемого шириной окна. Анализ членов сингулярного разложения позволяет сначала классифицировать их как относящиеся к одной из компонент ряда, а затем выделить эту компоненту для восстановления ряда.

Таблица 1

Физико-географические характеристики метеостанций на юге ЕТР

№ п/п	Метеостанция	Географические координаты	Высота над уровнем моря (н. у. м.), м
Равнинные станции (<500 м н. у. м.)			
1	Сочи (Краснодарский край)	43,35° N; 39,73° E	57
2	Краснодар	43, 03° N; 38,58° E	26
3	Изобильный (Ставропольский край)	45,22° N; 32,42° E	194
4	Моздок (РСО- Алания)	43,44° N; 44,39° E	126
5	Прохладная (Кабардино-Балкария)	43,46° N; 44,05° E	198
6	Ростов-на-Дону	47,14° N; 39, 44° E	64
7	Дербент (Дагестан)	42,04° N; 48,17° E	30
8	Кизляр (Дагестан)	43,51° N; 46,43° E	-17
9	Махачкала (Дагестан)	42,59° N; 47,31° E	173
10	Изберг (Дагестан)	42,34° N; 47,45° E	21
Предгорные станции (500–1000 м н. у. м.)			
11	Ставрополь (Ставропольский край)	45. 03° N; 41. 58° E	540
12	Майкоп (Краснодарский край)	44. 37° N; 40. 05° E	532
13	Черкесск (Карачаево-Черкесия)	44. 17° N; 42. 04° E	526
14	Кисловодск (Ставропольский край)	43. 54° N; 42. 43° E	819
15	Нальчик (Кабардино-Балкария)	43. 22° N; 43. 24° E	500
16	Владикавказ (РСО- Алания)	43. 21° N; 44. 40° E	680
17	Буйнакск (Дагестан)	42. 49° N; 47. 07° E	560
Горные станции (1000–2000 м н. у. м.)			
18	Теберда (Карачаево-Черкесия)	43,45° N; 41,73° E	1280
19	Ахты (Дагестан)	41,28° N; 47,44° E	1054
Высокогорная станция (>2000 м н. у. м.)			
20	Терскол (Кабардино-Балкария)	43,15° N; 42,30° E	2144

Был проведен пошаговый анализ и прогноз методом «Гусеница SSA». Для исследования структуры ряда было проведено преобразование, разложение, группировка и восстановление ряда, для чего использовался вариант метода «Гусеница SSA» без центрирования матрицы наблюдений, соответствующей ряду.

Метод сингулярного спектрального анализа (SSA), применяемый в работе, позволяет:

– выделить конечное число компонент во временных рядах, которые были рассмотрены в рассматриваемых регулярных интервалах;

– найти скрытые периодичности;

– на основе отобранных компонентов произвести сглаживание начальных данных;

– извлечь компоненты с известным периодом;

– прогнозировать будущие значения в наблюдаемой зависимости.

В результате проведенного спектрального анализа временного ряда метеопараметра за 1961–2018 гг. были выделены цикличности с периодами $T = 5$ лет и $T = 10$ лет.

Для анализа структуры временного ряда методом SSA были подобраны оптимальные параметры – ширина окна и количество главных компонент. Ширину окна взяли равную $L = 30$ ($L = 58 - 29 + 11$), количество главных компонент ГК1 = 20. Далее были определены коэффициенты для линейно-рекуррентной формулы (1), описывающей восстановленный ряд:

$$f_n = C_1 0{,}996^n + C_2 1{,}011^n \cos(2\pi n/6{,}47+\varphi_2) + C_3 0{,}992^n \cos(2\pi n/4{,}89+\varphi_3) + C_4 0{,}983^n \cos(2\pi n/17{,}28+\varphi_4) + C_5 0{,}978^n \cos(2\pi n/2{,}24+\varphi_5) + C_6 0{,}974^n \cos(2\pi n/3{,}14+\varphi_4) + C_7 0{,}97^n \cos(2\pi n/3{,}99+\varphi_5) \quad (1)$$

После восстановления и аппроксимации ряда линейно-рекуррентной формулой (1) проведено прогнозирование ряда (синяя ломаная, рис. 1). Для проверки качества прогноза взяли упреждающий ряд длиной 20 лет, т. е. начало прогноза установили с 1998 г. Был получен прогнозный ряд с 1998 по 2018 г., затем прогноз был продолжен на последующие 10 точек: 2019–2028 гг. Вертикальная черная линия на рис. 1 отделяет начало прогноза от фактических данных. Прогноз проведен рекуррентным способом, ширина окна L=30, количество главных компонент ГК = 20. Результаты прогнозирования на 2019–2028 гг. представлены на рис. 1 и в табл. 2.

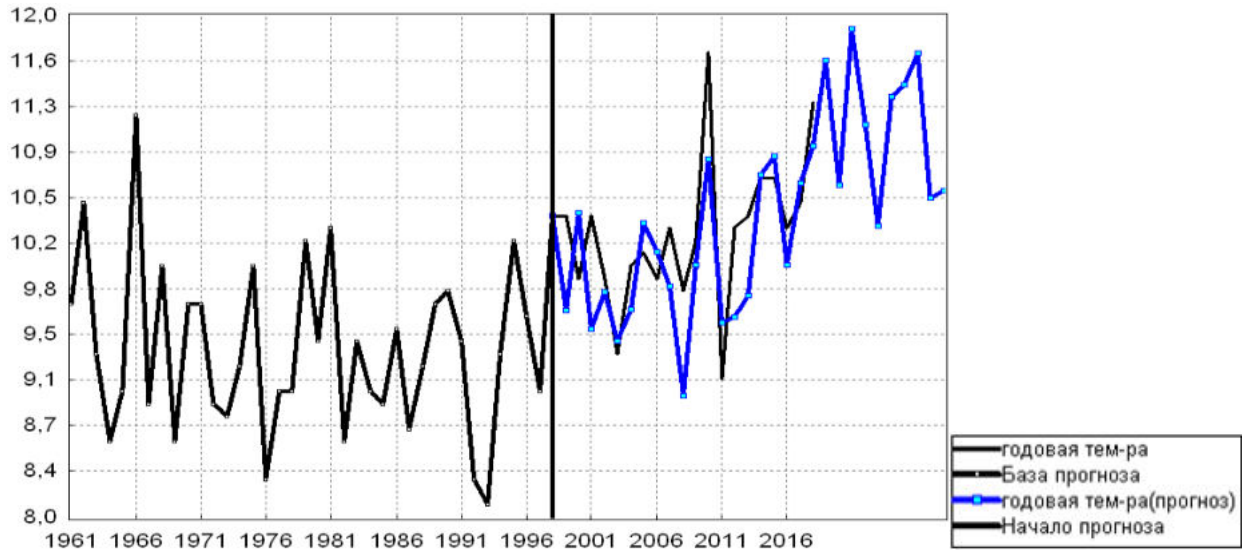
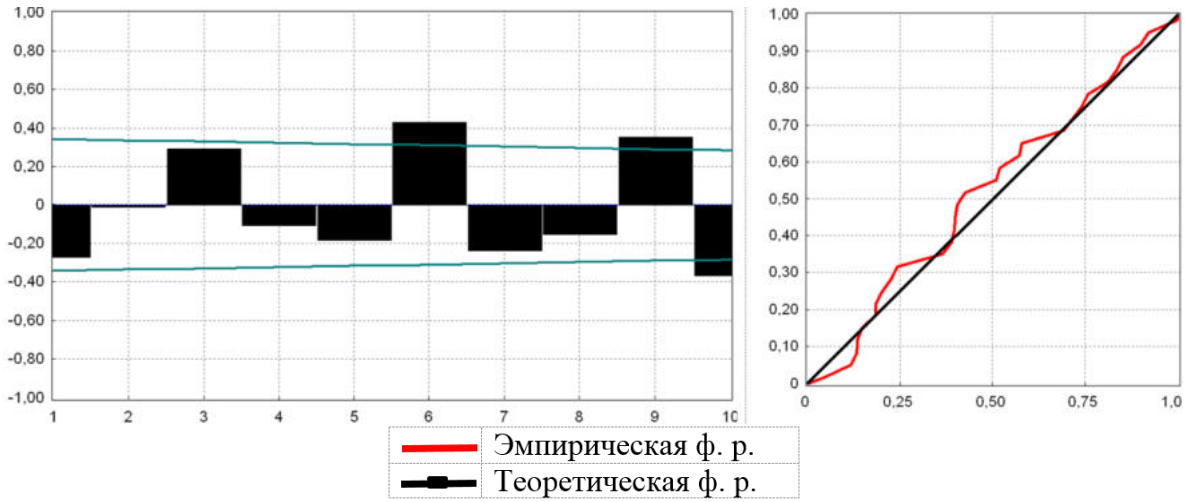


Рис. 1. Прогноз ряда средней годовой температуры на 2019–2028 гг. (1998–2018гг. – упреждающий интервал) рекуррентным способом (L = 30, ГК(1–20)), юг ЕТР



а) Автокорреляция остатков аппроксимации

б) Проверка нормальности остатков аппроксимации

*Рис. 2.*Проверка остатков на нормальность распределения

Таблица 2

Прогноз средней годовой температуры на 2019–2028 гг., юг ЕТР

nn	Годы	Исходный ряд, °С	Восстановленный ряд, °С	nn	Годы	Исходный ряд, °С	Восстановленный ряд, °С
1	1961	9,7		54	2014	10,7	10,1
	…	…	…	55	2015	10,7	10,7
38	1998	10,4	10,4	56	2016	10,3	10,6
39	1999	10,4	10,0	57	2017	10,5	10,7
40	2000	9,9	10,0	58	2018	11,3	11,5
41	2001	10,4	10,3	***среднее***		***10,27***	***10,20***
42	2002	9,9	9,9	***Периоды (годы)***		***5, 10 лет***	
43	2003	9,3	9,4	**59**	**2019**	–	**11,65**
44	2004	10,0	10,2	**60**	**2020**	–	**10,64**
45	2005	10,1	10,2	**61**	**2021**	–	**11,89**
46	2006	9,9	10,0	**62**	**2022**	–	**11,13**
47	2007	10,3	9,8	**63**	**2023**	–	**10,32**
48	2008	9,8	9,6	**64**	**2024**	–	**11,34**
49	2009	10,2	10,6	**65**	**2025**	–	**11,44**
50	2010	11,7	11,2	**66**	**2026**	–	**11,69**
51	2011	9,1	9,3	**67**	**2027**	–	**10,54**
52	2012	10. 3	9,6	**68**	**2028**	–	**10,60**
53	2013	10,4	10,2				

Для подтверждения адекватности модели исходному ряду необходимо доказать, что ряд остатков является случайным и подчиняется нормальному закону распределений. Поэтому следующее предположение состоит в том, что ряд остатков (ошибок), на основе которого строится прогноз, должен состоять из независимых одинаково распределенных случайных величин. В этом случае мы можем пользоваться выборочной моделью для прогноза. Таким образом, остатки должны быть:

– некоррелированные,

– нормально распределены.

На рис. 2 видно, что автокорреляционная функция в целом подтверждает некоррелированность остатков и сравнение теоретической и эмпирической функций распределения подтверждает нормальность остатков.

Качество прогноза средней годовой температуры определялось по следующим характеристикам:

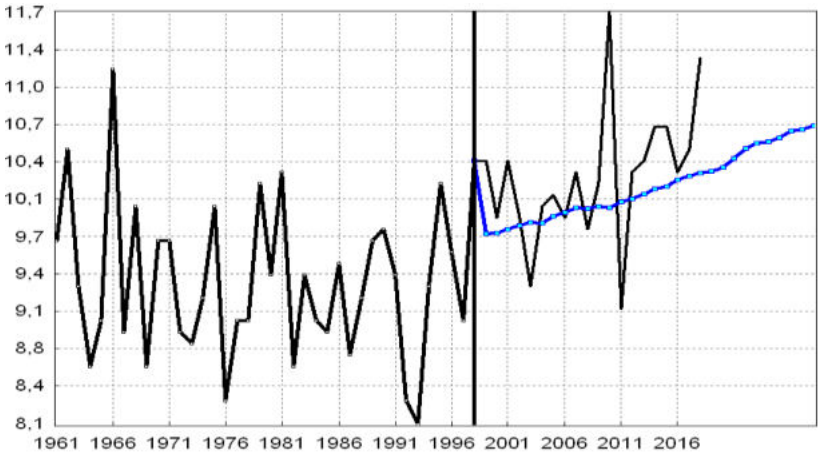
1) стандартное отклонение 0,504 °С;

2) максимальное отклонение 0,905 °С;

3) Т-тест Sig=0,595 на 5%-ном уровне): средние годовые температуры на периоде упреждения статистически равны: 10,27 °С≈ 10,20 °С.

4) Относительная ошибка 0,7 %.

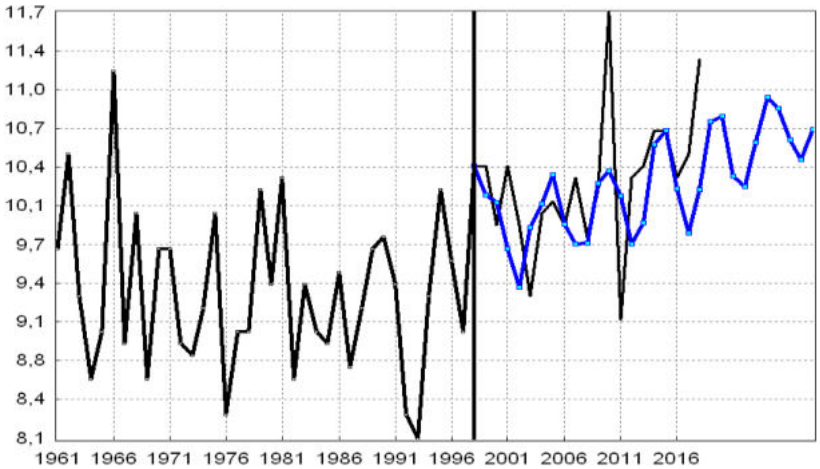
На рис. 3, *а, б* изображены графики прогнозных значений для медленных изменений тренда (при выборе одной главной компоненты) и циклических изменений температуры с выделенной периодом Т = 5 лет (при выборе трех главных компонент).



а) ГК1, 1998–2028 гг. (1998–2018 гг. – *интервал упреждения*)

Прогноз с ГК1

Годы	°С
2019	11,65
2020	10,64
2021	11,89
2022	11,13
2023	10,32
2024	11,34
2025	11,44
2026	11,69
2027	10,54
2028	10,60



б) ГК3, 1998–2028 гг. (1998–2018 гг. – *интервал упреждения*)

Прогноз с ГК3

Годы	Прогноз °С
2019	10,2
2020	10,8
2021	10,3
2022	10,2
2023	10,6
2024	11,0
2025	10,9
2026	10,6
2027	10,5
2028	10,7

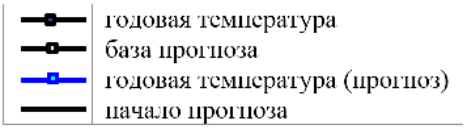


Рис. 3. Результаты прогнозирования ряда среднегодовой температуры на 2019–2028 гг.: а) с одной главной компонентой; б) с тремя главными компонентами

Из рис. 3 видно, что общие тенденции изменения среднегодовой температуры, полученные при выделении 1ГК и 3ГК и представленные на рис. 2, *а, б*, также повторяют полученные ранее закономерности для средних летних температур – устойчивый линейный рост при ГК1 и периодические изменения температуры (T = 5 лет) при сохраняющемся медленном положительном тренде.

Выводы по результатам прогнозирования средних годовых температур:

1. Общая тенденция (ГК1) медленных изменений средних годовых температур остается положительной до 2028 г.

2. Тренды средних годовых температур, полученные с помощью метода SSA (ГК3), до 2028 г. демонстрируют наличие осцилляций относительно возрастающих линейных трендов с периодом порядка 5 лет.

3. Наибольшее значение прогнозируемой среднегодовой температуры было получено для 2019 г. (11,65 °С) и для 2026 г. (11,68 °С).

Список литературы

1. *Ашабоков Б. А., Архестов Г. Х., Федченко Л. М.* Об одном подходе к прогнозированию агроклиматических ресурсов // Региональные эффекты глобальных изменений климата (причины, последствия, прогнозы) : материалы Междунар. науч. конф. (Воронеж, 26–27 июня 2012 г.). С. 356–360.

2. *Голяндина Н. Э.* Метод «Гусеница»-SSA: анализ временных рядов : учеб. пособие. СПб. : С.-Петер. гос. ун-т, 2004. 76 с.

3. *Голяндина Н. Э.* Метод «Гусеница»-SSA: прогноз временных рядов : учеб. пособие. СПб. : Изд-во С.-Петерб. гос. ун-та, 2004. 52 с.

4. Структурный анализ и прогноз зимних осадков методом Caterpillar-SSA / А. А. Ташилова [и др.] // Доклады АМАН. 2013. № 1. С. 103–106.

5. Возможности прогнозирования временного климатического ряда с помощью метода «Гусеница» -SSA / А. А. Ташилова, Л. А. Кешева, И. Н. Пшихачева, З. А. Таубекова // Инновационные методы и средства исследований в области физики атмосферы, гидрометеорологии, экологии и изменения климата : сб. науч. тр. Междунар. науч. конф. с элементами науч. шк. Ставрополь, 2013. С. 86–89.

6. *Ташилова А. А., Кешева Л. А.* Анализ высоты снежного покрова в предгорной части Северного Кавказа // Международная научная конференция по региональным проблемам гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды. Казань, 2012. С. 206–207.

7. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R. K. Pachauri and L. A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 2014. 151 p.

8. URL: http://www.gistatgroup.com/cat/20.03.2020.

УДК 551. 581

О возможном влиянии меридионального градиента инсоляции на тенденции изменения глобального климата

В. М. Фёдоров (fedorov.msu@mail.ru), Д. М. Фролов (denisfrolovm@mail.ru)
Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, г. Москва

Аннотация. В работе определяются естественные причины изменения современного глобального климата, основной из которых является изменение наклона оси вращения Земли, регулирующее распределение приходящей к Земле солнечной радиации по широтам и сезонам и интенсивность меридионального теплообмена.

Ключевые слова: меридиональный градиент, инсоляция, изменение климата.

Вариации приходящей к Земле солнечной радиации в основном определяются двумя причинами, имеющими различную физическую природу. Одной из причин является изменение активности в излучении Солнца. Другая причина связана с небесно-механическими процессами, изменяющими элементы земной орбиты и наклон оси вращения [2]. Под солярным климатом Земли понимается рассчитываемое теоретически поступление и распределение солнечной радиации на верхней границе атмосферы (ВГА) или на поверхности Земли без учета атмосферы [2]. При этом изменение активности Солнца не учитывается.

Инсоляция рассчитывалась с большим пространственным и временным разрешением [4; 7; 8]. Расчеты выполнялись по данным высокоточных астрономических эфемерид [10] для всей поверхности Земли (без учета атмосферы) в интервале с 3000 г. до н. э. по 2999 г. н. э. Исходными астрономическими данными для расчетов инсоляции были склонение и эклиптическая долгота Солнца, расстояние от Земли до Солнца, разность хода равномерно текущего (координатного времени – CT) и всемирного корректируемого времени (UT). Поверхность Земли аппроксимировалась эллипсоидом (GRS80 – Geodetic Reference System, 1980) с длинами полуосей равными 6378137 м (большие) и 6356752 м (малая). В общем виде алгоритм расчетов можно представить выражением:

$$I_{nm}(\varphi_1,\varphi_2)=\int_{t_1}^{t_2}\left(\int_{\varphi_1}^{\varphi_2}\sigma(H,\varphi)\left(\int_{-\pi}^{\pi}\Lambda(H,t,\varphi,\alpha)\,d\alpha\right)d\varphi\right)dt, \qquad (1)$$

где I – приходящая солнечная радиация за элементарный n-й фрагмент m-го тропического года (Дж); σ – площадной множитель ($м^2$), с помощью которого вычисляется площадной дифференциал σ(H,φ)dαdφ – площадь бесконечно малой трапеции – ячейки эллипсоида; α – часовой угол, φ – географическая широта, выраженные в радианах; H – высота поверхности эллипсоида относительно поверхности Земли (м); Λ(H, φ, t, α) – инсоляция в заданный момент в заданном месте поверхности эллипсоида ($Вт/м^2$), t – время (с). Шаги при интегрировании составляли: по долготе 1°, по широте 1°, по времени 1/360 часть продолжительности тропического года. Значение солнечной постоянной (среднее многолет-

нее значение TSI) принималось равным 1361 Вт/м^2. Изменение активности Солнца не учитывалось [4; 8].

Годовое поступление к Земле солнечной радиации за 5999 лет сокращается всего на 0,005 % [6–8]. Однако отмечается увеличение инсоляции в экваториальной области (0,25 %) и сокращение в полярных районах (2,73 %) – тенденция усиления широтной контрастности в солярном климате (рис. 1).

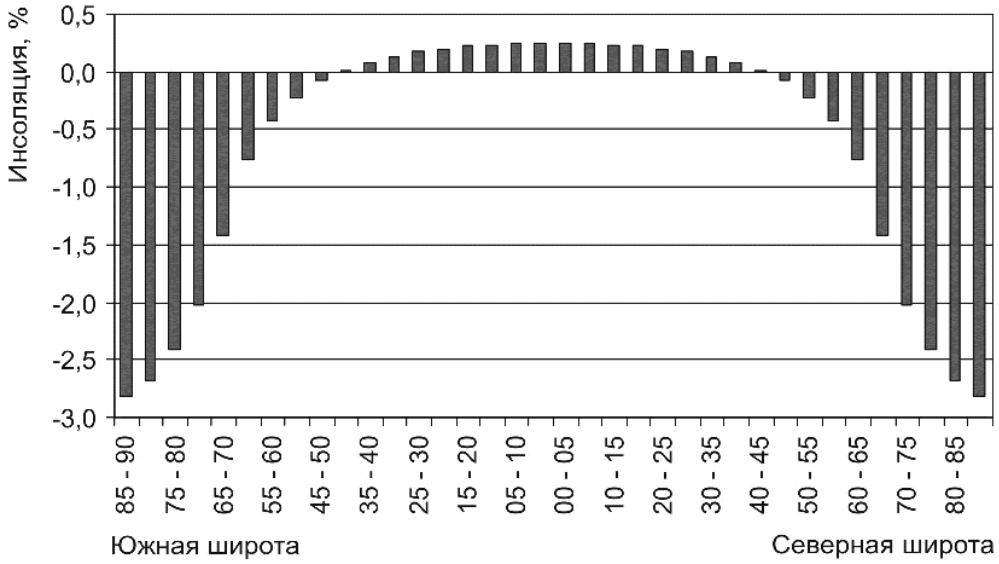


Рис. 1. Изменение годовой инсоляции Земли в широтных зонах с 3000 г. до н. э. по 2999 г.

Отмечается сокращение инсоляции в летние для полушарий полугодия (2,9 %) и увеличение в зимние (3,75 %) – проявляется тенденция сглаживания сезонных различий в солярном климате Земли (рис. 2).

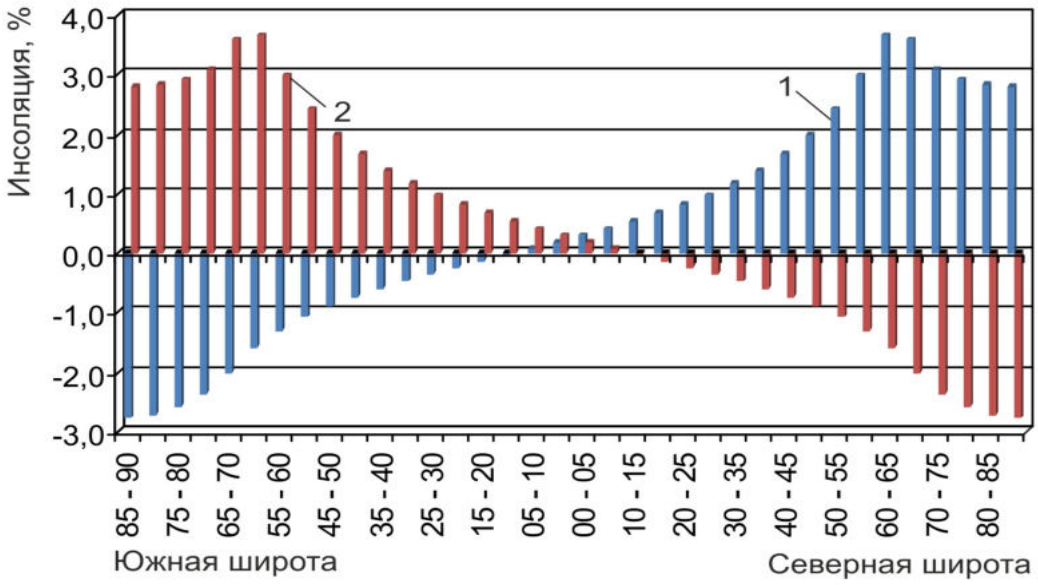


Рис. 2. Изменение полугодовой инсоляции Земли в широтных зонах с 3000 г. до н. э. по 2999 г. (1 – зимнее, 2 – летнее полугодие для северного полушария)

Из-за неравномерности в распределении солнечной радиации на поверхности Земли возникает меридиональный градиент инсоляции (МГИ) [1; 3]. Получен широтный профиль изменения годового МГИ за 5998 лет (рис. 3). Максимумы увеличения локализованы вблизи полярных кругов (60°–70° широты – годовые «зоны турбулентности»). Отмеченные «зоны турбулентности» совпадают с районами максимального развития внетропических циклонов (циклогенеза) в полушариях [1; 3]. Увеличение годового МГИ приходится на области локализации циркуляционных ячеек Хедли и Феррреля в атмосфере. Уменьшение годового МГИ приходится на области полярных ячеек.

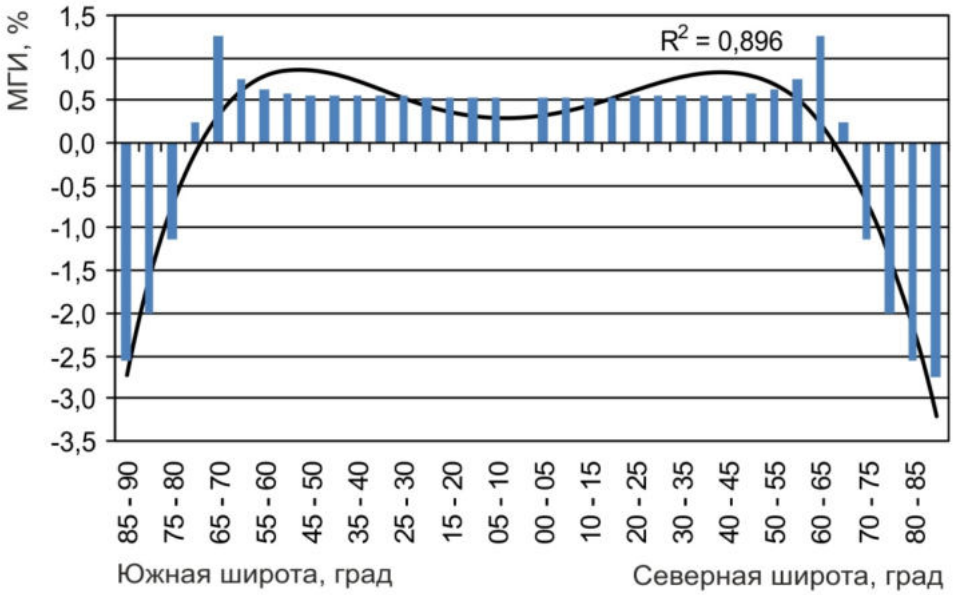


Рис. 3. Изменение годового МГИ за 5998 лет относительно среднего для широтной зоны значения (аппроксимация – полином 4-й степени)

Определены многолетние изменения МГИ для зимнего и летнего (в северном полушарии) полугодия (рис. 4). Значения МГИ максимально увеличиваются в зимнее (для северного полушария) полугодие в широтной зоне 15°–20° ю. ш. (11,8 %) и максимально сокращаются в зоне 10°–15° ю. ш. (17,8 %). В летнее (для северного полушария) полугодие максимальное увеличение (11,8 %) отмечается в широтной зоне 10°–15° с. ш., максимальное сокращение (17,8 %) в широтной зоне 5°–10° с. ш.

Таким образом, в летних полушариях выделяются сезонные «зоны турбулентности» расположенные в широтном диапазоне 5°–20° градусов широты. Здесь в соседних 5-ти градусных широтных зонах отмечаются максимальные расхождения в тенденциях изменения летнего МГИ. Сезонные «зоны турбулентности» совпадают с областями генерации тропических циклонов (80 % которых формируется в пределах диапазона 10°–20° широты). С вихревым переносом энергии связана работа «тепловой машины первого рода», механизма меридионального переноса тепла из низких широт в высокие [9]. В полярных областях (полярные циркуляционные ячейки) в зимние полугодия в полушариях отмечается увеличение МГИ, в летние полугодия сокращение.

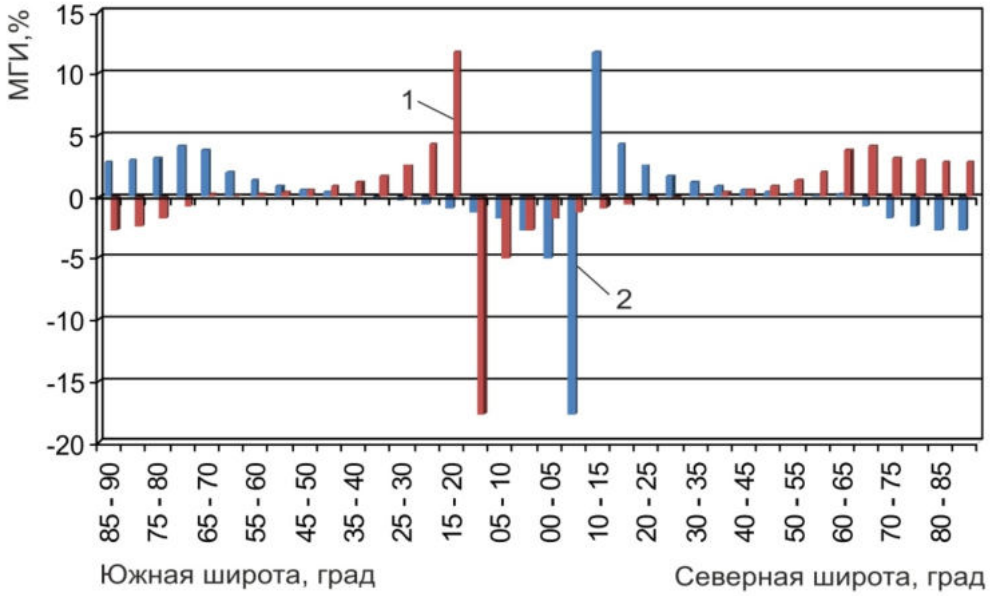


Рис. 4. Изменение МГИ в зимнее (1) и летнее (2) полугодие для северного полушария за 5998 лет в процентах от среднего для широтной зоны значения

Полученное среднее распределение годового МГИ сравнивалось с меридиональным распределением среднего годового переноса энергии в системе океан – атмосфера приведенным в работах Лоренца [1] и Пальмена, Ньютона [3]. Коэффициент корреляции между средними значениями годового МГИ и значениями переноса энергии в системе океан – атмосфера составил 0,98 (линейная связь). При этом численные значения переноса энергии в системе океан – атмосфера в работах [1; 3] в среднем в 6–7 раз, превосходят значения МГИ, что может быть связано с участием в переносе энергии в системе океан – атмосфера водных и воздушных масс.

Поскольку перенос энергии в системе океан – атмосфера определяется МГИ, то и полученные для него особенности могут проявляться и в системе океан – атмосфера (возрастание или ослабление интенсивности циркуляции в ячейках общей циркуляции атмосферы, усиление вихревого переноса энергии и климатической изменчивости). Отмечаемые для современной эпохи особенности солярного климата Земли связаны с уменьшением наклона оси вращения Земли в результате прецессии [2; 7; 8].

В результате корреляционного анализа определена связь многолетних изменений аномалии ПТВ и ТПО Земли и полушарий [11] с многолетними изменениями годовой инсоляционной контрастности (ИК). Для полушарий ИК рассчитывалась как разность солнечной радиации приходящей в широтную область 0°–45° (источник тепла) и 45–90° (стока тепла) за год. Для Земли в качестве ИК принималось среднее годовое значение ИК, полученное для полушарий. ИК рассчитывалась по рассчитанным нами значениям инсоляции Земли [4; 5]. ИК, таким образом, обобщенно (по областям источника и стока тепла) отражает изменение МГИ. Многолетние изменения ИК определяются изменением угла наклона оси вращения Земли в результате прецессии и нутации [5–7]. Из-

менение ИК линейно связано с изменением угла наклона оси вращения Земли (коэффициент корреляции составляет –0,998).

Изменения ПТВ и ТПО Земли и полушарий (данные университета Восточной Англии и метеобюро Хедли) в основном учитываются трендами [11]. Значения коэффициента детерминации составляют от 0,693 до 0,862 (тренды – полиномы второй степени). Коэффициент детерминации показывает долю изменений ПТВ и ТПО, определяемую трендом. Следовательно, чтобы объяснить тенденции многолетних изменений глобальной температуры следует определить фактор, определяющий тренды в исходных рядах ПТВ и ТПО. Анализ показывает, что многолетние изменения ПТВ и ТПО Земли и полушарий характеризуются тесными положительными корреляционными связями с многолетними изменениями ИК и отрицательными с многолетними изменениями угла наклона оси. Выполненные, по уравнению регрессии (по ансамблю линейных и полиномиальных решений) расчеты показали, что многолетние изменения ПТВ и ТПО в основном связаны с многолетними изменениями годовой инсоляционной контрастности (табл.).

Таблица

Многолетние изменения ПТВ и ТПО, объясняемые регрессионной моделью, %

	Земля/Мировой океан	Северное полушарие	Южное полушарие
Приповерхностная температура воздуха (ПТВ)			
ИК	80,7	73,4	83,1
ИК и КМО	88,3	86,4	84,0
Температура поверхности океана (ТПО)			
ИК	79,7	69,3	84,1
ИК и КМО	88,5	86,6	85,9 %

Примечание: КМО – климатическая мультидекадная осцилляция с периодом около 60 лет.

Таким образом, определяются естественные причины изменения современного глобального климата. Основной из них является изменение наклона оси вращения Земли, регулирующее распределение приходящей к Земле солнечной радиации по широтам и сезонам и интенсивность меридионального теплообмена (работы «тепловой машины первого рода») [9].

Работа выполнена в соответствии с госбюджетной темой «Геоэкологический анализ и прогноз динамики криолитозоны Российской Арктики» (№ АААА-А16-116032810055-0) и «Картографирование, моделирование и оценка риска опасных природных процессов» (№ АААА-А16-116032810093-2).

Список литературы

1. *Лоренц Э. Н.* Природа и теория общей циркуляции атмосферы. Л. : Гидрометеоиздат, 1970. 260 с.

2. *Миланкович М.* Математическая климатология и астрономическая теория колебаний климата. М. Л. : ГОНТИ, 1939. 208 с.

3. *Пальмен Э. Ньютон Ч.* Циркуляционные системы атмосферы. Л. : Гидрометеоиздат, 1973. 616 с.

4. *Федоров В. М., Костин А. А.* Вычисление инсоляции Земли для периода от 3000 г. до н. э. до 2999 г. н. э // Процессы в геосредах. 2019. № 2. С. 254–62

5. *Федоров В. М.* Инсоляция Земли и современные изменения климата. М. : Физматлит, 2018. 232 с.

6. *Фёдоров В. М.* Проблема меридионального переноса тепла в астрономической теории климата // Геофизические процессы и биосфера. 2019. Т. 18, № 3. С. 117–128. https://doi.org/10.21455/GPB2019.3-8

7. *Fedorov V. M.* Earth`s insolation variation and its incorporation into physical and mathematical climate models // Physics – Uspekhi. 2019. Vol. 62, N 1. P. 32–45. https://doi.org/10.3367/UFNe.2017.12.038267.

8. *Fedorov V. M., Frolov D. M.* Spatial and temporal variability of solar radiation arriving at the top the atmosphere // Cosmic Research, 2019. Vol. 57, N 3. P. 156–162. DOI: 10. 1134/S0010952519030043

9. *Шулейкин В. В.* Физика моря. М. : АН СССР, 1953. 990 с.

10. NASA, Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology (JPL Solar System Dynamics). URL: http://ssd.jpl.nasa.gov (date of access: 05.04.2020).

11. HadCRUT4 – a global temperature dataset. URL: http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature (date of access: 05.04.2020)

УДК 551.5

Вторжения арктического воздуха и ледяной покров Арктики в весенние сезоны XXI в.

А. В. Холопцев (kholoptsrv@mail.ru)[1,2], Н. К. Кононова (ninakononova@yandex.ru)[3,4], С. А. Подпорин[2]

[1] Севастопольское отделение ФГБУ «Государственный океанографический институт им. Н. Н. Зубова», г. Севастополь
[2] Севастопольский государственный университет, г. Севастополь
[3] Институт географии Российской Академии наук, г. Москва
[4] Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН, г. Севастополь

Аннотация. Выявлены современные тенденции межгодовых изменений некоторых характеристик вторжений в низкие широты Северного полушария арктического воздуха в весенние сезоны, а также вариаций средних значений суммарного объема ледяного покрова акваторий Арктики в Европейском и Сибирском секторах. Оценена значимость статистических связей между этими процессами на различных отрезках времени.

Ключевые слова: Арктика, ледяной покров, весенний сезон, вторжения арктического воздуха, южные циклоны, статистические связи, солнечная активность, реанализ.

Введение

Вторжения в умеренные широты Северного полушария арктического воздуха значимо влияют на протекающие в них гидрометеорологические процессы, жизнедеятельность населения, а также экологические условия. Поэтому выявление современных тенденций изменчивости характеристик арктических вторжений, которые поступают в различные его континентальные регионы, а также их связей с другими природными процессами является актуальной проблемой физической географии, метеорологии и климатологии.

Согласно современным представлениям о механизмах образования арктических вторжений, одним из основных является взаимодействие входящих в высокие широты южных циклонов с Арктическим антициклоном [10], состояние которого во многом определяется особенностями взаимодействия атмосферы с ледяным покровом акваторий Арктики [5]. Поэтому существенный интерес представляет решение рассматриваемой проблемы в отношении процессов, которые влияют на изменения характеристик ледяного покрова ее акваторий, расположенных в секторах Северного полушария, где образуются арктические вторжения.

Суммарный объем ледяного покрова какого-либо региона Арктики является одним из надежных индикаторов состояния его климата. Изменения объема льда обусловлены совместным действием факторов, способствующих как потеплению регионального климата [11], так и его похолоданию.

Среди факторов похолодания климата любого региона Арктики к числу наиболее важных в XXI в. относится уменьшение среднего за 11 лет уровня солнечной активности [13]. Данное явление, обусловлено приближением очередного минимума 189-летнего цикла Зюсса [9], который прогнозируется на 2060–2070 гг. [1].

Следствием снижения солнечной активности является уменьшение значений как солнечной постоянной [1], так и оптической плотности облачности над регионами высоких и умеренных широт [3], что в Арктике приводит к существенному уменьшению интенсивности инсоляции ее акваторий – главного источника энергии, потребляемой при таянии арктических льдов.

Одним из важнейших последствий арктических вторжений являются блокирующие процессы, при которых изменяются распределения атмосферных осадков, влажности и приземных температур воздуха на обширных территориях в области их влияния [8; 14].

На территориях, через которые проходят арктические вторжения, создаются засушливые метеоусловия, что, при достаточно большой продолжительности блокирующих процессов приводит к возникновению засух [6].

В основных земледельческих регионах мира, многие из которых расположены в Европейском и Сибирском секторах, особую опасность для развития растительности представляют засухи, которые возникают весной и начале лета.

К числу характеристик арктических вторжений, значимо влияющих на продолжительность блокирующих процессов в некотором регионе, относится объем поступившего в него арктического воздуха. Его значение, при прочих равных условиях, зависит от продолжительности вторжения, а также от средней скорости движения вторгающегося воздуха. Поэтому существенной характеристикой климата того или иного земледельческого региона являются значения суммарной продолжительности арктических вторжений в весенние месяцы, а также от средней скорости воздушных течений. Тем не менее, современные тенденции их изменения в Европейском и Сибирском секторах изучены недостаточно, что осложняет их учет при планировании развития социально-хозяйственных комплексов.

Изложенные соображения позволяют предположить, что значимым фактором межгодовой изменчивости средней скорости воздушных течений и суммарной продолжительности арктических вторжений в указанных секторах могут являться совпадающие с ними по времени вариации суммарного объема льда соответствующих регионов Арктики.

Целью данной работы является выявление современных тенденций изменчивости суммарной продолжительности арктических вторжений, средней скорости воздушных течений и суммарного объема льда для Европейского и Сибирского секторов, а также проверка адекватности выдвинутой гипотезы.

Фактический материал и методика исследования

Для достижения указанной цели применена методика, предполагающая оценку для Европейского и Сибирского секторов Арктики значимости статистических связей между временными рядами средних значений указанных показателей в весенний сезон. Средние значения суммарного объема льда (СОЛ) для каждого сектора вычислялись как сумма среднемесячных объемов льда во всех относящихся к нему районах Арктики для каждого месяца с апреля по июнь, а также за весь весенний сезон:

$$\text{СОЛ} = \sum_{i=1}^{N} S_i l_i h_i,$$

где h_i – средняя толщина льда i-го района, имеющего форму трапеции с основаниями, расположенными по тем или иным параллелям; l_i – его средняя ледовитость; S_i – площадь того же района, которая вычислялась с учетом широт, на которых располагаются его северная и южная границы (основания трапеции), а также расстояния между ними; N – общее количество районов, которые относятся к рассматриваемому сектору.

Значения $h_к$ и $l_к$ для каждого района – «квадрата» соответствующей координатной сетки определялись как средние арифметические значений соответствующих показателей, заданных в его вершинах. При этом как фактический материал о значениях указанных показателей во всех пунктах рассматриваемых регионов Арктики использован реанализ [15]. В указанном источнике для каждого месяца в интервале 01.1979–12.2019 представлены оценки среднесуточных значений всех рассматриваемых показателей, соответствующих узлам криволинейной координатной сетки с шагом 13×13 км.

Значения средней скорости воздушных течений для каждого рассматриваемого сектора оценивались на соответствующем участке южной границы Арктики – Северного Полярного круга. Они определялись на поверхности 1000 гПа. При этом использована информация из глобального реанализа ERA-Interim [12], где данные об изменениях среднесуточных значений меридиональных составляющих скоростей ветра на 1000 гПа представлены за период 01.01.1979–31.12.2018. Эти данные соответствуют узлам координатной сетки с шагом 0,7×0,7°.

Значения всех показателей оценивались для Европейского (0–60° Е) и Сибирского (60–120° Е) секторов. Учитывались все пункты рассматриваемого участка Северного Полярного круга, где в те или иные сутки на поверхности 1000 гПа преобладал ветер северных румбов. Значения средней скорости воздушных течений в таких пунктах нормировались на их количество.

При оценке суммарной продолжительности арктических вторжений применялась типизация макроциркуляционных процессов Северного полушария, разработанная под руководством Б. Л. Дзердзеевского [5]. Значения указанных показателей вычислялись как сумма продолжительностей действия в весенние месяцы элементарных циркуляционных механизмов (ЭЦМ), при которых наблюдаются арктические вторжения в Европейский или Сибирский сектор. ЭЦМ приведены в табл. 1.

Таблица 1

ЭЦМ, при которых в весенние месяцы арктические вторжения возникают в Европейском и Сибирском секторах

Сектор	ЭЦМ
Европейский	4а, 4б, 4в, 10а, 10б, 8а, 8бз, 8бл, 12а, 12бз, 12вз
Сибирский	5а, 5в,8бз, 8бл, 8вз, 8вл, 8гз, 11а, 11б, 11г, 12а, 12бз, 12вз, 5б, 5г, 11в, 12г, 4в, 8гл,10б, 12бл, 12вл

Среди перечисленных в табл. 1 ЭЦМ есть те, при которых арктические вторжения формируются при вхождениях южных циклонов в тот же сектор Арктики. Для Европейского сектора это ЭЦМ 8а, 8бз, 8бл, 12а, 12бз, 12вз, а для Сибирского сектора – 4в, 8гл,10б, 12бл, 12вл. При других ЭЦМ вхождения циклонов происходят в секторах, расположенных восточнее.

Значения продолжительностей действия в каждом месяце всех ЭЦМ за 1899–2018 гг. представлены в [7].

Изучение статистических связей между рядами суммарного объема льда, суммарной продолжительности арктических вторжений и средней скорости воздушных течений осуществлено с применением метода корреляционного анализа и критерия Стьюдента [2]. Значимость связей оценивалась для каждого сектора за период времени – 1993–2018 гг. Перед выполнением подобного анализа во всех сопоставляемых рядах скомпенсированы линейные тренды.

Предполагалось, что гипотеза адекватна, если достоверность статистического вывода о значимости корреляции изменений характеристик ледового покрова и рассматриваемых показателей атмосферной циркуляции составляет не менее 0,95.

Результаты исследования и их анализ

В соответствии с описанной методикой для акваторий Арктики, относящихся к Европейскому и Сибирскому секторам, за апрель – июнь вычислены значения суммарного объема льда (рис. 1).

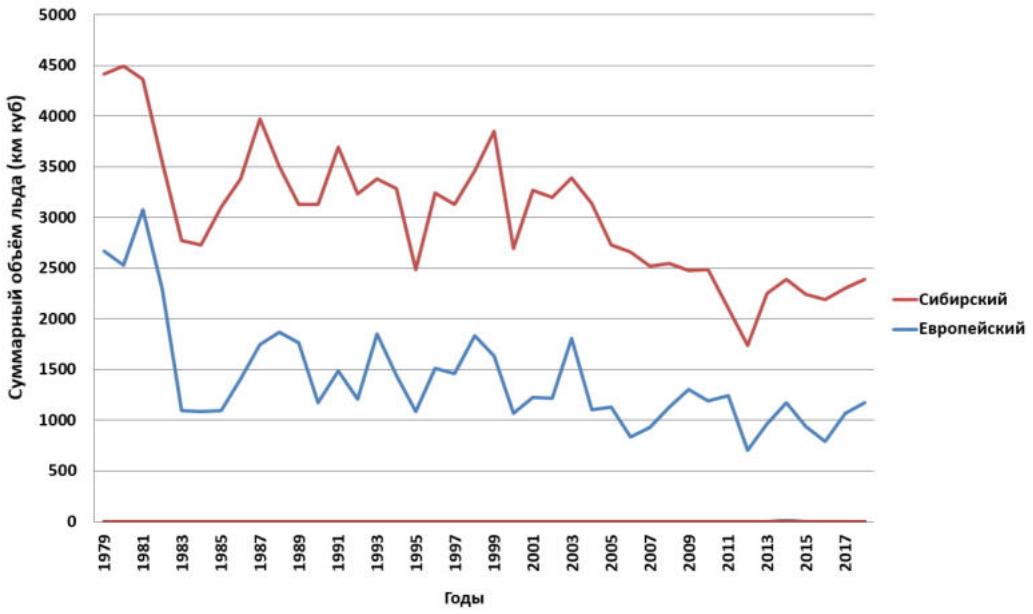


Рис. 1. Изменения суммарного объема льда в Европейском и Сибирском секторах

Из рис. 1 следует, что за 1979–2018 гг. среднемесячные значения суммарного объема льда для Европейского и Сибирского секторов в весенние месяцы заметно снизились. При этом в 2012–2018 гг. их уменьшения не наблюдалось. Более того, в Сибирском секторе после 2012 г. наметилось некоторое увеличение объема льда.

Для каждого сектора с применением описанной методики рассчитаны также средние скорости воздушных течений весной (рис. 2).

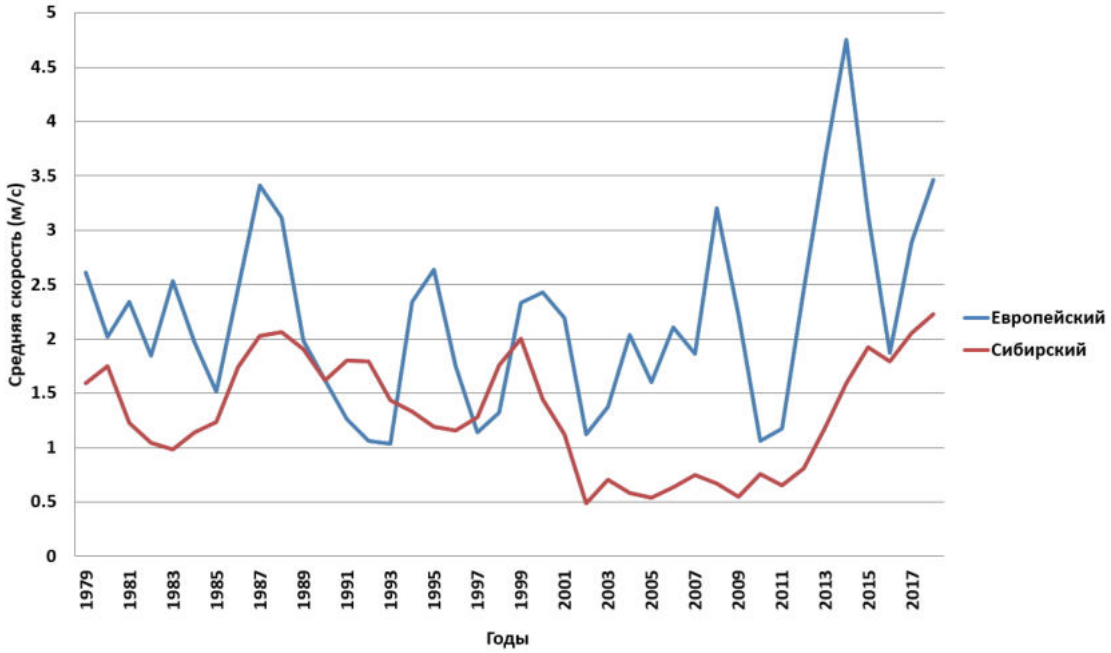


Рис. 2. Средние скорости воздушных течений весной

Рисунок 2 свидетельствует, что в весеннем сезоне средние скорости воздушных течений Европейского и Сибирского секторов испытывают сложные колебания. Их важной особенностью является произошедшая в 2012 г. перемена тенденций.

И в Европейском, и в Сибирском секторе в 2012–2018 гг. значения скоростей возрастают, что указывает на увеличение объемов арктического воздуха, входящего в умеренные широты. Следствием последнего является повышение в соответствующих регионах России рисков возникновения весенне-летних засух.

Рассчитанная с применением табл. 1, а также [7] суммарная продолжительность арктических вторжений для Европейского и Сибирского секторов за весенний сезон приведены на рис. 3.

Рисунок 3 показывает, что суммарная продолжительность арктических вторжений весной также испытывает сложные колебания, в которых в период 1991–2018 гг. присутствуют возрастающие тренды. Средняя скорость увеличения данных показателей существенно повышена в период 2008–2018 гг., в том числе и за 2012–2018 гг.

С применением сформированных временных рядов средних за весенний сезон значений трех рассмотренных показателей для выбранных секторов осуществлен их корреляционный анализ. В качестве примера его результаты, соответствующие периодам1993–2018 гг. и 1993–2011 гг., приведены в табл. 2.

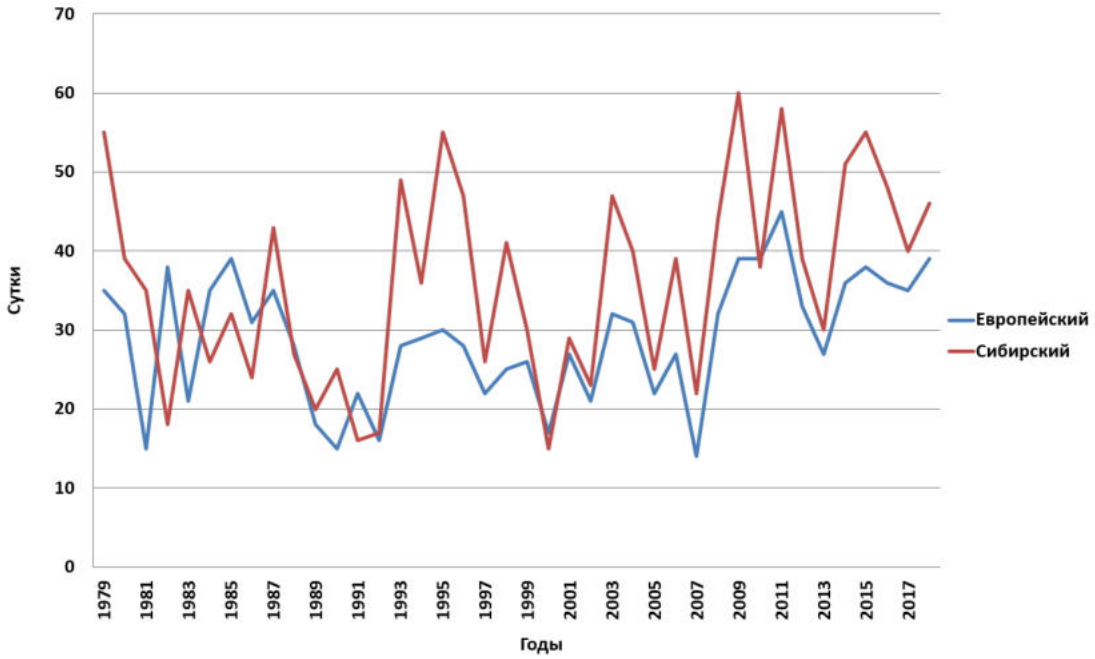


Рис. 3. Суммарная продолжительность арктических вторжений в весеннем сезоне

Таблица 2

Результаты корреляционного анализа связей межгодовых изменений средних за сезон значений суммарного объема льда (СОЛ), средней скорости воздушных течений (ССВ) и суммарной продолжительности арктических вторжений (СПВ)

	1979–2019, 95 % порог = 0,32		1979–2011 гг., 95 % порог = 0,34	
Сектор	ССВ	СПВ	ССВ	СПВ
Европейский	0,32	0,22	0,23	0,13
Сибирский	0,33	0,18	0,31	0,10

Как следует из табл. 2, в целом за период 1979–2018 гг. корреляция межгодовых изменений суммарного объема льда и средней скорости воздушных течений является значимой и положительной как для Сибирского сектора, так и для Европейского сектора, однако за 1979–2011 гг. значимой она не является. Следовательно, на отрезке времени 2012–2018 гг. связь между рассматриваемыми процессами усилилась.

Корреляция межгодовых вариаций суммарного объема льда и суммарной продолжительности арктических вторжений для рассматриваемых секторов за 1979–2018 гг. также являлась положительной, хотя выбранного уровня значимости не достигала. При этом за период 1979–2011 г. она была заметно слабее. Следовательно, в 2012–2018 гг. связь усилилась и между этими процессами.

Таким образом, результаты корреляционного анализа показывают, что выдвинутая гипотеза адекватна, а в период 2012–2018 гг. статистические связи между вариациями усилились. При этом достоверность вывода о наличии связи между изменениями суммарного объема льда и средней скоростью воздушных течений в обоих секторах превысила выбранный уровень значимости.

Полученные результаты показывают, что тенденция перемен климата Европейского и Сибирского секторов Арктики, а также рассматриваемых характеристик арктических вторжений, которая преобладала в период до 2011 г., ныне сменилась на противоположную. Следует ли из этого, что и далее значения рассмотренных показателей в данных секторах будут возрастать? Пока неизвестно, поскольку предвычислить дальнейшие перемены среднего уровня солнечной активности и динамику факторов потепления климата невозможно. Тем не менее, вероятность осуществления такого сценария будущего отнюдь не нулевая, поскольку снижение среднего уровня солнечной активности будет продолжаться до 2060–2070 г.

Выводы

Таким образом, установлено:

1. Изменения суммарного объема льда для весеннего сезона, которые происходили в регионах Арктики, расположенных в Европейском и Сибирском секторах за период 1979–2018 гг., значимо влияли на вариации суммарных объемов арктического воздуха, входивших в это время в соответствующие регионы умеренных широт. Статистические связи между этими процессами в современный период (после 2012 г.) усилились.

2. Характер выявленных изменений указывает на то, что в период 2012–2018 гг. влияние на динамку климата Арктики фактора его похолодания (снижения среднего уровня солнечной активности) преобладает над влиянием факторов потепления.

3. Поскольку сценарий дальнейших перемен климата не предопределен, актуальной проблемой является развитие систем климатического мониторинга изменений как суммарного объема льда, так и вторжений арктического воздуха.

Список литературы

1. *Абдусаматов Х. И.* Двухвековое уменьшение солнечной постоянной приводит к несбалансированному тепловому бюджету Земли и глубокому похолоданию климата // Кинематика и физика небесных тел. 2012. Т. 28, № 2. С. 22–33.

2. *Айвазян С. А., Мхитарян В. С.* Прикладная статистика и основы эконометрики. М. : Юнити. 1998. 1022 с.

3. *Веретененко С. В., Распопов О. М.* Солнечная активность и космические лучи: влияние на облачность и процессы в нижней атмосфере (памяти и к 75-летию М. И. Пудовкина) // Геомагнетизм и аэрономия. 2009. Т. 49, № 2. С. 147–155.

4. *Дзердзеевский Б. Л.* Циркуляционные механизмы в атмосфере Северного полушария в XX столетии // Материалы метеорологических исследований / ИГ АН СССР и Междувед. геофиз. комитета при Президиуме АН СССР. М., 1968. 240 с.

5. *Думанская И. О., Федоренко А. В.* Анализ связи ледовых характеристик морей европейской части России с макроциркуляционными атмосферными процессами // Метеорология и гидрология. 2008. № 12. С. 82–94.

6. Сравнительные исследования засух 2010 и 2012 г. на Европейской территории России по метеорологическим и 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. 246–253.

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

8. *Мохов И. И., Акперов М. Г., Прокофьева М. А*. Блокинги в Северном полушарии и Евро-Атлантическом регионе: оценки изменений по данным реанализа и модельным расчетам // Доклады Академии наук. 2013. Т. 449, № 5. С. 1–5.

9. *Холопцев А. В., Никифорова М. П.* Солнечная активность и прогнозы физико-географических процессов. Verlag LAP Lambert Academic Publishing. Saarbrucken, Deutschland, 2013. 333 p.

10. *Холопцев А. В., Подпорин С. А., Курочкин Л. Е.* Вторжения арктического воздуха и современная климатическая изменчивость экстремальных температур и атмосферных осадков в Крыму // Строительство и техногенная безопасность. №12. (64). 2018. С. 145–157.

11. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. . URL: https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/.

12. *Dee, D.* The Climate Data Guide: ERA-Interim. 31.10.2019. URL: https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/era-interim

13. *Trenberth K. E., Fasullo J. T., Kiehl J.* Earth's global energy bud get / Bull. Amer. Meteor. Soc. 2009. 90, N 3. P. 311–324.

14. The climatology of blocking anticyclones for the Northern and Southern Hemispheres: Block intensity as a diagnostic / J. M. Wiedenmann, A. R. Lupo, I. I. Mokhov, E. A. Tikhonova // J. of Climate. 2002. Vol. 15. P. 3459–3473.

15. A generic ensemble generation scheme for data assimilation and ocean analysis / H. Zuo, M. Alonso-Balmaseda, E. de Boisseson, S. Hirahara, M. Chrust, P de Rosnay. ECMWF, Technical Memorandum N 795. 44 p. https://doi.org/10.21957/cub7mq0i4

УДК 551.583:631.412

Изменение климата и пирогенетические трансформации мерзлотных почв Якутии

А. П. Чевычелов (chev.soil@list.ru), А. Н. Горохов (algor64@mail.ru)

Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, г. Якутск

Аннотация. В последние 10-летия на территории мерзлотно-таежной области Якутии отмечается устойчивая тенденция роста среднемноголетней температуры воздуха и в меньшей степени увеличение среднегодового количества атмосферных осадков. В лесных фитоценозах Центральной и Южной Якутии отмечаются большие запасы лесных горючих материалов, которые составляют 14,92–42,20 т/га, при этом на долю мхов и лишайников, а также опада, относимых к проводникам горения I группы, приходится 37–62 % от общей фитомассы. Вследствие высокой грозовой активности доля грозовых пожаров в регионе в среднем составляет 49 % от их общего числа. Изучены особенности географического распространения, формирования свойств и состава пирогенно-трансформированных мерзлотных почв с полициклическим профилем. Показано, что в составе пирогенных погребенных гумусовых горизонтов отмечается увеличение содержания гумуса и азота, а также фракций физической глины, ила и обменных оснований Ca^{+2} и Mg^{+2}. В мерзлотно-таежной области Якутии, особенно в горных гумидных районах, лесные пожары оказывают негативное влияние на состояние почвенного покрова.

Ключевые слова: климатические изменения, пирогенез, мерзлотные почвы, трансформация свойств и состава.

Введение

Признавая огромное влияние лесных пожаров на изменение состава, свойств и режимов автоморфных почв мерзлотной области, мы предложили термин «Пирогенез», понимая под ним совокупность процессов и явлений, возникающих в природных ландшафтах под действием огня [13]. В лесном покрове Якутии, как и всего северо-востока России, в условиях значительного сокращения лесозаготовок пирогенез стал главным фактором сукцесионных процессов в лесных сообществах. Гари пятнами и полосами разбросаны по всей лесопокрытой площади, охватывая пространства от речных долин до водоразделов [11]. Одна из самых повреждаемых огнем – территория с многолетнемерзлыми и длительно-сезонномерзлотными почвами, включая подзону северной тайги, зоны лесотундры и тундры. Эта мерзлотная область пока наименее освоена, поэтому бороться с пожарами здесь трудно, а последствия их нелегко прогнозировать [8].

Огонь в лесных районах распространения многолетней мерзлоты рассматривают как важный фактор, моделирующий поверхность и оказывающий влияние на геоморфологические процессы. Очевидно, с не меньшим основанием лесные пожары и вообще огонь следует включать в число важных факторов почвообразования, учет влияния которого обязателен при рассмотрении вопросов генезиса и географии лесных почв [1]. В связи с этим целью настоящей статьи являлось изучение современных тенденций изменения атмосферного кли-

мата и природы лесных пожаров в Центральной и Южной Якутии и оценка их влияния на состояние почвенного покрова мерзлотно-таежной области.

Материалы и методы исследований

Наши исследования проводились на территории Центральной и Южной Якутии. Область исследований примерно может быть ограничена координатами 120°–132° в. д. и 56°–62° с. ш. (рис. 1). Исходные материалы для данной статьи получены как посредством проведения собственных исследований, так и привлечения опубликованных данных, имеющихся в нашем распоряжении. Оценка частоты и возраста лесных пожаров произведена по огневым поражениям на стволах деревьев, сохранившихся на гарях в постпирогенный период. При определении пирогенных трансформаций мерзлотных почв использовались общепринятые в почвоведении профильно-генетический и сравнительно-аналитический методы [6; 7], при этом почвенные показатели определялись по стандартным методикам [2].

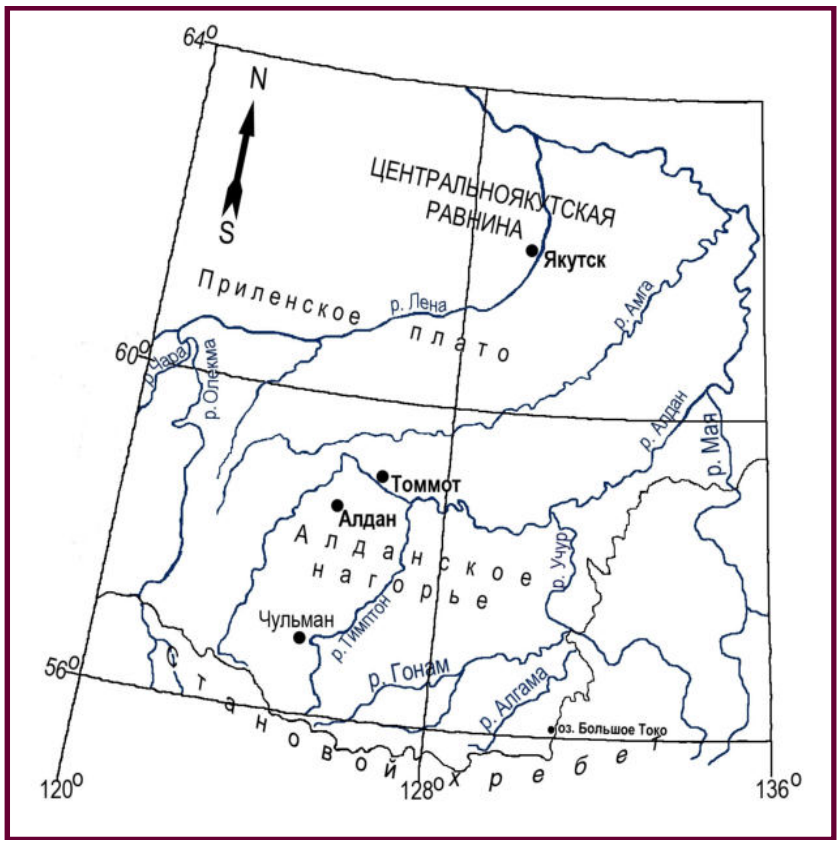


Рис. 1. Регион проведения исследований

Для оценки состояния ландшафтов Центральной и Южной Якутии нами были проанализированы динамические ряды, составленные на основе межгодовой изменчивости климатических характеристик по материалам метеостанции Якутск и отдельных показателей по метеостанции Алдан. При этом были привлечены архивные данные по температуре воздуха и осадкам Всероссийского НИИ гидрометеорологической информации – Мирового центра данных (meteo.ru) [3] и данные климатических справочников [9].

Известно, что климат постоянно претерпевает естественные изменения. В последние два-три десятилетия на естественные климатические циклы все заметнее влияют колебания, связанные с антропогенным воздействием. При изучении многолетних изменений современного климата, чтобы исключить случайные вариации усредняют метеорологические данные за промежуток времени, получая так называемые «скользящие» данные. Анализ таких пятилетних скользящих значений для средней годовой температуры воздуха был выполнен по Якутску.

Результаты и обсуждение

Анализ данных показывает, что можно выделить период с отчетливо выраженным повышением температуры воздуха, начиная с середины 80-х гг. прошлого столетия до настоящего времени. При этом за период метеорологических наблюдений в целом отмечается положительный тренд средней годовой температуры и составляет 0,16 ºС/10 лет за 1830–2016 гг. (рис. 2). Наблюдается заметное повышение *tг* в Якутске – в целом на 2,9 °С. Положительный тренд средней месячной температуры воздуха июля составляет 0,03 ºС/10 лет. Среднеиюльские температуры за период с 1830 по 2016 г. возросли в среднем на 0,5 °С. Максимальное повышение температуры воздуха отмечается зимой, значения положительного тренда средней месячной температуры воздуха января составляют – 0,36 ºС/10 лет. Среднеянварские температуры воздуха за период наблюдений с 1830 по 2016 г. увеличились на 6,8°С. Следовательно, тенденция увеличения *tг* на метеостанции Якутск в значительной мере обусловлена ростом температур зимних месяцев.

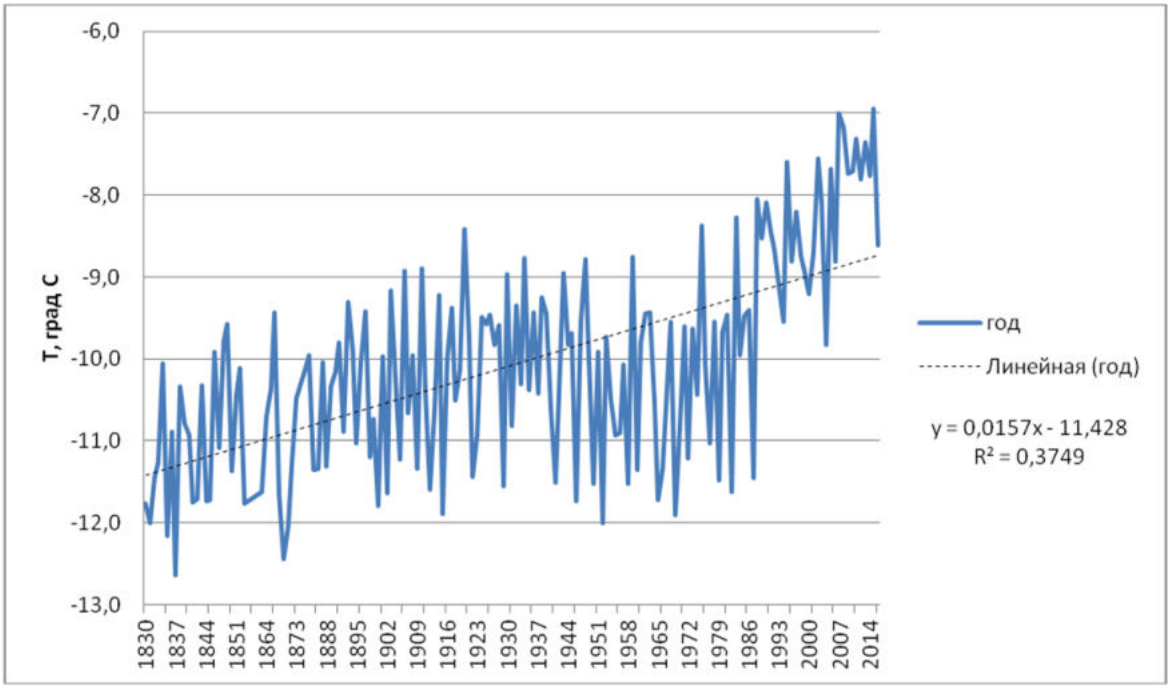


Рис. 2. Многолетняя изменчивость средней годовой температуры воздуха на метеостанции Якутск

Тренд среднегодового количества осадков за период с 1891–2016 гг. составляет 3,98 мм/10 лет (рис. 3). При этом средняя сумма осадков *Qг* возросла почти на 50 мм за весь период наблюдений.

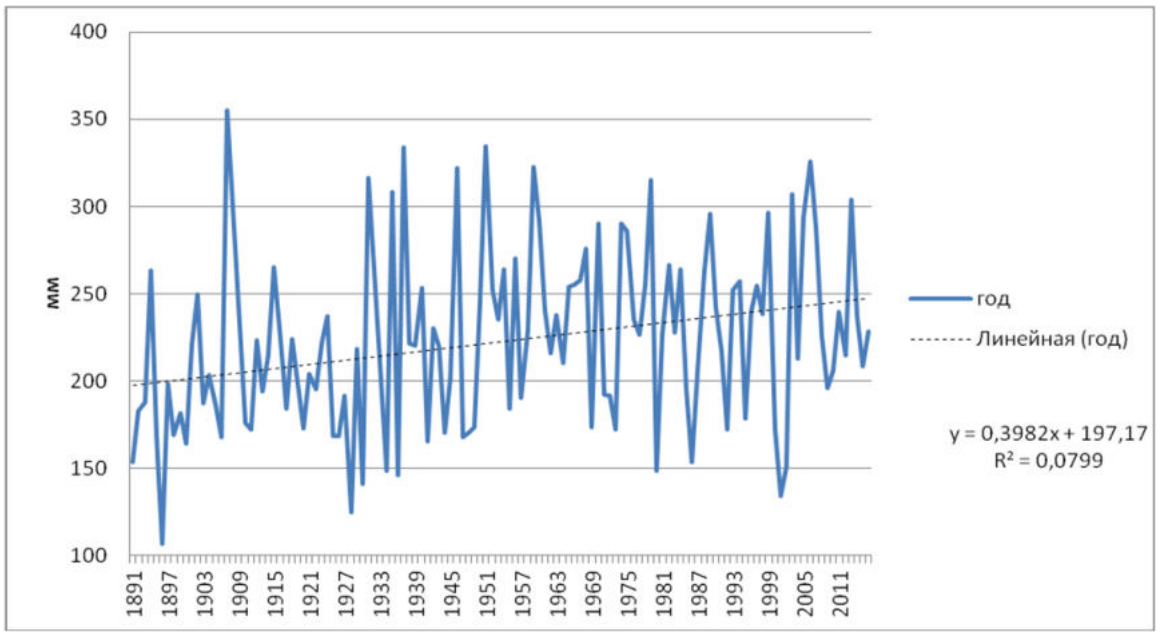


Рис. 3. Многолетняя изменчивость среднего годового количества осадков на метеостанции Якутск

В связи с отмеченной тенденцией увеличение годового количества осадков за период 1891–2014 гг. по станции Якутск, нами также изучена контрастность увлажнения применительно к отдельным маловодным и многоводным годам (табл. 1). Так в данное время наименее увлажненными оказались 1896, 1928 и 2001 гг., а наиболее увлажненными – 1900 и 1941 гг., когда соответственно выпало 53 и 57 %, а также 177 и 154 % атмосферных осадков от среднемноголетней годовой нормы за исследуемый период. Ранее нами указывалось [13], что такой контрастный разброс осадков по отдельным годам на метеостанциях в Якутии обусловлен неравномерностью увлажнения данного региона в сезонном и многолетнем цикле в условиях резко континентального климата. При этом дефицит увлажнения в отдельные годы в сочетании с экстремально-высокими летними температурами воздуха обусловливают высокую пожароопасность и горимость лесов на исследуемой территории. Согласно данным по статистике лесных пожаров в Якутии за 1955–2010 гг. наиболее пожароопасными были 1973, 1984–1987, 1990–1993, 1996, 2001–2003 гг., когда регистрировалось свыше 800 пожаров, а максимально пожароопасным – 1986 г., когда было зафиксировано 1400 пожаров [4].

Отметим, что маловодные годы на станции Якутск (табл. 1), такие как 1973, 1986, 2001, 2002 гг. целиком укладываются в отмеченные выше пожароопасные периоды, при этом особенное значение имеют двух- и трехлетние повторы маловодных или пожароопасных лет подряд. Таким уникальным являлся период 2000–2002 гг., когда выпало всего 134,0–173,0 мм осадков составляющих 57–74 % среднемноголетней нормы. Известно, что лесные пожары в лет-

ний сезон в Якутии являются преимущественно низовыми или подстилочно-гумусовыми [15]. При высокой интенсивности таких пожаров напочвенный покров и лесная подстилка могут выгорать полностью за один пожароопасный сезон. При этом оголенный с поверхности мелкозем лесных почв может быть подвергнут в разной степени поверхностному смыву. В последнем случае большое значение также имеет чередование в условиях резко континентального климата Центральной Якутии маловодных и многоводных лет подряд. За исследуемый период 1891–2014 гг. такие условия складывались в 1906–1907, 1930–1931, 1934–1935, 1969–1970, 1973–1974, и в уникальный период 2000–2002 гг., за которым отмечались три многоводных года (2003, 2005 и 2006 гг.). Таким образом, учитывая высокую пожароопасность лесов Якутии, когда здесь выделяются 4–6 и 10–14-летние циклы высокой горимости [4], поверхностный смыв и переотложение почвенного мелкозема имеют большое значение в трансформации свойств и состава мерзлотных почв.

Таблица 1

Контрастность атмосферного увлажнения по метеостанции Якутск в период 1891–2014 гг.

Период	Маловодные годы			Многоводные годы		
	Годы	Q, мм	Q, %	Годы	Q, мм	Q, %
1891–1923 гг.	1891	153,8	77	1894	263,4	131
	1896	106,8	53	1902	249,5	124
	1900	164,4	82	1907	355,2	177
	1906	167,8	84	1915	265,0	132
1924–1955 гг.	1928	125,0	57	1931	316,6	145
	1930	141,1	65	1935	308,2	141
	1934	148,9	68	1937	333,7	152
	1936	146,3	67	1946	322,3	148
	1941	165,3	76	1951	334,7	154
1956–1985 гг.	1969	173,4	72	1959	322,9	134
	1973	172,5	72	1970	290,4	121
	1980	148,8	62	1974	290,4	121
				1979	315,1	131
1986–2014 гг.	1986	153,3	66	1999	296,2	127
	1992	172,4	74	2003	307,0	131
	2000	173,0	74	2005	294,0	126
	2001	134,0	57	2006	326,0	139
	2002	151,0	65	2013	304,0	130

Примечание. *Q*, мм – количество осадков за год, мм. *Q*, % – количество осадков за год, % от среднемноголетнего за исследуемый период.

В климатическом сезонном цикле территории максимум недостатка насыщения водяного пара в июле совпадает по времени с сезонным максимумом грозовых явлений и наибольшей непрерывной продолжительностью гроз (рис. 4) следствием чего является проявление сухих гроз, не сопровождаемых выпадением атмосферных осадков. Юг Якутии характеризуется максимальной частотой грозовых явлений, составляющей 15–18 дней в году, вследствие чего основным источником лесных пожаров здесь (в 75 % случаев) являются сухие грозы. Для Якутии доля грозовых пожаров в среднем составляет 49±3,8 %, а отношение площади грозовых пожаров к общей площади лесных пожаров – 67±5 %, изменяясь от минимального значения 10 % до максимального – 99 % [5].

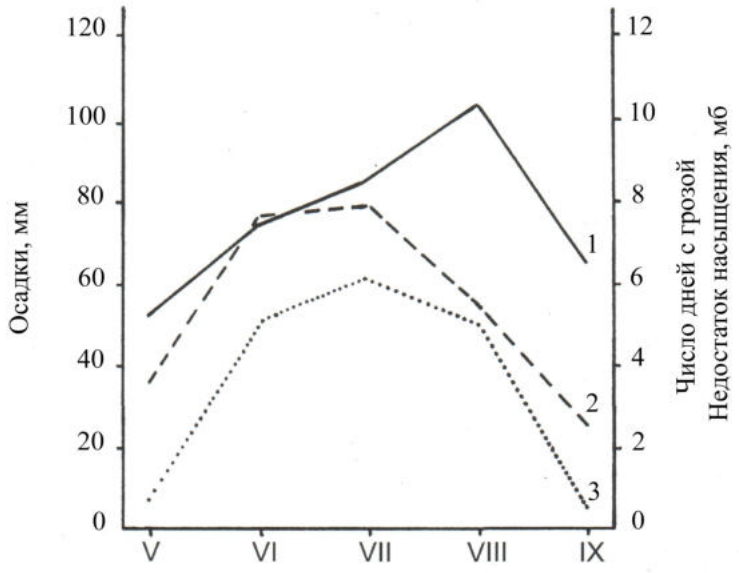


Рис. 4. Сезонный ход: осадков (1), недостатка насыщения (2) и частоты гроз (3) в Южной Якутии по данным метеостанции Алдан

В лесном покрове исследуемого региона исключительно преобладают светлохвойные леса из лиственницы Каяндера, на долю которых приходится 91 % лесопокрытой площади [10]. Интенсивность «работы» гетеротрофов, или второго трофического уровня системы, в лесах геокриогенной области значительно ослаблена как в живом, так и в детритном пищевых потоках. Вследствие этого превышение запасов лесных подстилок над годичным опадом в часто подвергавшихся пожарам лесах Центральной Якутии достигает 4−10-кратных значений, а в давно негоревших, с менее благоприятным гидротермическим режимом, – в десятки раз. В лесных фитоценозах Южной Якутии отмечаются большие запасы лесных горючих материалов, которые составляют 14,92–42,20 т/га, при этом на долю мхов и лишайников, а также опада, относимых к проводникам горения I группы, приходится 37–62 % от общей фитомассы. Последнее на исследуемой территории в засушливые периоды и в сухие сезоны определяет также высокую пожароопасность в таких лесах [12].

Постпирогенные трансформации свойств и состава мерзлотных почв показаны нами на примере изменения показателей дерново-карбонатной выщелоченной почвы, имевших место в послепожарный период 1985–1992 гг. В 1992 г., через 7 лет после прошествия сильного низового пожара, по послепожарной зачистке разреза 11–84 был описан разрез 3–92А. В его морфологическом строении отмечены существенные от допожарного состояния изменения (табл. 2), сопровождаемые уменьшением мощности почвенного профиля с 60 до 39 см. В частности, горизонт лесной подстилки А0 полностью выгорел, от гумусово-аккумулятивного горизонта А осталась только поверхностная пленка более минерализованного вторичного (послепожарного) гумусового горизонта. Уменьшилась также и мощность горизонта АВ, и в целом подгумусовой части почвенного профиля. Изменились также физико-химические показатели исследованного разреза. Так, более чем на единицу сдвинулось значение pH в ще-

лочную сторону поверхностного горизонта А, при этом одновременно почти троекратно в нем уменьшилось содержание органического вещества. В составе почвенно-поглощающего комплекса данного почвенного горизонта при общем незначительном изменении суммы обменных оснований почти в 1,5 раза уменьшилось содержание обменного кальция и в 2 раза увеличилось количество поглощенного магния.

Таблица 2

Изменение физико-химических свойств мерзлотной дерново-карбонатной выщелоченной почвы Южной Якутии в послепожарный период

Горизонт	Глубина, см	pH_{H_2O}	Гумус, %	Обменные катионы, смоль(экв)/кг почвы		Фракции, %		CO_2 карбонатов, %
				Ca^{+2}	Mg^{+2}	<0,001 мм	<0,01 мм	
До пожара, разрез 11–84								
А	0–9	6,1	31,5	53,5	17,8	-	-	Н. о. *
АВ	9–25	6,8	5,2	26,9	17,9	38,0	65,0	-//-
Bm	25–45	7,4	2,7	24,8	15,6	44,6	81,0	0,7
ВСса	45–60	7,7	1,2	-	-	41,5	77,0	2,2
После пожара, разрез 3–92 А								
А	0–2	7,3	9,4	33,4	35,7	-	-	Н. о.
АВ	2–11	6,8	5,1	22,1	16,8	32,4	63,4	-//-
Bm	11–27	7,2	2,4	26,8	13,2	49,0	83,2	0,8
ВСса	27–39	7,8	1,2	-	-	34,9	60,5	2,5

*Н. о. содержание не обнаружено.

Итоговые результаты исследований послепожарных изменений свойств мерзлотной дерново-карбонатной выщелоченной почвы Южной Якутии показали, что суммарное послепожарное уменьшение (на 21 см) мелкоземистой мощности данной почвы обусловлено в большей мере термопросадкой (46 % от общей потери мощности) почвенного мелкозема и в меньшей мере – его поверхностным смывом (28 %) и выгоранием (минерализацией) органогенной части почвенного профиля (26 %) [14].

При пирогенной трансформации мерзлотных почв Центральной и Южной Якутии нами также наблюдалось образование почв с полициклическим профилем сложного строения, включающего в своем составе 2–3 погребенных деградированных пирогенных гумусовых горизонта с обильным включением черных древесных углей. Подобная мерзлотная палевая серая пирогенно-трансформированная почва (разрез 2Ч-14) была описана нами в окрестностях г. Якутска и имела следующее морфологическое строение почвенного профиля: Ad(0–2) – A(2–17) – BC(17–31) – [ABC](31–40) – [A](40–50) – [BC](50–70) – [ABC](70–130) – C(130–160 см).

Значения актуальной почвенной кислотности данной почвы изменяются сверху-вниз от нейтральных до слабощелочных. Внутрипрофильное распределение гумуса, азота и обменных оснований Ca^{+2} и Mg^{+2} (табл. 3), а также фракций физической глины и ила также однозначно указывает на слоистость ее состава. При этом увеличение содержания гумуса в современном и погребенных

гумусовых горизонтах сопровождается синхронным возрастанием здесь количества азота и обменных оснований Ca^{+2} и Mg^{+2} и указывает на то, что эта тенденция носит биогенный характер, т. е. является следствием педогенеза данной почвы [14].

Таблица 3

Химические свойства и физико-химические показатели почвы

Горизонт	Глубина, см	$pHн_2o$	Гумус, %	Азот, %	C:N	Обменные катионы, смоль(экв)/кг почвы		
						Ca^{+2}	Mg^{+2}	Сумма
Палевая серая, разрез 2Ч-14								
A	4–14	6,7	5,6	0,28	20	23,4	7,4	30,8
BC	18–28	6,7	0,6	0,04	15	8,4	1,4	9,8
[A]	31–40	7,2	3,1	0,12	26	20,8	6,9	27,7
[BC]	31–40	7,5	0,8	0,03	27	8,2	2,7	10,9
[A]	40–50	7,5	3,2	0,13	25	20,5	4,7	25,2
[BC]	55–65	7,9	0,5	0,02	25	7,9	1,4	9,3
[A]	70–130	7,8	5,5	0,26	21	30,5	6,6	37,1
[BC]	70–130	8,3	0,8	0,03	27	10,9	2,2	13,1
C	140–150	8,3	0,1	0,02	5	9,2	1,3	10,5

Заключение

В последние 10-летия ушедшего XX и наступившего XXI в. на территории мерзлотно-таежной области Якутии отмечается устойчивая тенденция роста среднемноголетней температуры воздуха и в меньшей степени увеличение среднегодового количества атмосферных осадков. Так по данным метеостанции Якутск линейные тренды увеличения *tг* и *Qг* составили соответственно 0,16 ºС/10 лет за 1830–2016 гг. и 3,98 мм/10 лет за период с 1891–2016 гг.

Леса Якутии характеризуются высокой горимостью. В условиях резко континентального климата Якутии отчетливо проявляется неравномерность увлажнения в сезонном и многолетнем циклах, что способствует созданию пожароопасных условий в лесных фитоценозах при достижении пожарной «спелости» напочвенных горючих материалов, запасы которых составляют 14,92–42,20 т/га. Для Якутии доля грозовых пожаров в среднем составляет 49±3,8 %, а отношение площади грозовых пожаров к общей площади лесных пожаров – 67±5 %. В данном регионе пожары в лесах сухих местопроизрастаний повторяются через 10–15 лет, в средневлажных – через 60–70 лет, сырых – через 100–150 лет. В течение 110–120-летнего периода действию огня подвергается вся исследуемая территория.

Основное число лесных пожаров на территории Якутии классифицируется как устойчивые низовые или подстилочно-гумусовые. В результате воздействия огня происходит полное уничтожение напочвенного покрова, полностью или частично выгорают поверхностные органогенные горизонты, и, как следствие, резко изменяется гидротермический режим почв.

Сравнительный анализ результатов собственных наблюдений и литературных данных показал, что одновременно с активизацией геоморфологических процессов (термоэрозия, солифлюкция, поверхностный смыв), вызванных лес-

ными пожарами, в мерзлотных ландшафтах наступает перерыв в почвообразовании. Этот процесс впоследствии продолжается на новом чехле делювиальных отложений и приводит к формированию автоморфных почв с полициклическим профилем, вмещающим один, два, а иногда и три погребенных деградированных послепожарных гумусовых горизонта с включениями черных древесных углей.

В условиях гумидных горно-таежных ландшафтов и маломощных зональных почв смыв мелкозема в постпирогенный период может привести к полной утрате почвенного профиля и выходу на поверхность горных пород. В мерзлотной области Якутии, особенно в горных районах, лесные пожары оказывают негативное влияние на состояние почвенного покрова.

Список литературы

1. *Арефьева З. Н., Колесников Б. П.* Динамика аммиачного и нитратного азота в лесных почвах Зауралья при высоких и низких температурах // Почвоведение. 1964. № 3. С. 30–46.

2. *Аринушкина Е. В.* Руководство по химическому анализу почв. М. : Изд-во Моск. ун-та, 1970. 487 с.

3. Архив данных ВНИИГМИ–МЦД. URL: http://www.meteo.ru (дата обращения: 15.04.2020).

4. *Исаев А. П.* Естественная и антропогенная динамика лиственничных лесов криолитозоны (на примере Якутии) : автореф. дис. … д-ра биол. наук. Якутск, 2011. 51 с.

5. *Козлов В. И., Муллаяров В. А., Соловьев В. С.* Лесные пожары в Якутии от гроз // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. 2009. Т. 6, № 2. С. 388–393.

6. *Роде А. А.* Система методов исследования в почвоведении. Новосибирск : Наука, 1971. 92 с.

7. *Розанов Б. Г.* Морфология почв. М. : Изд-во Моск. ун-та, 1983. 320 с.

8. *Сапожников А. П.* Современные отечественные и зарубежные тенденции изучения пирогенеза почв мерзлотной зоны // География и природные ресурсы. 1982. № 1. С. 88–94.

9. Справочник по климату СССР. Вып. 24. Л. : Гидрометеоиздат, 1968. 351 с.

10. *Тимофеев П. А.* Леса Якутии: состав, ресурсы, использование и охрана. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2003. 194 с.

11. *Тихменев Е. А., Пугачев А. А., Тихменев П. Е.* Роль пирогенного фактора в формировании лесного покрова побережья Тайской губы (Охотское море) // Вестник Северо-Восточного государственного университета. 2009. Т. 11, № 11. С. 85–91.

12. *Уткин А. И.* Лесные биогеоценозы геокриогенной области как специфические системы // Экология. 1976. № 3. С. 15–22.

13. *Чевычелов А. П.* Пирогенез и горно-таежное континентальное гумидное почвообразование на Северо-Востоке Азии (на примере Южной Якутии). Новосибирск : СО РАН, 1997. 34 с.

14. *Чевычелов А. П.* Лесные пожары в Якутии и их влияние на почвенный покров в аспекте прогнозируемого изменения климата // Вестник СВФУ. Серия Науки о земле. 2019. № 1(13). С. 55–67.

15. *Щербаков И. П.* Лесной покров Северо-Востока СССР. Новосибирск : Наука, 1975. 344 с.

УДК 551.510.42

Туманы на территории Томской области

О. А. Черниговская (chernigovskaya.o@bk.ru), Л. И. Кижнер (kdm@mail.tsu.ru)
Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск

Аннотация. Рассмотрены основные характеристики и пространственная структура числа дней с туманом, повторяемость, сезонный ход туманов, непрерывная продолжительность их на территории Томской области. Показано, что за последние 40 лет число дней с туманом существенно уменьшилось.

Ключевые слова: туман, число дней с туманом, пространственное распределение туманов, непрерывная продолжительность туманов.

Общие положения

Туман как явление, ухудшающее видимость, оказывает существенное влияние на работу всех видов транспорта. Транспорт играет важную роль в решении приоритетных задач социально-экономического развития Российской Федерации, поэтому важной задачей Гидрометслужбы является качественный прогноз туманов, а также уточнение климатических характеристик, учет современных тенденций их изменения в разных регионах РФ, в том числе в Томской области.

Целью настоящей работы является анализ характеристик туманов в Томской области за последние 40 лет.

Туман представляет собой скопление в воздухе капелек воды или кристаллов льда, при этом горизонтальная видимость уменьшается до 1 км и менее [3]. Туман является одним из наиболее опасных атмосферных явлений для всех видов транспорта, поэтому туманы отнесены к опасным явлениям погоды [2].

Материалом для исследования послужили метеорологические данные из Архива ВНИГМИ-МЦД за период с 1977 по 2017 г. по 8 станциям Томской области [1]. При обработке данных были учтены туманы 6 видов: просвечивающий, поземный, ледяной, ледяной просвечивающий, ледяной поземный. Днем с туманом считается день, в течение которого отмечен хотя бы один вид тумана в месте расположения метеостанций и ближайших окрестностей [4].

Результаты и обсуждение

В работе рассчитано ежегодное число дней с туманом по каждой станции. На рис. 1 представлен график временного хода суммарного числа дней по всем станциям Томской области, а также среднее число дней за период. Число дней с туманом за рассматриваемый период аппроксимируется теоретической кривой третьей степени, уравнение является статистически значимым (в уравнении x – номер года, y – число дней с туманом). На графике можно выделить три периода, различающихся по числу дней относительно среднегодового значения: 1977–1987 гг. число дней с туманом выше среднеклиматического и имеет тенденцию к уменьшению; период 1987–2003 гг., отмечается наименьшая повторяемость туманов; последнее десятилетие – 2004–2017 гг. число дней с туманом возрастает. Можно отметить, что в последние 5 лет наблюдается большая межгодовая изменчивость числа дней с туманом, не наблюдаемая раньше.

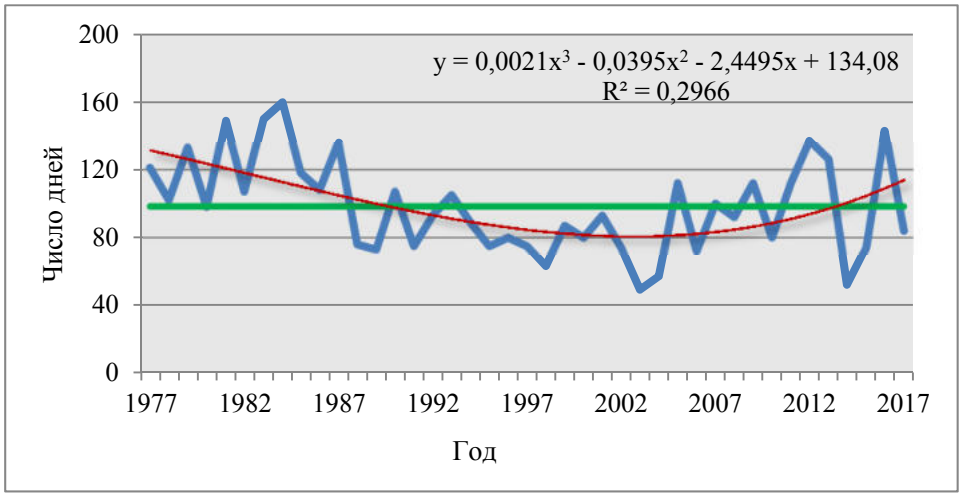


Рис. 1. Временной ход числа дней с туманом за период 1977–2017 гг. на территории Томской области

Пространственное распределение числа дней с туманом дано на рис. 2. Анализ изменения числа с туманом показал, что оно изменяется по территории в пределах от 5,9 до 22,0. Наибольшее среднее число дней зафиксировано на станции Томск (22,0). Возникновение туманов в Томске можно объясните тем, что около четверти дней в году (примерно 92) в Томске удерживается влажность 80 % и более. Второй очаг отмечается в районе станции Колпашево (14,9), так же повышенное среднее число дней с туманом (14,0) – на станции Средний Васюган, Напас (13,3). Минимальное – на станции Усть-Озерное (5,9).

Анализ распределения среднего и максимального числа дней с туманом по территории Томской области показывает, что оно не равномерно и зависит от разных факторов: количества осадков, свойств постилающей поверхности, близости водоемов и населенных пунктов. В основном туманы концентрируются вдоль русел полноводных рек. Например, Томск расположен на берегу реки Томь, станция Колпашево находится на берегу реки Оби, Ср. Васюган – на реке Васюган, притоке Оби. Станция Напас расположена на реке Тым, которая омывает его с севера и запада, а на востоке протекает река Польта. Число дней с туманом напрямую зависит от среднегодового количества осадков, и на станциях с большим числом дней с туманом отмечается количество осадков выше 500 мм/год. Рост числа дней отмечается вдоль реки Обь.

Сезонный ход туманов зависит от физико-географических условий исследуемой территории. В годовом ходе наибольшее число дней приходится в основном на летние месяцы – июль, август, что связано с высокими значениями влажности воздуха и испарением водяного пара с постилающей поверхности. Наибольшая повторяемость туманов отмечается в августе. В осенний период года вероятность образования туманов также высока, чаще всего они встречаются в сентябре, как уже отмечалось раньше, туманы концентрируются возле рек, и осенью, когда температура воды выше температуры воздуха, испаряющийся водяной пар конденсируется. В холодное полугодие туманы несколько чаще образуются в январе на станции Колпашево, в этом месяце наблюдаются морозные туманы.

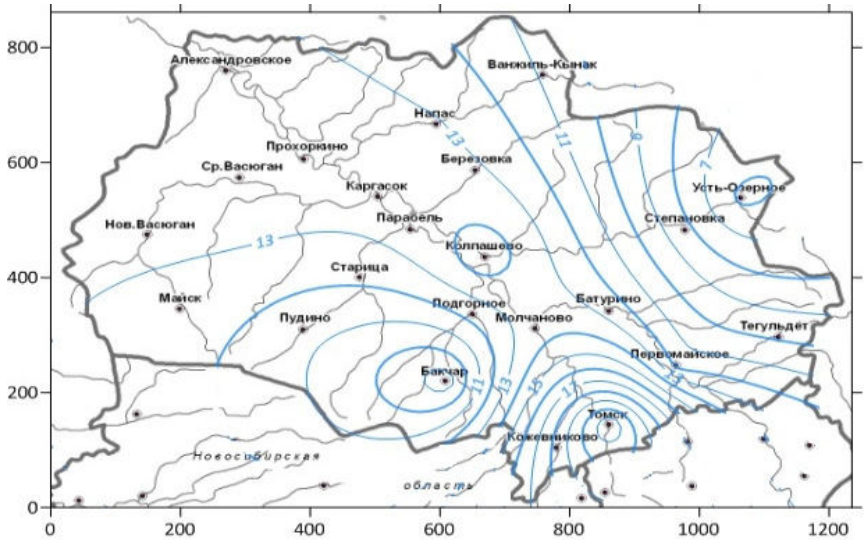


Рис. 2. Карта среднегодового числа дней с туманом на территории Томской области

Для оценки климатических изменений числа дней с туманом полученные данные были сравнены с аналогичными характеристиками, рассчитанными за период 1936–1980 гг. [4] (табл. 1).

Таблица 1

Среднемесячное число дней с туманом на территории Томской области (1977–2017 гг.) в сравнении с более ранним периодом (1936 –1980 гг.)

Станция / Месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Сумма
Бакчар	0,3	0,4	0,3	0,4	0,4	0,7	1,6	2,1	1,1	0,7	0,4	0,2	8,6
	2,0	2,0	0,8	0,7	0,8	1,0	2,0	4,0	3,0	1,0	0,9	2,0	20,2
Колпашево	1,2	0,7	0,7	0,8	0,8	0,7	1,9	3,2	2,5	1,5	0,5	0,4	14,9
	3,0	2,0	2,0	1,0	0,7	0,6	2,0	3,0	3,0	2,0	1,0	3,0	23,3
Томск	0,2	0,3	0,4	1,4	1,1	2,0	3,5	5,0	3,9	2,6	1,0	0,6	22,0
	2,0	2,0	1,0	2,0	0,9	2,0	3,0	5,0	4,0	2,0	2,0	2,0	27,9
Напас	0,1	0,1	0,5	0,6	0,7	0,8	1,7	3,9	2,8	1,6	0,2	0,3	13,3
	0,6	0,4	0,7	0,4	0,7	0,7	2,0	4,0	3,0	1,0	0,4	0,5	14,4
Первомайское	0,6	0,4	0,3	0,1	0,2	0,8	2,1	3,4	1,9	1,1	0,4	0,5	11,8
	2,0	1,0	0,6	0,6	0,4	1,0	3,0	4,0	2,0	1,0	0,5	2,0	18,1
Пудино	0,4	0,2	0,2	0,4	0,8	1,4	2,4	2,3	1,7	1,1	0,3	0,2	11,4
	2,0	0,9	0,9	0,9	1,0	2,0	3,0	5,0	3,0	1,0	0,7	2,0	22,4
Ср. Васюган	0,3	0,5	0,4	0,2	0,4	1,0	2,6	4,2	2,7	1,3	0,2	0,2	14,0
	1,0	0,6	0,6	0,8	0,7	0,7	2,0	4,0	3,0	0,6	0,4	0,8	15,2
Усть-Озерное	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3	0,4	1,0	1,7	1,2	0,6	0,1	0,1	5,9
	0,2	0,3	0,3	0,8	0,7	0,7	2,0	4,0	3,0	0,6	0,4	0,8	13,8

Примечание: □ – *полученные значения (1977–2017 гг.);* □ *– значения из Справочника (1936–1980 гг.)*

Сравнивая полученные нами значения и значения из Справочника [4], можно заключить, что число дней с туманом за последние 40 лет существенно уменьшилось, особенно на станциях Бакчар, Усть-Озерное – более чем в 2 раза. Меньшие отличия отмечены на станциях Томск, Напас, Первомайское, Ср. Васюган (от 1,3 до 6,5 дней).

Распределение числа дней по месяцам соответствует распределению годового хода из Справочника: наибольшая повторяемость приходится на летный и осенний периоды с максимумов в августе. Можно отметить, что за последнее 40 лет наиболее существенно повторяемость туманов уменьшилась в зимний период, летом изменение незначительное. На станции Томск среднее число дней с туманом незначительно увеличилось в мае, июле и октябре.

Оценка непрерывной продолжительности туманов показала, что, например, в Томске наиболее часто туманы имеют непрерывную продолжительность до 1 ч. Наибольшая продолжительность составила 21 ч. В 90 % случаев непрерывная продолжительность туманов не превышает 5 ч.

Интенсивность тумана характеризуется ухудшением метеорологической дальности видимости (МДВ). Наиболее опасные туманы наблюдаются при видимости 50 м, в умеренных туманах видимость достигает от 50 до 500 м, а при слабом тумане – видимость составляет от 500 м до 1 км.

Расчеты показали, что наиболее часто отмечаются слабые туманы – их повторяемость составляет 50 % случаев. Туманы средней интенсивности и сильные отмечаются соответственно в 45 и 5 % случаев.

Аналогичные результаты получены и для других станций: наибольшую повторяемость имеют туманы слабой интенсивности, а интенсивные туманы – минимальную повторяемость.

Краткие выводы

В работе показано, что за последние 40 лет число дней с туманом существенно уменьшилось. При этом в последнее десятилетие наблюдается тенденция увеличения числа дней с туманом на станциях. В последние годы в Томске отмечается наибольшая межгодовая изменчивость числа дней с явлением. В работе рассмотрены такие характеристики, как непрерывная продолжительность и интенсивность явления, которые раньше не приводились в климатических справочниках.

В целом уменьшение числа дней с туманом является благоприятным фактором для функционирования транспортной отрасли области.

Работа выполнена за счет гранта РФФИ № 18-45-700010 р_а.

Список литературы

1. Атмосферные явления. Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации. Мировой центр данных. URL: http://www.meteo.ru.

2. Опасные явления погоды на территории Сибири и Урала. Ч. 1 / А. Д. Дробышев, С. Д. Кошинский, Л. Г. Корулина, И. О. Лучицкая. Л. : Гидрометеоиздат, 1979. 382 с.

3. *Матвеев Л. Т.* Физика атмосферы. СПб. : Гидрометеоиздат, 2000. 751 с.

4. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Вып. 20 (Томская, Новосибирская, Кемеровская области и Алтайский край). Ч. 1–6. Многолетние данные. СПб. : Гидрометеоиздат, 1993. 717 с.

МОНИТОРИНГ, МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ СУШИ

УДК 556.043

Опыт экстраполяции кривой расходов р. Ии с привлечением данных радарной съемки

Т. И. Антонова, Е. Н. Сутырина (ensut78@gmail.com)

Иркутский государственный университет, г. Иркутск

Аннотация. Приводятся предварительные результаты исследования возможности привлечения данных радарной съемки SRTM для восстановления кривой площадей и экстраполяции кривой расходов на примере р. Ии.

Ключевые слова: р. Ия, Тулун, кривая расходов, экстраполяция, данные SRTM.

Введение

Целью работы является изучение возможности использования данных радарной съемки для построения кривой площадей $\Omega=f(H)$ и экстраполяции кривой расходов $Q = f(H)$ на примере р. Ии – г. Тулун.

Город Тулун расположен р. Ие, притоке р. Оки (бассейн Ангары). Территория города представляет собой холмисто-увалистую равнину, сформированную эрозионной деятельностью р. Ии и ее притоков. Город располагается на Транссибирской железнодорожной магистрали. Через Тулун проходят автомобильные дороги федерального значения.

В 1984 г. в Тулуне произошло наводнение, в зоне затопления оказались триста жилых домов. В июне 2006 г. в результате наводнения на р. Ие вся прибрежная зона была размыта, оказалась затопленной центральная часть города и федеральная трасса М-53, город фактически был обездвижен. Пострадали более 250 домов и приусадебных участков [2].

28 июня 2019 г. уровень воды в р. Ие достиг отметки 1387 см (критическая отметка – 700 см). Дамбы, отсыпанные за несколько лет до этого, оказались неспособны уберечь жилые дома от затопления. Всего вода затронула 887 домов, где проживал 1771 человек.

Используемые материалы

В работе использовались:

- данные топографической радарной съемки SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission);
- крупномасштабные снимки из сервиса Google Earth Pro;
- данные об измеренных расходах воды из ежегодника из ежегодника 1961 г. [3];
- данные сервиса ежедневного мониторинга уровня воды в водных объектах России – AllRivers [4];
- данные об уровнях из АИС ГМВО (Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов) [1].

Обсуждение результатов

Известно, что наиболее доступен для измерения уровень воды, а измерение расхода воды достаточно трудоемко, и выполняется наблюдателем гидрологического поста лишь несколько раз в месяц. Однако для характеристики водных ресурсов необходимы ежедневные значения расходов. Как в режимном, так и в оперативном вариантах учета стока в качестве первого приближения к значению расхода воды при фиксированном уровне принимается значение расхода воды, полученное по опорной кривой расходов $Q = f(H)$ (зависимости расходов от уровней воды для текущего уровня воды H).

Кроме этого, далеко не всегда при экстремально высоких уровнях воды удается произвести измерения расхода и встает вопрос экстраполяции кривой расходов $Q = f(H)$ до заданного уровня. Это особенно относится к высоким уровням при прохождении паводков и половодий; измерение расходов в этих условиях связано с техническими трудностями, а также часто бывает невозможно из-за кратковременности периода пика паводка. Для экстраполяции полезно располагать кривой площадей $\Omega = f(H)$. Используя цифровую модель рельефа (ЦМР) по данным радарной съемки SRTM, была предпринята попытка восстановить кривую площадей для створа поста п. Ия – г. Тулун. Для этого по ЦМР первоначально были получены значения ширины реки в створе гидропоста при различных отметках уровня в системе WGS84.

Далее по крупномасштабным снимкам, полученным с помощью сервиса Google Earth Pro, была определена ширина р. Ии в створе поста за определенные даты, а из сервисов AllRivers. info и АИС ГМВО были получены значения уровня и вычислена отметка уреза в Балтийской системе. По соотношению ширины в створе с отметками в системе WGS84 и в Балтийской системе была уточнена систематическая поправка для пересчета отметок из WGS84 в Балтийскую систему, которые в дальнейшем могут быть переведены в значения уровня H, см.

После введения поправки данные о ширине по SRTM и крупномасштабным космоснимкам хорошо соотносятся с натурными измерениями ширины по данным промеров (рис. 1).

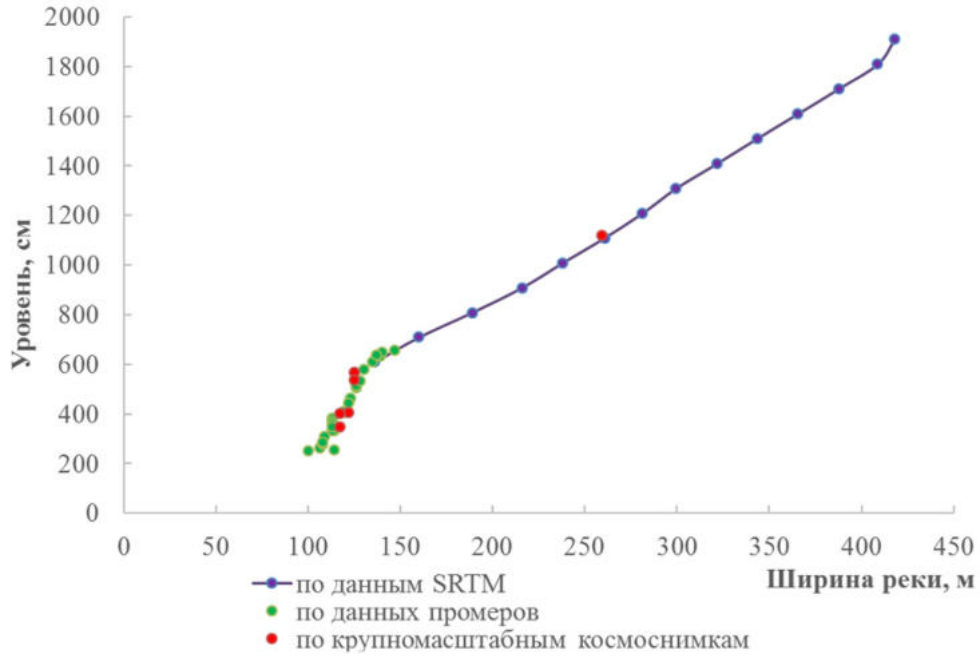


Рис. 1. Связь ширины р. Ии и уровня воды на основании различных материалов

На основании данных о ширине по материалам SRTM были рассчитаны значения площадей поперечного сечения Ω. Так как при отметках до 455,0 м БС точное определение ширины из-за специфики пространственного масштаба данных SRTM невозможно, то на данной отметке площадь была получена по кривой площадей по данным промеров [3], дальнейшее приращение площади получено по SRTM, и представлено на рис. 2.

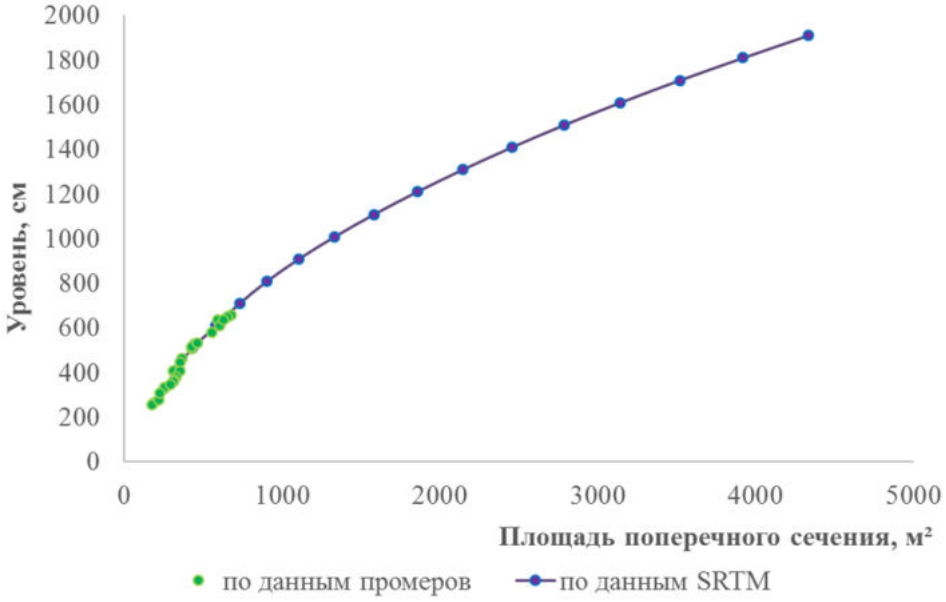


Рис. 2. Кривая площадей Ω = *f(H)* в створе гидропоста р. Ия – г. Тулун

Площади по данным SRTM и промеров хорошо соотносятся между собой, но по данным SRTM просто получить кривую площадей до необходимых отметок без проведения дополнительных трудоемких полевых работ.

Далее полученную кривую площадей мы использовали для экстраполяция кривой расходов. В данном исследовании экстраполяция вверх с применением кривой площадей может была выполнена следующими способами:

- по элементам расхода (через кривые площадей $\Omega = f(H)$ и скоростей $V = f(H)$)
- по способу Стивенса;
- по способу Стивенса-Великанова
- с помощью формулы Шези (с применением параметра M без непосредственного учета уклонов свободной поверхности).

На рис. 3 приведены результаты экстраполяции кривой расходов, полученной на основании анализа измеренных расходов только за один год, для имитации наиболее сложных условий экстраполяции со значительной (около 45 %) амплитудой уровней экстраполяции вверх. Экстраполированные кривые расходов, полученные в данном исследовании, приведены в сопоставлении с кривой расходов, построенной специалистами Иркутского УГМС, имеющими в распоряжении многолетние ряды измеренных расходов и выполнявшими расчеты расходов во время паводка 2019 г. с привлечением инструментальных измерений и учетом уклонов водной поверхности. Также для наглядности на рис. 3 приведены измеренные расходы, охватывающие больший диапазон значений уровня.

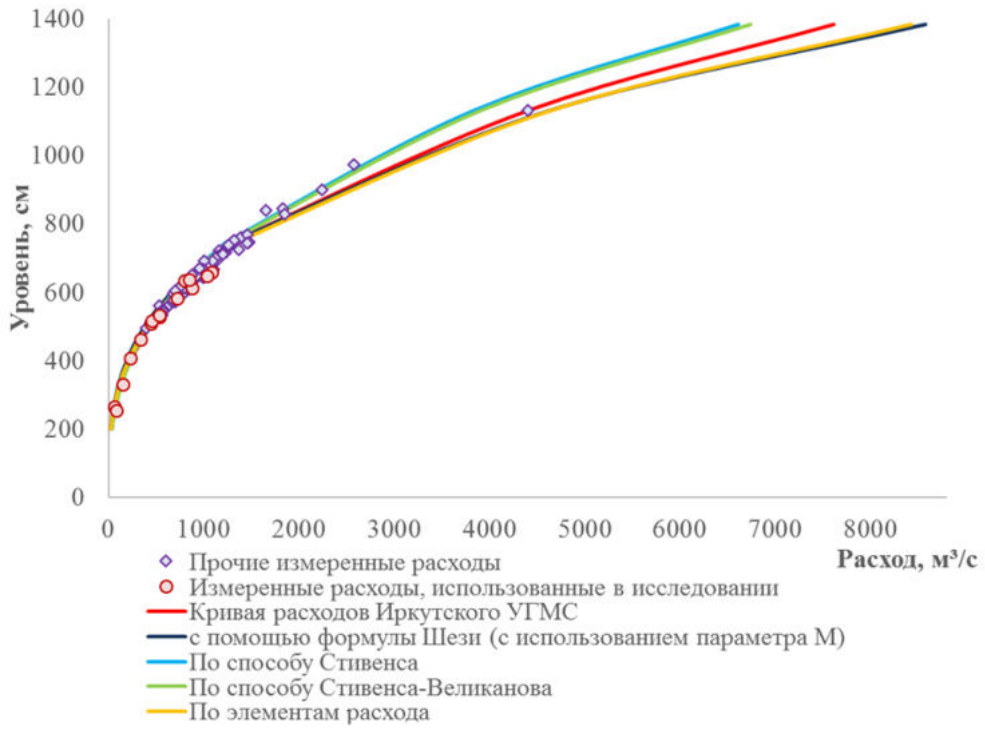


Рис. 3. Кривые расходов $Q = f(H)$ *в* створе гидропоста р. Ия – г. Тулун

По рис. 3 видно, что способы экстраполяции с применением формулы Шези (с использованием параметра M без данных об уклоне водной поверхности) и по элементам расхода с привлечение данных радарной съемки при ми-

нимуме исходной информации об измеренных расходах дают завышенные значения расходов при наивысшем наблюденном уровне 1387 см на 14 и 13 % соответственно по сравнению с данными с кривой расходов Иркутского УГМС. По способам Стивенса и Стивенса – Великанова получены заниженные расходы на 12 и 10 % по сравнению с данными с кривой расходов Иркутского УГМС при том же уровне наивысшем наблюденном уровне.

Выводы

В целом, видно, что привлечение данных радарной съемки при минимуме доступной информации об измеренных расходах и значительной части амплитуды уровней, неосвещенной измерениями соответствующих расходов, позволяет с применением способа Стивенса-Великанова получать наиболее приближенную оценку расходов р. Ии к информации Иркутского УГМС, полученную с использованием многолетних рядов измеренных расходов и выполнявшими расчеты расходов во время паводка 2019 г. с привлечением инструментальных измерений и учетом уклонов водной поверхности. Можно констатировать, что привлечение данных радарной съемки может быть оправдано при недостатке прочей информации и необходимости экстраполяции кривой расходов до экстремальных уровней, при которых не производилась съемка берегового рельефа.

Исследование выполнено при частичной поддержке РФФИ, грант № 17-29-05045.

Список литературы

1. АИС ГМВО (Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов). URL: https://gmvo.skniivh.ru/ (дата обращения: 15.05.2020).
2. Все крупные наводнения в истории Тулуна. URL: https://glagol38.ru/text/29-06-2019/navod_tulun (дата обращебния: 12.07.2020).
3. Гидрологический ежегодник. Л. : Гидрометеоиздат, 1961. Т. 7. Вып 2–4.
4. AllRivers. URL: https://allrivers.info (дата обращения: 18.07.2020).
5. Google Планета Земля. URL: https://www.google.com (дата обращения: 20.07.2020).

УДК 556.5

Режим уровней воды озер Кольского полуострова

Е. В. Давыденко (davydenko091@gmail.com)

Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург

Аннотация. Приведены результаты обобщающего анализа озер Куэтсъ-ярви, Пул-озеро, Ловозеро, Умб-озеро, Пермус-озеро. Построены и проанализированы хронологические графики характерных уровней воды исследуемых озер. Приведены результаты спектрального анализа. Рассмотрены внутригодовой ход уровней воды озер.

Ключевые слова: озеро, уровень воды, спектральный анализ, цикличность.

Введение

Кольский полуостров расположен на крайнем северо-западе Европейской территории России. С трех сторон – севера, востока и юга – полуостров омывается Баренцевым и Белым морями. Он входит в зону избыточного увлажнения и является озерным краем. Здесь насчитывается 107 146 озер, общая площадь зеркала которых составляет 8 195 км^2 или 6,3 % всей территории. Площадь водной поверхности менее 1 км^2 имеют 99 % озер. Подавляющее большинство озер сточные или проточные. [2].

Изучение уровенного режима озер является важной прикладной задачей. При современном многостороннем использовании водоемов огромный практический интерес проявляется к их уровенному режиму. Так как амплитуды колебаний служат одной из исходных величин при проектировании водозаборов и водосбросов, дамб, плотин, дорог и прочего.

Главной причиной колебаний уровня воды озер, как правило, является изменение климата. Поэтому уровень воды озера можно рассматривать как интегральный показатель колебанием увлажненности и климата на изучаемой территории. Климат Кольского полуострова находится под смягчающим влиянием окружающих его морей и особенно запасов тепла, приносимых северной ветвью теплого течения Гольфстрим. В качестве одного из индикаторов изменения климата в атлантико-европейском секторе северного полушария является преобладание поступления в рассматриваемый район воздушных масс атлантического и арктического происхождения и интенсивная циклоническая деятельность над Норвежским и Баренцевым морями, которые создают своеобразный режим тепла и влаги [1; 4].

Исходные данные

В качестве объекта исследования были выбраны озера, расположенные в зоне избыточного увлажнения (табл.).

Для анализа многолетней изменчивости уровней воды на исследуемых озерах использовались данные о средних годовых значениях уровня воды $H(t)$ и последовательности ежегодных средних значений уровней $Hi(t)$ (где i = 1,…, 12 для всех месяцев года). Ряды $H(t)$ интерпретируются как близкие к стационарным случайным процессам, за основную характеристику которых принимается функция распределения $F(H)$.

Таблица

Морфометрические параметры исследуемых озер

Озеро – пост	Период наблюдений	Площадь озера, км ^{2}	Площадь водосбора, км^2
оз. Куэтс-Ярви – пгт Никель	1949–2017	17	672
оз. Пул-озеро – ст. Пулозеро	1931–2017	8,62	1130
оз. Ловозеро – с. Ловозеро	1934–2017	223	3770
оз. Умб-озеро – исток реки Умба	1931–2017	313	2380
оз. Пермус-озеро – г. Оленегорск	1934–2017	24,4	503

Результаты

В первую очередь были построены хронологические графики хода средних годовых значений уровня воды (рис. 1). На всех озерах, за исключением, озера Пул-озеро наблюдаются значимые положительные тренды.

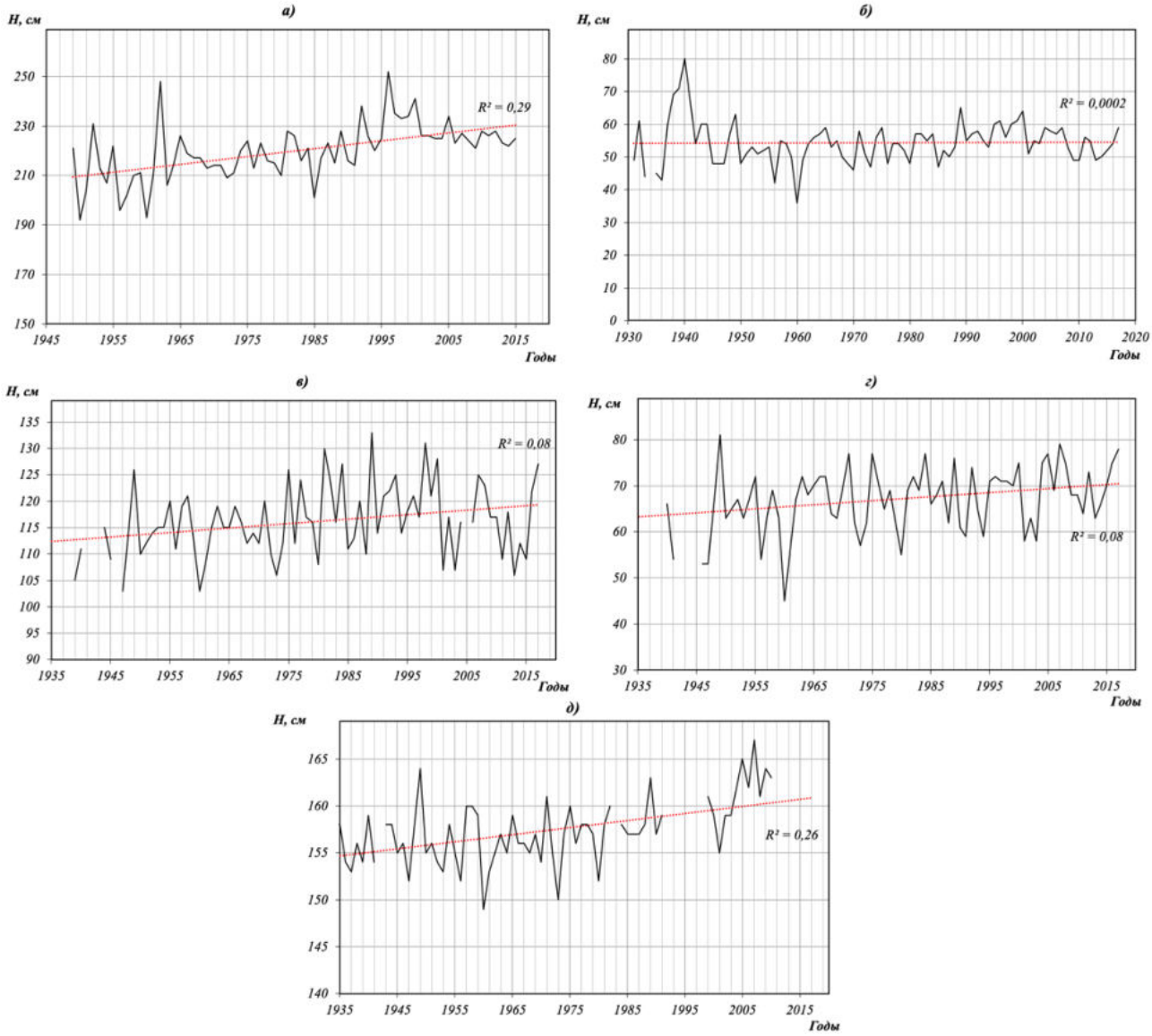


Рис. 1. Хронологические графики хода средних годовых уровней воды озер:
а) Куэтсъ-ярви; б) Пул-озеро; в) Ловозеро; г) Умб-озеро д) Пермус-озеро

На всех пяти озерах 1960-й был самым маловодным (по среднегодовому уровню). Многоводный год по величине среднегодового уровня для озера Куэтсъярви был в 1996 г.; для Пермус-озера и Умб-озера многоводный год наблюдался в 1949 г.; у Пул-озера – 1940 г., а у Ловозера – 1989 г. Годы, на которые приходились экстремальные значений уровня – максимальные и минимальные – были несколько различными. Из анализа водности лет синхронного ряда наблюдений за уровнем воды следует общая закономерность, которая состоит в том, что процесс наименьшей водности озер охватывает все исследуемые водоемы одновременно, тогда как многоводные периоды наблюдается в различные годы.

Для изучения структуры временного ряда уровней воды исследуемых озер за период инструментальных наблюдений в программе Statistica 6.0 был проведен спектральный анализ. В результате было установлено наличие хорошо выраженных пиков спектральной плотности, которые соответствуют различным периодам колебаний уровня воды в озере и представлены на рис. 2.

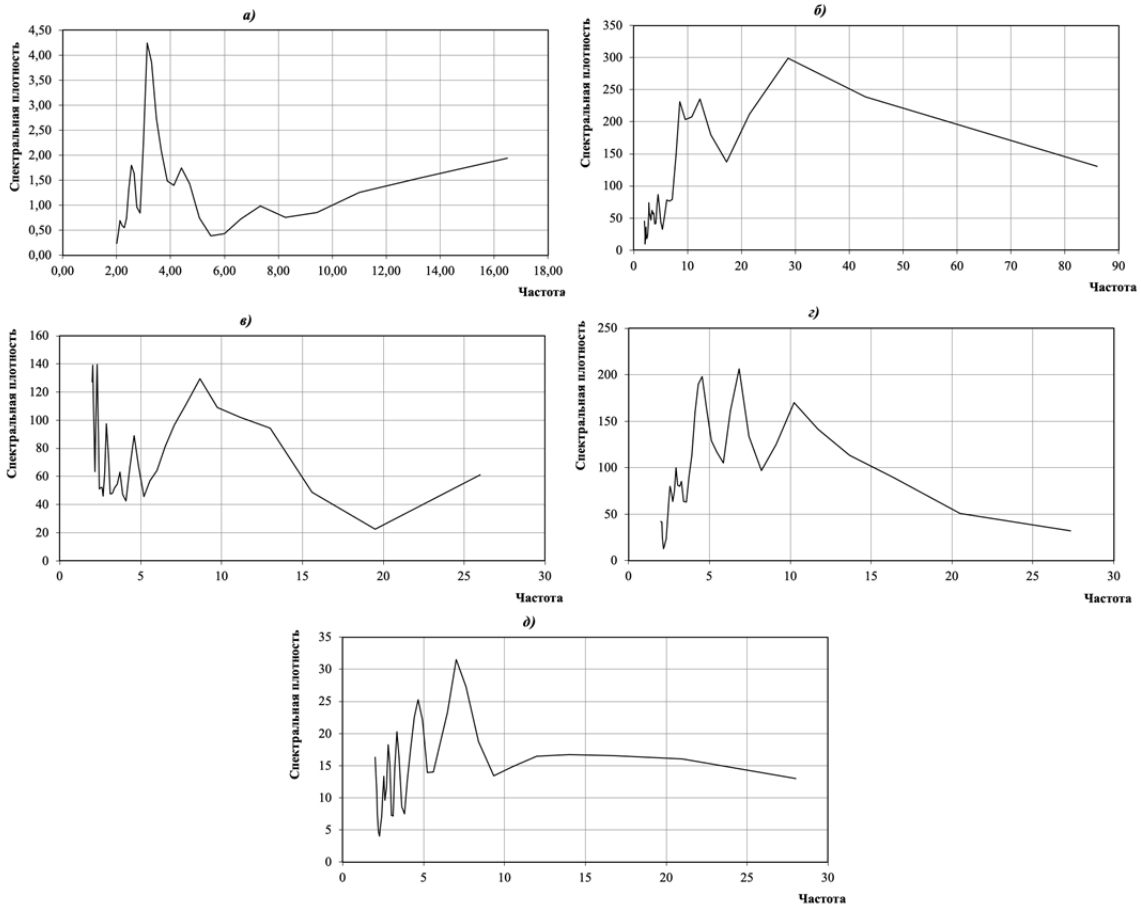


Рис. 2. Графики спектральной плотности средних годовых уровней озер:
а) Куэтсъ-ярви; б) Пул-озеро; в) Ловозеро; г) Умб-озеро д) Пермус-озеро

На озере Куэтсъярви выявлены около 3-летние циклы колебаний; на озере Пул-озеро наблюдаются квази 30-летние и около 10-летние циклы колебаний; на озере Ловозеро установлены около 3-летние и 6-летние циклы колебаний; на озере Умб-озеро – около 5-летние циклы колебаний уровней воды; на озере Пер-

мус-озеро также выявлены около 6-летние колебания. При этом следует отметить, что в левой части всех периодограмм наблюдаются незначительные всплески.

Для анализа ритмики годовой цикличности уровней воды в исследуемых водных объектах использовался метод теории периодически коррелированных случайных процессов (ПКСП). Этот метод изложен в работе [3]. Основными вероятностными оценками ПКСП являются математическое ожидание *m(t)*, дисперсия *D(t)*. Они хорошо отображают особенности ритмики годовой цикличности гидрометеорологических процессов.

Математическое ожидание ПКСП характеризует регулярную компоненту внутригодовых изменений процесса и позволяет оценить средний многолетний повторяющийся образ внутригодового колебания; дисперсия – отклонения процесса от средней многолетней нормы.

На рис. 3 представлен график оценок математического ожидания и дисперсии внутригодовых колебаний уровней воды озер Кольского полуострова за весь период инструментальных наблюдений.

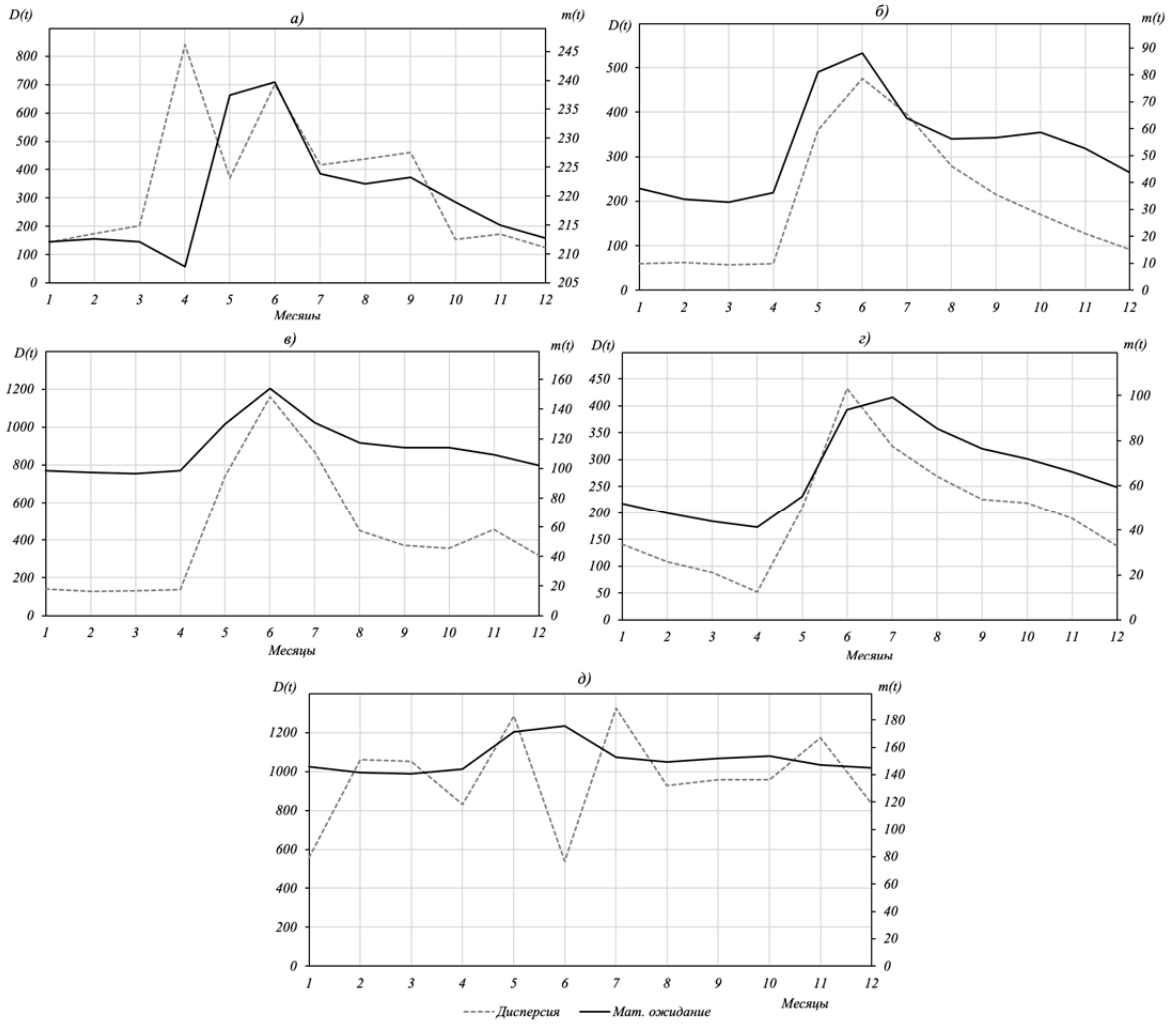


Рис. 3. Графики оценок математического ожидания
и дисперсии средних месячных уровней воды озер:
а) Куэтсъ-ярви; б) Пул-озеро; в) Ловозеро; г) Умб-озеро д) Пермус-озеро

Сравнительный анализ графиков хода математического ожидания позволил определить сходство типового хода уровней воды у исследуемых озер в течение года. На графиках кривая среднего многолетнего внутригодового хода уровня воды характеризуется сглаженным ходом. Она имеет четко выраженный сезонный характер. Так, на всех исследуемых водных объектах максимальные уровни наблюдаются в июне, а минимальные – в апреле.

Кривая дисперсии на графиках озер Пул-озеро, Ловозеро, Умб-озеро имеет одинаковый вид. Максимальное значение дисперсии приходится на июнь, минимальное – на апрель. Кривая также имеет четко выраженный сезонный характер и повторяет форму кривой математического ожидания. Для озера Куэтсъ-ярви кривая дисперсии имеет три явно выраженных пика, максимальное значение наблюдается в апреле, а также в июне и сентябре наблюдаются повышение значений дисперсии, минимальные значения приходятся на май и октябрь. На озере Пермус-озеро, напротив, максимальные значения дисперсии наблюдаются в мае, июле и ноябре, а минимальные – в июне и апреле.

Выводы

В ходе анализа полученных результатов на исследуемых озерах Куэтсъярви, Ловозеро, Умб-озеро, Пермус-озеро были выявлены значимые тренды на повышение уровней воды. На всех озерах выявлены циклы колебаний уровней воды различной продолжительности, которые в большинстве своем не превышают 7 лет, за исключением выявленных циклов на озере Пул-озеро. Все исследуемые водные объекты имеют общую закономерность, которая состоит в том, что процесс наименьшей обводненности озер охватывает все исследуемые озера одновременно, тогда как многоводье наблюдается в различные годы. Маловодный год на всех озерах пришелся на 1960 г. На всех озерах внутригодовой ход уровня воды имеет сглаженный ход, который имеет четко выраженный сезонный характер. Дальнейшее исследование и обобщение закономерностей уровенного режима данных озер позволит перейти к максимальным уровням воды заданной обеспеченности для всех неизученных озер Кольского полуострова, что имеет важное значение при проектной деятельности.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, № FSZU-2020–0009 «Исследование физических, химических и биологических процессов в атмосфере и гидросфере в условиях изменения климата и антропогенных воздействий».

Список литературы

1. *Малинин В. Н., Гордеева С. М.* Северо-Атлантическое колебание и увлажнение европейской территории России // Общество. Среда. Развитие. 2014. № 2. С. 191–198.

2. *Мякишева Н. В.* Многокритериальная классификация озер. СПб. : Гидрометоиздат, 2009. 153 с.

3. *Рожков В. А., Трапезников Ю. А.* Вероятностные модели океанологических процессов. Л. : Гидрометеоиздат, 1990. 270 с.

4. Изменения и изменчивость климата европейского Севера России и их влияние на водные объекты / Н. Н. Филатов, Л. Е. Назарова, А. П. Георгиев, А. В. Семенов, А. Р. Анциферова, В. Н. Ожигина, М. И. Богдан // Арктика: экология и экономика. 2012. № 2 (6). С. 80–93.

УДК 574.587

Использование системы эталонных створов в мониторинге и оценке качества поверхностных вод (на примере водотоков бассейна Верхнего Иртыша)

А. А. Евсеева (annaeco@mail.ru)

Ханты-Мансийский отдел Тюменский филиал ФГБНУ «ВНИРО» («Госрыбцентр»),
г. Ханты-Мансийск

Аннотация. В статье затронуты вопросы современного подхода в области оценки экологического состояния водных ресурсов, представлены результаты апробации, адаптации и внедрения некоторых принципов Европейской рамочной водной директивы применительно к водотокам трансграничного бассейна Верхнего Иртыша.

Ключевые слова: эталонный створ, бентос, биоиндикация

В последние десятилетия существенно возросла роль биологического контроля качества вод, основанного на методах биоиндикации, среди которых особое место отводят макрозообентосу. В рамках совершенствования системы мониторинга, а также согласно положениям Европейской Рамочной Водной Директивы необходимо унифицировать подходы управления и охраны водных ресурсов [14]. Одним из таких методов является система определения экологического качества вод путем использования эталонных створов.

Эталонные створы – одно из необходимых и ключевых понятий в системе мониторинга поверхностных вод. Под речным эталонным створом понимают участок реки находящийся под минимальным антропогенным воздействием, гидроморфологические, биологические, физическо-химические характеристики которого максимально приближены к исходному (естественному) состоянию. Существуют два типа эталонных створов – специфические и региональные [12]. В бассейне Верхнего Иртыша перечень специфических эталонных створов был разработан в 70-х гг. XX в. и внедрен для мониторинга качества поверхностных вод в государственной системе Казгидромет. Региональный тип эталонных створов используется для определения экологического статуса реки или речного бассейна. Основой для разработки регионального эталонного створа послужили результаты наших гидробиологических исследований в 2004–2019 гг., проводимые на территории ООПТ Восточного Казахстана (Маркакольский и Западно-Алтайский заповедники, Катон-Карагайский национальный парк). В данной работе рассмотрим возможность применения специфических эталонных створов.

Основная цель создания сети эталонных створов в бассейне Верхнего Иртыша – установить эталонные значения показателей, по отношению к которым и будет определяться экологическое качество воды на створах, испытывающих антропогенное влияние. Это позволит повысить объективность информации по качеству поверхностных вод, которая является основой эффективного управления водными ресурсами бассейна.

Эталонные створы в каждом суббассейне Верхнего Иртыша должны быть расположены на реках разного порядка (по принятой гидрологической классификации). Как модельные предлагаются следующие эталонные створы: участок р. Брекса (Филипповка), расположенный в 7 км выше г. Риддер; участок р. Белая Уба, расположенный на территории Западно-Алтайского государственного природного заповедника; участок р. Бухтарма, расположенные на территории Катон-Карагайского государственного национального природного парка.

Материалы по разработке и апробации вышеуказанных эталонных створов представлены в ряде публикаций [3–5]. В результате исследования донных сообществ беспозвоночных водотоков бассейна р. Ульба, Бухтарма, Уба, в том числе протекающих на территории ООПТ Восточного Казахстана, создана модель биоценоза «эталонного створа» для средних и малых рек бассейна Верхнего Ертиса. Она содержит более 16 таксонов, включая не менее 3 видов личинок веснянок, не менее 5 видов личинок поденок, не менее 3 видов личинок ручейников. В состав макрозообентоса эталонного створа также входят второстепенные таксоны – личинки двукрылых, пиявки, моллюски, ракообразные, личинки клопов и жуки, олигохеты. Количество и состав второстепенных таксонов может варьировать. Модель сообщества зообентоса эталонного створа предназначена для метрологического обеспечения измерений при оценке качества поверхностных вод по показателям зообентоса и контроле погрешности результатов измерений. Модифицированный биотический индекс Вудивисса позволяет более объективно оценивать качество вод при проведении мониторинговых, рекогносцировочных, экспертных работ в бассейне Верхнего Ертиса. При составлении адаптированной расчетной таблицы учтены особенности региональной гидрофауны водотоков ООПТ и показатели «эталонного» створа [4; 5; 8].

Как результат многолетнего мониторинга водотоков импактной зоны и исследований гидробиоценозов водотоков, протекающих на территории ООПТ Восточного Казахстана, разработана и внесена в реестр Казахстана методика выполнения измерений (МВИ) «Воды поверхностные. Оценка качества по показателям макрозообентоса», созданы методические рекомендации «Оценка качества поверхностных вод по показателям макрозообентоса» и «Разработка эталонного створа» [11].

Подавляющее большинство стран использует макрозообентос, как основу для биоиндикации. При этом основное внимание уделяется использованию чувствительных таксонов бентоса, т. е. фактически, системы видов-индикаторов и биотических индексов. Сравнительный анализ биоиндикационных показателей, индексов и метрик, предлагаемых для использования при определении качества воды Европейской рамочной водной директивой, ранее был проведен для малых рек Высокого Заволжья, бассейна рек Припять, Днепр, Обь, водоемов и водотоков Западной Сибири [1; 2; 7; 10; 13; 15].

Спецификация эталонных показателей для последующей оценки экологического статуса речного бассейна фактически представляет собой описание эталонных показателей и их метрик, а также их сравнение с соответствующими метриками, полученными для аналогичных створов речного бассейна. Это

сравнение проводится путем расчета показателя EQI (Ecological Quality Index), который является частным от деления метрики для какого-либо створа на метрику эталонного створа. Главная проблема в использовании этого показателя – пределы его изменения для конкретного качества речных вод [4; 14].

Для примера оценки качества поверхностных вод с применением системы эталонных створов использованы водотоки бассейна р. Ульба (крупный правобережный приток р. Иртыш в верхнем течении). Для определения экологического качества воды нами были использованы биотические индексы: ASPT, BMWP, биотический индекс Вудивисса модифицированный (БИМ). Анализ таксономической структуры и оценка качества воды бассейна р. Ульба по структурно-функциональным показателям сообщества макрозообентоса приведены в ряде других работ [6]. В данной работе акцент сделан на расчетах индекса EQI и применении системы эталонных створов при оценке качества поверхностных вод.

Отбор проб в импактной зоне проводили на 11 станциях, сбор и обработку гидробиологических проб осуществляли в рамках госпрограммы мониторинга качества поверхностных вод, проводимого филиалом «Казгидромет» по Восточно-Казахстанской области. Створ на р. Брекса, расположенный в 6,8 км выше г. Риддера («Б1») является эталонным для станций мониторинга [5]. Перечень исследованных створов представлен в табл. 1.

Таблица 1

Перечень станций гидробиологического исследования водотоков бассейна р. Ульба

Усл. обозначение	Наименование		Характеристика створа
	водного объекта	пункта наблюдения	
Б1	р. Брекса	г. Риддер	6,8 км выше г. Риддера, 0,7 км ниже с. Ливино, 1. 0 км выше впадения р. Большая Таловка
Б2	р. Брекса	г. Риддер	в черте г. Риддера, 0,6 км ниже сброса дренажных вод свинцового завода, 0. 3 км ниже впадения р. Быструха
Т1	р. Тихая	г. Риддер	0,5 км ниже г. Риддера, 0,8 км выше устья
Т2	р. Тихая	г. Риддер	1,5 км к З от г. Риддера, 0,1 км ниже слияния рек Брекса и Журавлиха
У(Т)1	р. Ульба	г. Риддер	1,75 км ниже слияния рек Громотуха и Тихая, 50 м выше сброса шахтных вод рудника Тишинский
У(Т)2	р. Ульба	г. Риддер	4,8 км ниже сброса шахтных вод рудника Тишинский, у автодорожного моста
У(У)1	р. Ульба	г. Усть-Каменогорск	21,0 км выше города, 0,3 км ниже впадения р. Малая Ульба, в черте с. Каменный Карьер, левый берег
ТМК1	р. Ульба	г. Усть-Каменогорск	1,0 км выше сбросов ТМК и Согринской ТЭЦ
ТМК2	р. Ульба	г. Усть-Каменогорск	0,5 км ниже сбросов ТМК и Согринской ТЭЦ
У(У)2	р. Ульба	г. Усть-Каменогорск	в черте г. Усть-Каменогорска, 1,45 км выше устья р. Ульба непосредственно у автодорожного моста (0,1), левый берег
У(У)3	р. Ульба	г. Усть-Каменогорск	в черте г. Усть-Каменогорска, 1,45 км выше устья р. Ульба непосредственно у автодорожного моста (0,9), правый берег

Оценка качества вод по биотическим индексам. Значения БИМ на створе «Б1» изменялись от 7 до 10, что соответствует I – II классу качества вод (очень чистые, чистые). Ниже сбросов сточных вод свинцового завода качество воды на створе «Б2» значения БИМ снижаются. Однако в 2005, 2009, 2012 гг. на данном створе отмечено улучшение качества вод, о чем свидетельствует увеличение биотических индексов (табл. 2).

По среднегодовым значениям индексов БИМ качество воды на створе «Т1» оценивалось как «умеренное загрязнение» и лишь в 2005 г. соответствовало категории «чистые». На створе «Т2» среднегодовые значения индексов БИМ соответствовали «умеренному загрязнению» и только в 2008–2009, 2011 гг. соответствовало категории «чистые». Согласно значениям БИМ качество поверхностных вод р. Ульба на семи створах мониторинга в 2002–2013 гг. изменялось в пределах III – IV классов качества, «воды загрязненные – умеренно загрязненные». На створах «УТ1», «УУ1», «ТМК1», «УУ(0,1)» значения БИМ варьировали в пределах категорий «чистые – умеренно загрязненные», на створах «УТ2», «ТМК2», «УУ(0,9)» – в пределах категорий «загрязненные – грязные».

Таблица 2

Динамика среднегодовых значений БИМ по створам водотоков бассейна р. Ульба

Створ	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	ср
Б1	8,1	7,9	8,7	8,7	9,0	9,3	10,0	10,0	10,0	9,6	9,7	10,0	9,3
Б2	5,2	5,6	6,4	6,6	6,6	7,0	6,9	8,0	7,6	7,1	8,1	6,0	6,8
Т1	5,5	6,6	6,5	7,8	7,6	6,6	6,2	6,1	7,1	5,6	7,3	6,7	6,6
Т2	6,1	5,0	5,7	6,0	7,7	7,0	8,6	8,6	7,0	8,1	7,1	6,4	6,9
УТ1	6,0	6,7	7,2	6,3	7,3	7,5	8,0	7,3	7,6	8,1	7,1	7,1	7,2
УТ2	4,6	4,9	6,3	5,0	7,0	6,3	5,1	3,2	5,1	6,3	5,9	5,6	5,4
УУ1	7,1	7,1	7,3	7,1	7,2	7,8	8,7	8,6	7,6	7,7	8,1	7,3	7,6
ТМК1	7,3	6,8	7,5	7,5	4,7	6,3	7,5	6,5	-	-	-	-	-
ТМК2	4,0	5,3	5,0	5,3	3,0	3,3	5,5	5,5	-	-	-	-	-
УУ (0,1)	6,3	6,4	6,7	6,7	6,6	4,8	6,2	7,7	6,2	7,7	6,6	4,6	6,4
УУ (0,9)	4,7	5,3	4,6	5,3	4,5	5,0	5,9	3,8	5,5	5,3	6,9	4,9	5,1
ср	5,7	6,0	6,3	6,4	6,2	6,2	6,8	6,5					

Средние значения индекса BMWP на эталонном створе «Б1» в 2002–2013 гг. изменялись в широком диапазоне: от 60 баллов – «хорошее» качество воды до 159 баллов – «исключительное». Показатели индекса BMWP, рассчитанные для створа «Б2», варьировали в пределах 13–57 баллов: «плохое» – «хорошее» качество воды (табл. 3).

Таблица 3

Динамика среднегодовых значений BMWP по створам водотоков бассейна р. Ульба

Створ	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	Ср.
Б1	106	61	73	75	104	108	159	155	159	114	120	124	113
Б2	16	13	29	38	30	42	47	44	39	40	54	30	35
Т1	15	22	22	57	41	33	31	35	48	27	35	37	33
Т2	20	18	16	25	43	45	89	76	67	62	46	39	46
УТ1	19	24	34	33	31	40	63	40	57	42	37	45	39

Окончание табл. 3

Створ	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	Ср.
УТ2	11	12	26	21	22	25	28	23	28	25	31	25	23
УУ1	32	34	55	53	69	48	105	89	69	58	59	52	60
ТМК1	35	33	37	32	15	24	69	30	43	21	36	32	34
ТМК2	18	15	19	15	6	11	49	25	28	23	19	16	20
УУ (0,1)	22	27	39	42	41	15	29	53	34	41	35	23	33
УУ (0,9)	13	17	14	19	12	15	24	13	23	18	39	24	19
Ср.	20	21	29	33	31	30	53	43	43	36	39	32	34

Индекс BMWP на створе «Т1» варьировал в пределах 2–84, на створе «Т2» – 2–159; согласно среднегодовым значениям, качество воды оценивается на створе «Т1» как «плохое», «невысокое» и лишь в 2005 г. соответствовало категории «хорошее». И кроме того, только до 2005 г. качество воды на створе «Т1» было выше, чем на створе «Т2». На створе «Т2» среднегодовые значения индекса BMWP изменялись в пределах 16 (2004 г.) – 89 (2008 г.), качество воды «плохое» – «невысокое» и только в 2008–2011 гг. соответствовало категории «хорошее». Значения индекса BMWP на р. Ульба (верхнее течение) в 2002–2013 гг. имели большую вариабельность в течение периода наблюдений: на створе «УТ1» в пределах 7–164 балла, на створе «УТ2» – 1–118 балла. Высокая вариабельность индекса BMWP связана с сезонными изменениями таксономического состава зообентоса, которая учитывается при расчете индекса. Максимальные средние значения индекса, были зарегистрированы на створе «УТ1» в 2008 г. 63, в 2010 г. 57 (качество воды «хорошее») (табл. 3). Среднегодовые значения BMWP на створе «УТ2» имели невысокую вариабельность в рамках класса воды «плохое» – «невысокое» качество. Среднегодовые значения индекса BMWP на створе «ТМК1» позволяют охарактеризовать качество вод как «невысокое», на створе «ТМК2» как «плохое». Средние значения индекса BMWP на створе «ТМК1» в 2002–2009 гг. изменялись в широком диапазоне: от 15 баллов – «плохое» качество воды до 69 баллов – «хорошее». Показатели индекса BMWP, рассчитанные для створа «ТМК2» варьировали в пределах 6–49 баллов: «плохое»- «невысокое» качество воды. Среднегодовые значения индекса BMWP позволяют охарактеризовать качество вод на створе «УУ1» как «хорошее»; на створах «УУ2» и «УУ3» как «невысокое».

Расчеты ASPT показали, что на эталонном створе «Б1» значения индекса характеризуют качество воды как «прекрасное», изменяясь в пределах 6,6–7,5 баллов, а на створе «Б2» – как «хорошее-прекрасное» (4,1–6,9 балла) (таблица 4). Особенность данного индекса – уменьшать вклад случайных таксономических групп, обнаруженных в таксонах с высокой балльной оценкой, что и подтверждается изменением значения индекса ASPT в градиенте загрязнения в соответствии с изменением качества воды, рассчитанного с помощью показателя BMWP. Подобные закономерности были отмечены для малых рек лесостепной зоны бассейна Нижней Волги [2]. Исключение составляет 2005 г., когда средние значения ASPT на створах «Б1» и «Б2» почти совпадают. Среднегодовые значения индекса ASPT р. Тихая в 2002–2013 гг. варьировали в диапазоне 4,0–

7,7, причем максимальное значение отмечены для створа «Т1» в 2006 г. 7,7 – «прекрасное» качество воды, минимальное в 2011 г. 4,0, «посредственное» качество воды. На створе «УТ1» значения индекса характеризуют качество воды как «очень хорошее», «прекрасное» (диапазон средних значений по годам изменялся в пределах 4–7,3 баллов). На створе «УТ2» по показателям индекса качество воды соответствовало категориям от «скорее плохое» до «прекрасное». В 2011 г. среднее значение индекса ASPT на створе «УТ2» оказалось выше, чем на створе «УТ1».

Таблица 4

Динамика среднегодовых значений ASPT по створам водотоков бассейна р. Ульба

Створы	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	Ср.
Б1	6,6	6,8	7,1	6,8	7,1	7,3	6,9	7,1	7,4	7,2	6,6	7,2	7,0
Б2	4,3	5,7	5,7	6,9	6,8	6,4	5,9	5,6	6,1	6,7	6,1	6,8	6,1
Т1	4,2	5,1	5,4	7,2	7,7	6,2	4,1	5,8	5,5	4,8	5,3	6,5	5,7
Т2	6,0	4,4	4,2	5,9	6,9	7,1	6,6	5,8	5,6	6,0	6,4	6,1	5,9
УТ1	5,6	6,8	6,4	6,5	7,3	7,0	7,0	5,0	4,6	4,8	5,2	6,3	6,0
УТ2	3,5	4,6	6,2	5,0	6,1	5,6	5,0	4,1	4,3	5,3	5,2	6,0	5,1
УУ1	5,8	6,4	5,4	5,8	5,5	6,8	6,1	6,4	5,5	5,8	6,1	6,8	6,0
ТМК1	5,6	7,0	5,5	6,1	4,2	6,3	6,0	5,0	5,6	4,9	5,2	4,8	5,5
ТМК2	4,0	4,3	4,4	4,0	3,0	3,6	5,5	4,2	5,3	5,3	4,4	4,9	4,4
УУ (0,1)	5,5	5,1	4,8	5,1	5,2	4,2	4,4	5,0	4,9	6,0	5,4	5,5	5,1
УУ (0,9)	4,2	4,3	3,2	4,7	3,9	4,4	4,7	3,5	4,6	4,1	5,3	4,5	4,3
Ср.	5,0	5,5	5,3	5,8	5,8	5,9	5,7	5,2	5,4	5,5	5,6	5,9	5,6

Значения индекса ASPT на створе «ТМК1» соответствуют категории «прекрасное» качество воды, на створе «ТМК2» – «хорошее». Значения индекса ASPT на створах «УУ1» соответствовали категории «прекрасное качество воды»; на створе «УУ2» – «очень хорошее»; на створе «УУ3» – «хорошее». Согласно значений индекса ASPT качество воды в 2002–2013 гг. на створе «УУ1» соответствовало рейтингу «прекрасное», за исключением 2006 г. рейтинг «очень хорошее». На створе «УУ2» качество воды имело рейтинг «хорошее, очень хорошее, прекрасное», на створе «УУ3» – «скорее плохое, посредственное, хорошее, очень хорошее».

Оценка качества вод с помощью индекса EQI. Расчет индекса EQI (табл. 5) проводили для 10 створов, используя три биотических индекса (ASPT, BMWP, биотический индекс Вудивисса модифицированный БИМ).

Границы для EQI, рассчитанные по биотическому индексу Вудивисса: 1,00–0,83 – высокий статус, 0,83–0,62 – хороший статус, 0,62–0,41 – посредственный статус, 0,41–0,20 – плохой статус, < 0,20 – очень плохой статус. Значение EQI для индекса BMWP: 0,85 и выше – очень хорошее, 0,70–0,84 – хорошее, 0,55–0,69 – вполне хорошее, 0,45–0,54 – посредственное, 0,30–0,44 – плохое, менее чем 0,3 – очень плохое. Значение EQI для индекса ASPT: 1,00 и выше – очень хорошее, 0,90–0,99 – хорошее, 0,77–0,89 – вполне хорошее, 0,65–0,76 – посредственное, 0,64–0,50 – плохое, менее чем 0,50 – очень плохое [12; 14].

Таблица 5

Значения индекса EQI, рассчитанное по среднегодовым значениям БИМ для створов водотоков бассейна р. Ульба в 2002–2013 гг.

Створы	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	Ср.
Б2	0,63	0,68	0,74	0,75	0,73	0,75	0,69	0,80	0,76	0,76	0,84	0,60	0,73
Т1	0,58	0,85	0,63	0,77	0,85	0,71	0,53	0,61	0,71	0,59	0,75	0,67	0,69
Т2	0,76	0,63	0,66	0,69	0,73	0,75	0,86	0,86	0,70	0,86	0,73	0,64	0,74
УТ1	0,62	0,86	0,69	0,72	0,69	0,69	0,80	0,73	0,76	0,86	0,73	0,71	0,74
УТ2	0,39	0,63	0,62	0,58	0,57	0,58	0,51	0,27	0,51	0,67	0,60	0,56	0,54
УУ1	0,88	0,91	0,84	0,83	0,57	0,72	0,87	0,86	0,54	0,81	0,84	0,73	0,78
ТМК1	0,36	0,48	0,51	0,48	0,21	0,28	0,43	0,37	0,00	0,00	0,00	0,00	0,26
ТМК2	0,19	0,36	0,34	0,34	0,10	0,15	0,31	0,31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,18
УУ (0,1)	0,78	0,84	0,66	0,78	0,51	0,44	0,53	0,77	0,53	0,81	0,68	0,46	0,65
УУ (0,9)	0,57	0,68	0,53	0,61	0,26	0,46	0,59	0,33	0,47	0,55	0,71	0,49	0,52
Ср.	0,58	0,69	0,62	0,65	0,52	0,55	0,61	0,59	0,50	0,59	0,59	0,49	0,58

Результаты расчета индекса EQI достаточно неоднозначные. Так, значения индекса EQI, рассчитанные по БИМ не показывают адекватной актуальной оценки класса качества воды и в большинстве случаев даже завышают статус. В целом, по средним значениям индекса EQI за период 2002–2013 гг. качество воды на большинстве створах характеризовалось «хорошим статусом», кроме «УТ2» и «УУ(0,9)» – посредственное качество воды; «ТМК1» – «плохое», «ТМК2» – «очень плохое» качество воды (табл. 5).

Согласно значений индекса EQI, рассчитанных для BMWP на большинстве створов качество воды соответствовало категории «плохое», за исключением створа «УУ1» – «вполне хорошее», створы «УТ2», «ТМК1», «ТМК2», «УУ(0,9)» – «очень плохое» качество воды (табл. 6). По данным расчетам можно сделать вывод о некотором занижении оценки качества поверхностных вод. По средним значениям индекса EQI, рассчитанного по ASPT за период 2002–2013 гг. качество воды на половине исследованных створах характеризовалось «вполне хорошим статусом», на створах кроме «УТ2» и «УУ(0,1)» – посредственное качество воды; «ТМК1» и «УУ(0,9)» – «плохое», «ТМК2» – «очень плохое» качество воды (табл. 7). Данное ранжирование поверхностных вод по категориям качества схоже с расчетами индекса EQI по BMWP.

Сравнение данных по оценке экологического качества воды в изученных реках на основании биотических индексов, с одной стороны (табл. 2–4), и величин индекса EQI (табл. 5–7), с другой, показало некоторые различия: качество воды на исследованных створах, рассчитанное по индексу EQI, оказалось ниже, чем качество по биотическому индексу BMWP и ASPT, и выше, чем качество по БИМ (табл. 8).

Таблица 6

Значения индекса EQI, рассчитанное по среднегодовым значениям BMWP для створов водотоков бассейна р. Ульба в 2006–2013 гг.

Створы	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	Ср.
Б1													
Б2	0,18	0,24	0,39	0,50	0,35	0,40	0,30	0,29	0,25	0,39	0,46	0,25	0,33
Т1	0,26	0,40	0,27	0,68	0,49	0,31	0,16	0,23	0,31	0,26	0,28	0,29	0,33
Т2	0,29	0,30	0,24	0,33	0,57	0,41	0,56	0,49	0,43	0,58	0,39	0,33	0,41
УТ1	0,22	0,43	0,37	0,45	0,38	0,37	0,40	0,26	0,35	0,39	0,31	0,37	0,36
УТ2	0,11	0,24	0,29	0,28	0,36	0,20	0,18	0,12	0,18	0,23	0,23	0,20	0,22
УУ1	0,49	0,61	0,78	0,78	0,52	0,39	0,65	0,58	0,36	0,50	0,50	0,42	0,55
ТМК1	0,21	0,37	0,31	0,17	0,05	0,10	0,26	0,12	0,15	0,07	0,20	0,15	0,18
ТМК2	0,10	0,14	0,15	0,09	0,02	0,04	0,18	0,09	0,09	0,09	0,10	0,08	0,10
УУ (0,1)	0,33	0,54	0,45	0,56	0,28	0,12	0,16	0,35	0,18	0,39	0,34	0,19	0,32
УУ (0,9)	0,19	0,31	0,21	0,26	0,05	0,13	0,16	0,07	0,12	0,16	0,34	0,19	0,18
Ср.	0,24	0,36	0,35	0,41	0,31	0,25	0,30	0,26	0,24	0,31	0,32	0,25	0,30

Таблица 7

Значения индекса EQI, рассчитанное по среднегодовым значениям ASPT для створов водотоков бассейна р. Ульба в 2006–2013 гг.

Створ	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	Ср.
Б2	0,62	0,87	0,86	1,01	0,96	0,89	0,86	0,79	0,83	0,93	0,92	0,94	0,87
Т1	0,55	0,77	0,79	0,90	1,09	0,85	0,52	0,82	0,75	0,68	0,80	0,91	0,79
Т2	0,93	0,68	0,60	0,86	0,99	0,97	0,97	0,82	0,75	0,84	0,98	0,86	0,85
УТ1	0,85	1,01	0,95	0,93	1,04	0,84	1,01	0,72	0,62	0,67	0,79	0,90	0,86
УТ2	0,43	0,70	0,72	0,73	0,88	0,67	0,63	0,26	0,58	0,73	0,78	0,85	0,66
УУ1	0,89	0,95	0,76	0,87	0,80	0,81	0,88	0,91	0,75	0,82	0,93	0,95	0,86
ТМК1	0,91	1,02	0,44	0,67	0,41	0,40	0,51	0,40	0,62	0,68	0,52	0,37	0,58
ТМК2	0,63	0,60	0,34	0,44	0,27	0,23	0,47	0,33	0,58	0,74	0,45	0,38	0,45
УУ (0,1)	0,86	0,76	0,59	0,76	0,63	0,34	0,55	0,71	0,67	0,83	0,83	0,77	0,69
УУ (0,9)	0,56	0,64	0,45	0,68	0,44	0,45	0,59	0,41	0,62	0,58	0,81	0,63	0,57
Ср.	0,72	0,80	0,65	0,79	0,75	0,64	0,70	0,62	0,68	0,75	0,78	0,75	0,72

Таблица 8

Значения рассчитанных индексов и экологическое качество воды для створов

Створ	ASPT	статус	EQI (ASPT)	статус	BMWP	статус	EQI (BMWP)	статус	БИМ	статус	EQI (БИМ)	статус
Б1	7,00	П	-	-	112,95	ОХ	-	-	9,25	Ч	-	-
Б2	6,12	П	0,87	ВХ	35,15	НВ	0,33	ПЛ	6,76	УЗ	0,73	Х
Т1	5,68	П	0,79	ВХ	33,48	НВ	0,33	ПЛ	6,63	УЗ	0,69	Х
Т2	5,92	П	0,85	ВХ	45,51	НВ	0,41	ПЛ	6,95	УЗ	0,74	Х
УТ1	6,01	П	0,86	ВХ	38,68	НВ	0,36	ПЛ	7,19	УЗ	0,74	Х
УТ2	5,13	П	0,66	ПР	23,09	ПЛ	0,22	ОПЛ	5,44	З	0,54	ПР
УУ1	6,05	П	0,86	ВХ	60,21	Х	0,55	ВХ	7,65	УЗ	0,78	Х
ТМК1	5,52	П	0,58	ПЛ	33,95	НВ	0,18	ОПЛ	6,80	УЗ	0,26	ПЛ
ТМК2	4,49	Х	0,45	ОПЛ	20,17	ПЛ	0,10	ОПЛ	4,60	З	0,18	ОПЛ
УУ (0,1)	5,14	П	0,69	ПР	33,31	НВ	0,32	П	6,37	УЗ	0,65	Х
УУ (0,9)	4,30	Х	0,57	ПЛ	19,13	ПЛ	0,18	ОПЛ	5,13	З	0,52	ПР

Примечание: П – прекрасное, Х – хорошее, ОХ – очень хорошее, ВХ – вполне хорошее, ПР – посредственное, ПЛ – плохое, ОПЛ – очень плохое, НВ – невысокое, Ч – чистые, УЗ – умеренно загрязненные,, з – загрязненные

В целом индекс EQI дает более строгую оценку качества воды, особенно в тех случаях, когда величины биотических индексов или других структурных характеристик сообщества макрозообентоса демонстрируют достаточно широкий разброс значений [13]. Так, оценка экологического качества воды методом эталонных створов позволяет давать более адекватную характеристику качества речных вод по сравнению с системой оценки, основанной на биотических индексах. Подобные выводы были сделаны при изучении экологического качества вод малых рек бассейна р. Сок, р. Днепр, р. Волги [2; 7; 10; 13].

Таким образом, в течение ряда лет (2002–2013 гг.) применительно к водотокам бассейна Верхнего Иртыша проведен сравнительный анализ биоиндикационных показателей, индексов и метрик, предлагаемых для использования при определении качества воды Европейской рамочной водной директивой, осуществлена модификация биотического индекса Вудивисса с учетом региональных особенностей фауны, разработана сеть эталонных створов. Оценка качества воды, проведенная на основе расчета различных биотических индексов, отражает таксономические и структурные особенности сообществ зообентоса исследованных рек с учетом чувствительности различных таксономических групп.

Бассейн Верхнего Иртыша разнороден по гидрологическим и гидрохимическим показателям, что необходимо учитывать при создании сети эталонных створов. Исходя из этого, минимальное количество таких створов в бассейне, с учетом рек разного порядка, не должно быть меньше 6–8. Наиболее соответствующими участками бассейна могут быть территории заповедников, национальных парков, и верхние течения рек, расположенные в зонах, где антропогенное влияние сведено к минимуму.

В целом подход, основанный на сети эталонных створов, позволит более реалистично оценивать состояние рек в бассейне Верхнего Иртыша. Для получения достоверной информации об экологическом состоянии речных бассейнов необходимы оптимизация государственной системы гидробиологического мониторинга на основании имеющегося опыта внутри страны и лучшего мирового опыта и разработка на основе международных стандартов, регламентирующих методы гидробиологического мониторинга.

Список литературы

1. Макрозообентос как индикатор экологического состояния водоемов и водотоков Западной Сибири / Д. М. Безматерных [и др.] // Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность. 2019 : сб. ст. по материалам Междунар. науч.-практ. конф. ; под ред. Л. И. Лукиной, Н. В. Ляминой. 2019. С. 259–263.

2. *Головатюк Л. В., Зинченко Т. Д.* Применение биотических идентификаторов для оценки качества вод притоков реки Сок (рр. Байтуган, Камышла, Сосновка) // Вестник Волжского университета им. В. Н. Татищева. Серия: Экология. 2011. Вып. 11. С. 10–19.

3. *Евсеева А. А.* Контроль испытаний качества вод по показателям зообентоса // Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии : тр. Всерос. науч. конф. с междунар. участием: в 2 т. Барнаул, 2014. Т. 2. С. 143–149.

4. *Евсеева А. А., Кушникова Л. Б.* Биологический контроль качества воды как одна из составляющих в системе мониторинга трансграничных водотоков // Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии : тр. III Всерос. науч. конф. с междунар. участием : в 4 т. Барнаул, 2017. Т. 4. С. 13–26

5. *Евсеева А. А., Кушникова Л. Б.* Основные метрики макрозообентоса эталонного створа малой реки Брекса (бассейн Верхнего Иртыша) // Современные фундаментальные проблемы гидрохимии и мониторинга качества поверхностных вод России : материалы науч.-практ. конф. с междунар. участием. Азов, 8–10 июня 2009 г. Ростов-на-Дону, 2009. Ч. 2. С. 167–169

6. *Евсеева А. А., Яныгина Л. В.* Макрозообентос реки Ульба (Восточный Казахстан) в условиях антропогенной нагрузки // Мир науки, культуры, образования. 2010. № 6 (25), ч. 1. С. 258–262

7. Применение биотических идентификаторов для оценки качества поверхностных вод (на примере малых рек бассейна нижней Волги) / Т. Д. Зинченко, Л. В. Головатюк, Э. В. Абросимова, Е. В. Промахова // Астраханский вестник экологического образования. 2016. № 3(37). С. 61–72.

8. *Кушникова Л. Б, Евсеева А. А.* Модификация биотического индекса Вудивисса для водотоков бассейна Верхнего Иртыша // Современные фундаментальные проблемы гидрохимии и мониторинга качества поверхностных вод России : материалы науч.-практ. конф. с междунар. участием. Азов, 8–10 июня 2009 г. Ростов-на-Дону, 2009. Ч. 2. С. 184–187

9. *Кушникова Л. Б., Евсеева А. А., Саиров С. Б.* Инновационный патент на изобретение № 22307 «Способ оценки качества поверхностных вод по показателям макрозообентоса». Рег. № 2008/1243.1 от 12.11.2008

10. *Липинская Т. П., Семенченко В. П.* Экологическое качество воды рек 2–4-го порядков бассейна Днепра // Веснік МДПУ імя І. П. Шамякіна. 2011. № 3 (32).

11. МВИ. Воды поверхностные. Оценка качества по показателям макрозообентоса. Рег. № KZ.07.00.00869-2008

12. *Семенченко В. П., Тищиков И. Г.* Оценка качества воды и мониторинг поверхностных вод в бассейне реки Припять путем создания сети эталонных створов как шаг к внедрению Водной Рамочной Директивы : метод. руководство. 2000. 13 с.

13. *Семенченко В. П., Разлуцкий В. И., Мороз М. Д.* Сравнительный анализ двух подходов оценки качества воды по биологическим показателям (на примере притоков р. Днепр) // Водные ресурсы. 2009. Т. 36, № 4. С. 459–464. 3

14. *Семенченко В. П., Разлуцкий В. И.* Экологическое качество поверхностных вод. Минск : Беларус. навука, 2010. 329 с.

15. *Яныгина Л. В.* Донные сообщества в оценке экологического состояния малой реки Издревой // Известия Алтайского отделения Русского географического общества. 2017. № 4 (47). С. 93–100.

УДК 556.531

Состояние загрязнения поверхностных вод Калужской области

М. В. Захарова (ZaharovaMV@tksu.ru)

Калужский государственный университет им. К. Э. Циолковского, г. Калуга

Аннотация. Статья посвящена исследованию состояния загрязнения речных вод Калужской области по данным гидрохимического мониторинга, проводимого Калужским ЦГМС – филиалом ФГБУ «Центральное УГМС» последние 5 лет. Установлено, что за последние годы класс качества поверхностных вод не претерпел сильных изменений, сохраняя тенденцию «загрязненный» с переходом в «очень загрязненный». Основными источниками загрязнения поверхностных вод Калужского региона остаются предприятия ГП «Калугаоблводоканал», характерными загрязняющими веществами являются азот аммонийный и нитритный, органические вещества по $БПК_5$ и ХПК.

Ключевые слова: мониторинг, качество поверхностных вод, состояние загрязнения, гидрохимические показатели, оценка, УКИЗВ, загрязняющие вещества.

Актуальность исследования

Масштабы водопользования и его воздействия на окружающую среду в настоящее время достигли таких размеров, что экологические требования, предъявляемые для сохранения водной среды, и даже сама по себе возможность использования водных ресурсов становятся лимитирующим фактором социально-экономического развития регионов страны [3].

Увеличение потребления воды в сочетании с пространственно-временной неравномерностью распределения естественных водных ресурсов, практически неконтролируемое загрязнение водных ресурсов, заставляют более пристально отнестись к исследованию качества поверхностных вод, идентификации действующих источников сброса сточных вод, установлению списков приоритетных загрязняющих веществ и выбору эффективных методов очистки.

Таким образом, гидрологические аспекты рационального природопользования предполагают соответствие антропогенной нагрузки природно-ресурсному потенциалу регионов для сохранение пространственной целостности природных систем в процессе их хозяйственного использования.

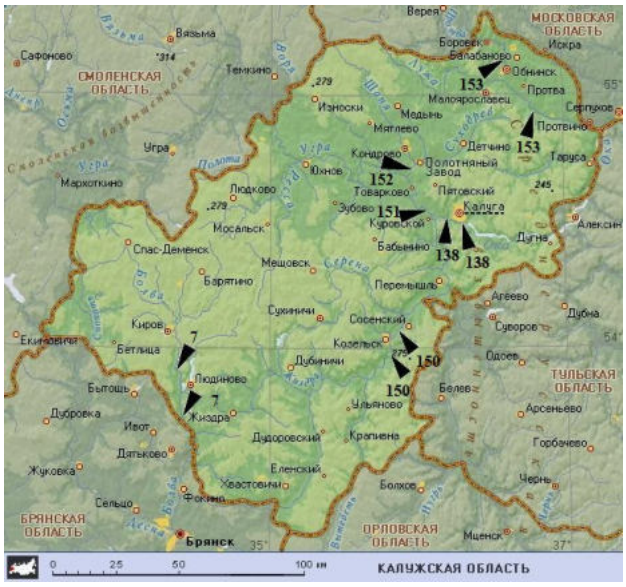
Материалы и методы исследования

Исследование качества поверхностных вод бассейна р. Волги на территории Калужской области ведется на 5 водных объектах у 5 пунктов:

1) р. Ока – г. Калуга;
2) р. Жиздра – г. Козельск;
3) р. Угра – пос. Куровской;
4) р. Шаня – пос. Товарково;
5) р. Протва – г. Обнинск

и бассейна р. Днепр на 1 водном объекте у 1 пункта (р. Болва – г. Людиново) (рис. 1).

Для интегральной оценки качества поверхностных вод суши в работе использован метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям, который утвержден Росгидрометом для использования [2]. В этом методе для интегральной оценки используется показатель, называемый удельным комбинаторным индексов загрязненности вод (УКИЗВ), который учитывает повторяемость случаев загрязненности и кратность превышения ПДК.



Условные обозначение:

7 **р. Болва – г. Людиново**,
фоновый створ 2 км к западу от г. Людиново, мост
контрольный створ 12 км ниже г. Людиново, мост

138 **р. Ока – г. Калуга**,
фоновый створ 0,5 км выше сброса сточных вод свх. им. Циолковского;
контрольный створ 0,6 км ниже г. Калуга, 1 км выше впадения р. Калужка

150 **р. Жиздра – г. Козельск**,
фоновый створ 8 км выше г. Козельск, 2,5 км выше с. Березичи, 6 км выше впадения р. Грязна;
контрольный створ 12 км ниже г. Козельск, 1,7 км ниже с. Нижние Прыски, у автодорожного моста

151 **р. Угра – пос. Куровской**,
створ 9 км ниже пос. Куровской, в черте с. Угра, 1 км выше устья, у автодорожного моста

152 **р. Шаня – пгт Товарково**,
створ 1 км к СЗ от пгт. Товарково, 0,2 км выше устья

153 **р. Протва – г. Обнинск**,
фоновый створ 9 км выше г. Обнинск, 0,2 км выше с. Кривское;
контрольный створ 25 км ниже г. Обнинск, 0,2 км ниже с. Новая Слобода,13 км ниже впадения р. Угодка, у моста

Рис. 1. Карта-схема расположения пунктов наблюдений за загрязнением поверхностных вод суши на территории Калужской области

Характеристика источников загрязнения поверхностных вод

Основным источником загрязнения р. Болвы на территории Калужской области является ГП «Калугаоблводоканал» г. Людиново. Объемы сбросов сточных вод с данного предприятия в 2019 г. составили 2003,79 тыс. м^3, содержащих 442,0 т загрязняющих веществ. По данным Московско-Окского бассейнового управления [1] в р. Оку поступило 43065,3 тыс. м^3 сточных вод, что связано с увеличением объема сброса сточных вод предприятий ОАО «Калужский турбинный завод» и ОАО «Калужская птицефабрика». Однако объем загрязняющих веществ сточных вод снизился на 1328,9 т. В реку Шаня в 2019 г. поступило 4455,2 тыс. м^3 сточных вод, содержащих 1480,4 т загрязняющих веществ, что связано с увеличением объема сброса сточных вод с предприятий ООО «Яргоркомплекс», ПАО «Троицкая бумажная фабрика», ГП «Калугаоблводоканал» п. Полотняный Завод, при этом наблюдается увеличение объема загрязняющих веществ, что связано с ухудшением качества сточных вод. Объем

сброса сточных вод и загрязняющих веществ в р. Жиздра составил 1353,8 тыс. м^3 сточных вод и 551,9 т соответственно, которые поступили с ГП «Калугаоблводоканал» г. Сосенский. Объем сточных вод в р. Угра в 2019 г. составил 629,7 тыс. м^3, 226,8 т загрязняющих веществ. Основными источниками загрязнения Угры являются предприятия ГП «Калугаоблводоканал» п. Товарково и участок «Павлищев Бор». Следует отметить, что объем загрязняющих веществ снизился на 22,5 т, уменьшилось содержание нитратов, нефтепродуктов, сульфатов и фосфатов. Всего в реку Протва на территории Калужской области поступило 18867,0 тыс. м^3 сточных вод, 5005,7 т загрязняющих веществ. В сравнении с 2018 г. объем сточных вод уменьшился на 237,7 тыс. м^3, что связано с уменьшением объема сброса сточных вод с предприятия ФГБНУ ВНИИРАЭ, но в тоже время объем загрязняющих веществ увеличился на 847,1 т, что связано с ухудшением качества сточных вод и увеличением содержания нитратов, БПК, хлоридов, сульфатов и взвешенных веществ.

Результаты исследования

Оценивая состояние вод рек бассейна Днепра следует отметить, что в 2019 г. на исследуемом участке р. Болвы (г. Людиново) качество воды в фоновом и в контрольном створах сохранило класс качество прежних лет и оценивается как 3-й класс качества разряда «А» (загрязненная). УКИЗВ равен 2,87 в фоновом створе, 2,74 в контрольном (рис. 2). Превышения ПДК отмечены по 6 из 13 показателей качества, из которых загрязненность железом, медью, органическими веществами по $БПК_5$ и ХПК является характерной, но тяготеет к низкому уровню. По азоту нитритному аммонийному превышения ПДК были единичные. Среднегодовые концентрации тяжелых металлов в 2019 г. остались на прежнем уровне, отмечаются незначительные среднегодовые увеличения взвешенных веществ, сульфатов и ХПК. В течение трех лет среднегодовые концентрации сохранились на прежнем уровне. Содержание растворенного в воде кислорода не опускалось ниже 8,83 мг/дм^3.

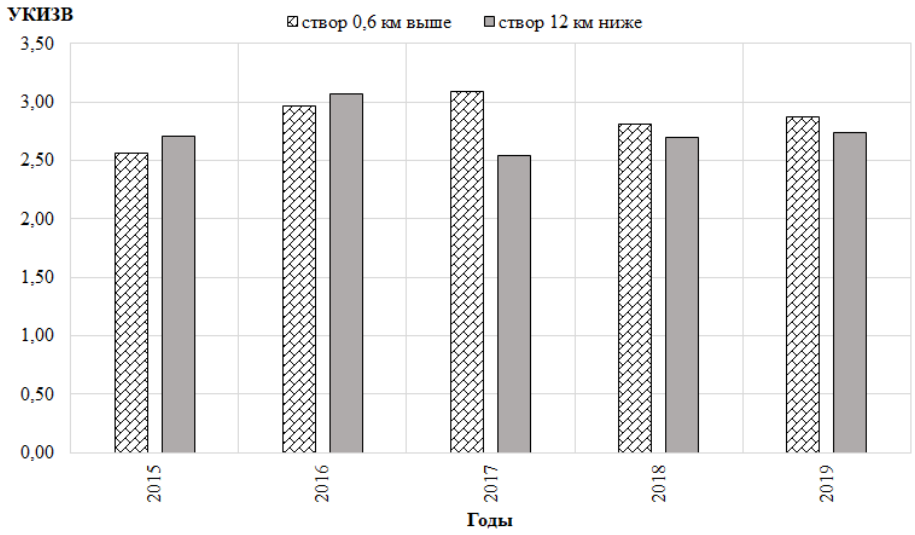


Рис. 2. Тенденция изменения значений УКИЗВ за 2015–2019 гг. на р. Болва – г. Людиново (бассейн р. Днепр)

Характеризуя качество поверхностных вод бассейна Волги, следует отметить, что на территории Калужской области качество воды р. Ока в 2019 г. в фоновом створе сохранило класс качества предшествующих лет 3А (загрязненная). Превышения ПДК отмечены по 7 показателям из 14, коэффициент УКИЗВ равен 2,46 (рис. 3). В контрольном створе сохранило класс качества разряда «Б» (очень загрязненная), коэффициент УКИЗВ равен 3,71. Превышения ПДК отмечены по 7 показателям из 14. Наибольший вклад в загрязнение реки на всем рассматриваемом участке вносят железо и медь, летучие фенолы, азот аммонийный и нитритный, а также органические вещества по $БПК_5$ и ХПК, загрязненность этими веществами является характерной, но сохраняет низкий уровень. В фоновом створе среднегодовые величины загрязняющих веществ в 2019 г. остались на прежнем уровне. В контрольном створе несколько снизились среднегодовые концентрации взвешенных веществ (с 15,7 до 10,7 мг/дм^3), а среднегодовые концентрации ХПК увеличились с 24,3 до 27,6 мг/дм^3, также увеличились среднегодовые значения азота нитратного, но незначительно. Среднегодовые значения тяжелых металлов в фоновом и в контрольном створах остались на прежнем уровне. На всем исследуемом участке содержание растворенного в воде кислорода не опускалось ниже 7,07 мг/дм^3.

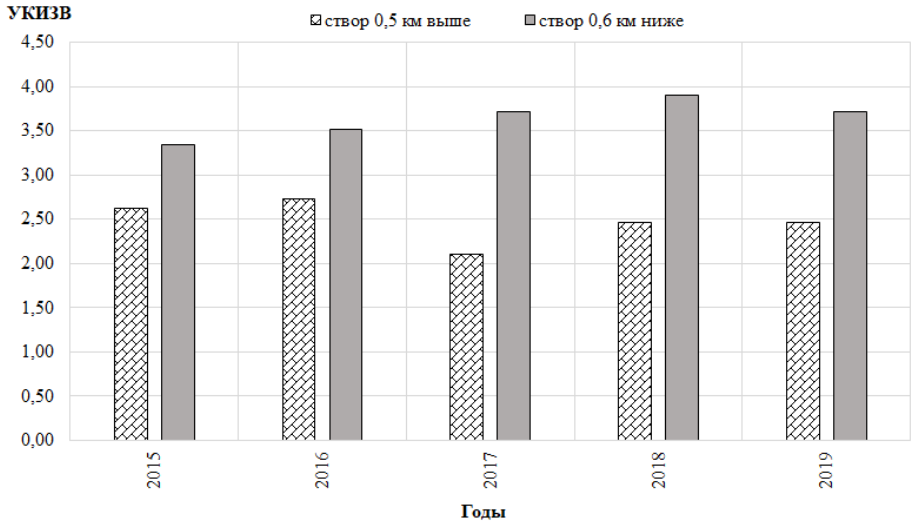


Рис. 3. Тенденция изменения значений УКИЗВ за 2015–2019 гг. на р. Ока – г. Калуга (бассейн р. Волга)

Качество воды р. Жиздра (г. Козельск) в 2019 г. в фоновом створе и контрольном створе класс качества оценивается как 3А (загрязненная). УКИЗВ равен 2,76 в фоновом створе и 2,73 в контрольном (рис. 4). Превышения ПДК отмечены по 5 показателям из 12. Из которых загрязненность медью, ХПК, железом общим, по азоту нитритному и $БПК_5$ на всем участке, классифицируется как характерная, но тяготеет к низкому уровню. За 5-й летний период на контролируемом участке существенных изменений в среднегодовых показателях не произошло. Однако в 2019 г. наблюдались незначительные среднегодовые увеличения величин цветности и температуры,

в фоновом створе увеличились среднегодовые концентрации хлоридов, но незначительно, снизились в сравнении с предшествующим годом среднегодовые показатели железа общего. Содержание растворенного в воде кислорода не опускалось ниже 8,39 мг/дм^3. Среднегодовые показатели тяжелых металлов остались на уровне 2018 г.

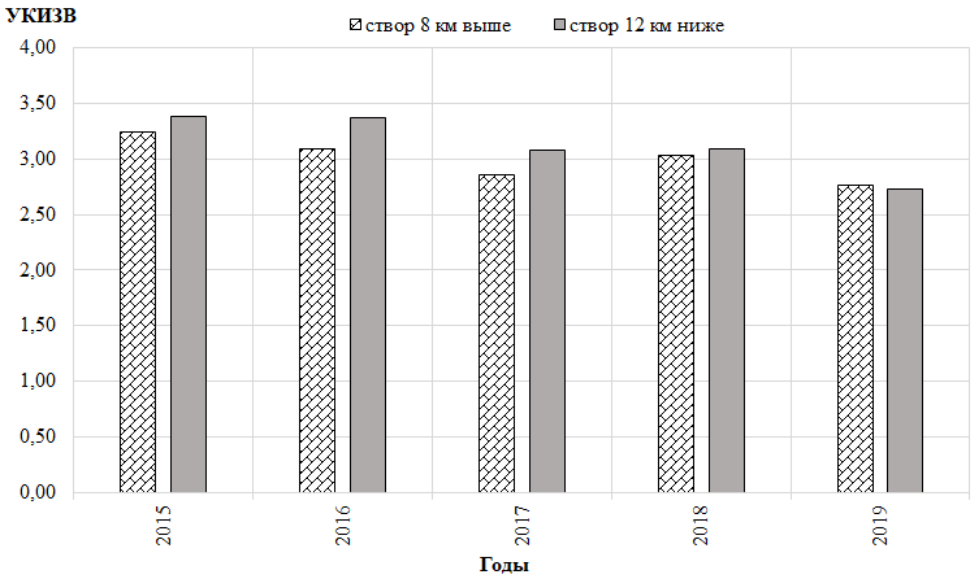


Рис. 4. Тенденция изменения значений УКИЗВ за 2015–2019 гг. на р. Жиздра – г. Козельск (бассейн р. Волга)

В фоновом и контрольном створах г. Обнинска р. Протва качество воды в 2019 г. не изменилось и сохранило класс качества прошлого года – 3-й класс разряда «Б» (очень загрязненные). УКИЗВ равен 3,43 в фоновом створе и 3,48 в контрольном (рис. 5). Превышения ПДК отмечены по 7 ингредиентам из 14 как в фоновом створе, так и в контрольном. Наибольший вклад в состояние загрязенения вод р. Протва вносят ионы меди, нитритного и аммонийного азота, ХПК, $БПК_5$ и фенолы летучие. По железу общему имели место единичные случаи превышения ПДК. На всем исследуемом участке в 2019 г. значительных изменений среднегодовых концентраций химического состава воды не отмечено, содержание тяжелых металлов осталось на уровне 2018 г. Содержание растворенного в воде кислорода не опускалось ниже 7,37 мг/дм^3.

Качественный состав воды р. Угра (п. Куровской) в текущем году остался на прежнем уровне класс 3 «Б» (очень загрязненные). Коэффициент УКИЗВ равен 3,26 (рис. 6). Превышения ПДК отмечены уже по 7 ингредиентам из 13. Загрязненность медью и железом, и органическими веществами по $БПК_5$ и ХПК относится к характерной, но низкого уровня. Загрязненность по фенолам является характерной, но тяготеет к низкому уровню. Существенных изменений в текущем году среднегодовых концентраций показателей химического состава не отмечено. В 2019 году увеличились среднегодовые значения азота нитратного (с 0,49 до 0,71 мг/дм^3), кремнекислоты (с 3,4 до 4,4 мг/дм^3), цинка (с 1,7 до 2,8 мкг/дм^3) и фенолов (с 0,001 до 0,002 мг/дм^3). Содержание растворенного в воде кислорода не опускалось ниже 8,51 мг/дм^3.

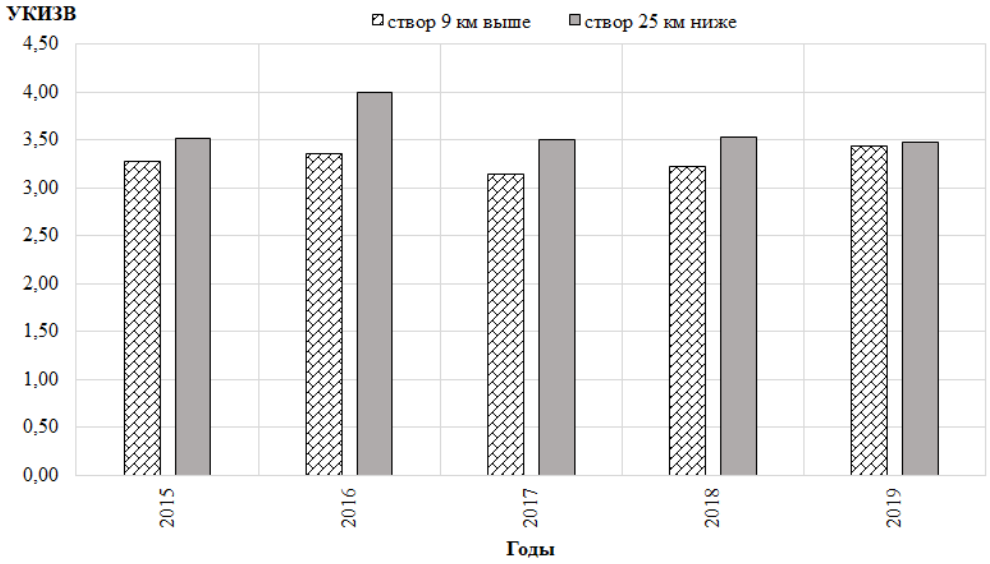


Рис. 5. Тенденция изменения значений УКИЗВ за 2015–2019 гг. на р. Протва – г. Обнинск (бассейн р. Волга)

Качество воды р. Шаня (пгт. Товарково), по сравнению с 2018 г. осталось на прежнем уровне 3 класс разряда «Б» (очень загрязненные). Коэффициент УКИЗВ равен 3,59 (рис. 6). Превышение ПДК отмечены по 7 ингредиентам из 13. Загрязнение легкоокисляемыми органическими веществами, железом и медью является характерной, но тяготеет к низкому уровню. Загрязненность фенолами ХПК является характерной, но тяготеет к низкому уровню. Имели место единичные случаи превышения ПДК по азоту нитритному. Увеличились среднегодовые концентрации фенола на 0,001 мг/дм^3 (с 0,001 до 0,002 мг/дм^3) . Содержание растворенного в воде кислорода не опускалось ниже 7,37 мг/дм^3.

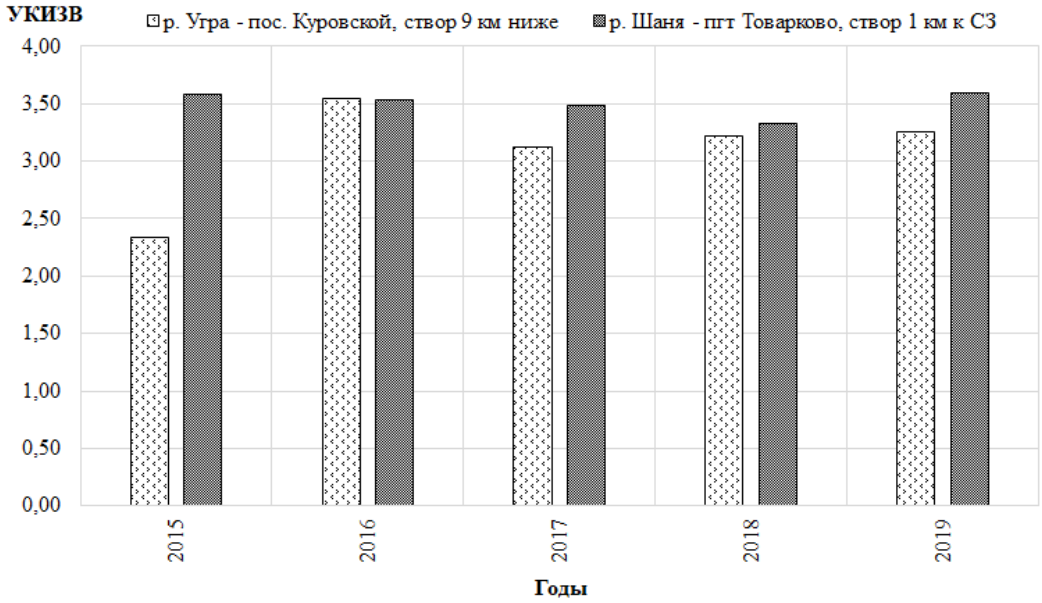


Рис. 6. Тенденция изменения значений УКИЗВ за 2015–2019 гг. на р. Угра – пос. Куровской, р. Шаня – пгт Товарково

Выводы

По итогам проведенной оценки состояния загрязнения поверхностных вод Калужской области можно отметить следующие особенности:

1. Класс качества всех поверхностных вод характеризуется как «загрязненный» с переходом в «очень загрязненный».

2. В пространственном аспекте наименее загрязненными являются воды р. Оки у г. Калуги в фоновом створе, наиболее загрязненными они же, но в контрольном створе.

3. Во временном аспекте для всех рассматриваемых пунктов мониторинга наибольшие величины УКИЗВ отмечаются в 2016 г. (кроме р. Ока – г. Калуга).

4. Состояние загрязнение вод р. Болва в г. Людиново в фоновом створе последние три года хуже, чем в контрольном створе.

5. Основными источниками загрязнения остаются районные филиалы ГП «Калугаоблводоканал» и наиболее мощные из действующих предприятий области.

6. Приоритетными загрязняющими веществами являются азот аммонийный и нитритный, органические вещества по $БПК_5$ и ХПК, железо и медь.

Список литературы

1. Доклад о состоянии природных ресурсов и охране окружающей среды на территории Калужской области в 2018 году. Калуга, 2019. 292 с.

2. Руководящий документ РД 52.24.643-2002. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям. Ростов-на-Дону, 2002. 49 с.

3. *Фролова Н. Л.* Гидроэкологическая безопасность водопользования : автореф. дис. ... д-ра геогр. наук : 25.00.27. М., 2012. 48 с.

УДК 551.510.42

Зимний сток рек зоны мерзлоты Восточной Сибири

Л. С. Лебедева (lyudmilaslebedeva@gmail.com)

Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, г. Якутск

Аннотация. Целью работы является исследование зимнего стока рек криолитозоны Республики Саха (Якутия) как наиболее чувствительного компонента гидрологического режима, характеризующего состояние мерзлоты и гидрогеологических условий региона. Были собраны и проанализированы данные исторических наблюдений по расходам воды на 232 гидрологических постах на малых, средних и крупных водотоках бассейнов рек Лены, Яны, Индигирки, Оленька и Анабара. Водосборы перечисленных рек полностью находятся в зоне распространения многолетней мерзлоты. На 170 из 232 пунктах наблюдений за стоком воды река перемерзает до дна ежегодно или в отдельные годы. Статистический анализ показал, что на половине гидрологических постов из 104 с длинными рядами наблюдений сток рек в зимний период (с ноября по март) увеличивается, на остальных – остается неизменным.

Ключевые слова: зимний сток рек, криолитозона, гидрологический режим, Восточная Сибирь, изменение стока рек, изменение климата.

Целью работы является исследование зимнего стока рек криолитозоны Республики Саха (Якутия) как наиболее чувствительного компонента гидрологического режима, характеризующего состояние мерзлоты и гидрогеологических условий региона. Многолетняя мерзлота препятствует свободному водообмену между подземными и поверхностными водами, способствует наледеобразованию, криогенному перераспределению стока и криогенным паводкам. Процессы сезонного протаивания и промерзания грунтов обусловливают межгодовую и сезонную динамику емкостей задержания воды на водосборе, могут приводить к полному истощению подземного питания зимой и промерзанию реки до дна.

Был собран массив среднемесячных расходов воды для 232 действующих и закрытых постов на территории Республики Саха (Якутия). Водосборы исследуемых рек находятся криолитозоне сплошного, несплошного и прерывистого типов залегания в пределах бассейнов рек Лены, Анабар, Оленек, Яна и Индигирка.

Для действующих и закрытых в последние 10 лет постов были собраны данные с начала работы поста по 2017 г. По закрытым ранее постам были собраны данные, доступные в Государственном водном кадастре (Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши, т. 1, вып. 16) за 1970–1980 гг. Продолжительность периода наличия данных по каждому посту варьируется от восьми месяцев до 92 лет. Данные по 104 постам имеют продолжительность более 25 лет, по 128 постам – менее 10 лет. Площади водосборов в массиве собранных данных варьируются от одного до 2 460 000 км².

На 170 постах из 232 было зафиксировано полное перемерзание реки до дна хотя бы на один месяц за период доступных данных (рис. 1). Площади водосборов перемерзающих рек в среднем меньше, чем неперемерзающих. Медианные значения площадей водосборов перемерзающих и неперемерзающих рек составляют 955 и 29 000 км² соответственно. На большом диапазоне площадей от 10 до 224 000 км² встречаются как промерзающие, так и непромерзающие

реки. Самой крупной рекой, где было зафиксировано полное промерзание до дна, является Яна на постах Джангкы (площадь водосбора 216 000 км², полное промерзание в течение 6 месяцев за 5 лет наличия данных, средний расход 962 м³/с) и Юбилейная (площадь водосбора 224 000 км², полное промерзание в течение 4 месяцев за 9 лет наличия данных, средний расход 1244 м³/с). Севернее 65 градуса СШ постоянно текут только самые крупные реки – Лена, Оленек, Анабар, Индигирка и Алазея (рис.). Все средние и мелкие реки севера полностью перемерзают и прекращают сток в зимний период. Постоянно текущие малые и средние реки находятся в южной части сплошной криолитозоны на границе с зоной распространения мерзлоты несплошного и прерывистого типов. Немногочисленные постоянно текущие малые и средние реки в центральной части рассматриваемой территории приурочены к горным областям, где может происходить круглогодичное питание рек трещинными подземными водами.

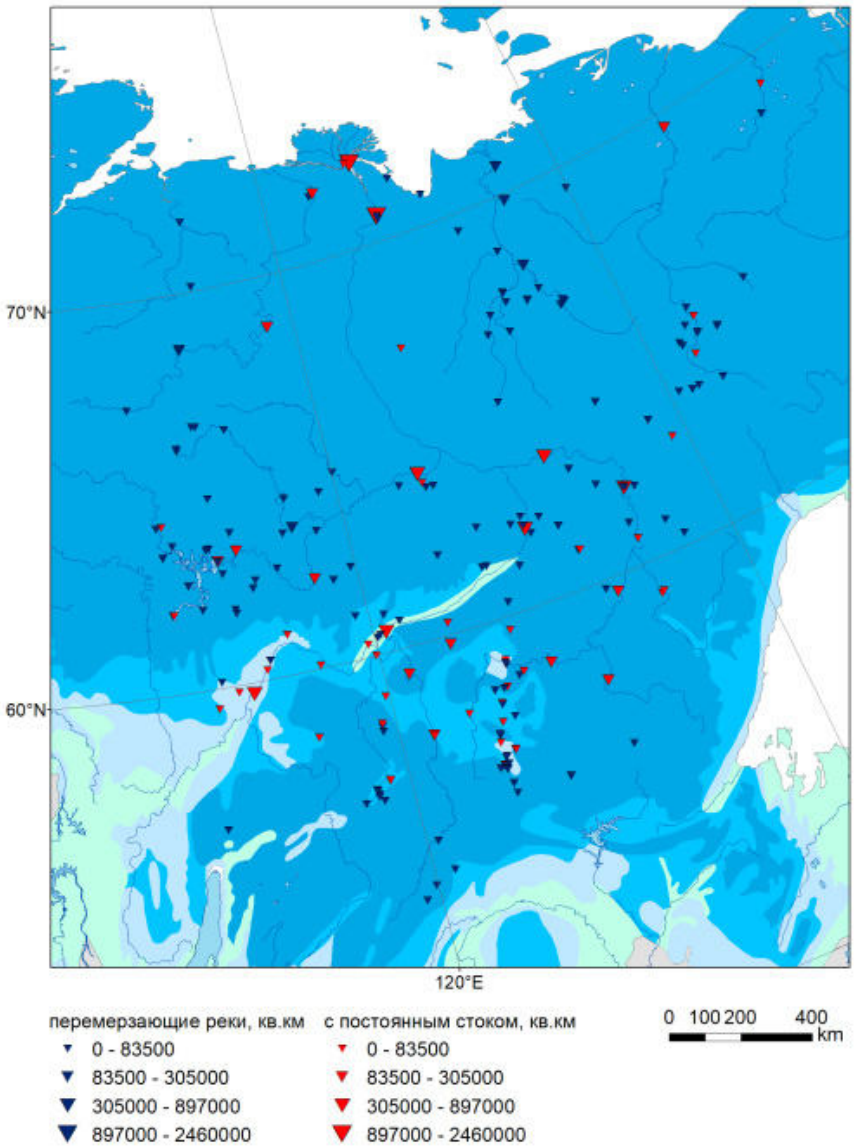


Рис. Посты на реках, перемерзающих до дна и текущих постоянно на карте распространения мерзлоты сплошного (темно-синяя заливка), несплошного (голубая заливка), прерывистого (серо-голубая заливка) и островного (зеленоватая заливка) типов. Размер треугольника пропорционален площади водосбора

Стационарность временных рядов расходов воды за месяц продолжительностью от 25 до 92 лет, доступных по 104 постам, была проверена относительно наличия монотонных трендов с помощью непараметрических критериев ранговой корреляции Манна-Кендалла и Спирмена с уровнем значимости $p < 0{,}05$. В тех случаях, когда оба теста указывали на наличие тренда с уровнем значимости $p < 0{,}05$, проверялся коэффициент автокорреляции ряда. При величине коэффициента автокорреляции $r < 0{,}20$ тренд принимался достоверным. При $r \geq 0{,}20$ для устранения автокорреляции в исходных рядах применялась процедура «предварительного очищения» (trend-free pre-whitening). «Очищенные» ряды вторично тестировались с помощью непараметрического критерия Манна-Кендалла с уровнем значимости $p < 0{,}05$ и делался окончательный вывод о наличии или отсутствии статистически значимого тренда.

Было выяснено, что в зимний сезон (ноябрь – апрель) на 40–50 % анализируемых постов обнаруживается статистически значимое увеличение речного стока (табл.). В мае, августе, сентябре и октябре сток растет примерно на трети рассматриваемых постов, в июле – на 18 % (см. табл.), а в июне остается практически неизменным (3 % постов показывают статистически значимое увеличение водности, см. табл.). У небольшого количества постов (4–7 %) были обнаружены статистически значимые отрицательные тренды речного стока в зимнем сезоне.

Таблица

Количество постов, на которых были выявлены статистически значимые положительные и отрицательные тренды стока воды за отдельные месяцы и их отсутствие

Месяц	Количество постов с наличием данных	Количество постов с положительными трендами	Количество постов с отрицательными трендами	Количество случаев отсутствия трендов
Январь	69	29	3	37
Февраль	65	29	3	33
Март	74	37	5	32
Апрель	104	41	0	63
Май	104	30	1	73
Июнь	104	3	3	97
Июль	104	19	0	84
Август	104	34	1	68
Сентябрь	104	35	1	67
Октябрь	94	32	0	62
Ноябрь	90	41	4	45
Декабрь	85	33	4	48

Анализ зимнего стока рек выполнен при финансовой поддержке РНФ (проект № 19-77-00055). Анализ весеннего и летнего стока рек выполнен при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-55-71005).

УДК 528.8

Изучение протекания термобара в проливе Малое Море (оз. Байкал) в 2020 г. по данным радиометра AVHRR

В. В. Михайлов, Е. Н. Сутырина (ensut78@gmail.com)

Иркутский государственный университет, г. Иркутск

Аннотация. Цель работы – изучение протекания явления веснего термобара в проливе Малое Море 2020 г. с применением данных радиометра AVHRR. В ходе работы отобраны снимки AVHRR с низким содержанием облачности в районе исследования, определено положение и скорость смещения термобара в проливе Малое Море в мае – июне 2020 г.

Ключевые слова: термобар, температура поверхности воды, озеро Байкал.

Введение

Целью исследования является изучение протекания явления термобара в проливе Малое Море (оз. Байкал) весной 2020 г. с применением спутниковых данных.

Явление термобара является основополагающим фундаментальным природным процессом, который определяет все стороны жизни внутриконтинентальных пресноводных водоемов. Образование термического бара определяет пространственные различия распределения гидробионтов в озере, оказывает влияние на репродукционные миграции. Возможность дистанционного обнаружения этой фронтальной области и слежения за ее динамикой и развитием является существенным достижением методов аэрокосмической дистанционной диагностики, открывающим перспективы для множества направлений спутниковых геоэкологических и лимнологических исследований, в том числе, для прогноза распространения загрязнений от береговых источников в центральную часть озера, а также для проведения комплексных исследований ледового режима озер и водохранилищ [2].

Объект исследования

Малое Море – часть озера Байкал в средней его части, отделенная островом Ольхон (рис. 1). Акватория Малого Моря входит в Прибайкальский национальный парк в Иркутской области.



Рис. 1. Схема пролива Малое Море (по данным Google Earth)

Длина пролива Малого Моря – 76 км. Ширина – от 5 до 17 км. Глубина – до 210 м в северной части. Вдоль северо-западного берега протягивается Приморский хребет (1746 м). Растительность берегов горно-таежная, в устьях рек – степная. Имеются подвижные пески. На юго-западе Малое Море связано с Байкалом проливом Ольхонские Ворота, к северо-западу от которого находится залив Мухор [1].

Малое Море отличает большое количество солнечных дней в году и малое количество осадков. Летом вода в мелководных заливах моря прогревается до плюс 21 °С, а иногда и более, что делает Малое Море чрезвычайно популярным местом для туристов.

Материалы и методы исследования

В данной работе для изучения термобара были использованы данные радиометра AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), установленного на борту метеорологических спутников серии NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). Сканирующий радиометр AVHRR – это наиболее часто используемый для измерений температуры поверхности воды инструмент. AVHRR – это устройство для регистрации излучения, которое может использоваться для дистанционного определения облачного покрова и температуры поверхности. Линейный размер элемента разрешения на местности радиометра AVHRR в надире составляет около 1090 км. Спутниковое изображение охватывает полосу земной поверхности шириной более 2600 км вдоль траектории движения носителя, что обеспечивает полный обзор, как акватории, так и всего водосборного бассейна озера Байкал за один пролет.

В ходе написания работы из архива были отобраны 6 малооблачных снимков AVHRR с разницей по времени съемки около 8–12 дней: 11 мая 2020 г., 23 мая 2020 г., 5 июня 2020 г., 17 июня 2020 г., 26 июня 2020 г., 3 июля 2020 г. (табл.). И далее обработаны в специализированной программе HRPT Reader.

Таблица

Использованные снимки радиометра AVHRR

Название снимка	Дата съемки	Время съемки в UTC
202005110946_N19_58016	11 мая 2020 г.	09:46
202005230235_N18_77333	23 мая 2020 г.	02:35
202006050955_N19_58369	05 июня 2020г.	09:55
202006170242_N18_77695	17 июня 2020 г.	02:42
202006260237_N18_77813	26 июня 2020 г.	02:37
202007032326_N19_58772	03 июля 2020 г.	23:26

В пределах акватории Малого Моря были намечены 8 контрольных точек с заданными координатами (широта, долгота) (рис. 2).

В каждой контрольной точке на каждом из 6 снимков были сняты значения температуры поверхности воды, °С.

По формуле гаверсинусов было определено расстояние между постоянным началом и первой точкой, а далее – расстояния между соседними точками.

$$\Delta\sigma = 2\arcsin\left\{\sqrt{\sin^2\left(\frac{\phi_2-\phi_1}{2}\right)+\cos\phi_1\cos\phi_2\sin^2\left(\frac{\Delta\lambda}{2}\right)}\right\}. \quad (1)$$

где – ϕ_1, λ_1; ϕ_2, λ_2 – широта и долгота двух точек в радианах; $\Delta\lambda$ – разница координат по долготе; $\Delta\sigma$ – угловая разница. Формула гаверсинусов используется, чтобы избежать проблем с небольшими расстояниями. Для перевода углового расстояния в метрическое, нужно угловую разницу умножить на радиус Земли (6371 км), единицы конечного расстояния будут равны единицам, в которых выражен радиус Земли (в данном случае – километры).



Рис. 2. Расположение контрольных точек

По полученным данным о расстояниях и температурах был построен профиль распределения температуры поверхности воды вдоль оси пролива Малое Море (рис. 3).

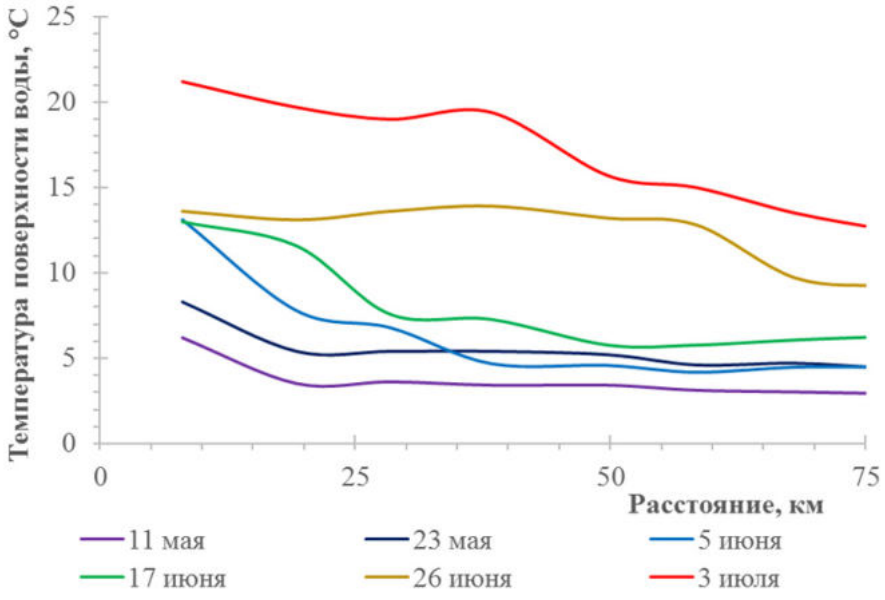


Рис. 3. Профили распределения температуры поверхности воды вдоль оси пролива Малое Море в 2020 г.

Анализируя профиль распределения температуры поверхности воды с середины мая до конца июня, можно отчетливо различить локализацию термобара и изучать его динамику. На снимках за 11 мая и 23 мая термобар расположен примерно на 20 км от постоянного начала (П. Н.), за которое принята крайняя точка залива Мухор, на снимке за 5 июня – на 35 км от П. Н., на снимке за 17 июня – на 48 км от П. Н., на снимке за 26 июня – на 68 км от П. Н., на снимке за 3 июля – термобара уже нет – температура слишком высокая для теплоинертной области, скорее всего термобар вышел за пределы пролива в открытую часть озера. Соответственно скорости перемещения термобара в проливе Малое Море составили от 1,1 км/сут. в начале июня, до 2,2 км/сут. – в третьей декаде июня 2020 г.

Исследование выполнено при частичной поддержке РФФИ, грант № 17-29-05045.

Список литературы

1. *Верещагин Г. Ю.* Байкал. Научно-популярный очерк. М. : Ин-т географии, 1949. 228 с.
2. *Кондратьев К. Я., Мелентьев В. В., Назаркин В. А.* Дистанционная диагностика акваторий и водосборов. СПб. : Гидрометеоиздат, 2002. 248 с.

УДК 552.143:550.4:549.02

Минералого-геохимический состав толщи техногенных осадков рек Екатерингофка, Охта, Смоленка (Санкт-Петербург)

А. Ю. Опекунов (a_opekunov@mail.ru), С. Ю. Янсон (jansn.sv@gmail.com), М. Г. Опекунова (m.opekunova@mail.ru), С. Ю. Кукушкин (stepic@yandex.ru)

Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

Аннотация. Приведены результаты изучения химического и минералогического состава толщи техногенных осадков рр. Екатерингофка, Охта и Смоленка. Показан высокий уровень загрязнения отложений Pb (5,54 %), Ba (4,1 %), Zn (8180 мг/кг), Cu (4870 мг/кг), Cd (172 мг/кг), Hg (8,57 мг/кг). Выделены элементы, отражающие воздействие предприятий разных отраслей промышленности: производство свинцово-кислотных аккумуляторов – Pb–Mn–Co–Cd–Sb (р. Екатерингофка), лакокрасочное производство – Ba–Zn–As–Hg (р. Охта), металлообработка – Cu–Fe–Cr. В условиях техноседиментогенеза происходит активное образование вторичных минералов и техногенных образований в виде агрегатов минеральных фаз – оксигидроксидов железа, барита, гипса, сульфидов халькофильных металлов, Fe и Pb в самородном состоянии, Fe, Pb, Zn, Cu в составе агрегатов комплексного строения.

Ключевые слова: донные отложения, минералогический состав, металлы и металлоиды, химическое загрязнение, вторичные минералы.

Введение

При оценке состояния окружающей среды большое внимание уделяется изучению донных отложений, которые отражают уровень химического загрязнения водных объектов и трансформации гидрологических процессов [4; 6; 7; 9; 12]. В условиях значительных техногенных нагрузок природный режим осадконакопления сменяется техноседиментогенезом, продуктами которого являются техногенные илы [1; 6]. Водотоки центральной части Санкт-Петербурга служат типичным примером техногенного осадконакопления с высокими скоростями, значительным потоком абсолютных масс осадочного материала, аномальным уровнем загрязнения донных осадков широким спектром поллютантов и высокой лабильностью металлов. В целом такие условия сложились 60–70 лет назад [2; 3], а на некоторых участках водотоков и в более ранний период времени. Высокий уровень загрязнения является причиной активизации процессов техногенного минералообразования, приводящих к формированию широкого спектра аутигенных (вторичных) минералов [8; 10; 11]. Однако этот вопрос изучен в меньшей степени по сравнению с геохимическими аспектами загрязнения.

Цель настоящих исследований заключается в определении уровня загрязнения металлами техногенного слоя донных осадков и установлении состава вторичных минералов, образующихся в результате химического загрязнения. В качестве объекта исследований рассматриваются три водотока Санкт-Петербурга: рр. Екатерингофка, Охта и Смоленка, протекающие в центральной части города и испытывающие значительные антропогенные нагрузки (рис. 1).

Объекты и методы исследований

Река Екатерингофка вытекает из Невы и впадает в Невскую губу. В Екатерингофку впадают Обводный канал, реки Ольховка и Таракановка, а также отходят Бумажный и Внутренний каналы. По берегам водотока расположены предприятия химической и пищевой отраслей промышленности, машиностроения и судостроения, производства свинцово-кислотных аккумуляторов. По реке осуществляется судоходство, влияние автотранспорта проявлено меньше и только вблизи мостовых переходов. Колонка донных осадков мощностью 60 см взята в устье р. Ольховка в районе сброса сточных вод предприятия по производству свинцово-кислотных аккумуляторов. Пробы отбирались через 2 см.



Рис. 1. Расположение станций отбора проб на реках Санкт-Петербурга

Река Охта – один из крупнейших правых притоков Невы длиной 90 км. В пределах Санкт-Петербурга ее протяженность составляет 17,5 км. Ширина русла реки в нижнем течении – 40–60 м, берега имеют высоту до 4–5 м. На городском участке река протекает по промышленной зоне с большим количеством действующих и ликвидированных в последние годы предприятий. Основное направление производств – обработка металлов, приборостроение, изготовление лакокрасочных материалов и изделий из полимеров, деревообработка. Колонка отложений из р. Охта поднята вблизи предприятия лакокрасочной промышленности. Мощность колонки 32 см, пробы отбирались через 2 см.

Река Смоленка берет начало в Малой Неве и впадает в Невскую губу, разделяя Васильевский остров и остров Декабристов. Длина составляет 3,7 км, ширина 15–40 м, глубина до 2,6 м. В верхнем течении реки расположены предприятия металлообработки и радиоэлектроники. Ниже промзоны поднята колонка донных отложений мощностью 75 см, которая опробована через 3 см.

В качестве фона тяжелых металлов и металлоидов (ТММ) в донных осадках принято их содержание в алевритовых илах верхнего течения р. Нева.

Отбор донных осадков проведен пробоотборником Hydro-bios (Германия) с установленным креплением алюминиевых штанг для контактного заглубления в осадки. Длина приемной трубы из оргстекла – 1,2 м. Определение металлов и металлоидов (ТММ – Fe, Pb, Zn, Mn, Ni, Cr, Cu, Cd, Co, Ba, Sc, V, Sb, As, Hg) в донных отложениях проводилось в Центральной лаборатории ВСЕГЕИ им. А. П. Карпинского. Пробоподготовка включала полное кислотное вскрытие образцов в соответствии с ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98. Для определения As вскрытие проводилось царской водкой. Металлы определялись методом ИСП МС на приборе ELAN-DRC-6100. Ртуть анализировалась методом «холодного пара» на автономном приборе «Юлия-5м» с порогом обнаружения 0,005 мг/кг.

Микроминералогические исследования проводились на оборудовании ресурсного центра «Микроскопии и микроанализа» (Научный парк СПбГУ) – сканирующем электронном микроскопе Quanta 200 3D (FEI, Нидерланды) с аналитическим комплексом Pegasus 4000 (EDAX, USA) в режиме отраженных и вторичных электронов. Электронно-зондовый микроанализ выполнен на энергодисперсионном дифрактометре указанного микроскопа в условиях высокого вакуума при ускоряющем напряжении 20 кВ.

Для интегральной оценки уровня загрязнения донных отложений ТММ использован аддитивный показатель (Ap) – сумма нормированных к фону ($C_{\phi i}$) концентраций металлов (C_i), превышающих единицу [Опекунов, Митрофанова, Опекунова, 2017]:

$$Ap = \sum_{i=1}^{n} \frac{C_i}{C_{\phi i}}$$

где n – количество ТММ, содержание которых выше фонового значения.

Качественная характеристика загрязнения принята по Е. П. Янину [5]: < 10 – низкий уровень техногенного загрязнения, 10–30 – средний, 30–100 – высокий, 100–300 – очень высокий, > 300 – чрезвычайно высокий уровень техногенного загрязнения.

Результаты исследований

Содержание ТММ во всех изученных колонках донных осадков характеризуется очень высокими концентрациями, в значительной степени превышающими фоновые значения, о чем свидетельствует показатель аддитивности (рис. 2). Его максимальные значения (5546) наблюдаются в нижних слоях разреза осадков р. Екатерингофка. Величина Ap в реках Охта и Смоленка ниже, однако наблюдается общая закономерность – с глубиной показатель растет.

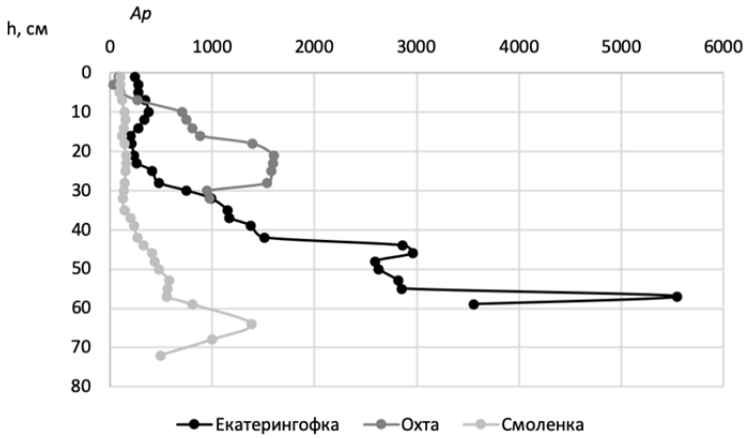


Рис. 2. Значение показателя аддитивности (Ap) в разрезе донных осадков рек Санкт-Петербурга

Микроскопический анализ изученных проб позволил выявить ряд общих закономерностей. Размер минеральных фаз меняется от долей микрона до первых миллиметров. Основу образцов составляют кварц и алюмосиликаты, представленные измененными полевыми шпатами, минералами группы слюд и смектитами. Характерны комковатые агрегаты. Частицы несортированы и неокатаны, что отражает отсутствие значимого переноса и механической дифференциации осадочного материала.

В р. Екатерингофка в районе сброса предприятия по производству свинцово-кислотных аккумуляторов осадки представлены черным илом с запахом нефтепродуктов и химии, с постепенным уплотнением вниз по разрезу (ст. 923). В толще осадков отмечаются максимальные из изученных содержания: Pb – 5,54 %, Mn – 3486 мг/кг, Co – 1290, Cd – 172, Sb – 64,9 мг/кг. Отмечается тренд снижения концентрации металлов вверх по разрезу (рис. 3). Коэффициент парной корреляции содержания перечисленных металлов в разрезе осадков составляет $r = 0{,}91–1{,}0$ (критическое значение $r = 0{,}38$ при $p = 0{,}05$). По величине *Ap* (рис. 2) загрязнение металлами верхней части колонки до 25 см соответствует высокому уровню, ниже – чрезвычайно высокому ($Ap > 300$).

Образец на микроскопический анализ взят из нижней части колонки, сложенной обломочными полимиктовыми алеврито-пелитовыми комковатыми агрегатами, отдельными зернами кварца и темноцветных минералов (рутил, ильменит). Из вторичных минеральных фаз определяется барит, гипс и оксигидроксиды железа (рис. 4). Свинец (*а*) и железо (*б*), представлены агрегатами неправильной формы. Карты распределения элементов по площади показывают, что Fe, Mn, Pb, Ti и Zn образуют отдельные фазы, относящиеся к техногенным.

Колонка отложений из р. Охта, отобранная вблизи предприятия лакокрасочной промышленности (ст. 819), сложена в верхней части (до 10 см) илом темно-серого цвета, насыщенным нефтепродуктами, вниз по разрезу до 17 см залегает разнозернистый илистый песок с включением мелкой дресвы и шлака темно-серого цвета с запахом нефтепродуктов. Ниже осадки представлены песчанистым илом черного цвета. Химические исследования показали очень высо-

кие концентрации Ba (4,1 %), Zn (8180 мг/кг), As (60,1) и Hg (8,57 мг/кг) (рис. 5). Выражено постепенное снижение концентрации металлов от 10 см к поверхности. Отмечается очень высокая парная корреляция содержания этих металлов в разрезе осадков (r = 0,87–0,99 при критическом значении r = 0,55). Показатель аддитивности в верхнем слое до 6 см отвечает высокому, а ниже по разрезу – чрезвычайно высокому уровню загрязнения осадков ТММ (рис. 2).

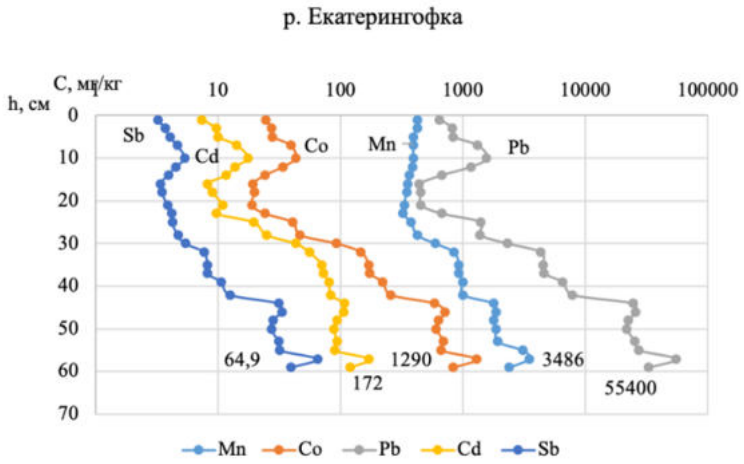


Рис. 3. Распределение типоморфных металлов в разрезе донных осадков р. Екатерингофка и их максимальное содержание

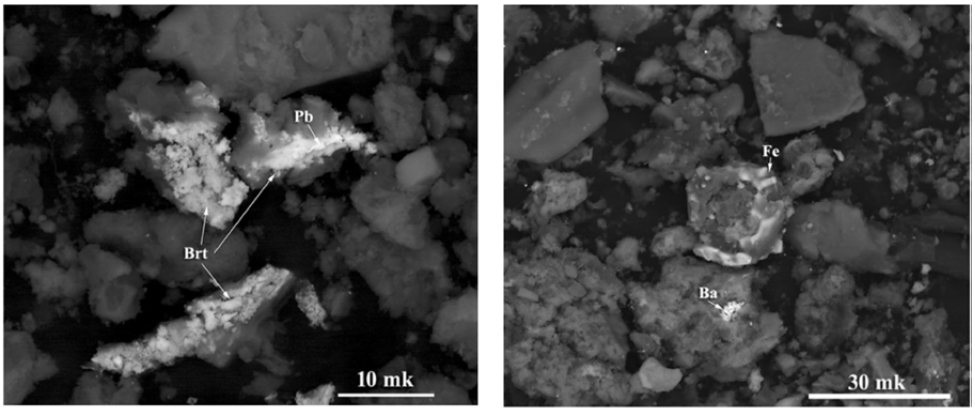


Рис. 4. Вторичные минеральные фазы в обр. 923. Изображение СЭМ, отраженные электроны

Пробы на микроскопический анализ изучены в поверхностном слое 0–2 см (819-1), в интервалах 14–16 см (819-7) и 26–28 см (819-13). В поверхностном слое среди основных минералов присутствует кварц, встречается альбит. В виде отдельных зерен установлены циркон, оксигидроксиды железа, барит, биотит. Железо в виде обломков (рис. 6, *а*) и железосодержащих шариков (рис. 6, *в*) рассматривается как техногенное. Большинство из них покрыты гидроксидной или слюдисто-глинистой коркой. Барит образует отдельные комковатые агрегаты на поверхности с кристалликами гипса (рис. 6, *б*).

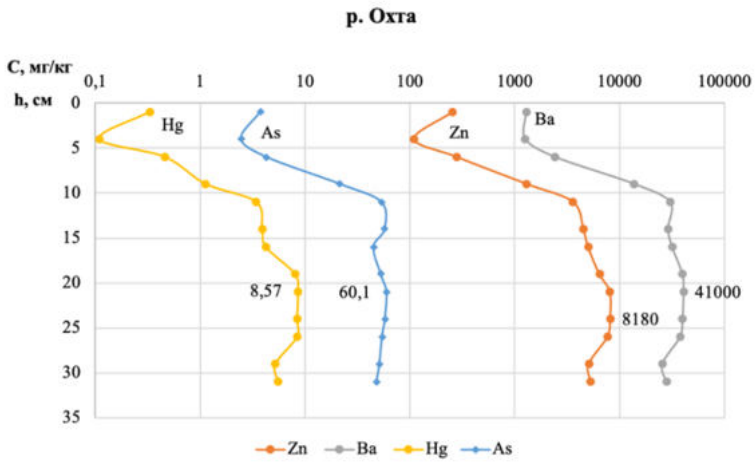


Рис. 5. Распределение типоморфных металлов в разрезе донных осадков р. Охта и их максимальное содержание

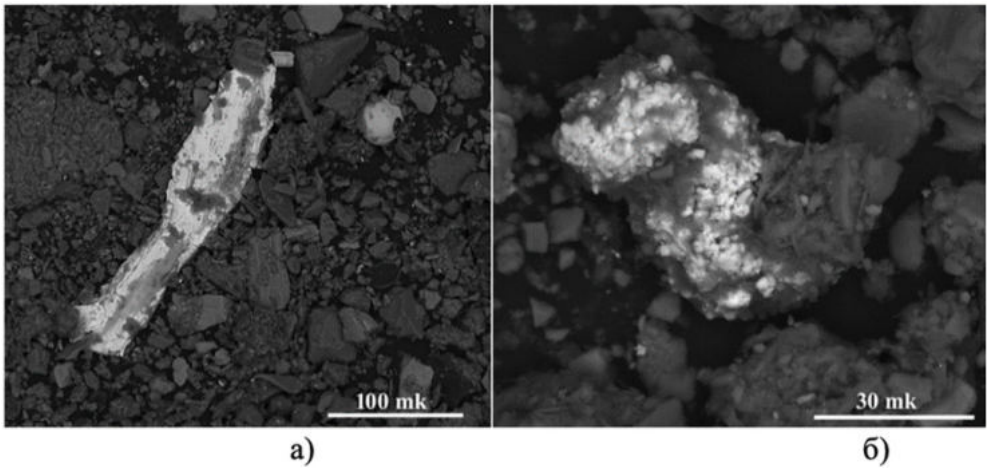


Рис. 6. Вторичные минеральные фазы в обр. 819–1: а) техногенные обломки железа; б) агрегаты барита. Изображение СЭМ, отраженные электроны

В нижележащем образце (14–16 см) размер обломков увеличивается. В основном они представлены зернами кварца с примесью глинистых минералов, слюды и полевых шпатов. В соответствии с ростом концентрации Ba в осадках растет количество барита. Он представлен комковатыми агрегатами и мелкими зернами, рассеянными по всему образцу (рис. 7, *а*). Оксигидроксиды железа отмечаются в большом количестве в виде шариков. Из акцессорных минералов присутствуют ильменит и циркон. Встречаются замещенные конкреции пирита.

Нижний слой (26–28 см) по составу и структуре минералов близок к вышележащему. Однако степень окатанности обломков возрастает, возможно, из-за большей цементации и комковатости тонкой глинистой фракции. Минералы представлены в основном кварцем с редкими зернами плагиоклаза, пироксена и чешуйками биотита. Барит покрывает все минеральные зерна мелкой присыпкой. Он чаще, чем в вышележащих осадках, образует крупные обломки (рис. 7, *б*). Снижается количество шарообразных гидроксидов, но растет количество округлых комковатых агрегатов. Самостоятельных минералов Cu и Zn, которые характеризуются очень высокими концентрациями, в образце не выявлено. Но аналитические спектры содержат пики данных элементов с содержанием до

25 %. Карты распределения химических элементов указывают на наличие в образце Cu и Zn, возможно, в виде очень мелкой фракции. Соотношение пиков в отдельных спектрах позволяет допустить присутствие сфалерита и халькопирита.

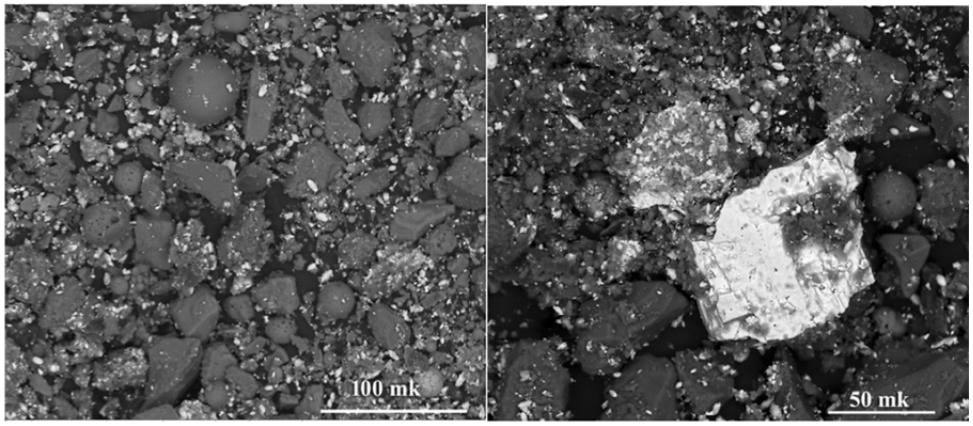


Рис. 7. Образцы 819–7 и 819–13: а) шарики оксидов железа и «присыпки» барита (белое) в слое 14–16 см; б) крупные обломки и «присыпки» барита в слое 26–28 см. Изображение СЭМ, отраженные электроны

Колонка донных отложений из р. Смоленка (ст. 413) имеет мощность 75 см. Верхние слои (до 41 см) сложены илистыми осадками темно-серого цвета с запахом коммунально-бытовых стоков. Слой 41–75 см представлен илом черного цвета с запахом нефтепродуктов. Встречаются шлаковые частицы и фрагменты древесины. В разрезе осадков установлены максимальные концентрации Cr (0,144 %), Fe (0,63 %) и Cu (0,487 %) (рис. 8). Коэффициент парной корреляции между этими металлами составляет r = 0,83–0,90 (критическое значение r = 0,44). Тенденция увеличения концентрации металлов вниз по разрезу проявляется в основном для Cr и Cu. Значение *Ap* в верхнем слое до 6 см отвечает высокому уровню загрязнения, в диапазоне 7–43 см – очень высокому и ниже до забоя колонки – чрезвычайно высокому уровню загрязнения (рис. 2).

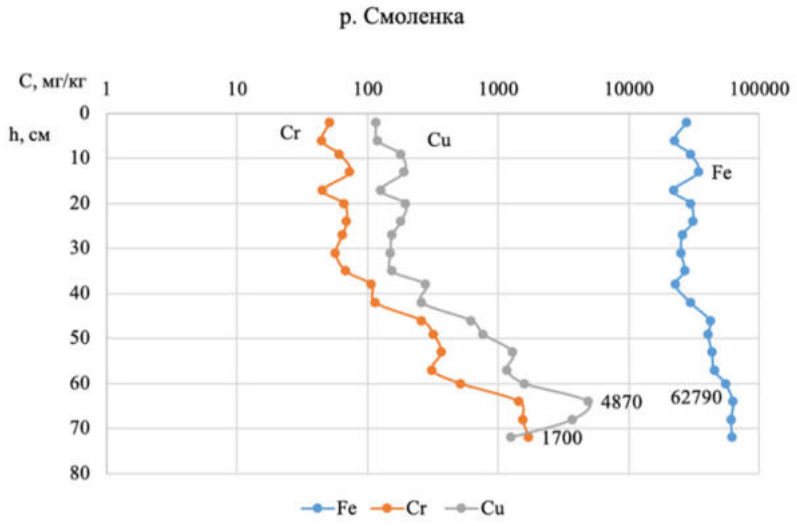


Рис. 8. Распределение типоморфных металлов в разрезе донных осадков р. Смоленка и их максимальное содержание

Микроскопические исследования проведены в пробе с глубины 63–65 см, где установлены высокие содержания перечисленных металлов. Из реликтовых минералов к набору, установленному в изученных пробах, добавляется пироксен. Барий в виде барита (рис. 9, *а*) дополнен витеритом. Распространены кристаллики гипса. Оксигидроксиды железа образуют агрегаты причудливой формы (рис. 9, *б*), зерна со следами огранки и шарики.

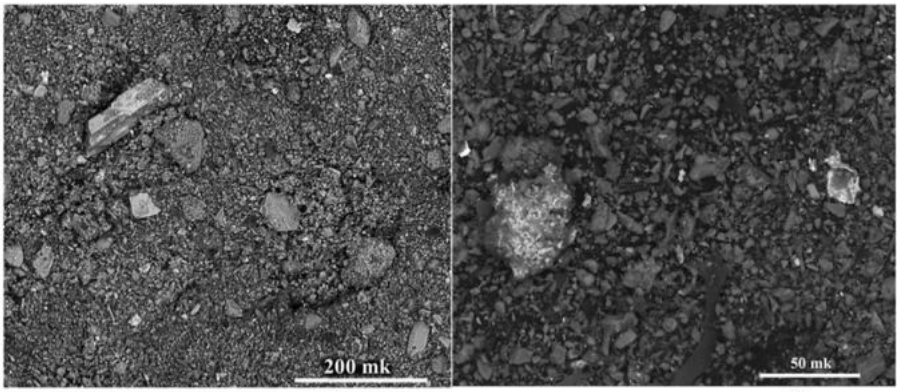


Рис. 9. Образец 413: а) кристаллы барита (яркие); б) частицы оксигидроксидов. Изображение СЭМ, отраженные электроны

Обсуждение и выводы

Поднятые колонки осадков отражают период осадконакопления от 60 (рр. Охта и Смоленка) до 90 (р. Екатеригофка) лет. Уровень загрязнения отложений характеризуется от сильного до чрезвычайно сильного. При этом четко прослеживается тенденция снижения содержания ТММ вверх по разрезу осадков, при максимальных значениях концентрации в самых нижних слоях разреза техногенных илов. Это обусловлено постепенным внедрением системы водоохранных мер, особенно после 1976 г., когда было принято постановление Совета Министров СССР «О мерах по усилению охраны от загрязнения бассейна Балтийского моря» (16 июля 1976 г. № 567), а также снижения производства в 1990-е и 2000-е гг.

Ассоциативность металлов и их концентрации зависят от промышленной специфики производств, сбрасывающих сточные воды в водотоки. На Екатерингофке большое влияние оказывает производство свинцово-кислотных аккумуляторов, обусловивших аккумуляцию в осадках Pb (более 5,5 %), Co, Cd, Mn. В условиях воздействия лакокрасочных производств на р. Охта происходит накопление Ba (более 4,0 %), Zn, As и Hg. В р. Смоленка концентрация металлов в донных осадках происходит под воздействием расположенного выше по течению металлообрабатывающего производства (Fe), в составе которого находится меднолитейная мастерская (Cu, частично Cr), а также кожевенного производства (Cr).

При анализе минералогического состава техногенных илов наибольший интерес представляют аутигенные (вторичные) минералы и техногенные образования в виде агрегатов минеральных фаз. Среди них ведущее место занимают

оксигидроксиды железа и барит. Количество последнего пропорционально общей концентрации бария в осадке. Но даже при относительно невысоком содержании металла происходит кристаллизация сульфата бария. В осадках также присутствует гипс, но в меньших количествах.

В изученных пробах встречаются сульфиды металлов-халькофилов: фрамбоидальный пирит, сфалерит и сульфиды меди, иногда их сростки. В осадках с рудными содержаниями металлов в самородном состоянии обнаружены Fe и Pb, а также в составе агрегатов комплексного строения – Fe, Pb, Zn, Cu. Это в основном типично для пробы из р. Екатерингофка.

В целом аутигенное минералоообразование в экстремальных условиях загрязнения –важная и малоизученная особенность раннедиагенетических преобразований состава техногенных илов. Исследование таких процессов представляется весьма важным, так как они являются одним из механизмов стока металлов в условиях техногенного воздействия на водные объекты.

Исследования проведены при поддержке гранта РФФИ № 19-05-00508.

Список литературы

1. *Опекунов А. Ю.* Аквальный техноседиментогенез. СПб. : Наука, 2005. 278 с. (Труды ВНИИ. Океангеология ; т. 208).

2. *Опекунов А. Ю., Митрофанова Е. С., Шейнерман Н. А.* Особенности техногенного осадконакопления в водотоках центральной части Санкт-Петербурга // Биосфера. 2014. Т. 6, № 3. С. 250–256.

3. *Опекунов А. Ю., Митрофанова Е. С., Опекунова М. Г.* Техногенная трансформация состава донных отложений рек и каналов Санкт-Петербурга // Геоэкология. Инженерная геология. Гидроэкология. Геокриология. 2017. № 4. С. 48–61.

4. *Опекунов А. Ю., Холмянский М. А., Куриленко В. В.* Введение в экогеологию шельфа. СПб. : Изд-во С.-Петерб. университета, 2000. 176 с.

5. *Янин Е. П.* Техногенные геохимические ассоциации в донных отложениях малых рек (состав, особенности, методы оценки). М. : ИМГРЭ, 2002. 52 с.

6. *Янин Е. П.* Техногенные речные илы (условия формирования, вещественный состав, геохимические особенности). М. : НП «АРСО», 2018. 415 с.

7. *Burton E. D., Phillips I. R., Hawker D. W.* Factors controlling the geochemical partitioning of trace metals in estuarine sediments // Soil Sediment Contam. 2006. Vol. 15. P. 253–276.

8. Geochemistry of trace metals in a fresh water sediment: field results and diagenetic modeling / R. W. Canavan, P. Van-Cappellen, J. J. G. Zwolsman, G. A. Van-den-Berg, C. P. Slomp // Sci. Total Environ. 2007. Vol. 381. P. 263–279.

9. On metal diagenesis in contaminated sediments of the Deûle river (northern France) / L. Lesven, B. Lourino-Cabana, G. Billon, P. Recourt, B. Ouddane, O. Mikkelsen, A. Boughrie // Applied Geochemistry, 2010. Vol. 25. P. 1361–1373.

10. *Lynch S. F. L., Batty L. C., Byrne P*. Environmental Risk of Metal Mining Contaminated River Bank Sediment at Redox-Transitional Zones // Minerals. 2014. Vol. 4. P. 52–73.

11. *Taylor K. G., Hudson-Edwards K. A., Bennett A. J., Vishnyakov V*. Early diagenetic vivianite [$Fe_3(PO_4)_2 \cdot 8H_2O$] in a contaminated freshwater sediment and insights into zinc uptake: A μ-EXAFS, μ-XANES and Raman study // Applied Geochemistry. 2008. Vol. 23. P. 1623–1633.

12. Effects of sediment geochemical properties on heavy metal bioavailability / C. Zhang, Z. Yu, G. Zeng, M. Jiang, Z. Yang, F. Cui, M. Zhu, L. Shen, L. Hu // Environment International. 2014. Vol. 73. P. 270–281.

УДК 910:502.051

Комплексное управление прирусловыми территориями рек

Е. В. Потапова (e.v.potapova.isu@mail.ru)

Иркутский государственный университет, г. Иркутск

Аннотация. Представлены общие сведения о проблемах прирусловых территорий и исполнении программ по их комплексному развитию. Отмечены тенденции переэксплуатации водных объектов и несоблюдение водного законодательства России.

Ключевые слова: водные объекты, населенные пункты, проблемы, наблюдение, развитие, ООН.

Создание и развитие большинства населенных пунктов тесно связано с реками и другими водными объектами. Даже цивилизации обычно появлялись и процветали в междуречьях. Вода не просто основа жизни, процветания, но именно водные запасы, преимущественно поверхностные и пресные, обеспечивают жизненные ресурсы региона, страны [1]. Для их сохранения необходимы не только постоянные наблюдения, но оптимизация использования, учитывающая общее время эксплуатации, первостепенные нужды и возможности улучшения состояния.

Прирусловые и прибрежные территории представляет собой чрезвычайно динамический комплекс, ширина которого, особенно в пределах поселений, определяется не только геоморфологическими, экологическими, но и социально-экономическими характеристиками. Она занимает те участки берега и водного объекта, где требуется контролировать деятельность человека, так как последняя оказывает влияние на состояние в целом. Любые работы в этой зоне могут отразиться так же на нормальном течении природных процессов и, следовательно, привести к изменению русловых процессов и даже формы рельефа. Следовательно, прирусловая зона является чрезвычайно интерактивной. Деятельность людей в ее пределах может сказываться на состоянии всей реки, а состояние последней в свою очередь будет влиять на деятельность людей. Водные ресурсы имеют значительное число типов использования, как с изъятием ресурса, так и без него. Приоритетные варианты нередко не учитываются. Некоторые промышленные объекты, особенно водоемкого производства, до сих пор размещают в непосредственной близости к урезу воды, игнорируя строгие запреты на такое положение. Водные объекты в России, всегда чрезвычайно популярные места отдыха, особенно малоимущего и малоподвижного населения. За последние десятилетия флот маломерных судов также сильно увеличился. Все это приводит, в том числе к конфликтным ситуациям между разными группами населения за право посещения территорий, прилегающих к воде. Прирусловые территории многих рек (например, в Европе и европейской части России) фактически полностью застроены (заняты неестественными, сохраняющими свойства водного объекта растительными сообществами, а проездами, набережными, сельскохозяйственными угодьями и т. д.), несмотря на наличие рекомендаций и запретов в законодательстве по их рациональному использованию и приоритетному охранному статусу. Ширина и правила использования

водоохранных зон и даже прибрежных защитных полос в России повсеместно не соблюдаются. В связи с этим берега рек и сами водные объекты утрачивают санитарно-эпидемические нормы и показатели качества вод снижаются настолько, что представляют опасность при любом виде использования. Особенно это характерно для водных объектов крупных городов [2].

Оценивая степень экологического риска и пытаясь управлять его факторами при существующих тенденциях использования прирусловых территорий, разработчики планов их развития, Генеральной застройки поселений, беспокоятся в лучшем случае как их деятельность отразится на социально-экономическом состоянии людей, а не на качестве объекта и состоянии окружающей его среды. А для понимания истинных причин экологических рисков в прибрежной, прирусловой зоне и снижения их масштабов, необходимо еще учитывать происходящие в ней природные процессы и знать, какое влияние на них могут оказать работы хозяйственной и иной деятельности.

Долгосрочные проекты комплексного управления прирусловыми территориями рек в пределах городов и городских агломераций приобретают колоссальную актуальность при постоянном усилении процессов урбанизации. Их составление требует умения точно оценивать степень возникновения риска и принимать обоснованные решения, особенно с точки зрения качества среды. Не стоит забывать и о сопоставимости расходов, связанных с работами по снижению рисков, и получаемые при этом выгоды. В рамках программы такого управления прирусловыми территориями наиболее эффективным оказывается анализ факторов экологических рисков и последствий от их снижения. Прежде всего необходимо:

1) описать и инвентаризировать состояние прирусловой территории (водоохранной зоны и прибрежной защитной полосы) водного как в пределах территории планируемого управления, так и участков, не затронутых антропогенной деятельностью, которые можно использоваться как эталонные, для контролирования всех процессов;

2) идентифицировать и изучить природу и масштабы экологических рисков на всем протяжении водного объекта в пределах границ территории города и на некотором удалении;

3) выбрать участки наиболее подходящие или нуждающиеся в принятии верных решений управления;

4) создать схему или программу, возможно состоящую из нескольких блоков для дальнейшего устойчивого развития объекта и отдельных участков;

5) добиться того, чтобы осуществляемые по программе работы не привели к увеличению экологической опасности для населения и прирусловых территорий;

6) создать программы мониторинга за состоянием управляемого объекта и особенно за участками интенсификации использования.

Как предварительные исследования, так и дальнейшую эксплуатацию необходимо основывать на реализации устойчивого экономического, экологического, социального и институционального развития, с учетом водно-ресурсного потенциала региона, интересов будущих поколений, окружающей природной среды и среды самого водного объекта.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Иркутской области в рамках научного проекта №20-45-380032.

Список литературы

1. *Корытный Л. М.* О воде – фундаментально // География и природные ресурсы. 2006. № 1. С. 167–169.

2. *Потапова Е. В., Пшеничникова М. Е, Соколова О. Е.* Исследование состояния водоохранных зон рек г. Иркутска // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2016. Т. 15. С. 89–103

УДК 008:502.051

ООН в решении вопроса обеспечения человечества чистой водой

Е. В. Потапова (e.v.potapova.isu@mail.ru), А. В. Абрамова, Т. И. Зандакова

Иркутский государственный университет, г. Иркутск

Аннотация. Отмечена значимость водных ресурсов в мире, указана роль ООН в решении проблем обеспечения населения земли чистой водой. Указаны основные программы ООН по водным проблемам, в том числе цель устойчивого развития № 6.

Ключевые слова: чистая вода**,** устойчивое развитие, водопользование, мировое сотрудничество, здоровье людей.

Сегодня качество водных ресурсов во всем мире ухудшается, а спрос на воду увеличивается, конкуренция среди потребителей водных ресурсов усиливается. Такая ситуация оказывает дестабилизирующее влияние на развитие территорий, преимущественно находящихся в бассейнах трансграничных рек, пересекающих государственные границы. Потребность в совместном управлении водными ресурсами должна становиться не причиной конфликтов, а поводом для сотрудничества. За последние 50 лет подобные споры стали причиной только 37 конфликтов с применением силы, в то время как за этот же период было подписано 150 мирных соглашений [1]. Эти соглашения жизненно важны для государств, так как они делают международные отношения в области управления водными ресурсами более устойчивыми и предсказуемыми. Одним из важнейших направлений деятельности ООН давно является преодоление глобального кризиса, обусловленного недостаточно развитой системой водоснабжения, которая столь необходима для удовлетворения основных человеческих потребностей. Проблема усугубляется ростом спроса на воду для коммерческой и сельскохозяйственной деятельности.

По оценкам экспертов, от дефицита воды страдает более 40 % мирового населения. доступа к чистой воде лишены более 700 млн жителей планеты и более 1,7 млрд человек, проживающих на территории речных бассейнов, нуждаются в дополнительных источниках пресной воды, 90 % всех стихийных бедствий связаны с водой, 80 % сточных вод возвращается в экосистему без очистки, загрязненная вода и антисанитарные условия являются главными факторами детской смертности в развивающихся странах [2].

2003 год – Международный год пресной воды, объявленный Генеральной Ассамблеей на Саммите тысячелетия в 2000 г. Тогда мировые лидеры выразили решимость к 2015 г. сократить вдвое долю людей в населении земного шара, не имеющих доступа к безопасной питьевой воде, в том числе из-за нехватки средств. Невыполнение этих планов может повлечь серьезные последствия, а именно распространение смертельных заболеваний, дальнейший ущерб мировой окружающей среде, создание угрозы продовольственной безопасности и безопасности в целом. И хотя проблема с обеспечением чистой водой наиболее остро стоит в развивающихся странах, развитые страны также сталкиваются с ней.

Одной из 17 Целей в области устойчивого развития до 2030 г. (приняты в 2015 г.), а именно цель № 6, предполагает: «Обеспечение наличия и рационального использования водных ресурсов и санитарии для всех» и предполагает к 2030 г. обеспечить всеобщий и равноправный доступ к безопасной и недорогой питьевой воде для всех. Несмотря на значительный прогресс, достигнутый за последние годы в плане доступности к чистой питьевой воде, миллиарды людей в мире, в основном в сельских районах, по-прежнему лишены этих услуг. Каждый третий человек все еще не имеет доступа к чистой питьевой воде, 2 из 5 – не располагают базовыми приспособлениями для мытья рук с мылом и водой [3].

Чистая вода необходима для поддержания жизни и имеет первостепенное значение для здоровья человека. Теоретически на планете достаточно пресной воды для каждого ее жителя. Однако слабая экономика и отсутствие инфраструктуры приводят к тому, что миллионы людей, в основном дети, умирают от болезней, связанных с отсутствием надлежащего водоснабжения, санитарии и гигиены. Проблемам, связанным с водой, были посвящены Конференция ООН по водным ресурсам (1977 г.), Международное десятилетие снабжения питьевой водой и санитарии (1981–1990 гг.), Международная конференция по водным ресурсам и окружающей среде (1992 г.) и Всемирная встреча на высшем уровне «Планета Земля» (1992 г.). Координационный совет руководителей системы ООН учредил общесистемный механизм «ООН – водные ресурсы», в сферу деятельности которого входят все вопросы, связанные с пресной водой и санитарией. Глава 18, на общеизвестной Конференции ООН по окружающей среде и развитию в Рио-де-Жанейро 19992 г. посвящена сохранению качества ресурсов пресной воды и снабжение ею: применение комплексных подходов к освоению водных ресурсов, ведению водного хозяйства и водопользованию. Ее целями (помимо прочего) было а) обеспечить к 2000 г., чтобы все жители городов имели доступ по меньшей мере к 40 л питьевой воды на человека в день и чтобы 75 % всего городского населения обеспечивалось надлежащими санитарно-гигиеническими условиями на коммунальных объектах или по месту жительства; б) установить и применять к 2000 г. количественные и качественные нормы сброса городских и промышленных сточных вод [4]. Вопросы обеспечения и качество воды на Земле – это обязательная составляющая всех, рассматриваемых вопросов на Генеральных ассамблеях ООН.

В своем выступлении на историческом заседании Совета Безопасности в 2011 г. Генеральный секретарь ООН Пан Ги Мун отметил: «Дефицит воды и продовольствия угрожает сотням миллионов людей во всем мире. Это подрывает сами основы стабильности на местном, национальном и глобальном уровнях. Нарастает конкуренция между общинами и странами за получение доступа к имеющимся скудным ресурсам, в первую очередь водным, что усугубляет давние проблемы в области безопасности и порождает новые». Ничто не внесет такой большой вклад в сокращение заболеваемости и спасение жизни людей, как обеспечение всего населения безопасной водой, утверждал Кофи Аннон, Генеральный секретарь ООН, в начале 2000-х гг. Его призывы до сих пор реализуются на благо всего человечества Земли.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Иркутской области в рамках научного проекта № 20-45-380032.

Список литературы

1. Вода без границ. Организация объединенных наций, 2013. 5 с.
2. Глобальные вопросы повестки дня. URL: https://www.un. org/ru/sections/issues-depth/global-issues-overview/index. html (дата обращения: 01.09.2020).
3. ЦУР ООН. URL: https://www.un. org/sustainabledevelopment/ru/water-and-sanitation/ (дата обращения: 01.09.2020).
4. Повестка дня на XXI век. Организация объединенных наций, 1992. 300 с.

УДК 911.52

Модели высотно-ландшафтных комплексов водосборов Сихотэ-Алинской области как основы мониторинга и моделирования состояния водных объектов суши

В. Т. Старожилов (starozhilov.vt@dvfu.ru)

Тихоокеанский международный ландшафтный центр ШЕН, Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток

Аннотация. Рассматриваются на примере равнинного и горного типа ландшафтов высотно-ландшафтные комплексы Сихотэ-Алинской области как звена Тихоокеанского ландшафтного пояса России. Выделяются равнинные, мелкосопочные, низкогорные, расчлененносреднегорные, массивносреднегорные, гольцовые высотно-ландшафтные комплексы. Структурирование и классификация представляются для дальнейшего изучения структур как объектов отраслевой индикации и как основы мониторинга и моделирования состояния водных объектов суши, в том числе качества воды и возможностей использования высотно-ландшафтных комплексов как территорий освоения.

Ключевые слова: ландшафт, высотно-ландшафтный комплекс, водосбор, освоение.

Введение

Предлагаемое читателю структурирование и классификация ландшафтов водосборов представляются как основы для дальнейшего изучения структур как объектов отраслевой индикации, мониторинга и моделирования состояния водных объектов суши, в том числе качества воды и возможностей использования высотно-ландшафтных комплексов как территорий освоения и изучения водной экологии региона.

Работа представляет собой продолжение исследований Тихоокеанского международного ландшафтного центра ШЕН ДВФУ, в целом сформировавшейся ландшафтной школы ДВФУ и разработанных парадигм: общей Дальневосточной ландшафтной парадигмы и Дальневосточной ландшафтной парадигмы индикации и планирования (doi:10.18411/lj-05-2020-26) [1], разработок по картографическому оцифрованному ландшафтному обеспечению индикации, планирования и геоэкологического мониторинга юга Тихоокеанского ландшафтного пояса России (doi:10.18411/lj-05-2020-27) [2]. Рассматривается структурирование Сихотэ-Алинской области как звена Тихоокеанского ландшафтного пояса, который представляет собой азональный пояс ландшафтной сферы с генетически единым структурно-тектоническим положением в зоне окраинно-континентальной дихотомии системы океан-континент и характеризуется аккреционной природой фундамента ландшафтных сихотэалинской, нижнеамурской, приохотской, сахалинской, камчатско-курильской, чукотской и др. географических областей (структур) с климатическим и растительным внутренним содержанием, подчиняющимся высотной и широтной зональности и эволюционирующим под действием взаимодействующих, взаимосвязанных и взаимопроникающих друг в друга орогенического, орографического, климатического и фиторастительного факторов (рис. 1).

Предлагается на примере Сихотэ-Алинской системы для тихоокеанских горных территорий проводить структурирование и классификацию ландшафтных территорий с выделением высотно-ландшафтных комплексов с изучением вертикальной и горизонтальной дифференциации как универсального свойства количественного и качественного изменения внутреннего содержания высотно – ландшафтных систем и использования полученных материалов для мониторинга и моделирования состояния водных объектов суши. При этом под высотно-ландшафтным комплексом понимаются генетически связанные ассоциации ландшафтов, определяемые рельефом, общим генетическим и динамическим, подчиняющимся законам причинно-следственных связей, состоянием эрозионно-денудационных систем, функционирующих под действием вещественно-энергетических потоков Земли и в первую очередь гравитационной энергии.



Рис. 1. Карта Тихоокеанского ландшафтного пояса России [Старожилов, 2013].
Области пояса: 1 – Сихотэ-Алинньская; 2 – Нижнеамурская; 3 – Приохотская;
4 – Колымская; 5 – Анадырьская; 6 – Чукотская; 7 – Корякская;
8 – Камчатско-Курильская; 9 – Сахалинская

Структурирование и классификация проводились в различных масштабах на планетарном, среднемасштабном и локальном уровнях. В статье рассматривается структурирование на среднемасштабном уровне. При выделении среднемасштабных высотно-ландшафтных комплексов доминантными являются высотный критерий и количественные и качественные изменения их внутреннего содержания с учетом состояния эрозионно-денудационных систем, функционирующих под действием вещественно-энергетических потоков Земли и в первую очередь гравитационной энергии.

По этим критериям ландшафтные территории классифицируются и выделяются равнинные, мелкосопочные, низкогорные, расчлененносреднегорные, массивносреднегорные, гольцовые высотно-ландшафтные комплексы. Структурирование и классификация представляются для дальнейшего изучения структур, как объектов отраслевой индикации и возможностей использования высотно-ландшафтных комплексов, как объектов освоения.

Отмеченное, а также то, что исследование проведено впервые и нацелено на практическую реализацию ландшафтного подхода в освоении территорий, определяет актуальность выполненной работы.

Материалы

Рассматриваются материалы результатов научных и практических исследований в сфере геолого-географического изучения и ландшафтного картографирования Сихотэ-Алинской системы как звена Тихоокеанского ландшафтного пояса России (см. рис. 1). Изучались материалы соотношений и взаимосвязи достаточно значимых данных не только по рельефу, растительности и почвам, но и коренным и рыхлым породам, климату [3–9].

В статье приводятся материалы результатов, полученных на основе авторских полевых (более 30 полевых сезонов автора) и производственных по практической реализации ландшафтного метода в различных областях природопользования: в области туризма и рекреации, градостроительства, лесопользовании, планирования и проектирования природопользования и др. [10–14].

Использовались результаты картографирования отдельных областей Тихоокеанского ландшафтного пояса, например, ландшафтная классификация, базовая ландшафтная карта Приморского края М 1:500 000 и легенда к ней, разработанная в масштабе 1:500 000 ландшафтная классификация Сахалинской области [15], продолжающихся ландшафтных исследований по другим территориям Тихоокеанской России и в том числе о. Русском; особенности формирования фундамента ландшафтов Тихоокеанского ландшафтного пояса на основе авторской концепции его акреционной геодинамической эволюции, с опорой на изучение петрографического состава и структурно-тектоническое положение осадочных и других литокомплексов [16].

При выделении и классификации высотно-ландшафтных комплексов использовались материалы ландшафтной индикации.

Выше отмечено только часть использованных материалов. В них ранее рассмотрены отдельные вопросы при выполнении задач по разным разделам ландшафтоведения. Общего их анализа как основы концепции высотно-ландшафтных комплексов и их классификации ранее не проводилось. В связи с этим, все они, в том числе и авторские полевые (30 полевых сезонов), нами использованы как основы для решения задачи структурирования и классификации высотно-ландшафтных комплексов.

Результаты

В целом на основе анализа, синтеза и оценке значимого полевого и теоретического материала установлен фундаментальный результат настоящих исследований, заключающийся в том, что для реализации концепции структурирования высотно-ландшафтных структур как природных основ ведения гармонизированных с

природой отраслевого освоения территорий необходимо иметь прежде всего оцифрованную векторно-слоевую морфологическую ландшафтную основу [3].

В результате исследований разработана классификация и выделяются высотно-ландшафтные комплексы. Они разные и разделяются на равнинные, мелкосопочные, низкогорные, расчлененносреднегорные, массивносреднегорные, гольцовые комплексы.

Равнинный высотно-ландшафтный комплекс в границах находит отчетливое отражение на морфологических ландшафтных картах и занимает ландшафтное равнинное пространство, например, в Приморском крае, занимает ландшафтное равнинное пространство Уссури-Ханкайской ландшафтной провинции. Включает равнинную территорию дальневосточного равнинного класса ландшафтов с характерным для нее сочетанием лесостепного равнинного и долинно-речного подкласса и равнинного эрозионно-аккумулятивного и долинно-речного и приморско-равнинного родов.

Низкогорный высотно-ландшафтный комплекс. Это горы с абсолютными отметками 300–800 м и относительными превышениями до 200–250 м. Для них характерны прямые, реже выпуклые, склоны, покрытые мощным слоем щебнистых суглинков, мощность которых у подножий гор обычно увеличивается. Обнажения отмечаются редко. Это обычно либо денудационные останцы и гребни, сложенные устойчивыми к выветриванию горными породами на вершинах и склонах, либо эрозионные (абразионные) обрывы у подножий гор.

Низкогорный высотно-ландшафтный комплекс характеризуется сложной дифференцированностью ландшафтных растительных и почвенных группировок. Среди растительных преобладают широколиственные леса, а в почвенных – бурые-лесные. Комплекс характеризуются замедленным боковым выносом мелкозема в процессе суффозии и бокового почвенного смыва, преобладающим термокриповым и гигрокриповым транзитом склоновых отложений, с заметным обогащением верхних слоев разреза грубообломочным материалом при сохранении их преимущественно суглинистого состава. Широко распространены явления промежуточной склоновой аккумуляции на перегибах и у подножьев склона. Территории относятся к участкам с замедленной денудацией и активной аллювиальной и склоновой аккумуляцией.

Включает горную территорию дальневосточного горного класса ландшафтов с ландшафтами доминантного горно-смешанно-широколиственного, редкого горно-темнохвойного подклассов, доминантного низкогорного полисубстратного и терригенного родов. Для комплекса доминантный – низкогорный пихтово-елово-лиственично-мелколиственный вид горно-смешанно-широколиственного пояса и включает комплекс пихтово-еловых, лиственничных, елово-лиственичных и мелколиственных лесов (местами с широколиственными породами) на горно-таежных бурых и др. почвах. Имеет быстрый водообмен на узких водоразделах и крутых склонах, слабо сдержанный на широких водоразделах и выположенных склонах. Встречается пихтово-елово-лиственично-мелколиственный вид горно – смешанно-широколиственного пояса и включают комплекс пихтово-еловых, лиственничных, елово-лиственичных и мелколиственных лесов (местами с широколиственными породами) на горно-таежных бурых и др. почвах. Имеет быстрый водообмен.

Расчлененносреднегорный высотно-ландшафтный комплекс. Включает горную территорию дальневосточного горного класса ландшафтов с ландшафтами доминантного горно – смешанно-широколиственного, горно-темнохвойного подклассов, доминантного полисубстратного и терригенного родов. Это горы с абсолютными отметками более 800 м. Развит на территории с глубоким расчленением первоначально единых массивов на большое число узких извилистых хребтов и обособленных вершин с глубоко расчлененными склонами. Это территории с резко очерченными водораздельными гребнями, очень крутыми прямыми или выпуклыми в верхней части склонами, к которым на япономорском макросклоне приурочены подвижные осыпи, часто покрывающие склоны от подножья до вершины. Из растительных группировок преобладают кедрово-широколиственные и елово-пихтовые леса. На склонах, поросших древесной растительностью, развиты щебнистые и щебнисто-дресвяные суглинки, служащие минеральной основой преобладающих бурых и желто-бурых почв. Вверх по склону обычно отмечается увеличение количества грубообломочного материала, обогащение им верхней части склоновых накоплений, увеличивается крупность обломочного материала. В целом этот комплекс ландшафтов относится к области активной денудации, но существенную роль играют также процессы аллювиального транзита и промежуточной аккумуляции. Кроме того, для высотного расчлененносреднегорного комплекса ландшафта характерно: заметное преобладание продуктов физического выветривания в общем объеме мобилизованного материала зоны разрушения скальных пород; широкое распространение обвально-осыпных явлений и осовов; эпизодическое проявление курумового транзита, солифлюкции и морозного выпучивания; каньонообразные формы эрозионного врезания вершин водотоков, значительные продольные уклоны долин в зоне руслового водного транзита обломочного материала.

Массивносреднегорный высотно-ландшафтный комплекс. Включает горную территорию дальневосточного горного класса ландшафтов с ландшафтами доминантного горно – смешанно-широколиственного, горно-темнохвойного подклассов, доминантного полисубстратного и терригенного родов. Это горы с абсолютными отметками более 800 м. Характеризуется преобладанием наиболее возвышенных куполовидных массивов и линейно вытянутых горных кряжей, обычно контролируемых выходами на поверхность наиболее устойчивых к выветриванию горных пород, представленных молодыми интрузиями, экструзиями, метосамотическими полями, купольными, ядерными и диапировыми структурами. Распространены вершины округлых очертаний и уплощенные широкие водораздельные перегибы. Это районы таежных группировок хвойных лесов с преобладанием ели аянской и пихты белокорой в хвойной и березы – в лиственной составляющих. Верхнюю границу леса формируют подгольцовые ельники, отличающиеся мощным развитием травянистого покрова и кустарничкового яруса. Преобладающими почвами являются горно-таежные бурые иллювиально-гумусовые, формирующиеся в условиях быстрого водообмена. Растительность формируется на глыбово-дресвяно-щебнистой коре выветривания с относительно высоким содержанием суглинка в разрезе. В целом это области активной денудации и локальной аккумуляции. Кроме того, для массивно-среднегорного высотно-ландшафтного комплекса характерно: значительное преоб-

ладание продуктов физического выветривания в общем объеме мобилизованного обломочного материала зоны разрушения скальных горных пород; заметное проявление курумового транзита, осовов, солифлюкции, морозного выпучивания и обвально-осыпных явлений; циркообразные формы глубинной эрозии в водосборной зоне и большие продольные уклоны долин в зоне руслового водного транзита обломочного материала.

Гольцовый высотно-ландшафтный комплекс. Включает горную территорию дальневосточного горного класса ландшафтов с ландшафтами доминантного горно-тундрового подкласса, доминантного полисубстратного и терригенного родов. Распространен на гольцовых, подгольцово-горных, каменистых россыпях, осыпях, курумах и каменистых потоках, приуроченных к гребням водоразделов, вершинам и склонам гор, развит не широко. В большинстве случаев это самые возвышенные участки гор, округлые вершины и террасированные склоны. На северном Сихотэ-Алине ландшафты этого комплекса довольно часто отмечаются с отметок 700 – 900 м. Характеризуются маломощным чехлом обломочных накоплений, малым количеством мелкозема в их разрезе, слаборазвитыми фрагментарными каменистыми почвами. В таких условиях глубина промерзания значительно превышает мощность слоя рыхлых накоплений, что приводит к интенсивному развитию явлений отторжения обломков скальных пород и выпучивания их вверх вплоть до дневной поверхности. Этому способствуют продолжительные резкие перепады суточных температур осенью и весной, высокий уровень солнечной радиации, переувлажнение грунтов.

Почвы горно-тундровые в гольцовом и иллювиально-гумусовые и дерново-органические в подгольцовом поясах. Горные тундры характеризуются преобладанием в покрове кустистых лишайников (особенно ягелей). Встречаются одиночные кусты низкорослого кедрового стланика. В зоне подгольцовых частей гор развиты стелющиеся леса кедрового стланика. К местам скопления каменисто-глыбовых отложений склонов всех экспозиций приурочены лишайники.

В целом для гольцового высотно-ландшафтного комплекса характерно: интенсивное проявление и широкое распространение процессов вершинного выравнивания и гольцовой планации; активное морозно-мерзлотное, химическое и биологическое выветривание с образованием грубообломочного структурного элювия; активный вынос мелкозема в процессе суффозии, солифлюкции и бокового подпочвенного смыва; интенсивное проявление курумового, термокрипового и криокрипового транзита грубообломочного материала; формирование осовов (камнепадов) на склонах и как следствие быстрое смещение склоновых накоплений на значительные расстояния (вплоть до подножия склонов); широкое распространение явлений солифлюкции и морозного выпучивания.

Заключение

Подводя итоги, отметим, что в сложившейся Ландшафтной школе Дальневосточного федерального университета разработана и сформирована под руководством профессора В. Т. Старожилова научно-практическое направление структурирования ландшафтов Сихотэ-Алинской системы. Констатируется выделение равнинных, мелкосопочных, низкогорных, расчлененносреднегорных, массивносреднегорных, гольцовых высотно-ландшафтных комплексов. Все они со-

провождаются составлением полимасштабных морфологических, индикационных и других векторно-слоевых ландшафтных карт. В целом сложилось важное направление для создания платформы для разработки планов и проектов развития территорий. Она также является платформой для обучения студентов открываемой магистратуры по программе «Ландшафтное планирование». Представляет собой часть основ фундаментального научно-прикладного направления, разработанного в Тихоокеанском международном ландшафтном центре ДВФУ и направленного на рациональное освоение и использование территорий.

Изучение комплексов важно не только с точки зрения разработок научных основ ландшафтоведения, но и как направление исследований стратегических возможностей применения знаний о них при комплексном и отраслевом освоении ландшафтного пространства, мониторинга, моделирования и прогнозирования состояния водных объектов, качества воды и изучения водной экологии регионов. В настоящее время Тихоокеанский международный ландшафтный центр ДВФУ продолжает разрабатывать концептуальную методологию оцифрованного структурирования горных территорий азональных ландшафтных поясов (водосборов) и возможности использования этих материалов при освоении территории Тихоокеанской России. Географы ДВФУ уже подготовили базовую ландшафтную карту Приморского края в масштабе 1:500 000, ландшафтную карту Русского острова в масштабе 1:25 000, ландшафтную классификацию Сахалинской области, продолжают исследования по другим регионам Тихоокеанского ландшафтного пояса России.

Список литературы

1. *Старожилов В. Т.* Дальневосточная ландшафтная парадигма индикации и планирования // Тенденции развития науки и образования. 2020. № 61. Ч. 2. С. 28–36.

2. *Старожилов В. Т.* Картографическое оцифрованное ландшафтное обеспечение индикации, планирования и геоэкологического мониторинга юга Тихоокеанского ландшафтного пояса России // Тенденции развития науки и образования, 2020. № 61. Ч. 2. С. 36–42.

3. *Старожилов В. Т.* Природопользование: практическая ландшафтная география : учебник. Владивосток, 2018. 2765 с

4. Атлас Приморского края / В. Т. Старожилов [и др.]. Владивосток, 2008.

5. Почвы ландшафтов Приморья (рабочая классификация) / Н. М. Костенков, О. В. Нестерова, Л. Н. Пуртова, Л. Т. Крупская, А. М. Дербенцева, А. В. Назаркина, В. Н. Пилипушка, В. А. Семаль, В. Т. Старожилов *:* учеб. пособие. Владивосток, 2011.

6. *Старожилов В. Т.* Эколого-ландшафтный подход в формировании региональной экологической политики на территории стран АТЭС // Шестые Гродековские чтения. Актуальные проблемы исследования Российской цивилизации на Дальнем Востоке : межрегион. науч.-практ. конф / Правительство Хабаровского края. Хабаровск, 2009. С. 24–28.

7. *Старожилов В. Т.* Региональные компоненты и факторы структуры и пространственной организации ландшафтов юга Дальнего Востока (на примере Приморского края). М., 2008.

8. *Старожилов В. Т.* Статистический анализ прстранственного распределения ландшафтов окраинно-континентальных геосистем Тихоокеанской России // Эколого-геоморфологические исследования в урбанизированных и техногенных ландшафтах (Арчиковские чтения – 2015). Чувашский государственный университет имени И. Н. Ульянова, 2015. С. 102–113.

9. *Старожилов В. Т.* Ландшафтное картографирование территорий Приморского края // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2010. № 2. С. 82–89.

10. *Старожилов В. Т., Зонов Ю. Б.* Ландшафтные предпосылки устойчивого развития территорий // Природа без границ : материалы I Междунар. экон. форума / Адм. Приморского края. Владивосток, 2006. С. 261–265.

11. Процессы механической деградации почв в ландшафтах Приморья : монография / В. Т. Старожилов, А. М. Дербенцева, А. Б. Евсеев, В. И. Ткаченко, А. И. Степанова. Владивосток : Изд-во Дальневост. ун-та, 2009. 86 с.

12. Техногенные изменения ландшафтов, обусловленные промышленным производством в Приморском крае / В. Т. Старожилов, А. М. Дербенцева, Л. Т. Крупская, А. Б. Евсеев // Экологические системы и приборы. 2009. № 6. С. 52–55

13. *Старожилов В. Т.* Эколого-ландшафтный подход к промышленным территориям юга Дальнего Востока // Современные геофизические и географические исследования на Дальнем Востоке России : материалы 9-й науч. конф., приуроч. к Всемирным дням воды и метеорологии, к 110-летию ДВГУ и 45-летию ГФФ / под ред. Н. В. Шестакова. Владивосток : Дальневост. гос. ун-т, Ин-т окружающей среды, 2010. С. 155–158.

14. *Старожилов В. Т.* Проблемы ресурсопользования, структура и пространственная организация ландшафтов приокеанских Дальневосточных территорий // Науки о Земле и отечественное образование: история и современность : материалы Всерос. науч.-практ. конф., посвящ. памяти акад. РАО А. В. Даринского / Рос. гос. пед. ун-т им. А. И. Герцена, фак. географии. СПб., 2007. С. 310–312.

15. *Старожилов В. Т.* Ландшафтные геосистемы Сахалинского звена Тихоокеанской России // Научная дискуссия: гуманитарные, естественные науки и технический прогресс : материалы VII Всерос. науч.-практ. конф. 2015. С. 54–64.

16. *Старожилов В. Т.* Ноосферные проблемы, структура и пространственная организация ландшафтов дальневосточных территорий (на примере Приморского края) // Ноосферные изменения в почвенном покрове : материалы Междунар. науч.-практ. конф. Владивосток : Дальневост. гос. ун-т, 2007. С. 31–37.

УДК 556.535.3

Анализ изменения стока рек на территории Усть-Ордынского Бурятского округа

Е. Н. Сутырина (ensut78@gmail.com), С. А. Андреева

Иркутский государственный университет, г. Иркутск

Аннотация. Приводятся основные итоги исследования изменения параметров стока рр. Мурин, Куда, Харат, Оса, Ида на территории Усть-Ордынского Бурятского округа за многолетний период. Проанализировано изменение внутригодового распределения исследуемых водотоков, изучено изменение метеорологических факторов, влияющих на сток указанных рек.

Ключевые слова: Усть-Ордынский Бурятский округ, внутригодовое распределение стока, стокоформирующие факторы.

Происходящие в настоящий момент климатические изменения ведут к перестройке водного режима рек, кроме этого происходят перестройки в хозяйственном использовании рек, что приводит к необходимости изучать изменения характеристик стока рек в современный период и определяет актуальность представленного исследования.

Целью работы являлось анализ изменения параметров стока рек на территории Усть-Ордынского Бурятского округа.

В работе использовались ряды расходов воды на гидрологических постах р. Мурин – с. Загатуй, р. Куда – с. Ахины, р. Харат – с. Харат, р. Оса – с. Оса, р. Ида – д. Морозова за многолетний период. Были исследованы многолетние колебания модульных коэффициентов стока *K* указанных водотоков, которые, согласно рис. 1, на исследуемой территории носят схожий характер и во многом совпадают по фазе колебаний.

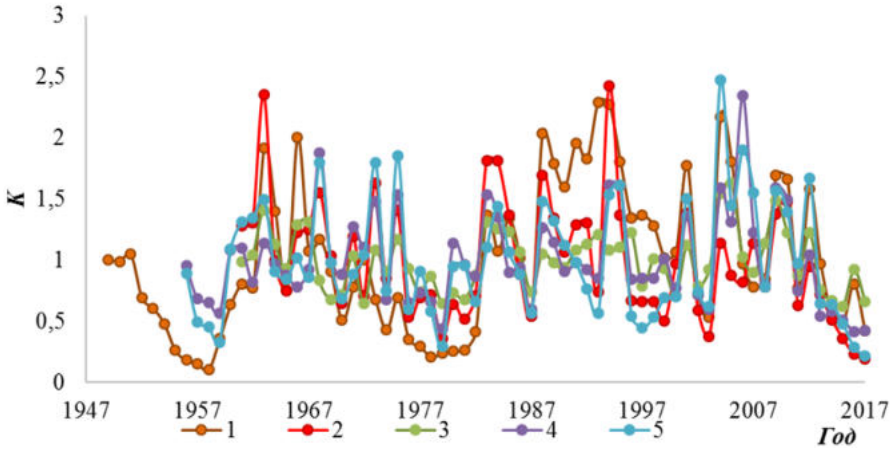


Рис. 1. Межгодовая изменчивость модульного коэффициента расходов воды на гидрологических постах: 1 – р. Мурин – с. Загатуй, 2 – р. Куда – с. Ахины, 3 – р. Харат – с. Харат, 4 – р. Оса – с. Оса, 5 – р. Ида – д. Морозова

Для более детального анализа далее были рассчитаны парные коэффициенты корреляции между среднегодовыми значениями расходов воды на различных постах на исследуемой территории отдельно за два различных периода:

1971–1993 гг. и 1994–2017 гг. (табл. 1). В ряде работ [2] показана связь циклов магнитного излучения солнца и циклов изменчивости стокоформирующих метеорологических факторов, поэтому анализируемые периоды, указанные выше, приближены по длительности к продолжительности циклов Хейла, чтобы в анализе минимизировать влияние данной цикличности на сток и сфокусироваться на воздействии других факторов.

Таблица 1

Парные коэффициенты корреляции между среднегодовыми значениями расходов

Пост	р. Мурин – с. Загатуй	р. Куда – с. Ахины	р. Харат – с. Харат	р. Оса – с. Оса	р. Ида – д. Морозова
р. Мурин – с. Загатуй	1,00	–	–	–	–
р. Куда – с. Ахины	0,55	1,00	–	–	–
р. Харат – с. Харат	0,61	**0,80**	1,00	–	–
р. Оса – с. Оса	0,29	**0,79**	0,55	1,00	–
р. Ида – д. Морозова	0,24	**0,76**	0,44	**0,85**	1,00
1994–2017 гг.					
р. Мурин – с. Загатуй	1,00	–	–	–	–
р. Куда – с. Ахины	**0,80**	1,00	–	–	–
р. Харат – с. Харат	**0,76**	0,48	1,00	–	–
р. Оса – с. Оса	0,67	0,69	0,61	1,00	–
р. Ида – д. Морозова	0,69	0,68	0,69	**0,86**	1,00

Наиболее тесная связь и в первый и во второй период наблюдается между стоком на постах р. Оса – с. Оса и р. Ида – д. Морозова, эта связь объясняется территориальной близостью водосборов, а также их площадей – 1870 и 2490 км² соответственно. Наиболее существенно изменилась связь на посту р. Мурин – с. Загатуй со стоком на других постах изучаемой территории: во второй период связь между стока на посту р. Мурин – с. Загатуй со стоком р. Куда – с. Ахины и р. Харат – с. Харат стала тесной вместо заметной в первом периоде, со стоком р. Оса – с. Оса стала заметной взамен слабой связи в первом периоде. Из табл. 1 видно, что в первый анализируемый период тесная связь наблюдалась между стоком на посту р. Куда – с. Ахины и стоком р. Харат – с. Харат, р. Ида – д. Морозова и р. Оса – с. Оса, во второй анализируемый период связь между стоком на указанных постах стала заметной или умеренной.

В работе также проанализировано изменение средних расходов за указанные выше многолетние периоды с 1971 по 1993 г. и с 1994 по 2017 г. Из табл. 2 видно, что средний многолетний расход наиболее существенно изменился (вырос на 22,9 %) на посту р. Мурин – с. Загатуй. На постах р. Харат – с. Харат, р. Оса – с. Оса и р. Ида – д. Морозова изменения расхода слабо выражено. В целом расходы увеличились почти на всех постах, за исключением расходов на посту р. Куда – с. Ахины, которые снизились на 16,5 %. Изменение расхода на указанных двух постах хорошо соотносится с изменением тесноты связи, показанной выше.

Таблица 2

Средние многолетние значения расходов воды в 1971–1993 и 1994–2017 гг. и их изменение

Пост	Средние многолетние значения расходов Q, м³/с		100 %·ΔQ/Q
	1971–1993 гг.	1994–2017 гг.	
р. Мурин – с. Загатуй	0,70	0,86	22,9
р. Куда – с. Ахины	0,85	0,71	–16,5
р. Харат – с. Харат	1,66	1,73	4,2
р. Оса – с. Оса	4,50	4,67	3,8
р. Ида – д. Морозова	3,30	3,50	6,1

Далее по данным NCEP/NCAR (National Centers for Environmental Prediction / National Center for Atmospheric Research) проанализированы многолетние изменения метеорологических факторов формирования стока: количества осадков и температуры воздуха, влияющей на испаряемость, на исследуемой территории.

Данные табл. 3 демонстрируют, что температура воздуха выросла на 1,2 °С за период с 1994 по 2017 г. по сравнению с температурой за 1971–1993 гг. Испаряемость также должна повыситься вместе с температурой воздуха. Осадки во второй период незначительно увеличились в целом по территории Усть-Ордынского Бурятского округа.

Таблица 3

Средние многолетние значения количества осадков и температуры воздуха в 1971–1993 и 1994–2017 гг. и их изменение

Период	Температура воздуха, °С	Количество осадков за год, мм
1971–1993 гг.	-1,4	410
1994–2017 гг.	-0,2	439
Приращение значений характеристик	1,2	29

Для более детального изучения изменений характеристик стока за многолетний период в работе рассчитано внутригодовое распределение стока. Наиболее простым, но в то же время информативным является анализ изменения внутригодового распределения среднемесячных значений стока, рассчитанный за два многолетних периода. В работе вычислено и представлено на рис. 2 внутригодовое распределение среднемесячных значений расходов, осредненных за периоды 1971–1993 гг. и 1994–2017 гг., на гидрологических постах Усть-Ордынского Бурятского округа.

По диаграммам (рис. 2) видно, что внутригодовое распределение на посту р. Мурин – с. Загатуй и р. Куда – с. Ахины наиболее отличается в периоды 1971–1993 и 1994–2017 гг. причем имеют разнонаправленные изменения. На других постах отличия менее выражены.

На посту р. Мурин – с. Загатуй наибольшее значение среднемесячных расходов за многолетний период с 1971 по 1993 г. наблюдалось в августе и составили 1,48 м^3/с, наибольшие значения среднемесячных расходов за период 1994–2017 гг. зафиксированы в июле и составили 1,69 м^3/с. Отчетливо виден рост расходов на данном посту с мая по октябрь, с наиболее заметными изменениями в мае и июле.

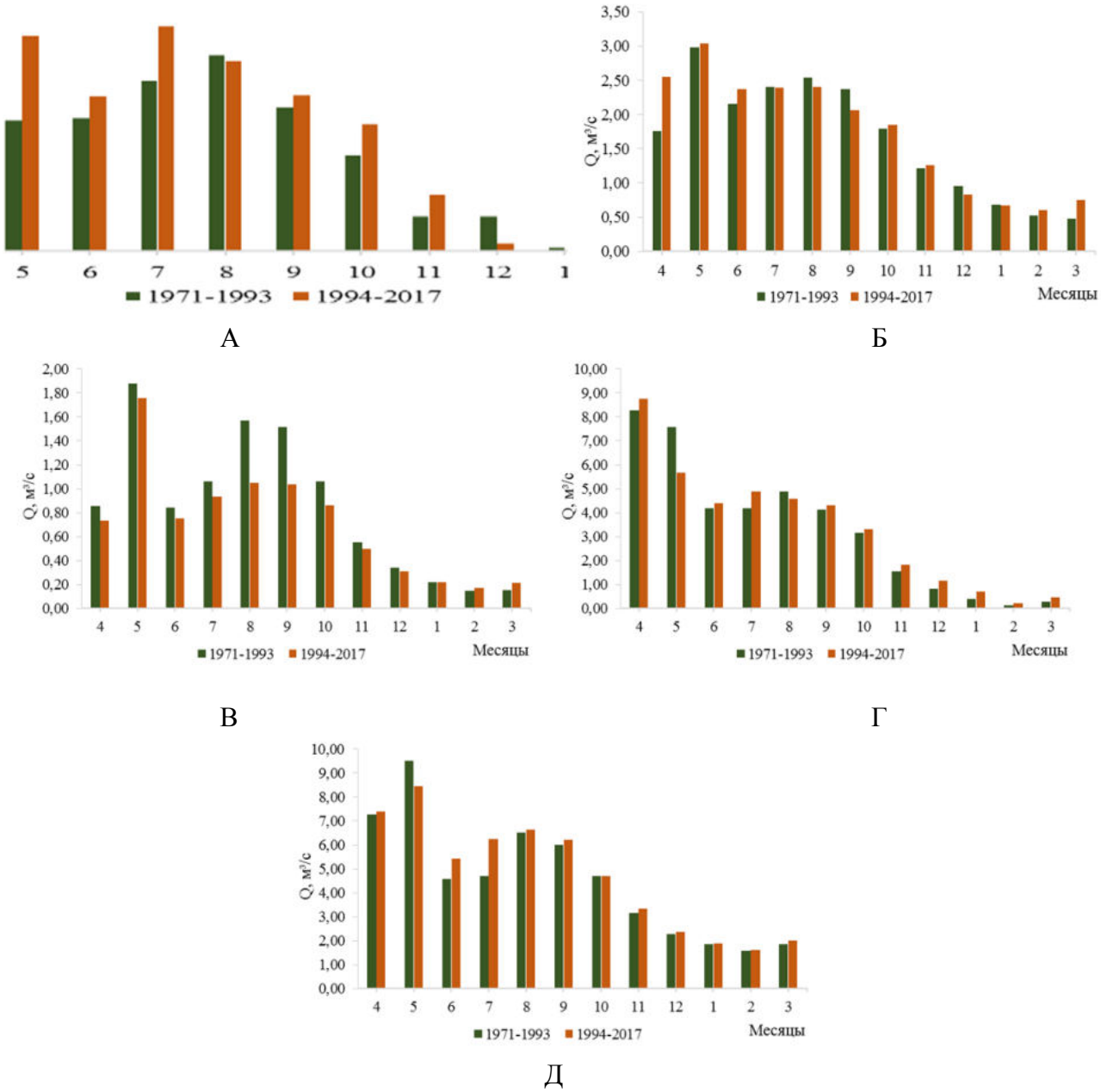


Рис. 2. Внутригодовое распределение среднемесячных значения расходов на поста хр. Мурин – с. Загатуй (А), р. Харат-с. Харат (Б), р. Куда-с. Ахины (В), р. Ида – д. Морозова (Г) и р. Оса – с. Оса (Д) за периоды 1971–1993 и 1994–2017 гг.

На посту р. Куда – с. Ахины видны существенные изменения во внутригодовом распределении в более позднем и более раннем периодах. Среднемесячные расходы уменьшились в более позднем периоде в 1994–2017 гг. во все месяцы с апреля по декабрь по сравнению с расходами в 1971–1993 гг., наибольшие изменения наблюдались в августе и сентябре, когда расходы снизились на треть.

Таким образом, в створах р. Мурин – с. Загатуй и р. Куда – с. Ахины, расположенных на незначительном удалении в схожих метеорологических условиях, произошли различные по знаку изменения стока.

На уменьшение расходов в створе р. Куда – с. Ахины, имеющего значительную заболоченность и относительно небольшую площадь водосбора в 278 км² – наименьшую из водосборов анализируемых створов, возможно влияние могли оказать бассейновые факторы, так как на водосборе ведутся рубки леса на значительных площадях, что в условиях незначительной площади водосбора может оказывать существенное влияние на сток. Изучение данного аспекта затрагивает обширный круг вопросов и может стать темой отдельного исследования.

К увеличению стока на посту р. Мурин – с. Загатуй вероятно могло, наоборот, привести снижение интенсивности хозяйственной деятельности на водотоке и в пределах бассейна, так как бассейн имеет существенную распаханность и долю земель сельскохозяйственного назначения, а в более поздний период значительно сократились посевная площадь, развиваются личные подсобные хозяйства, а роль сельхозпредприятий в производстве сельхозпродукции падает. В целом произошел спад объемов сельскохозяйственного производства по состоянию на 2007 и 2009 гг. соответственно [1; 3].

Полученные результаты содержат новые данные о состоянии водотоков и об изменении их стока в современный период и могут быть использованы для дальнейшей оценки влияния антропогенных факторов на сток, а также применяться для принятия управленческих решений в местных органах самоуправления.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ, грант № 17-29-05045.

Список литературы

1. *Иванова Л. А.* Социально-экономическое и геополитическое положение Усть-Ордынского Бурятского автономного округа и его влияние на преступность и организацию предупреждения преступности // Сибирский юридический вестник. 2009. № 2 С. 65–69.

2. *Мельник С. В.* Анализ временных рядов стока на постах верхнего и среднего Днестра // Ученые записки Таврического университета им. В. И. Вернадского. 2012. Т. 25 (64), № 2. С. 74–80.

3. *Хантакова Т. А.* Развитие сельского хозяйства в Усть-Ордынском Бурятском автономном Округе // Вестник Бурятского государственного университета. Биология. География. 2007. № 3. С. 43–46.

УДК 551.466.8

Внутригодовая изменчивость квазиинерционных внутренних волн в Черном море

Е. Е. Химченко (ekhym@ocean.ru), А. Г. Островский (osasha@ocean.ru), А. А. Клювиткин

Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, г. Москва

Аннотация. Приводятся примеры долговременных наблюдений за квазиинерционными внутренними волнами в Черном море. Проведено сравнение внутренних волн в различные сезоны. Выявлено почти постоянное присутствие инерционных движений в течениях. Установлено, что максимальная интенсификация инерционных движений характерна для осенне-зимнего периода.

Ключевые слова: внутренние волны, течения, Черное море, континентальный склон.

Введение

Внутренние волны распространены повсеместно на шельфах океанов и морей. Они в существенной мере определяют изменчивость толщи водной среды в широких диапазонах пространственных и временных масштабов [1]. Внутренние волны играют важную роль в переносе энергии от крупномасштабных процессов к мелкомасштабным. Обрушение внутренних волн является основным источником энергии для океанской турбулентности, которая приводит к диапикническому переносу тепла, соли, растворенных газов и веществ [2]. Внутренние волны оказывают значительное влияние на формирование и существование вертикальной стратификации водной толщи, влияя, как на физические, так и биологические процессы. В первую очередь, обеспечивая вертикальное перемешивание между слоями и, тем самым, способствуя обогащению их кислородом и питательными веществами. Хотя Черное море является замкнутым и практически бесприливным, здесь также существует развитое поле внутренних волн.

Исследованию внутренних волн в Черном море посвящено множество работ (см. например, [3–6]), а наблюдения за инерционными внутренними волнами велись здесь еще в 1960–80-х гг. [6; 7]. Однако большей частью все работы были основаны на непродолжительных наблюдениях в прибрежной зоне. В настоящей работе анализируются длительные (до 1 года каждый)–временные ряды данных гидрофизических измерений в глубоководной центральной части Черного моря, полученные в 2016–2017 и 2017–2018 гг.

Материалы и методы

В работе представлен анализ данных двух автономных притопленных заякоренных станций в северо-западной и северо-восточной частях центральной котловины Черного моря. Северо-западная станция была установлена 01.12.2016 на глубине примерно 1800 м в точке с координатами 43°47,359' с. ш. 32°04,487' в. д. Она функционировала по 05.10.2017. В составе станции на горизонте 100 м имелся акустический доплеровский измеритель течений ADCM

Sontek, дискретность измерений которого составляла 15 мин. Северо-восточная станция работала с 01.12.2017 по 04.12.2018 в точке с координатами 43°26,094' с. ш. 36°22,317' в. д., глубина места 2160 м. Она была оснащена измерителем температуры и давления RBR duet на горизонте 260 м, с дискретностью измерений 30 с. Точки наблюдений представлены на рис. 1.

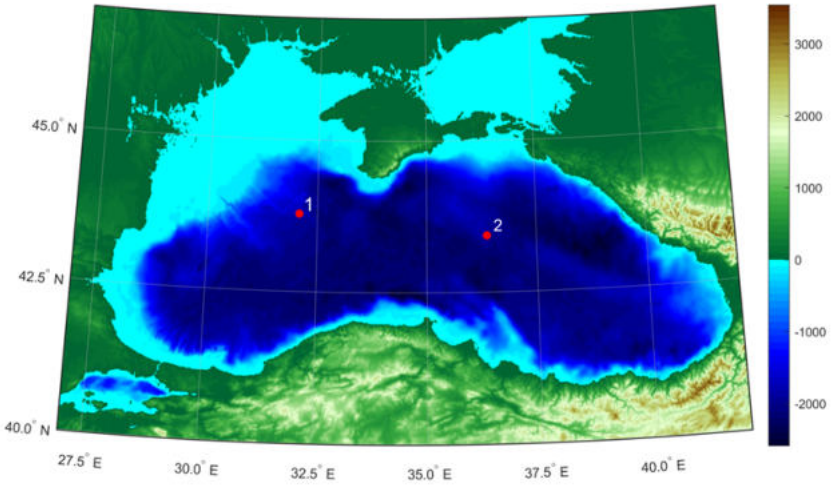


Рис. 1. Точки наблюдений на карте батиметрии Черного моря (по данным etopo1 doi:10.7289/V5C8276M). 1 – положение ADCM Sontek, 2 – положение измерителя RBR duet

По данным температуры и скорости течений был проведен частотный спектральный анализ, предварительно были удалены линейные тренды. Дополнительно к анализу были привлечены метеорологические данные реанализа ERA-5 (European Centre for Medium-Range Weather Forecast (ECMWF) пятого поколения). Реанализ объединяет данные модели с наблюдениями со всего мира, шаг сетки по широте и долготе составляет 0,25°. Для наших задач использовались массивы ежечасных наблюдений приводного ветра и давления (на высоте 10 м от поверхности моря).

Результаты

В качестве примера на рис. 2 приведены данные направления и скорости течений, а также ветра для января и июня 2017 г. Как видно, для января скорость ветра и течений выше по сравнению с июнем. Скорость ветра зимой достигает 20–25 м/с, а летом редко более 10–15 м/с. Скорость течений зимой составляет порядка 20 см/с, а летом – 10–15 см/с. В среднем зимнее время года характеризуется наличием более продолжительных (больше суток) устойчивых ветров, в то время как в летнее время направление и скорость ветра могут изменяться в течение одних суток. Такая особенность изменчивости ветра в разные сезоны приводит к наблюдаемым изменениям в инерционных движениях, обусловленных внутренними волнами.

На рис. 2 в январе хорошо прослеживается характерное движение инерционных течений по часовой стрелке, в то время как в июне инерционные движения, не так хорошо выражены, годографы течений не совершают полный оборот, как во время осенне-зимней интенсификации. При этом развитие инер-

ционных волн и их интенсификация обусловливаются продолжительностью воздействия ветров, причем определенной направленности. Так для наблюдаемого района воздействие устойчивого сильного ветра С и СВ направления часто приводит к интенсификации инерционных движений, а вот Ю направления – не всегда.

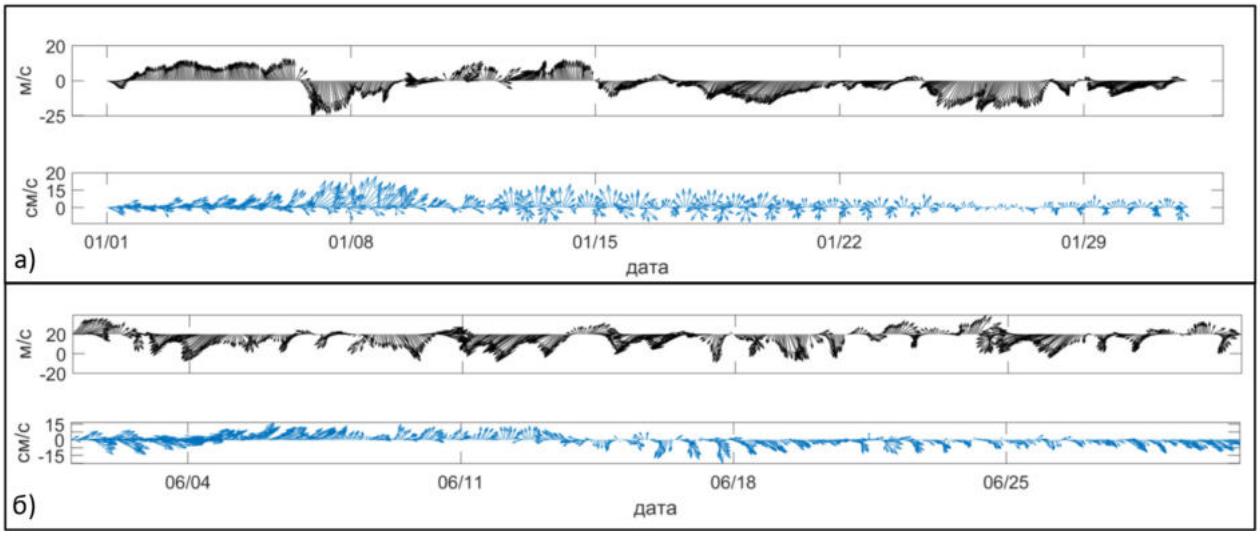


Рис. 2. Скорость и направление ветра, а также скорость и направление течений в точке №1 для января (а) и июня 2017 г (б)

На рис. 3 представлен частотный спектр колебаний *u*-компоненты скорости течений на глубине 100 м для различных сезонов. Для каждого сезона выделяется достоверный пик на частоте 0,058–0,06 ц/ч (17,24–16,67 ч), близкий к локальной инерционной частоте f_{in} = 0,0577 ц/ч (17,34 ч). Максимумы спектров смещены от локального инерционного в сторону высоких частот, что характерно для инерционных движений [8]. При более детальном рассмотрении пиков инерционного диапазона заметно, что уровень энергии наблюдаемых внутренних волн в осенне-зимний сезон выше по сравнению с летне-осенним (см. врезку на рис. 3). Вероятно, интенсификация инерционных движений в зимний сезон обусловливается усилением ветровой активности над акваторией Черного моря зимой.

Для района глубоководной впадины в точке № 2 был проведен частотный спектральный анализ данных годовой записи температуры на горизонте 260 м (рис. 4). В целом спектр также имеет выраженный пик на околоинерционной частоте 0,05859–0,06 ц/ч (17,07–16,66 ч). Для точки на СВ части бассейна локальная инерционная частота составляет f_{in} =0,0573 ц/ч (17,45 ч). Аналогично СЗ району, здесь анализ сезонной изменчивости также показал, что наиболее интенсивные инерционные движения наблюдаются в зимний период. Заметно ослабевают проявления квазиинерционных движений в летнее время и вновь усиливаются осенью. Как видно из анализа данных на горизонте 260 м инерционные движения также хорошо удается регистрировать.

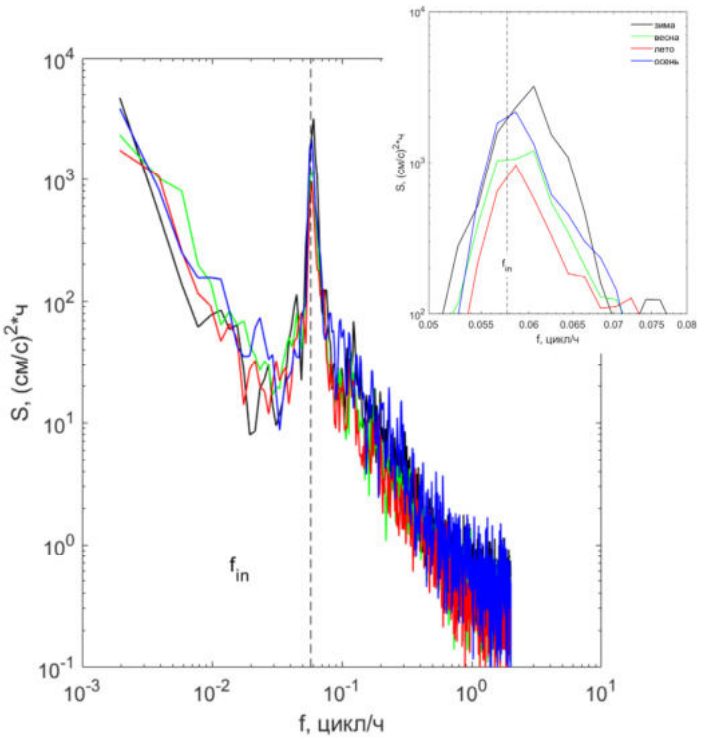


Рис. 3. Частотный спектр колебаний u-компоненты скорости течений на глубине 100 м для различных сезонов, штрих-пунктиром отмечена локальная инерционная частота в районе наблюдений

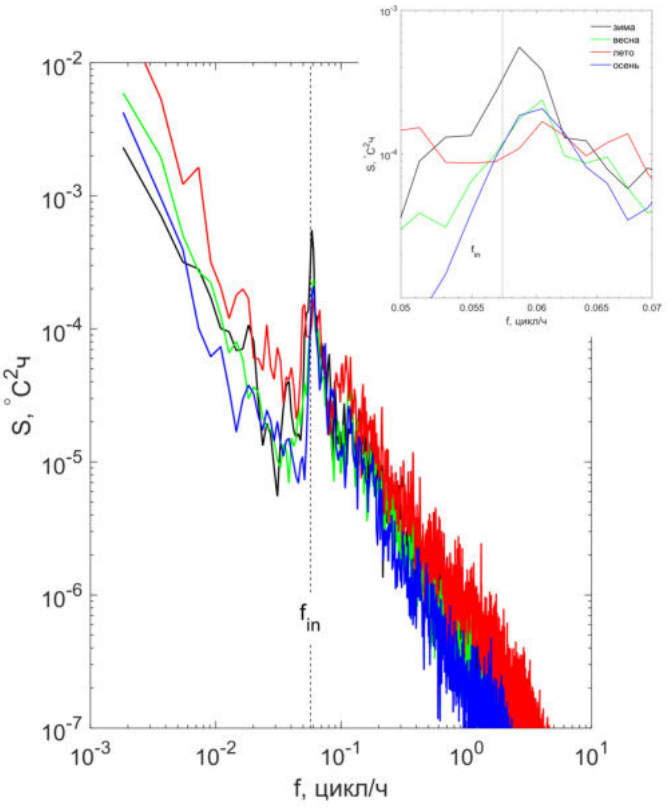


Рис. 4. Частотный спектр колебаний температуры на глубине 260 м для различных сезонов, штрих-пунктиром отмечена локальная инерционная частота в районе наблюдений

Заключение

В работе проведен анализ сезонной изменчивости квазиинерционных внутренних волн на северо-западной и северо-восточной частях центральной котловины Черного моря. Для каждого района характерно почти постоянное присутствие квазиинерционных движений с частотой близкой к локальной инерционной, в течение года. Однако их интенсификация отмечается в осенне-зимний период (с сентября по февраль), когда ветровая активность над акваторией Черного моря максимальна. Начиная с весеннего периода инерционные движения, не так хорошо выражены, годографы течений не совершают полный оборот, как во время осенне-зимней интенсификации.

Работа выполнена в рамках государственного задания тема № 0149-2019-0011, обработка данных осуществлялась при поддержке проектов РФФИ № 19-05-00459 и № 19-05-00787.

Список литературы

1. *Gerkema T., Zimmerman J. T. F.* An Introduction to Internal Waves: Lecture Notes, R. Neth. Inst. for Sea Res., Den Burg., 2008.

2. *MacKinnon J. A. et al.* Climate process team on internal wave–driven ocean mixing // Bulletin of the American Meteorological Society. 2017. Vol. 98, N. 11. P. 2429–2454.

3. *Филонов А. Е.* Внутренние волны // Исследование и моделирование гидрологических процессов в Черном море. М. : Гидрометеоиздат, 1989. С. 83–98.

4. *Серебряный А. Н., Иванов В. А.* Исследования внутренних волн в Черном море с океанографической платформы МГИ // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2013. Т. 6, № 3. С. 34–45.

5. *Химченко Е. Е., Серебряный А. Н.* Внутренние волны на кавказском и крымском шельфах Черного моря (по летне-осенним наблюдениям 2011–2016 гг.) // Океанологические исследования. 2018. Т. 46, № 2. С. 69–87.

6. *Ямпольский А. Д.* О внутренних волнах в Черном море по наблюдениям на многосуточной якорной станции // Труды ИОАН СССР. 1960. Т. 39. С. 111–126.

7. Изменчивость гидрофизических полей Черного моря / А. С. Блатов, Н. П. Булгаков, В. А. Иванов, А. Н. Косарев, В. С. Тужилкин. Л. : Гидрометеоиздат, 1984. 240 с

8. *Garrett C.* What is the “near-inertial” band and why is it different from the rest of the internal wave spectrum? // Journal of Physical Oceanography. 2001. Vol. 31, N 4. C. 962–971.

УДК 556.047+556.522

О возможности учета азональных факторов при определении нормы стока неизученных рек в зависимости от их порядка

Д. А. Шаликовский (shalikovsky@gmail.ru)[1,2]

[1]Забайкальское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, г. Чита
[2]Забайкальский государственный университет, г. Чита

Аннотация. В статье произведен учет азональных факторов стока неизученных рек, необходимых при определении нормы стока в зависимости от их порядка. Представлена схема районирования, учитывающая влияние азональных факторов.

Ключевые слова: водные ресурсы, водосбор, норма стока, порядок реки, гидрологические расчеты, районирование.

Введение

Из-за сокращающейся из года в год сети гидрологических наблюдений, а также труднодоступности данных наблюдений для конечного пользователя, расчет параметров стока с использованием текущих методов становится все более трудоемкой задачей. Для разработки новых методов определения гидрологических характеристик неизученных рек неизбежно приходится прибегать к различного рода упрощениям и обобщениям. Использования таких подходов позволяет выделить факторы, которые влияет на формирование стока. Одним из таких обобщений морфологических параметров рек является порядок реки.

Расчет стоковых характеристик с использованием порядка реки и другие подобные косвенные методы является перспективными для значительной части территории Забайкальского края, в пределах которого имеется значительное количество азональных факторов. Например, территория Забайкалья охватывает большое количество климатических зон и их поясов от сухостепных до гольцово-тундровых, а модули стока колеблются в широких пределах (от 0,1 до 15 л/с·км^2) [3].

Объект и методы исследования

Объектом исследования, как уже было указано, является Забайкальский край. Реки Забайкальского края принадлежат к трем крупным бассейнам – бассейну р. Амур (55 % территории края), бассейну р. Лены (30,4 %) и бассейну оз. Байкал, который является подбассейном р. Енисей (13,3 %) [2]. Исследуемая территория занимает 243,5 тыс. км^2 и охватывает водосборы рек Шилка и Аргунь, образующих Амур, а также область стока верхнего 46-километрового участка р. Амур. В соответствии с водохозяйственным районированием к Амурскому бассейну относится и бессточная область в южной части Забайкальского края (около 1,3 % территории).

Действующая сеть мониторинга распределена очень неравномерно: в трех из 21 гидрологических подрайонов гидрологические посты отсутствуют, а в одном насчитывается 14 стоковых и 2 уровневых пунктов наблюдений (рис. 1, табл. 1).

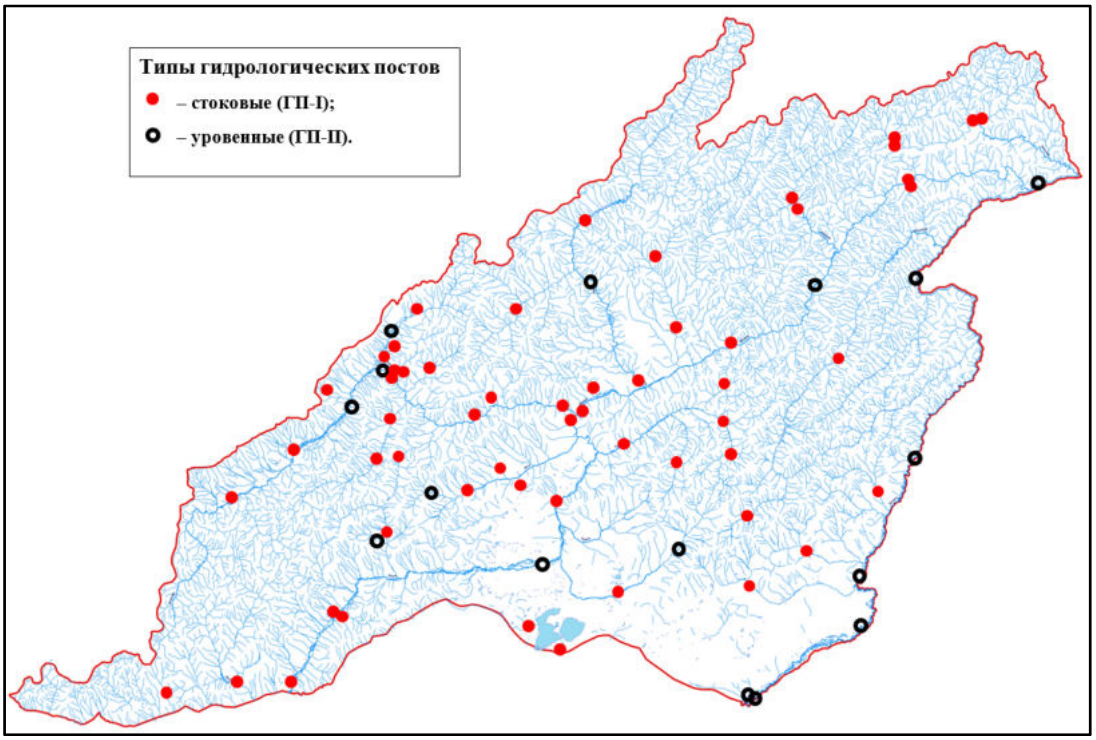


Рис. 1. Схема действующей наблюдательной сети ЗабУГМС на территории Амурского бассейна

Таблица 1

Распределение гидрологических постов по основным географическим признакам

Показатель	Диапазон	Число постов		
		действующих	закрытых	всего
Площадь водосбора, км2	< 200	3	11	14
	200 – 2000	26	28	54
	>2000	46	30	76
Высота над уровнем моря, м	< 600	33	44	77
	600 – 900	41	22	63
	> 900	1	3	4

Изначально, для каждого из 102 исследуемых постов рассчитывались норма стока [4] и порядок реки в створе поста. Порядок каждой реки определялся в створах наблюдений по формуле А. Шайдеггера [7]:

$$N_{ш} = 1 + \log_2 P, \quad (1)$$

где P – число притоков длиной до 10 км выше рассматриваемого створа.

Преимущество подхода А. Шайдеггера заключается в постепенном возрастании порядка реки по мере впадения в нее других водотоков, а не сохранение постоянного значения порядка или его дискретное изменение [4].

Результаты и обсуждение

Раннее рядом авторов [1] была установлена зависимость (2) для всего Амурского бассейна.

$$Q_0 = 0{,}024 \cdot e^{0{,}69 \cdot N_{\text{ш}}} \ (R = 0{,}97). \quad (2)$$

В работе учитывались посты Забайкальского края со средним значением расхода воды в 20 м^3/с, а для Амурского бассейна в целом – 240 м^3/с. В связи с тем, что регрессионный анализ основан на минимизации суммы квадратов отклонений аппроксимирующей функции от анализируемых данных, то материалы по Забайкалью практически не влияют на результаты установления единой бассейновой зависимости [5]

Поэтому было принято решение рассматривать только бассейны рек с площадью водосборов до 2000 км^2. Получена зависимость (3):

$$Q_0 = 0{,}039 \cdot e^{0{,}582 \cdot N_{\text{ш}}} (R = 0{,}85). \quad (3)$$

Более низкое значение коэффициента корреляции по сравнению с (2) свидетельствует о влиянии азональных факторов на сток малых и средних рек. То есть целесообразно отдельно рассматривать крупные реки для получения единой региональной зависимости, а для небольших водотоков производить районирование. Для анализируемой территории выделено пять таких районов (рис. 2, табл. 2) с различными значениями коэффициентов в экспоненциальной зависимости вида:

$$Q_0 = a \cdot e^{b \cdot N_{\text{ш}}}. \quad (4)$$



Рис. 2. Схема районирования по виду зависимости $Q_0 = f(N_ш)$

Таблица 2

Гидрологические районы в зависимости от нормы стока малых и средних рек

№ на рис. 1	Наименование	Уравнение зависимости	Коэффициент корреляции
А	Даурский горно-таежный район	$Q_0 = 0{,}132e^{0{,}5009N_ш}$	0,97
Б	Среднеингодинский лесостепной район	$Q_0 = 0{,}0088e^{0{,}7676N_ш}$	0,97
В	Нижнеингодино-Ундинский горно-таежный и лесостепной район	$Q_0 = 0{,}0256e^{0{,}6295N_ш}$	0,97
Г	Шилкинско-Нижнеагунско-Амазарский горно-таежный район	$Q_0 = 0{,}0485e^{0{,}592N_ш}$	0,95
Д	Онон-Аргунский степной и лесо-степной район	$Q_0 = 0{,}023e^{0{,}7676N_ш}$	0,95

Заключение

Использование закона Хортона о порядке реки и метод расчета порядка реки Шейдеггера позволяет рассчитывать гидрологические характеристики неизученных и малоизученных рек с достаточно большой достоверностью. Однако, для получения более качественных результатов, необходимо учитывать влияние азональных факторов. Для этого в свою очередь возможно применение метода группировки исследуемой территории. В результате такой группировки явно видно географическое распределение значений, что свидетельствует о высоком влиянии азональных факторов.

Список литературы

1. Подобие рек и их систем / Н. И. Алексеевский [и др.] // Водные ресурсы. 2013. № 6 (40). С. 531–543.

2. Водные ресурсы Читинской области: состояние, проблемы, пути решения / В. Н. Заслоновский [и др.]. Чита : ЧитГУ, 1998. 111 с.

3. *Копылов А. П.* Атлас расчетных гидрологических карт и номограмм. Л. : Гидрометеоиздат, 1986.

4. *Шаликовский Д. А*. Подготовка гидрологической информации для корректного определения нормы речного стока / под ред. А. В. Шапиева, И. Ю. Мальчикова. Чита : Забайк. гос. ун-т, 2017. С. 27–30.

5. *Шаликовский Д. А.* О проблемах в установлении закономерностей между стоковыми характеристиками и порядком реки на примере Забайкальского края // Кулагинские чтения: техника и технологии производственных процессов : сб. ст. XIX Междунар. науч.-практ. конф. : в 3 ч. Чита : Забайк. гос. ун-т, 2019. Ч 2. С. 39–42.

6. *Horton R. E.* Erosional development of streams and their drainage basin; hydrophisical approach to quatitaive morphology // Bulletin of the geological society of America. 1945. Vol. 56. P. 275–370.

7. *Scheidegger A. E.* Horton’s Law of Stream Numbers // Water Resources Research.1968. N 3 (4). P. 655–658.

УДК 504.453+504.4.054

Закономерности загрязнения Москвы-реки биогенными и потенциально токсичными веществами от истока до устья (по данным 2019 г.)

Г. Л. Шинкарева (galina.shinkareva@gmail.com), О. Н. Ерина (oxana.erina@geogr.msu.ru), М. А. Терешина (martereshina@yandex.ru), Д. И. Соколов (Dmitriy.Sokolov@yandex.ru), А. Ю. Руденко (annaru13@bk.ru), М. Ю. Лычагин (lychagin2008@gmail.com)

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, г. Москва

Аннотация. Представлен анализ данных по содержанию органического вещества, биогенных элементов, макрокомпонентов и потенциально токсичных элементов в водах р. Москвы и ее основных притоков по результатам полевых исследований, проведенных в апреле и августе 2019 г.

Ключевые слова: органическое вещество, потенциально токсичные элементы, биогенные элементы, река Москва.

Введение

Московский мегаполис с численностью населения более 12,5 млн человек является одним из самых крупных населенных центров Европы, около 30 % территории которого занимает долина р. Москвы [6]. Антропогенная нагрузка на гидрографическую сеть г. Москвы и прилегающих территорий в последние годы неизбежно растет с ростом численности населения. Несмотря на устойчивое снижение водопотребления в регионе, Московская агломерация продолжает оставаться одним из крупнейших водопользователей в стране, а также лидером по объемам водоотведения в водные объекты.

Целью данной работы являлось выявление пространственных изменений в содержании потенциально токсичных элементов (ПТЭ) и биогенных веществ. В качестве модельных были выбраны периоды весеннего половодья (апрель) и летней межени (август) 2019 г.

Объект и методы исследования

Весенние полевые работы на р. Москве и ее притоках выполнены 4–5 апреля на участке выше г. Москвы, летние – 6–8 августа по всей длине р. Москвы от истока до устья (рис. 1). Исследования включали отбор проб в 29 пунктах весной (19 на р. Москве и 10 на ключевых притоках) и 56 летом (38 и 18 соответственно).

Физико-химические свойства речных вод измерялись на каждой станции опробования с помощью зонда YSI ProSolo (Yellow Springs, Ohio, USA). Пробы речных вод отбирались в пластиковые бутылки объемом 5 л, после чего фильтровались с помощью вакуумного насоса Millipore через предварительно взвешенные мембранные фильтры с диаметром пор 0,45 мкм для отделения растворенной фракции химических элементов. Далее в гидрохимической лаборатории Красновидовской УНБ МГУ им. М. В. Ломоносова проводились аналитические

работы. В не фильтрованных пробах титриметрическим методом оценивалась перманганатная окисляемость (ПО) и скляночным методом – биохимическое потребление кислорода ($БПК_5$). В фильтрованных (буква «р» в нижнем индексе) и не фильтрованных (общее или валовое содержание) пробах с использованием фотометрии определялось содержание азота ($N_{общ}$ и $N_р$), минерального ($Р_м$ и $Р_{мр}$) и валового фосфора ($Р_в$ и $Р_{вр}$), а также титриметрически оценивалось химическое потребление кислорода (ХПК и $ХПК_р$). После фильтрования фильтр с взвесью повторно взвешивался для расчета содержания взвешенного вещества в речных водах (мг/л). Макрокомпонентный состав речных вод определялся с помощью ионной хроматографии. Содержание B, Al, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Rb, Sr, Y, Zr, Mo, Sb, Cs, Ba, W, Pb, Bi, U анализировалось масс-спектральным и атомно-эмиссионным методами с индуктивно связанной плазмой на приборах Elan-6100 и Optima-4300 (Perkin Elmer, США) во ВНИИ минерального сырья имени Н. М. Федоровского.

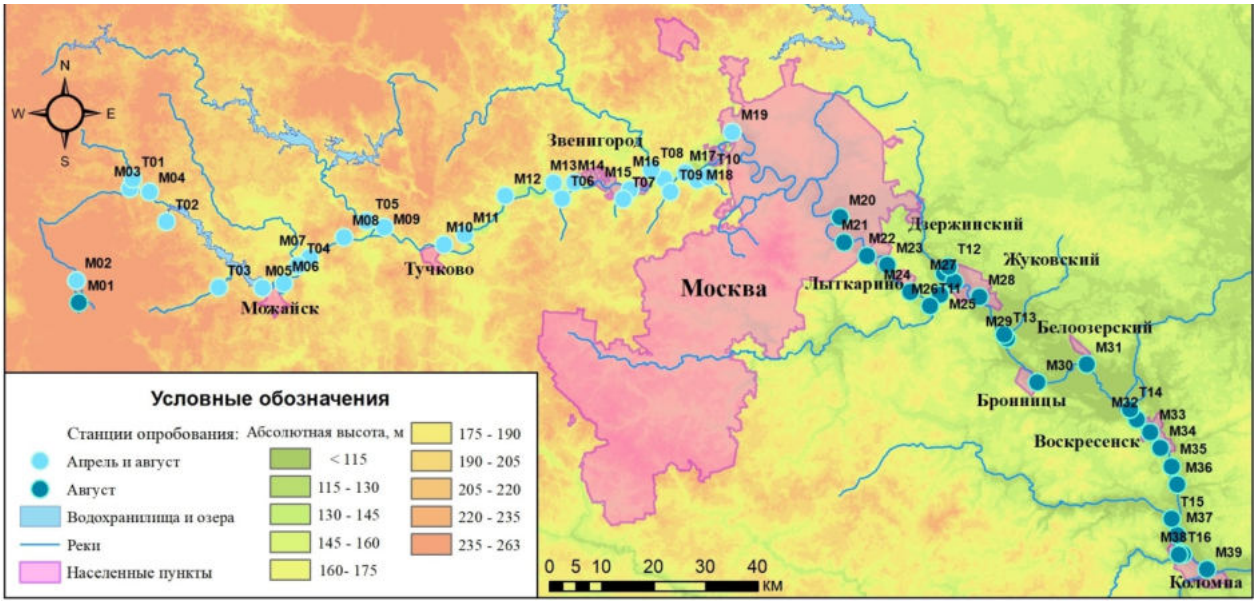


Рис. 1. Станции гидрохимического мониторинга во время весеннего половодья (апрель) и летней межени (август)

Для оценки уровней содержания ПТЭ рассчитывались соотношения концентраций элементов в речных водах Москвы и ее притоков со среднемировыми данными (K_c) [13] и с предельно допустимыми концентрациями химических веществ ($ПДК_{к-б}$) в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования (K_o) [5].

Результаты и обсуждение

Полученные данные позволяют оценить пространственную динамику основных физико-химических свойств вод и содержания поллютантов в бассейне р. Москвы. Так, величины pH, удельной электропроводности и мутности изменяются незначительно: средние значения во время весеннего половодья (апрель) и летней межени (август) составили 8,0–8,1; 453–580 мкСм/см и 11,7–

18,9 мг/л соответственно, что совпадает с данными других авторов [12]. При этом значения pH отличаются достаточной стабильностью и слабо изменяются от истока р. Москвы к ее устью. Удельная электропроводность имеет тенденцию к увеличению вниз по течению: от 151 до 710 мкСм/см. Это связано со слиянием достаточно чистых речных вод в верховьях Москвы с более минерализованными водами притоков (реки Вяземка, Медвенка, Чаченка, Пахра, Пехорка, Гжелка), а также влиянием сточных вод городов Можайск, Звенигород, Москва, Дзержинский, Жуковский, Воскресенск, Коломна, и др.

Содержание взвешенного вещества (ВВ) существенно увеличивается вниз по течению, изменяясь от 2,7 до 33,3 мг/л, особенно в период летней межени (рис. 2). Максимальная концентрация ВВ (92 мг/л) была установлена в самой верхней точке у истока р. Москвы, располагающегося в заболоченной местности, которая характеризуется большим количеством органической взвеси и коллоидов, что подтверждается также максимальными значениями ХПК и $ХПК_р$ в этой точке. В условиях весеннего половодья (апрель) содержание ВВ в среднем в 4 раза превышало таковое для летней межени (август), максимальные превышения были установлены для верхнего течения реки и составили 16–18 раз, что объясняется более интенсивными эрозионными процессами на этом участке в период половодья, вызывающими поступление значительного количества органического вещества и коллоидов из заболоченной местности у истока реки. Воды притоков р. Москвы в весенний период отличаются более высоким содержанием ВВ. Набольшие значения выявлены для р. Нахавня (57 мг/л). Во время летней межени максимальные концентрации ВВ, не считая истока р. Москвы, были установлены в р. Москве в черте г. Воскресенска (35 мг/л).

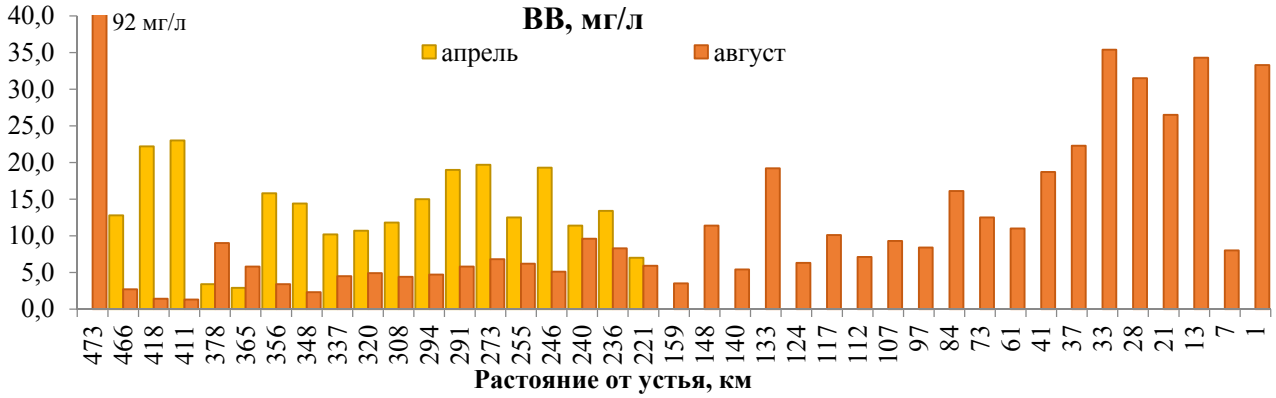


Рис. 2. Изменение содержания взвешенного вещества по течению р. Москвы

Содержание органического вещества и биогенных элементов. Разброс величин $БПК_5$, ХПК и $ХПК_р$ за исследуемый период составил 0,5–11,5; 12,4–145,8 и 11,5–124,4 мгО/л соответственно. Для $БПК_5$ характерен постепенный рост от верхнего течения к нижнему. Максимальные величины ХПК и $ХПК_р$ зафиксированы в истоке р. Москвы и имели природное происхождение; на участке от истока до г. Москвы они были невелики, повышаясь в 1,5 раза в черте города и еще в 1,5 раза (до 46 и 34 мгО/л соответственно) на участке от г. Москвы до устья. Важно отметить, что источником повышения ХПК в черте

г. Москвы были не выпуски Курьяновских очистных сооружений (КОС), а волжские воды, поступающие по каналу Москва-Волга.

Содержание нитритного, нитратного, аммонийного и общего азота, а также общего и минерального фосфора резко увеличивается в 3–7 раз ниже выпусков Курьяновских и Люберецких (ЛОС) очистных сооружений и продолжает сохраняться на повышенном уровне до самого впадения в Оку, что согласуется с данными других авторов [2; 8]. Курьяновские очистные сооружения – самые старые в системе канализации г. Москвы, а также одни из самых мощных [8]. По данным доклада «О состоянии окружающей среды в г. Москве в 2019 году» [6] ниже КОС и до Бесединского моста выявлена устойчивая загрязненность речных вод ионом аммония. По нашим данным, ниже КОС концентрации аммонийного азота возрастают в 5 раз (рис. 3). Таким образом, несмотря на масштабную реконструкцию КОС, проведенную в 2011–2019 гг., очистные сооружения г. Москвы продолжают оставаться одним из ключевых загрязнителей реки.

Второй пик концентраций аммонийного азота в период летней межени 2019 г. был установлен в р. Москве ниже впадения р. Пехорки (рис. 3), для которой характерна очень большая нагрузка сточными водами [1]. Доля биологически очищенных сточных вод в общем стоке реки составляет около 90 % [10].

В целом ниже г. Москвы в речных водах в 2–18 раз возрастают концентрации минерального и валового фосфора, общего, нитритного, нитратного и аммонийного азота.

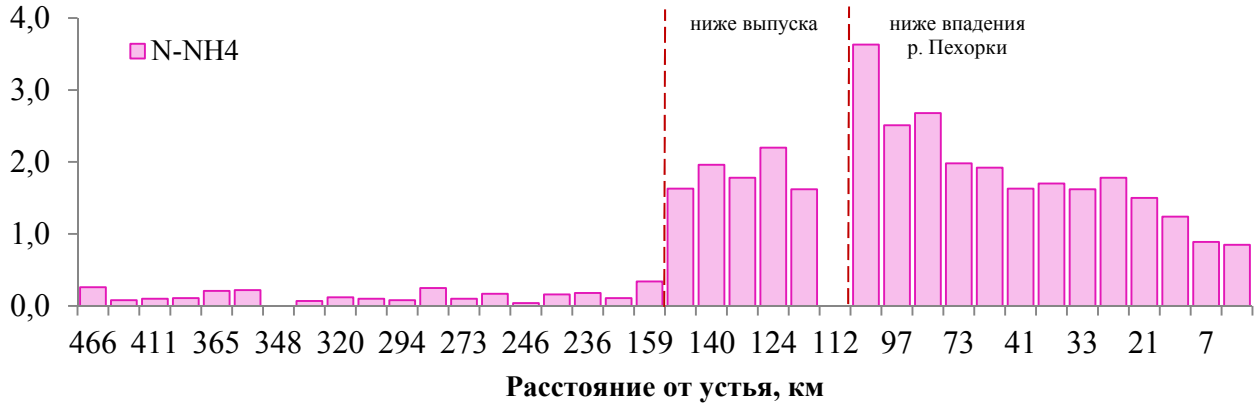


Рис. 3. Изменение содержания аммонийного азота по течению р. Москвы

Содержание потенциально токсичных элементов. По сравнению с среднемировыми данными [13], в речных водах Москвы и притоков в среднем повышены концентрации только Cr, As, Sb, Zr, Pb, B, Zn, Sr (рис. 4). По отношению к предельно допустимым концентрациям ($ПДК_{к-б}$) в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования [5] в реке Москве и ее притоках в среднем превышений не выявлено. Только отношение максимальных концентраций Fe и Al, характерных для истока Москвы, к ПДК составило 4,3 и 2,6 соответственно (рис. 4). Превышение $ПДК_{к-б}$ по содержанию Fe в верхнем течении р. Москвы согласуется с ранее полученными данными других авторов [6; 9].

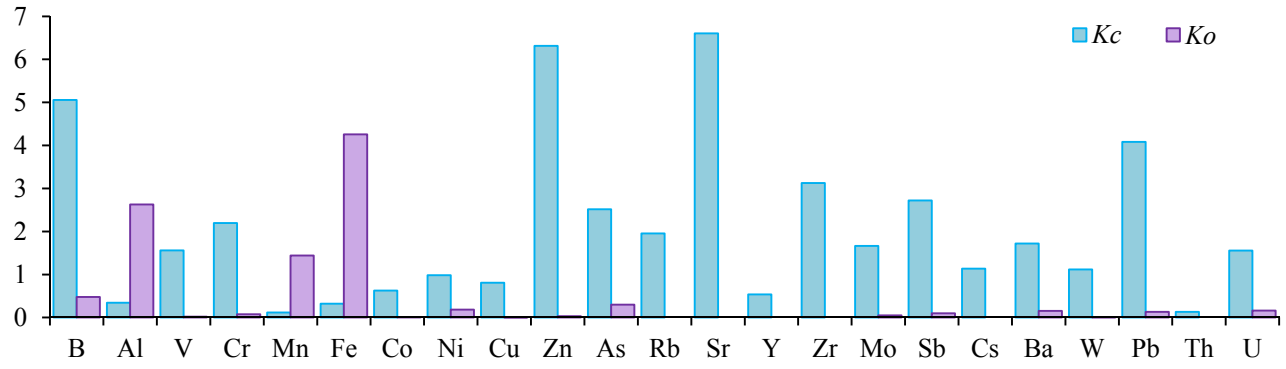


Рис. 4. Превышение концентраций ПТЭ в водах р. Москвы и ее притоков по сравнению со средними содержаниями элементов в реках мира (K_c) и предельно допустимыми концентрациями элементов (K_o)

Существенный вклад в содержание растворенных ПТЭ вносят КОС и ЛОС, ниже которых в 2–9 раз возрастают концентрации Zr, Bi, Cs, B, Zn, Ni, Rb, K. В целом ниже г. Москвы в речных водах выявлено повышение концентраций растворенных Cu, Sr, Pb, Rb, Zn, Sb, Cs, W, Ni в 2 – 13 раз (рис. 5), что согласуется с данными других авторов [9]. Эти элементы могут поступать как из природных, так и из техногенных источников.

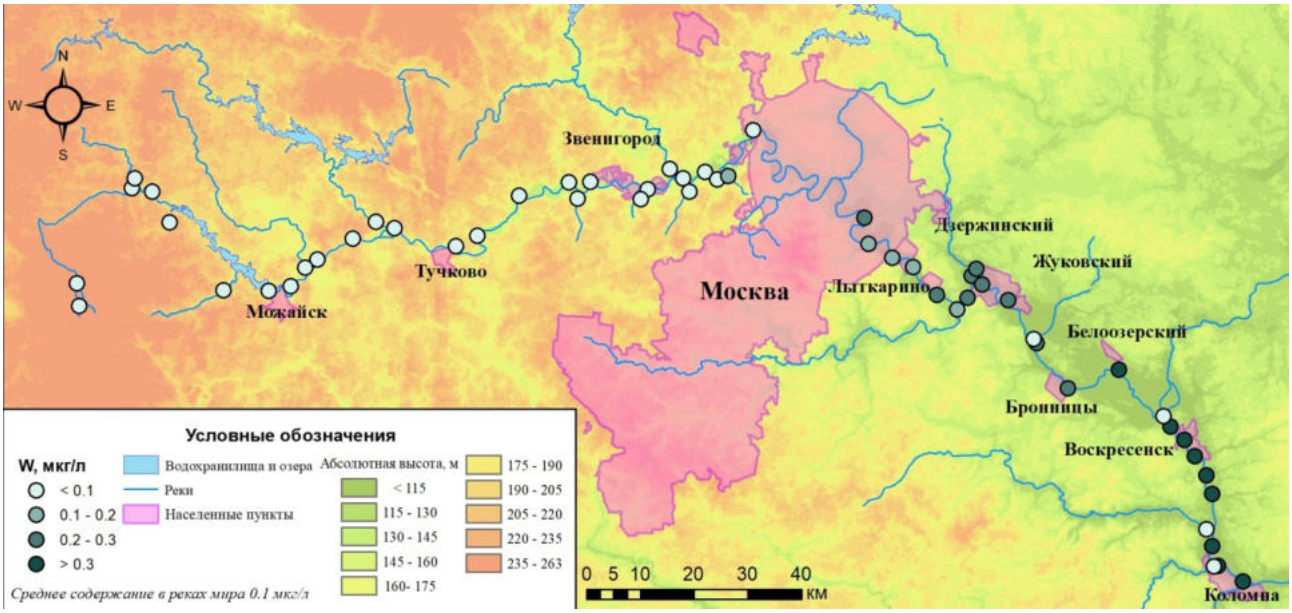


Рис. 5. Содержание W в речных водах Москвы и ее притоков

Кластерный анализ, проведенный совместно с корреляционным, позволил выявить 8 ассоциаций элементов (рис. 6) с физико-химическими показателями речных вод и макрокомпонентами с достаточной теснотой связей (< 0,5):

1) удельная электропроводность (k)–Cl–Na–Mo–B–Sr (r = 0. 7–0. 9);
2) $ХПК_р$–W–Cu–Ni (r = 0. 7–0. 8);
3) $N_{общ\ р}$–$P_{в\ р}$–SO_4–K–Cs–Rb–Sb (r = 0. 8–0. 9, и для $P_{в\ р}$ r = 0. 3);
4) Mn–Bi (r = 0. 5);
5) Fe–Y (r = 0. 9);
6) HCO_3–Ca–Mg (r = 0. 7);

7) Al–Zr (r = 0. 6);

8) As–Cr–V–Pb–U (r = 0. 5–0. 8).

Таким образом, удельная электропроводность речных вод в наибольшей степени влияет на миграцию растворенных Cl–Na–Mo–B–Sr. Установлено, что основным источником Sr и Mo в городской среде являются выбросы автотранспорта [3], а Cl и Na могут поступать с антигололедными реагентами – хлоридами и карбонатами Na, Ca, Mg, Sr [15]. В речных водах дополнительным источником хлоридов и Na являются сбросы городских сточных вод.

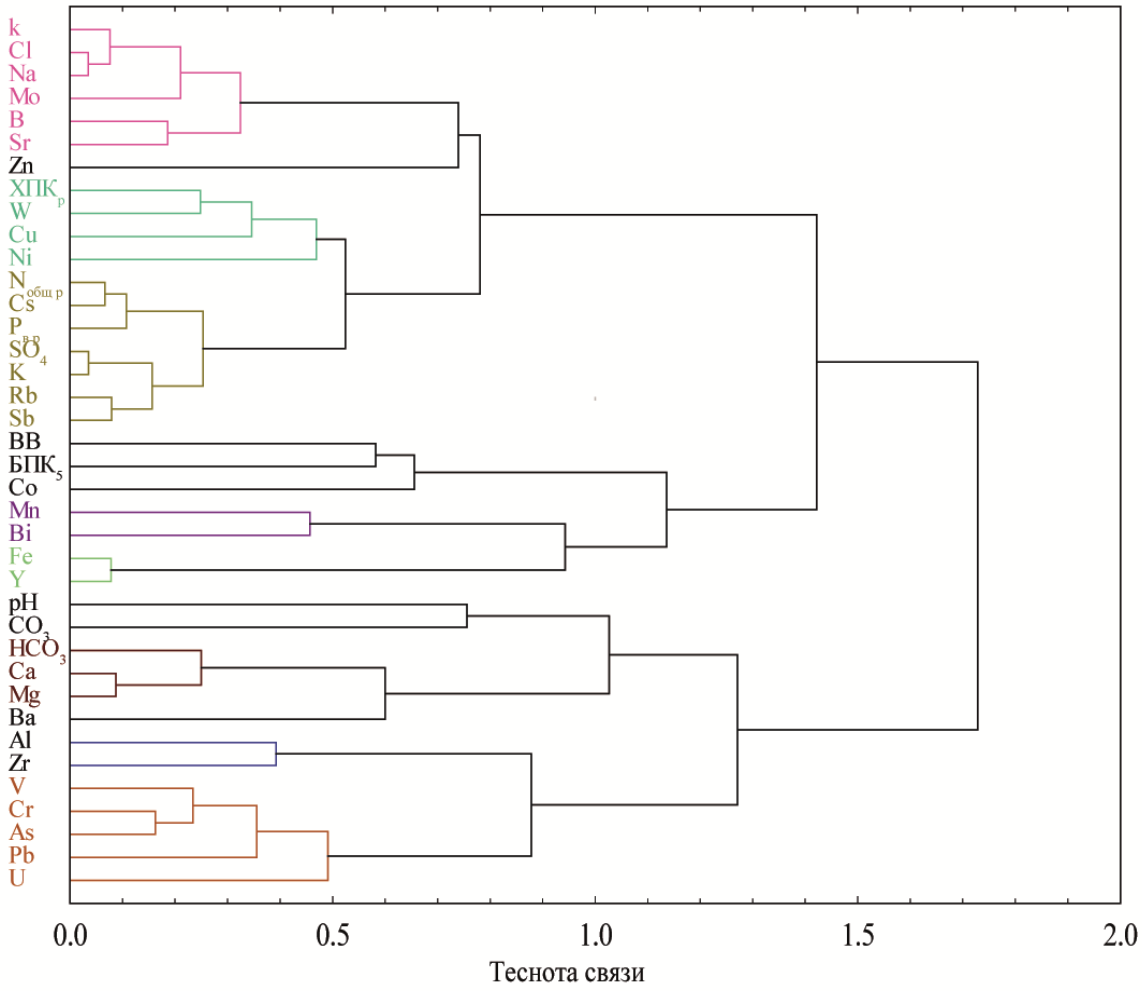


Рис. 6. Дендрограмма по результатам кластерного анализа. Метод полных связей (Complete linkage), мера сходства 1-Pearson r.

Содержание W, Cu и Ni в большей степени зависит от $ХПК_р$. Ранее было установлено, что основным источником Cu (до 84 % городских стоков) являются сточные воды [7], для которых в пределах города характерно устойчивое загрязнение органическим веществом по ХПК [6].

Концентрации Cs, Rb, Sb зависят от нескольких характеристик: $N_{общ\ р}$ (общий растворенный азот), $P_{в\ р}$ (валовый растворенный фосфор), количество SO_4^{2-} и K. В частицах $PM_{1–10}$ дорожной пыли г. Москвы Sb является важным индикатором влияния транспорта, так как может поступать с выбросами мотор-

ного масла, при истирании шин, тормозных колодок и подшипников [3]. Существенная корреляция между концентрациями Rb и K была ранее установлена в речной системе Ганг – Брахмапутра, где основным источником этого литофильного элемента являются карбонатные горные породы [14]. Таким образом, источником данной ассоциации могут являться городские почвы.

Bi из ассоциации Mn–Bi достаточно часто присутствует в осадках сточных вод, в том числе образующихся на Курьяновских и Люберецких очистных сооружениях [11].

Ассоциация Fe–Y вероятно поступает со стоками с сельскохозяйственных полей выше города, что подтверждается более высокими концентрациями этих элементов в створах в верхнем течении р. Москвы. Наличие соединений Fe в речных водах свидетельствует об активизации процессов эрозии почв и деградации гумусовых веществ [12]. Кроме того, установлено, что фосфатное сырье для минеральных удобрений часто обогащено Y [11].

HCO_3–Ca–Mg ассоциация, по-видимому, связана с размыванием карбонатных пород (известняки и доломиты), достаточно широко распространенных в Московском регионе. Дополнительным источником карбонатной пыли в городе служат строительные площадки [15].

Al–Zr ассоциация отличается повышенными концентрациями на участке от поселка Тучково ниже сбросов завода железобетонных изделий ООО «ТУБЕТОН» до впадения р. Гжелки в 230 км ниже по течению. На протяжении данного участка в р. Москву поступают сточные воды поселка Тучково, городов Звенигорода, Москвы (КОС и ЛОС), Дзержинского, Лыткарино, Жуковского. Кроме того, источником Zr могут служить стоки, размывающие россыпь титан-циркониевых минералов, расположенную на Теплостанской возвышенности в пределах Москвы.

Одна из самых крупных ассоциаций As–Cr–V–Pb–U имеет по большей части антропогенный генезис. Pb и As были ранее выделены в числе приоритетных загрязнителей донных отложений водоемов восточной части Москвы [4]. Так, повышенные концентрации Pb, выявленные в донных отложениях прудов Восточной Москвы, связаны с выбросами предприятий машиностроения, металлообработки и по производству строительных материалов [4]. Достаточно высокие концентрации As установлены в ливневых стоках опытного химико-металлургического завода в г. Подольске и в р. Пахре в пределах Щербинской свалки промышленно-бытовых отходов [11].

Выводы

Полученные данные позволяют сделать вывод о достаточно стабильных значениях pH и электропроводности, слабо меняющихся от истока к устью р. Москвы в период весеннего половодья (апрель) и летней межени (август) 2019 г. Величина ХПК возрастала от истока до устья р. Москвы в 3 раза, БПК – более чем в 10 раз. Содержание нитритного, нитратного, аммонийного и общего азота, общего и минерального фосфора существенно увеличивается (в 3–7 раз) ниже выпуска Курьяновских и Люберецких очистных сооружений и ниже впадения р. Пехорки, сохраняя повышенные значения до устьевой области.

Различия в концентрациях биогенных элементов ниже и выше Москвы составляет от 2 до 18 раз.

Средние содержания потенциально токсичных элементов в Москве и ее притоках не превышают предельно допустимые концентрации в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования.

Результаты кластерного и корреляционного анализа позволили выделить 8 ассоциаций растворенных элементов с физико-химическими свойствами речных вод, обусловленных воздействием сельского хозяйства (Fe–Y), городского автотранспорта (k–Cl–Na–Mo–B–Sr), сточных вод ($ХПК_р$–W–Cu–Ni и Mn–Bi), промышленности (As–Cr–V–Pb–U), других техногенных (Al–Zr) и природных (HCO_3–Ca–Mg) факторов, а также ассоциацию смешанного природно-техногенного генезиса ($N_{общ\ р}$–$P_{в\ р}$–SO_4–K–Cs–Rb–Sb), поступающую в основном из городских почв.

Работы по определению концентраций ПТЭ выполнялись в рамках проекта РНФ 19-77-30004; содержание взвешенного вещества анализировалось в рамках проекта РФФИ 19-05-50109; содержание биогенных веществ исследовалось в рамках проекта РГО «Москва-река от истоков до устья: гидролого-геохимическая оценка экологического состояния», статистическая обработка полученных данных проводилась в рамках темы «Природные и антропогенные изменения ландшафтно-геохимических и почвенных систем».

Список литературы

1. *Абрамова Е. А.* Геоэкологическая оценка антропогенной нагрузки на поверхностные воды бассейна реки Оки : дис. … канд. геогр. наук. СПб., 2012.

2. *Богомолова Т. Г., Курочкина В. А.* Загрязнение речных русел на урбанизированных территориях и инженерные мероприятия по улучшению их экологического состояния // Вестник МГСУ. 2010. Т. 4, № 2. С. 399–404.

3. *Власов Д. В., Касимов Н. С., Кошелева Н. Е.* Геохимия дорожной пыли (Восточный округ Москвы) // Вестник Московского университета. Серия 5, География. 2015. № 3. С. 23–33.

4. *Власов Д. В., Шинкарева Г. Л., Касимов Н. С.* Металлы и металлоиды в донных отложениях водоемов восточной части Москвы // Вестник Московского университета. Серия 5, География. 2019. № 4. С. 43–52.

5. ГН 2.1.5.1315 03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования // КонсультантПлюс, 2017. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_43149/ (дата обращения: 24.04.2017).

6. Доклад «О состоянии окружающей среды в городе Москве в 2019 году» / под ред. А. О. Кульбачевского. М., 2020. 222 с.

7. *Рогозина Т., Фукс Ш., Вандер Р.* Поступление вредных веществ в воду на примере бассейна реки Москвы // Великие реки 2010. М., 2011. С. 132–134.

8. *Тимофеева Е. А., Караванова Е. И.* Оценка экологического состояния Москвы-реки в районе Курьяновских очистных сооружений // Городские исследования и практики. 2018. Т. 3, № 3. С. 99–110. https://doi.org/10.17323/usp33201899-110

9. *Уваров А. Г.* Оценка степени загрязнения тяжелыми металлами реки Москвы и возможность использования макрофитов рода *Potamogeton* для биомониторинга тяжелых металлов в реке // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2015. Т. 17, № 6. С. 150–158.

10. Влияние обводнения очищенными водами на экологическое состояние реки Пехорки / Н. М. Щеголькова, Д. А. Данилович, М. Н. Козлов, О. В. Мойжес, В. Я. Пушкарь, М. Л. Владов, А. В. Старовойтов // Водоснабжение и санитарная техника. 2008. Т. 10. С. 77–84.

11. *Янин Е. П.* Техногенные речные илы (условия формирования, вещественный состав, геохимические особенности). М. : АРСО, 2018. 415 с.

12.. Экологический мониторинг вод Москвы-реки в столичном мегаполисе / И. М. Яшин, И. И. Васенев, И. В. Гареева, В. А. Черников // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 2015. Вып. 5. С. 8–25.

13. *Gaillardet J., Viers J., Dupré B.* Trace Elements in River Waters // Treatise on Geochemistry. Elsevier, 2003. P. 225–272. https://doi.org/10.1016/B0-08-043751-6/05165-3.

14. Strontium isotopes and rubidium in the Ganga-Brahmaputra river system: Weathering in the Himalaya, fluxes to the Bay of Bengal and contributions to the evolution of oceanic $^{87}Sr/^{86}Sr$ / S. Krishnaswami, J. R. Trivedi, M. M. Sarin, R. Ramesh, K. K. Sharma // Earth and Planetary Science Letters. 1992. Vol. 109, N 1–2. P. 243–253. https://doi.org/10.1016/0012-821x(92)90087-c

15. Dissolved and suspended forms of metals and metalloids in snow cover of megacity: partitioning and deposition rates in Western Moscow / D. Vlasov, J. Vasil'chuk, N. Kosheleva, N. Kasimov // Atmosphere. 2020. 11. P. 907. https://doi.org/10. 3390/atmos11090907

ОПАСНЫЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ И ПРОЦЕССЫ

УДК 613.1:656.61.(470.620)

«Новороссийская бора» и ее генезис

С. М. Авдеев (avdeev@rgau-msha.ru)

Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К. А. Тимирязева, г. Москва

Аннотация. Представлены особенности формирования опасных климатических факторов для судоходства в районе города-героя Новороссийска. Приведены особенности возникновения Новороссийской боры и штормов южной четверти.

Ключевые слова: Новороссийск, Цемесская бухта, бора, шторма, судоходство.

В современном мире существует множество проблем, которые влияют на судоходство не только в нашей стране, но также за рубежом. Среди них немаловажное место занимают климатические факторы.

Актуальность проблемы обеспечения безопасности мореплавания стоит остро из-за недостаточной точности прогнозирования метеорологических и гидрологических факторов. В порту г. Новороссийска, где преобладают северо-восточные ветра и шторма южной четверти, проблема качественных прогнозов необходима и для этого нужно не только следить за частотой явлений, но и стараться разрабатывать более грамотные подходы к обеспечению безопасности, что и будет затронуто в работе, так как большинство трудов, посвященных исследованию данных неблагоприятных климатических явлений основываются только на теоретических предположениях.

Порт, который располагается в г. Новороссийске, обеспечен современным морским терминалом для обслуживания судов с применением передовых технологий с различными типами, назначениями и тоннажа.

Гидрометеорологические факторы являются первопричиной проблем не только во время стояния судна в акватории порта, но так же во время его маневрирования и обработки у причалов. Эта проблема исходит из своеобразной орографии региона Цемесской бухты, в низовье которой находится порт Новороссийск, и что в свою очередность определяет формирование специфических синоптических явлений в бухте, зачастую выступает в роли угрозы для судов, стоящих у причала в рейде.

Речь идет о ветрах северо-восточного направления, зачастую достигающих сил урагана – «Новороссийская бора» и штормах южной четверти, итогом которых становится весьма значительное волнение в бухте, что приводит к появлению толчеи и тягуна у определенных причалов.

Новороссийская бора является одной из самых главных климатических проблем г. Новороссийска, так как вызывает не только волнение в море, но и приносит вред прибрежной зоне, принося с собой холодный порывистый ветер из-за сильных градиентов давления между материком и Черным морем. Данное неблагоприятное явление наносит вред и инфраструктуре, но также может приводить к человеческим жертвам.

Традиционно под Новороссийской борой понимают ветры от 12 м/с и выше и имеют продолжительность более 6 ч, что значительно затрудняет работу и навигацию на территории бухты.

Новороссийская бора имеет четыре пути своего возникновения:

1. Стоковые боры – они относятся к образованию первого типа, когда через хребет происходит протекание тонкого слоя холодного воздуха при условии небольших скоростей ветра на хребте и при его усилении у подножья хребта. Стоковые боры образуются из-за силы тяжести, которая происходит у подножья хребта. Скорость ветра не превышает 20–25 м/с в восточной части города. Вследствие всего вышесказанного возникают высокие градиенты температуры с направлением на северо-восток.

2. Внутримассовые боры. Возникают в тот момент, когда через хребет проникает холодный мощный поток воздуха, в случае если высота хребта мала в сравнении с вертикальными размерами потока-Его рассматриваем как однослойный из-за соотношения высоты потока и гор.

3. Муссонные боры – возникают в момент перетекания через хребет двухслойного потока с вертикальным размером нижнего холодного потока одного порядка с высотой хребта. Верхний и нижний потоки имеют противоположное направление, разделены резко выраженной инверсией

4. Фронтальные боры – возникают при прохождении через хребет холодного фронта. Четвертый тип является наиболее опасным из-за того, что фронтальная бора не имеет специфики локализовываться в одном месте, что дает ей обосновываться на больших территориях и принося большие потери. В момент ее прохождения над городом происходит похолодание, что влечет за собой обледенение не только судов, находящихся в бухте, но и объектов, находящихся на берегу. Не редко набережная Новороссийска после действия северо-восточных ветров зимой находится под слоем льда.

Но не только новороссийская бора может наносить ущерб судоходству. Существуют так же штормы южной четверти, под этим термином понимают усиление ветра южного, юго-восточного и юго-западного направлений. В отличие от новороссийской боры, у которой нижним пределом мы принимали 12 м/с у ветров южных штормов – это 10 м/с из-за того, что при данном направлении ветра волнение моря усиливается до 4 баллов [1].

Из таблицы мы можем сделать вывод о том, что по Новороссийску наиболее часты ветра северо-восточного направления (31,8 %) и ветры южной четверти (32,8 %).

Таблица

Повторяемость направлений ветра и штилей по Новороссийску

Месяцы	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ	ШТ	Всего
Январь	6	30	3	6	7	14	5	10	19	100
Февраль	4	26	1	13	13	17	3	8	15	100
Март	1	23	3	16	11	13	4	7	22	100
Апрель	1	35	1	18	10	9	2	3	21	100
Май	1	26	2	14	13	7	3	4	30	100
Июнь	2	30	3	13	13	10	2	3	24	100
Июль	2	31	3	8	12	13	5	5	21	100
Август	3	44	2	5	10	8	4	6	18	100
Сентябрь	1	43	1	7	7	13	4	6	18	100
Октябрь	3	40	2	9	10	8	2	5	21	100
Ноябрь	1	24	4	10	7	9	2	4	39	100
Декабрь	3	29	4	17	11	13	6	5	12	100
Всего	28	381	29	136	124	314	42	66	260	100
Год, %	2,3	31,8	11,3	11,3	10,3	11,2	3,5	5,5	21,7	100,0

Северо-восточные ветры преобладают в месяцы – август (44), сентябрь (43), октябрь (40). Ветры южного направления чаще всего наблюдаются в феврале, мае и июне (13). Юго-восточного направления – в феврале – апреле (от 13 до 18). Ветры юго-западного направления осредненно наблюдаются на территории Новороссийска в небольшом количестве весь год от 7 до 17.

Одним из основных неблагоприятных явлений являются шторма южной четверти, которые наносят вреда ничуть не меньше, чем новороссийская бора. Как было сказано ранее, за шторма южной четверти мы будет принимать скорость ветра от 10 м/с и волнение моря от 4 баллов для судов с наименьшим тоннажем.

Южные шторма определяются не силой ветров, а быстро развивающимся волнением моря, отсчет начинается с нижней ступени – 4 балла и может доходить до 6–7 баллов, что опасно для судов с большим тоннажем, причем это волнение может быть даже на внутренней акватории порта.

Проникновение волн большой высоты со стороны открытого моря во внутреннюю часть бухты и порта определяется географическим расположением самой бухты и геометрией расположения ее оградительных сооружений.

Новороссийская бухта и сам город имеет свои особенности гидрологии, которые связаны с его климатом, структурой сложения рельефа и литологией. Рельеф города является расчлененным, с сильно развитым интенсивным дренажем подземных вод, гидрологическая сеть является глубоко врезанной. Породы представлены плотными непористыми мергелями с небольшим содержанием прослоев песчанников [2].

Наряду с этим район Новороссийска имеет особенности геологического строения, обусловившие на отдельных его участках формирование значительных его запасов подземных вод. К этим особенностям относятся широко развитые тектонические зоны ослабленных и трещиноватых пород, созданные разломами, наличие в ряде городских районов рыхлых морских и речных отложений с хорошими коллекторскими способностями, и также наличие сочетания двух указанных особенностей, когда мощные морские галечники залегают на верхнемеловом фундаменте, осложненном разломами.

Шторма южной четверти обычно не сопровождаются сильным усилением ветра как при боре, и редко достигают 28 м/с. Характер этого метеорологического фактора имеет ряд особенностей.

Во-первых, самым основным фактором является расположение Новороссийской бухты, оно таково, что один из основных параметров, формирующих сильное волнение – разгон волн – для определенных направлений ветров южной четверти практически в 100 раз превышает разгон волн при северо-восточном ветре. Например, для точки в центральной части у входа в Новороссийскую бухту с глубиной 33 м разгон волн при ветре юго-восточного направления составляет 455 км, для ветров южного направления – 411 км, для ветров юго-западного направления – 422 км [3].

Во-вторых, проникновение волнения на внутреннюю часть акватории зависит от расположения заградительных сооружений. Молы, которые предназначаются для защиты внутренней акватории порта, имеют оконечность, через которую возможно проникновение сильного волнения для ветров южной четверти.

В-третьих, во время южных штормов на ветровое волнение может накладываться сильная зыбь с открытого моря, а во внутренней части бухты и нефтегавани Шесхарис, накладываются еще и дифракционные волны.

Был проведен анализ пространственной и временной изменчивости поля во время действия боры, с действием ураганного ветра на побережье и склонах Мархотского хребта. Изучена зависимость скорости ветра от фоновых атмосферных параметров и условий блокирования натекающего потока с наветренной стороны от гор для случаев сильной и слабой боры.

Бора, как говорилось ранее, – это местное название холодного фена, направленного с горных хребтов в сторону теплого моря. Новороссийская бора является разновидностью ветров подветренных склонов. Исследования ее интересны и имеют практическую значимость, но все не используется в полную силу. Изучение физических механизмов интересны с точки зрения понимания мезомасштабных атмосферных динамических процессов в горных районах и динамики стратифицированных течений в целом.

Чаще всего рассматриваются два сюжета формирования боры:

1. Первый представляет собой резонансное возбуждение подветренных волн в устойчиво стратифицированном пограничном слое, приводящее из-за нелинейных эффектов к обрушению волн и значительному усилению ветра на подветренной части гор;

2. Второй механизм представляет собой гидравлическую модель вторжения струи стратифицированного воздуха в пограничный слой атмосферы над горой.

В любом случае, описать развитие боры с точки зрения орфографии или с чем-то иным нельзя, чаще всего на развитие влияют нелинейные связи и описывают новороссийскую бору математическими моделями.

В начале развития бора представляет собой тонкую струю приповерхностного ветра над морем и подветренным склоном горного хребта. Толщина потока составляет около 100–200 м. Скорость вблизи поверхности над подветренным склоном уже на этом этапе развития достигает 25–30 м/с. Над наветренным склоном гор скорость составляет 10–15 м/с, высота потока – 1,5 км. При анализе выявляется, что в пограничном слое происходит блокирование набегающего потока, а сам поток есть нечто иное как низкотропосферное струйное течение с максимальной скоростью 15–20 м/с на высоте около 0,6–1,2 км.

В стадии развитой боры скорость ветра увеличивается до 40–45 м/с, толщина струйного течения в атмосфере над морем и подветренным склоном – до 600–900 м. Структура полей скорости ветра и температуры остается прежней. Расположение изотерм в атмосфере за подветренным склоном явно указывает на обрушение внутренних волн и, следовательно, на формирование области турбулентности [4].

Таким образом, изучение и прогнозирование опасных явлений в порту г. Новороссийска способно снизить человеческие и финансовые потери, а также сделать судоходство и стоянку кораблей в порту более безопасным.

Список литературы

1. *Гутман Л. Н., Франкель Ф. Н.* Термогидродинамическая модель боры // Доклады АН СССР. 1990. Т. 14. С. 140.

2. *Зуйков О. Т.* Применение и анализ Руководства по швартовному оборудованию OCIMF // Материалы научной конференции НГМА. РИО НГМД, Новороссийск, 2007.

3. *Лыткина И. И.* Южные штормы в Керчь-Туапсинском районе. Новороссийское ГМБ, 1962. С. 34.

4. *Alpers W., Ivanov A., and Hortmann S.* Obrervations of bora events over the Adriatic Sea and Black Sea by spaceborne synthetic aperture radar // Mon. Wea. Rev. 2009. Vol. 137, N 3. P. 1150–1161.

УДК 551.509.32

Современные тенденции и перспективы прогноза опасных конвективных явлений погоды

А. А. Алексеева (antonida_alekseeva@mail.ru), Е. В. Васильев (syno@inbox.ru), В. М. Лосев (losev@mecom.ru), В. М. Бухаров (rprogn@mail.ru)

Гидрометцентр России, г. Москва

Аннотация. Приведены основные результаты исследований по автоматизированному прогнозу опасных конвективных явлений погоды в летний период года за последние два десятилетия, полученные в Гидрометцентре России. Разработанные методы прошли оперативные испытания, были рекомендованы к внедрению Центральной методической комиссией по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам Росгидромета, реализованы в рамках автоматизированной технологии с записью результатов прогноза в оперативные базы данных Гидрометцентра России, которые используются в прогностических подразделениях Росгидромета. Рассмотрены современные тенденции и перспективы прогноза опасных конвективных явлений погоды.

Ключевые слова: метод, прогноз, опасное явление, ливень, град, шквал, достижение, перспектива.

Введение

Опасные конвективные явления погоды – ливень, количеством осадков ≥ 50 мм/12 ч или ≥ 30 мм/ч, шквал, скоростью ветра ≥ 25 м/с, град, диаметром ≥ 2 см, а также их комплексы – даже не достигнув приведенных значений, нередко сопровождаются значительным ущербом и гибелью людей. Явления отличаются кратковременностью и локальностью возникновения. Их образование обусловлено сложным с физической точки зрения механизмом, так как происходит взаимодействие атмосферных процессов разного масштаба, от микрофизических до крупномасштабных. Такие явления до сих пор сложно прогнозировать. Особенно возникают трудности при прогнозе точного времени и места их возникновения, а также интенсивности. Поэтому исследования в данной области являются до настоящего времени актуальными и практически значимыми. Еще более востребованными они становятся при наблюдающемся глобальном потеплении, в результате чего увеличивается повторяемость опасных конвективных явлений погоды и расширяются зоны их возникновения.

Основные результаты гидрометеорологических исследований, полученных в Гидрометцентре России в области прогнозирования опасных конвективных явлений погоды

На настоящее время решениями Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета за последний двадцатилетний период рекомендованы к внедрению в оперативную практику ФГБУ «Гидрометцентр России» семь автоматизированных методов краткосрочного прогноза опасных конвективных явлений погоды в летний период года [13], результаты расчетов которых доступны для использования на сети прогнозирования Росгидромета. Все методы базируются на дан-

ных отечественной региональной модели Гидрометцентра России [12], рассчитываются два раза в сутки в 00 и 12 ч ВСВ, заблаговременность прогнозов до 30 ч. Прогнозами охватывается территория России и близлежащих стран. Результаты прогнозов оперативно записываются в базы данных Гидрометцентра России, доступны в рамках программного комплекса «Прометей», в том числе удаленно, либо в виде карт, выложенных на ftp-сервер. Прогнозы ливней и шквалов в трех градациях интенсивности для территории ЦФО и северных районов европейской территории России (ЕТР) передаются в виде автоматизировано визуализированных карт. Следует отметить, что методы начали разрабатываться на выходных данных региональной модели, когда она была базовой региональной прогностической моделью.

Пять методов прогноза разработано по принципу «идеального прогноза», два метода – подходом MOS. Для расчета параметров конвекции в первых пяти методах прогноза использована одномерная стационарная модель конвекции. Основополагающим предиктором в прогнозах является значение максимальной конвективной скорости, рассчитанной по методу Н. И. Глушковой [13]. В случаях фронтальной конвекции, когда расчет параметров конвекции производится в слоях с высоким влагосодержанием, не всегда достоверно с помощью модели конвекции можно рассчитать максимальные вертикальные конвективные движения. В этих случаях максимальные скорости конвективных движений (W_m) рассчитываются по значению массовой доли влаги у поверхности земли и мощности конвекции [13]:

$$W_m = \frac{0.23 \times 3.79 \times EXP\left(\frac{17.13 \times Td}{Td + 235}\right)}{0.85 \times (H_m - H_k)} \quad (1)$$

где Td – температура точки росы у поверхности земли, °С; H_m и H_k – высоты верхней и нижней границ кучево-дождевого облака, км.

Расчеты по данной формуле производятся при определенных средних значениях дефицитов точки росы в слоях 850–700 гПа и 500–400 гПа, соответственно $\overline{d_{8,7}} < 3\ ^\circ\text{C}$, $\overline{d_{5,4}} \leq 4\ ^\circ\text{C}$, и дефиците точки росы на уровне 400 гПа $d_4 \leq 3{,}5\ ^\circ\text{C}$.

В оперативной технологии прогноза реализованы методы автоматизированного альтернативного прогноза дневных ливней и шквалов в градациях опасные явления (ОЯ), а также метод прогноза количества осадков заблаговременностью 12 и 24 ч по исходным срокам 00 и 12 ч ВСВ с использованием выходной продукции региональной гидродинамической модели атмосферы.

Дискриминантные функции для двух классов явлений: ливневых осадков с количеством ≥ 50 мм/12 ч ($L_{явл}$) и без них ($L_{б.\ явл}$), являющихся функциями (L) от следующих параметров атмосферы [8; 13]:

$$L = F(W_m, Td_з, \Delta P_з, \overline{d_{8,7}}) \quad (2)$$

где W_m – максимальная конвективная скорость, м/с; $Td_з$ – температура точки росы у поверхности Земли, °С; $\Delta P_з$ – лапласиан приземного давления,

гПа/(600 км)^2; $\overline{d_{8,7}}$ – средний дефицит точки росы в слое 850–700 гПа, °С; имеют вид:

$$L_{явл} = 0,242W_m + 1,621Td_з + 0,068\Delta P_з + 0,475\overline{d_{8,7}} - 18,0 \quad (3)$$

$$L_{б.явл} = 0,117W_m + 1,425Td_з + 0,002\Delta P_з + 0,618\overline{d_{8,7}} - 12,4 \quad (4)$$

Дискриминантная функция ($L_{шк}$) для прогноза шквалов в градации ОЯ [1; 8; 13]:

$$L_{шк} = W_m + 2,16\Delta P_з - 35, \quad (5)$$

причем расчеты проводятся только при условии, когда $W_m \geq 27$ м/с и $7,5\,\text{гПа}/(600\ \text{км})^2 \geq \Delta P_з \geq 3,5\,\text{гПа}/(600\ \text{км})^2$.

В основе прогноза максимального количества смешанных осадков (обложных и ливневых) лежит формула вида [5; 8; 13]:

$$Q_{\max_1} = b\,k_0\,W_m \text{ (мм/12 ч)} \quad (6)$$

где b = 4,36 мм·с/м; W_m – максимальная конвективная скорость, м/с; k_0 – коэффициент генерации осадков, выраженный через упорядоченные вертикальные движения на уровне 850 гПа. Количество осадков в случаях, когда дождь ливневого характера вносит основной вклад в общую сумму осадков, рассчитывается как функция только максимальной конвективной скорости:

$$Q_{\max_1} = c\,W_m \text{ (мм/12 ч)} \quad (7)$$

причем коэффициент регрессионной зависимости c определяется в зависимости от влажности воздуха в слое 850–700 гПа и вертикальных упорядоченных движений на уровне 850 гПа.

Ранее проведенные исследования показали, что при сильных ливнях чем больше величина максимальной конвективной скорости, тем меньше разница между максимальной и средней интенсивностью осадков, продолжительностью ливневой части дождя и общей продолжительностью дождя. В связи с этим в формулу прогноза максимального количества осадков со средней интенсивностью конвективных осадков введен коэффициент на интенсивность конвекции $L = f(W_m)$.

Для смешанных и ливневых осадков при средней интенсивности конвективных осадков уравнения регрессии соответственно имеют вид:

$$Q_{\max 2} = L\,k_0\,W_m \quad (8)$$

$$Q_{\max 2} = L\,W_m \quad (9)$$

Отношение продолжительности ливневой части дождя к общей продолжительности дождя характеризуется плотностью конвективных струй χ, средние значения которой в летние месяцы находятся в интервале 0,29–0,38.

Окончательная формула прогноза максимального количества осадков имеет вид:

$$Q_{\max} = Q_{\max 1} \cdot \chi + Q_{\max 2} \cdot (1 - \chi) \text{ (мм/12 ч)}. \quad (10)$$

Также в оперативной технологии прогноза реализован автоматизированный метод прогноза осадков с детализацией интенсивности в трех градациях (от 15 до 34,9 мм/12 ч, от 35 до 49,9 мм/12 ч и ≥ 50 мм/12 ч) с заблаговременностью 12 и 24 ч [5; 6; 13]. Прогноз осадков данным способом является результатом комплексирования результатов двух методов прогноза, основы которых изложены выше: метода прогноза максимального количества осадков – основы прогноза во всех градациях; и альтернативного метода прогноза ливней градации ОЯ – уточняющего для градации осадков 50 мм/12 ч и более.

Автоматизированный метод прогноза шквалов с детализацией интенсивности по градациям (от 20 до 24,9 м/с, от 25 до 32,9 м/с и ≥ 33 м/с) [1; 4; 7] является результатом комплексирования двух методов: прогноза скорости ветра при шквалах (основы которого представлены ниже) и альтернативного прогноза шквалов в градации ОЯ, представленного выше. Шквалы с ураганной скоростью ветра прогнозируются при условии одновременного прогнозирования шквалов в градации ОЯ альтернативным способом и скорости максимальных порывов не менее 33 м/с. Прогноз максимальной скорости ветра V (м/с) при сильных шквалах рассчитывается с помощью уравнения регрессии [2; 4]:

$$V = a \cdot W_m^{\frac{1}{n}} \cdot \left[(\left|\bar{v}\right| + b) \cdot (\Delta P + c) \right]^{\frac{1}{m}} + d \cdot (\left|\bar{v}\right| + g)^{\frac{1}{k}} + f \cdot \left|\bar{v}\right| - C \qquad (11)$$

где W_m – максимальная конвективная скорость, м/с; $\left|\bar{v}\right|$ – модуль средней векторной скорости ветра в слое 700–500 гПа; ΔP – лапласиан приземного давления (гПа/(600 км)^2; *b, c, g* – оптимальные для шквала значения параметров; *a, d, f, C* – эмпирические коэффициенты. Эмпирические коэффициенты и степенные показатели входящих в уравнение предикторов меняются в зависимости от периода сезона возможного возникновения шквалов.

В рамках другой оперативной технологии прогноза реализован гидродинамико-статистический метод прогноза шквалов и очень сильного ветра в градации ≥ 20 м/с в летний период года на основе выходных данных региональной модели подходом MOS с заблаговременностью 12, 24 и 36 ч [13]. В данном методе метеорологическая ситуация, способствующая возникновению шквалов и сильного ветра, представляется как многомерный вектор $X(A) = (x_1(A), x_2(A), \ldots, X_n(A))$, где n – количество параметров атмосферы (предикторов). Обучающая выборка включала случаи с наличием явления в градации ОЯ и случаи с их отсутствием, но при этом выбирались такие, когда атмосфера была термодинамически неустойчива и в большинстве случаев наблюдались грозы и сильные ливни. Модель распознавания векторов и получения дискриминантной функции построена с использованием байесовского подхода. В качестве критериев информативности каждого предиктора использованы критерии минимальной энтропии Вапника – Червоненкиса и расстояние Махаланобиса. Был выбран вектор-предсказатель для шквалов и сильного ветра со скоростью ≥ 20 м/с, состоящий из следующих предикторов: поля геопотенциала на уровне 1000 гПа, приземной температуры воздуха, скорости ветра на уровне 700 гПа и температуры на уровне 300 гПа, а также рассчитанных на основе модельных полей

влажности воздуха у земли (точка росы) гидродинамической неустойчивости (индекс Вайтинга) и модуля горизонтального градиента температуры у земли. Если значение дискриминантной функции больше 3, то дается прогноз очень сильных шквалов или опасного ветра со скоростью 25 м/с и более, и указывается возможность образования смерчей. Вероятность возникновения явлений рассчитывается по формуле:

$$P(X) = 100 \big/ (1 + EXP(-F(X))) \quad (12)$$

где *F(X)* – значение дискриминантной функции.

Прогнозируемые области сильного и опасного ветра выделяются по задаваемой для каждой заблаговременности пороговой вероятности. В случае устойчивой стратификации сразу прогнозируется отсутствие явления.

Другим методом, разработанным на основе подхода MOS, является гидродинамико-статистический метод прогноза сильных летних полусуточных осадков количеством ≥ 15 мм/12 ч с заблаговременностью 18, 30 и 36 ч (исходный срок 0 ч ВСВ) по ЕТР с использованием выходных данных региональной модели Гидрометцентра России [13; 14]. Предикторами прогностической зависимости являются геопотенциал на уровне 1000 гПа, приземные температура воздуха и температура точки росы, дефицит точки росы на изобарической поверхности 700 гПа, индекс гидродинамической неустойчивости (индекс Вайтинга), модуль горизонтального градиента температуры у Земли и лапласиан приземного давления. Значение пороговой вероятности выбрано эмпирически.

Кроме вышеупомянутых методов прогноза, рекомендованных к внедрению ЦМКП Росгидромета, разрабатывались методы прогноза в рамках диссертационных исследований. Например, альтернативный метод прогноза сильных шквалов Е. В. Васильева [10; 11; 13]. Метод реализован в оперативном режиме также на основе выходных данных региональной модели Гидрометцентра России. Другим примером может служить метод прогноза скорости ветра (автор М. М. Смирнова) [10].

Не потерял актуальности рекомендованный ЦМКП в 1998 г. к внедрению в практику метод прогноза конвективных ОЯ с ущербом [3; 13].

Кроме того, в Гидрометцентре России разработаны метод прогноза града в двух градациях (неблагоприятное явление (НЯ) и ОЯ) и метод прогноза конвективных НЯ и ОЯ с детализацией типа явления [13].

Таким образом, при разработке автоматизированной технологии ФГБУ «Гидрометцентр России» для прогноза опасных конвективных явлений в летний период года ставилась задача охватить прогнозом весь комплекс неблагоприятных и опасных явлений погоды, связанных с зонами активной конвекции (ЗАК) в теплое полугодие, кроме смерчей. Это: прогнозы каждого явления (ливень, град, шквал) по отдельности в градации ОЯ, а также в градации НЯ, комплексный прогноз конвективных НЯ и ОЯ, детализирующий тип неблагоприятного или опасного конвективного явления в их совокупности, а также прогноз конвективных ОЯ с ущербом. Кроме методов альтернативного прогноза опасных конвективных явлений, технология включает количественные прогнозы

максимального количества осадков, скорости ветра при шквалах и радиуса града, выпадающего на поверхность земли, используемые также и как промежуточные результаты для прогнозов конвективных комплексов. Необходимость разработки комплексного метода прогноза, способного предсказывать совокупность явлений, связанных с определенной ЗАК, обусловлена определенными причинами. Как показала практика, на территории России чрезвычайные ситуации нередко возникают под влиянием совокупности ряда явлений, каждое из которых не обязательно носит экстремальный характер. Такие ситуации могут возникать и при длительном воздействии одного и того же явления, хотя его интенсивность не соответствует установленным критериям опасности. Часто одно или несколько явлений из такой опасной совокупности достигает интенсивности, составляющей около 75 % от критерия ОЯ.

Из принятых ЦМКП Росгидромета решений за последнее двадцатилетие видно, что и рекомендованные к внедрению методы имеют статус консультативных, вспомогательных к синоптическому методу, или продуцируемые ими прогнозы следует считать фоновыми, т. е. последнее слово в прогнозе остается за синоптиком. Причем рекомендованные к внедрению методы реализованы на региональной модели, на настоящее время уступающей мезомасштабным моделям по пространственному разрешению. Однако следует учесть, что только два метода разработаны подходом MOS, остальные методы – по принципу «идеального прогноза», поэтому прогностические уравнения применимы к выходным данным и других моделей.

В работе [13] приведены предложения по уточнению автоматизированных прогнозов опасных конвективных явлений погоды на основе данных метеостанций за счет расчета разработанного Б. Е. Песковым индекса – «показателя макро-мезоситуации, предрасположенной к образованию опасных конвективных явлений». Для прогноза очень сильных осадков данный индекс уточняется за счет учета оптимальной величины скорости ветра на изобарической поверхности 500 гПа.

Кроме этого, в Гидрометцентре России проводятся исследования по совершенствованию алгоритмов диагностирования опасных конвективных явлений погоды по данным сети метеорологических радиолокаторов ДМРЛ-С и результатам численного моделирования. С основами диагностирования максимальных конвективных скоростей, интенсивности ливневых осадков и града можно подробнее ознакомиться в работе [9]. Для диагностирования шквалов реализованы два алгоритма: диагностирования шквалов и их скорости (метод Б. Е. Пескова [15]) и шквалов в градации ОЯ, основы которого представлены выше. Во втором алгоритме при диагностировании дополнительно к данным ДМРЛ-С используется лапласиан приземного давления, прогнозируемый региональной моделью Гидрометцентра России с детализацией по времени и пространству, идентичной данным базы данных ДМРЛ-С (0,05 град и 10 мин).

Наряду с представленными выше рекомендованными к внедрению в оперативную практику методам, т. е. специализированными методами прогноза опасных конвективных явлений погоды в летний период года, в Гидрометцен-

тре России активно внедряются в практику мезомасштабные модели, в рамках которых развивается направление прогноза опасных явлений погоды. На настоящее время отсутствуют рекомендации ЦМКП Росгидромета о внедрении в практику прогноза таких явлений, но в рамках моделей выдаются прогнозы количества осадков и скорости ветра у поверхности Земли, включая градации опасных явлений погоды. Данные прогнозы очень важны для синоптиков. В работе [10] представлены результаты анализа прогнозов скорости ветра ≥ 15 м/с, включая градации НЯ и ОЯ, полученных с помощью гидродинамических моделей разного пространственного разрешения, расчет по которым проводится в Гидрометцентре России. Так, ветры скоростью 15–19 м/с неплохо прогнозируются вышеупомянутым методом М. М. Смирновой. Достаточно точно прогнозируются ветры со скоростью 20–24 м/с мезомасштабной моделью COSMO-Ru7. Версия модели COSMO-Ru2 точнее версии COSMO-Ru7 прогнозирует ветер со скоростью ≥ 25 м/с, но при этом количество «ложных тревог» увеличилось в 6. 7 раз. Подробнее с результатами испытаний COSMO-Ru2 можно ознакомиться в решении ЦМКП Росгидромета от 15.12.2016, согласно которому в теплый период года прогнозы скорости ветра 18–22 м/с по моделям COSMO-Ru2 и COSMO-Ru7 оказались вполне удовлетворительными. При этом прогнозы COSMO-Ru2 превосходили по критерию предупрежденности прогнозы COSMO-Ru7. В теплый период опасные порывы ветра (22 м/с и более) обе версии модели прогнозируют малоудовлетворительно.

Тенденции и направления развития современных подходов к прогнозированию опасных конвективных явлений погоды

Следует заметить, что в настоящее время в исследованиях, изложенных в научной периодической литературе, наметилось возвращение к практике XX в. – использованию разнообразных индексов, разработанных в разных странах, при прогнозе конвективных явлений. Однако следует отметить, что ни один подход к прогнозированию конвективных ОЯ с использованием индексов не только не был рекомендован в последние два десятилетия ЦМКП Росгидромета для использования на практике, но даже не был заявлен для оперативных испытаний. В научных статьях и даже в диссертационных исследованиях авторская проверка прогнозов с использованием индексов, как правило, включает ограниченное количество случаев, причем выбранных только для случаев конвективных ОЯ. Поэтому при использовании индексов в прогнозе конвективных ОЯ необходимо помнить, что испытаний в оперативной практике прогнозирования рекомендованных критериев, как и самих индексов, не было. Согласно требованиям, утвержденным в Росгидромете, для использования методов прогноза в оперативной практике необходимы оперативные испытания таких методов. Даже в научных статьях отмечается, что при использовании индексов при прогнозе конвективных ОЯ необходимо подобрать критерии индексов для конкретного региона. Как видится, зоны прогноза рекомендованными к внедрению методами будут в большинстве случаев совпадать с зонами индексов неустойчивости по критериям, характерным для их возникновения, но при этом будут обладать большей информативностью, прогнозировать тип конвективного явления и его интенсивность.

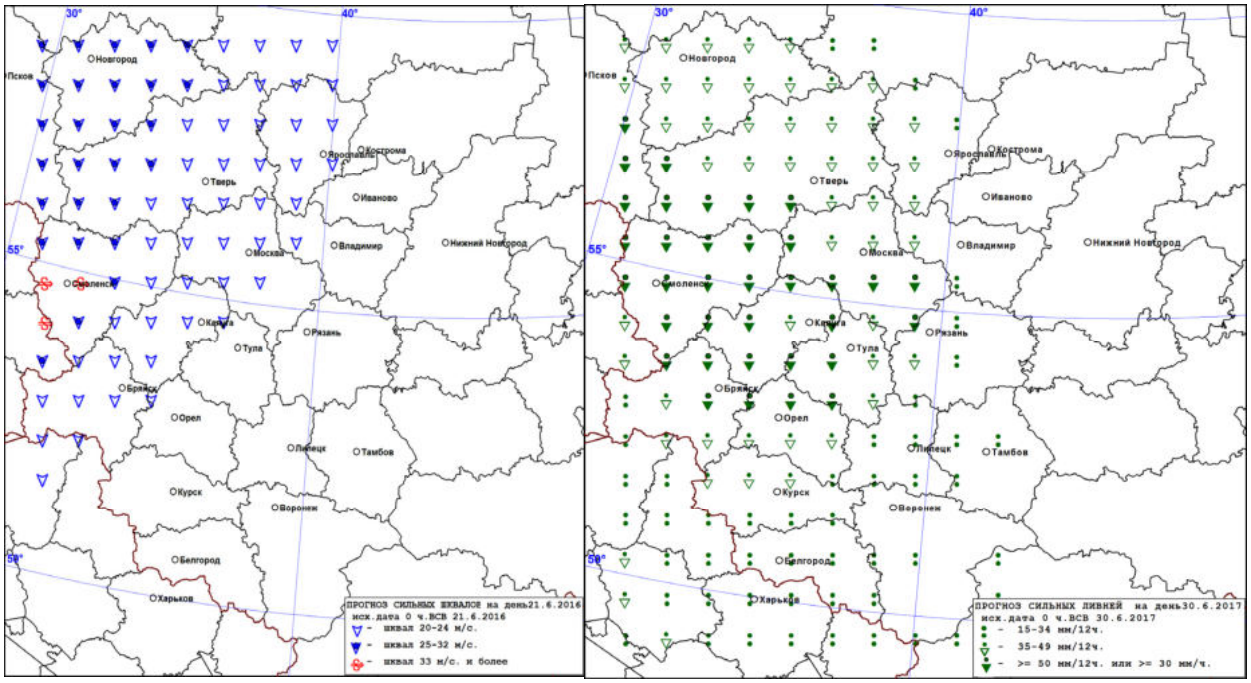


Рис. 1. Примеры прогноза сильных шквалов и ливней в трех градациях интенсивности в рамках автоматизированной технологии прогноза опасных конвективных явлений погоды в летний период года

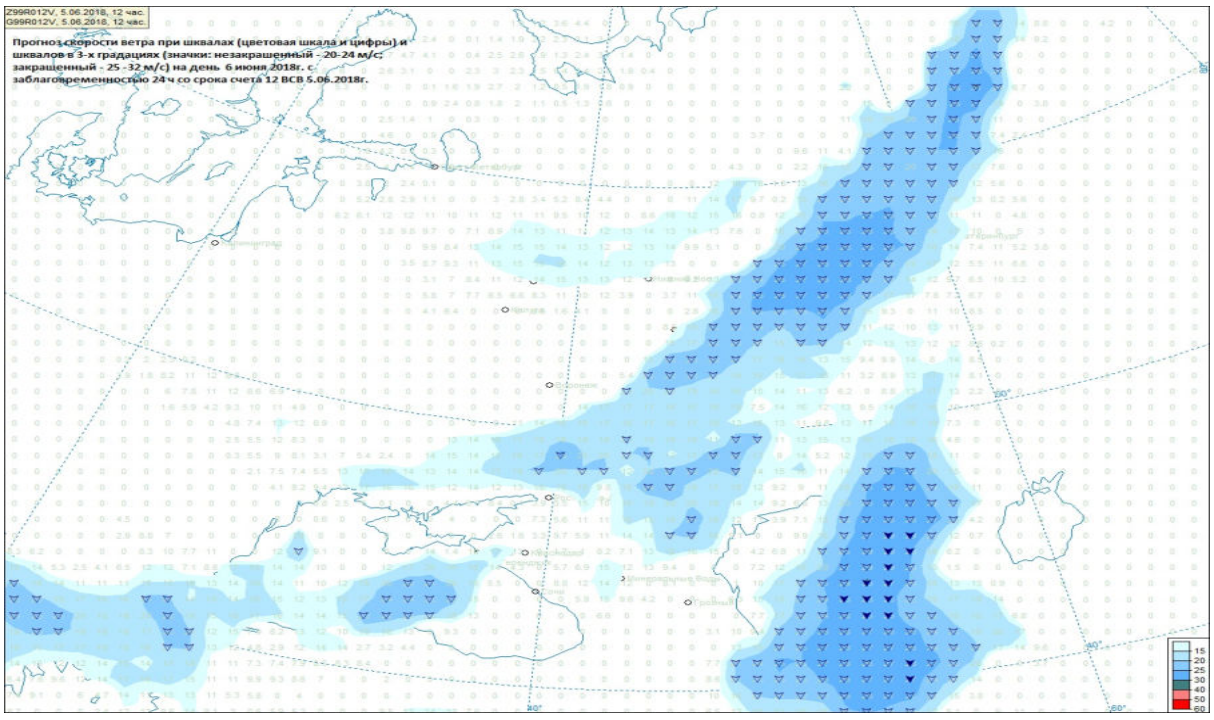


Рис. 2. Пример альтернативного прогноза сильных шквалов в трех градациях интенсивности (значки) и скорости ветра (легенда) в рамках автоматизированной технологии прогноза опасных конвективных явлений погоды в летний период года

Перспективным направлением является развитие подходов к прогнозированию опасных конвективных явлений погоды как в рамках мезомасштабных гидродинамических моделей, так и на основе их выходных данных. Следует учесть не только зарубежные научные разработки в области прогноза опасных

конвективных явлений, но и богатый багаж знаний в этой области советских и российских ученых, накопленный за 60-летний период. Следует заметить, что как совершенствование подходов к диагнозу опасных конвективных явлений погоды на основе современных радиолокационных данных сети ДМРЛ-С или данных метеостанций открывает новые возможности совершенствования подходов к их прогнозированию, так и применение наработок по прогнозированию – совершенствует их диагностирование. Таким образом, комплексные исследования, включающие исследования по диагностированию и прогнозированию опасных конвективных явлений погоды, позволяют совершенствовать оба направления исследований, углублять физические основы используемых подходов, совершенствовать алгоритмы расчетов.

Список литературы

1. *Алексеева А. А.* Метод прогноза сильных шквалов // Метеорология и гидрология. 2014. № 9. С. 5–15.

2. *Алексеева А. А.* Прогноз ураганных ветров внетропических циклонов на территории России // Метеорология и гидрология. 2017. № 1. С. 5–15.

3. *Алексеева А. А., Глушкова Н. И.* Способ прогноза стихийных конвективных гидрометеорологических явлений теплого периода. Патент РФ № 2162237 // Бюллетень изобретений. 2001. № 2.

4. *Алексеева А. А., Лосев В. М.* Прогноз опасных конвективных явлений погоды в летний период года // Труды Гидрометцентра России. Вып. 374 : Гидрометеорологические исследования и прогнозы. С. 127–143.

5. *Алексеева А. А., Лосев В. М.* Прогноз сильных летних осадков на основе выходных данных региональной модели Гидрометцентра России // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2014. Вып. 351. С. 43–63.

6. *Алексеева А. А., Лосев В. М., Багров А. Н.* Результаты испытания автоматизированного метода прогноза осадков с детализацией интенсивности в трех градациях (от 11 до 34, от 35 до 49, 50 мм/12ч и более) на основе выходных данных региональной модели с заблаговременностью 12 и 24 ч // Информационный сборник № 39 «Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов». М. : Обнинск : ИГ-СОЦИН, 2012. С. 49–60.

7. Результаты испытания автоматизированного метода прогноза шквалов с детализацией интенсивности в трех градациях (от 20 до 24, от 25 до 32, 33 м/с и более) на основе выходных данных региональной модели с заблаговременностью 12 и 24 ч / А. А. Алексеева, В. М. Лосев, Б. Е. Песков, А. Н. Багров // Информационный сборник № 39 «Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов», М. : Обнинск : ИГ-СОЦИН, 2012. С. 61–68.

8. Прогноз развития зон активной конвекции с особо опасными явлениями на основе региональной модели Гидрометцентра России / А. А. Алексеева, В. М. Лосев, Б. Е. Песков, Е. В. Васильев, А. Е. Никифорова // 80 лет Гидрометцентру России. М. : Триада, ЛТД, 2010. С. 147–159.

9. *Алексеева А. А., Песков Б. Е.* Оценка максимальной скорости конвективного потока, характеристик ливневых осадков и града по радиолокационной информации // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2016. Вып. 360. С. 135–148.

10. Результаты испытания метода прогноза шквалов с использованием термодинамических параметров атмосферы и потенциального вихря Эртеля / А. А. Алексеева, Ю. И. Юсупов, А. Н. Багров, О. Ю. Демидова, М. М. Смирнова, Ю. Я. Черногубова // Информационный сборник № 42 «Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов», М. : Обнинск : ИГ-СОЦИН, 2015. С. 15–38.

11. *Васильев Е. В., Алексеева А. А., Песков Б. Е.* Условия возникновения и краткосрочный прогноз сильных шквалов // Метеорология и гидрология. 2009. № 1. С. 5–15.

12. *Лосев В. М.* Региональная гидродинамическая модель прогноза Гидрометцентра России // 80 лет Гидрометцентру России. М. : Триада, ЛТД, 2010. С. 36–58.

13. Методические рекомендации по использованию в прогностической практике продукции численных краткосрочных прогнозов опасных конвективных явлений погоды в летний период года. М., 2018. 170 с. URL: method. meteorf.ru (дата обращения: 27.08.2020).

14. *Переходцева Э. В.* Гидродинамико-статистический метод прогноза сильных летних осадков по ЕТР на основе выходных данных региональной модели Гидрометцентра России // Информационный сборник № 41 «Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов». 2014. С. 74–88.

15. РД 52.27.339-93. Руководство по диагнозу и прогнозу осадков, града и шквалов (опасных и стихийных) по данным МРЛ и ИСЗ / Н. И. Глушкова, В. Ф. Лапчева. М. : Федеральная служба России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, 1996. 180 с.

УДК 551.515.2

Опасные явления погоды для авиации в районе аэродрома Иркутск

А. А. Антипина (a.dzhonson@bk.ru), А. В. Георгиева (georgieva.1999@bk.ru), А. Ц. Добчинова (dobchinova.a@mail.ru)

Иркутский государственный университет, г. Иркутск

Аннотация. Обсуждаются вопросы безопасности полетов с точки зрения влияния вертикальных сдвигов ветра, турбулентности, болтанки и обледенения воздушных судов на различных этапах пилотирования в районе аэродрома Иркутск. Особое внимание уделяется оценке сезонной и межгодовой динамики опасных явлений погоды в условиях меняющегося климата.

Ключевые слова: авиация, турбулентность, болтанка, сдвиги ветра, градиенты температуры, обледенение, аэродром, Иркутск.

Введение

Авиация – один из наиболее зависимых от изменений погоды видов транспорта. Наиболее сложными являются начальный и конечный этапы пилотирования, особенно в горных районах. На территории Иркутской области на деятельность авиации существенное влияние оказывают сложные условия погоды при сочетании низкой облачности и ограниченной дальности видимости. Наименее изучены такие опасные явления для авиации, как сдвиги ветра, турбулентность и обледенение воздушных судов.

Сдвиг ветра – это изменение направления и (или) скорости ветра в пространстве, включая восходящие и нисходящие потоки. Резкое изменение характера движения воздушных масс относительно воздушного судна индуцирует неустановившееся движение, при котором нарушается равновесие подъемной силы и составляющей веса. Следствием этого являются изменения, которые проявляются в отклонениях воздушного судна от расчетной траектории. Поэтому представляет интерес их исследование, в том числе для оценки вероятности данных событий и их влияния на пилотирование воздушных судов. Пульсации ветра, особенно изменения вертикальной скорости, вызывают резкие перемещения воздушного судна и являются причиной турбулентности, также представляющей опасность для авиации.

Обледенение – одно из неблагоприятных метеорологических явлений, от которого зависят безопасность и регулярность полетов воздушных судов. Сильное обледенение может привести к авиационному происшествию. Необходимыми и достаточными условиями для обледенения воздушного судна в полете являются наличие достаточного количества влаги в воздухе (облака, осадки), отрицательные температуры воздуха и поверхности воздушного судна. По данным Международной организации Гражданской авиации около 4 % авиационных происшествий в сложных метеорологических условиях приходится на обледенение. Поэтому знание экипажем метеорологических условий возникнове-

ния обледенения воздушных судов и его характеристик позволят повысить уровень безопасности полетов.

Результаты исследований

В работе проанализированы вертикальные сдвиги ветра в районе аэродрома Иркутск в тропосфере и стратосфере до уровня 26 км. В качестве исходных использованы ежедневные данные радиозондирования атмосферы в сроки 00 и 12 всв (гринвича) аэрологической станции Ангарск за январь 2007–2019 гг. Январь является не только одним из самых холодных месяцев, но и характеризуется значительными изменениями температуры воздуха, определяющих высокую вероятность вертикальных сдвигов ветра в районе аэродрома Иркутск. Установлено, что в тропосфере до уровня тропопаузы в исследуемый период чаще всего отмечались положительные значения сдвигов скорости ветра, преобладающие градации которых не превышали 10 м/с в различных слоях тропосферы (рис. 1, *а, б*). Выше уровня тропопаузы до 16 км примерно равновероятны положительные и отрицательные сдвиги скорости ветра (рис. 1, *в*), а в стратосфере вновь преобладали положительные отклонения средней скорости ветра по вертикали (рис. 1, *г*). Следует отметить, что максимальные значения сдвигов ветра (≥ 20–30 м/с), которые характеризуются увеличением скорости ветра с высотой, отмечались в слоях нижней (Земля – 1,5 км) и средней тропосферы (3–5 км), тогда как ослабление ветра характерно для нижней стратосферы – слой 100–150 гПа (16–19 км).

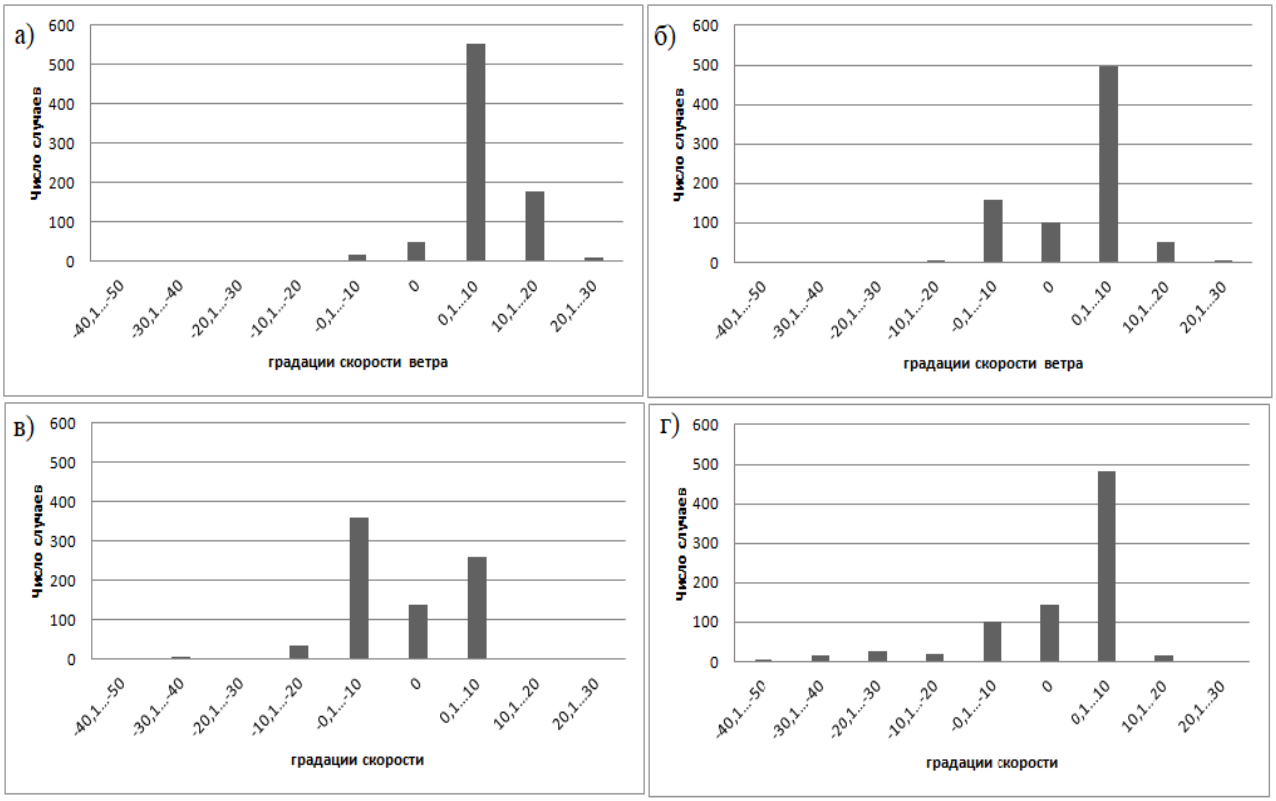


Рис. 1. Распределение числа случаев различных градаций вертикальных сдвигов по скорости ветра: Земля-850 гПа (а), 850–700 гПа (б), 250–200 гПа (в) и 200–150 гПа (г) в районе аэродрома Иркутск в январе 2007–2019 гг.

В распределении сдвигов по направлению ветра в нижнем 1,5-км слое тропосферы в районе аэродрома Иркутск в исследуемый нами период преобладали отрицательные значения, которые характеризуют адвекцию тепла (рис. 2, *а*). В вышележащем слое до уровня 5 км примерно равновероятны положительные и отрицательные сдвиги по направлениям ветра с преобладанием градаций ≤50° (рис. 2, *б*). Далее до высоты 200 гПа примерно равновероятны положительные и отрицательные сдвиги в направлении ветра (рис. 2, *в*), а выше высоты 12 км преобладала адвекция холода на высотах (рис. 2, *г*).

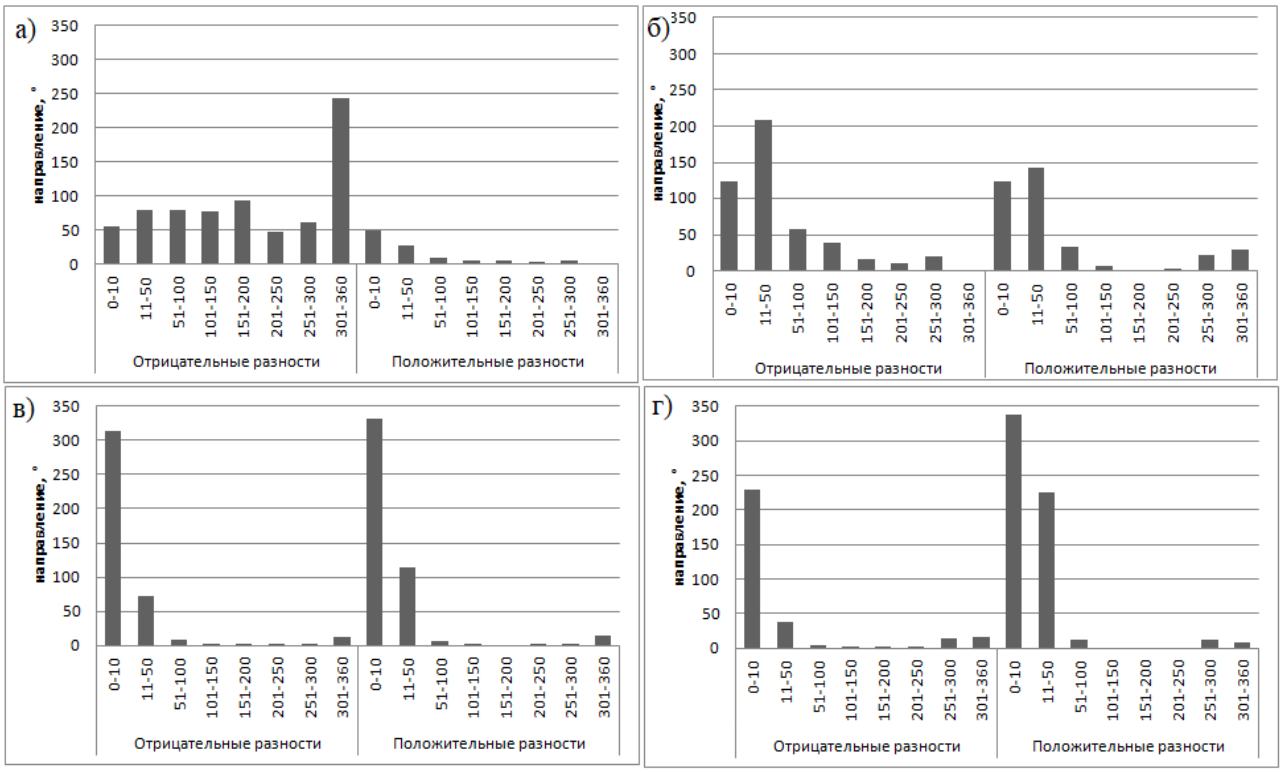


Рис. 2. Распределение числа случаев различных градаций вертикальных сдвигов по направлению ветра: Земля – 850 гПа (а), 850–700 гПа (б), 400–300 гПа (в) и 200–150 гПа (г) в районе аэродрома Иркутск в январе 2007–2019 гг.

Для оценки термической составляющей болтанки воздушных судов в районе аэродрома Иркутск по данным за 1948–2019 гг. рассчитывались разности температуры воздуха на этапах взлета и посадки воздушных судов в нижнем 1,5-километровом слое атмосферы. Установлено, что наиболее выражена термическая составляющая турбулентности в нижней тропосфере летом (рис. 3), когда, согласно выполненным нами расчетам, значения вертикальных градиентов температуры воздуха были максимальными. В холодный период года с ноября по январь изменчивость температур наиболее выражена в многолетней динамике, на что указывают максимальные значения средних квадратических отклонений рассматриваемого параметра.

Вертикальный градиент температуры воздуха (°С/100 м) в зимние месяцы в районе аэродрома Иркутск варьировал от 0,15 до 0,5, а весной и летом, когда атмосфера наиболее неустойчивая, они составляли в среднем 0,4–0,5. Ис-

следование многолетней динамики вертикальных градиентов температуры воздуха в исследуемый период 1948–2019 гг. на этапах взлета и посадки воздушных судов не выявило статически значимых тенденций в изменениях параметра устойчивости атмосферы. Таким образом, несмотря на то что в настоящее время темпы изменений климата в Иркутской области возросли, вертикальных градиенты не демонстрируют трендовой составляющей, что можно объяснить тем, что в тропосфере однонаправленная тенденция повышения температур проявляется не только у поверхности Земли, но и в вышележащих слоях.

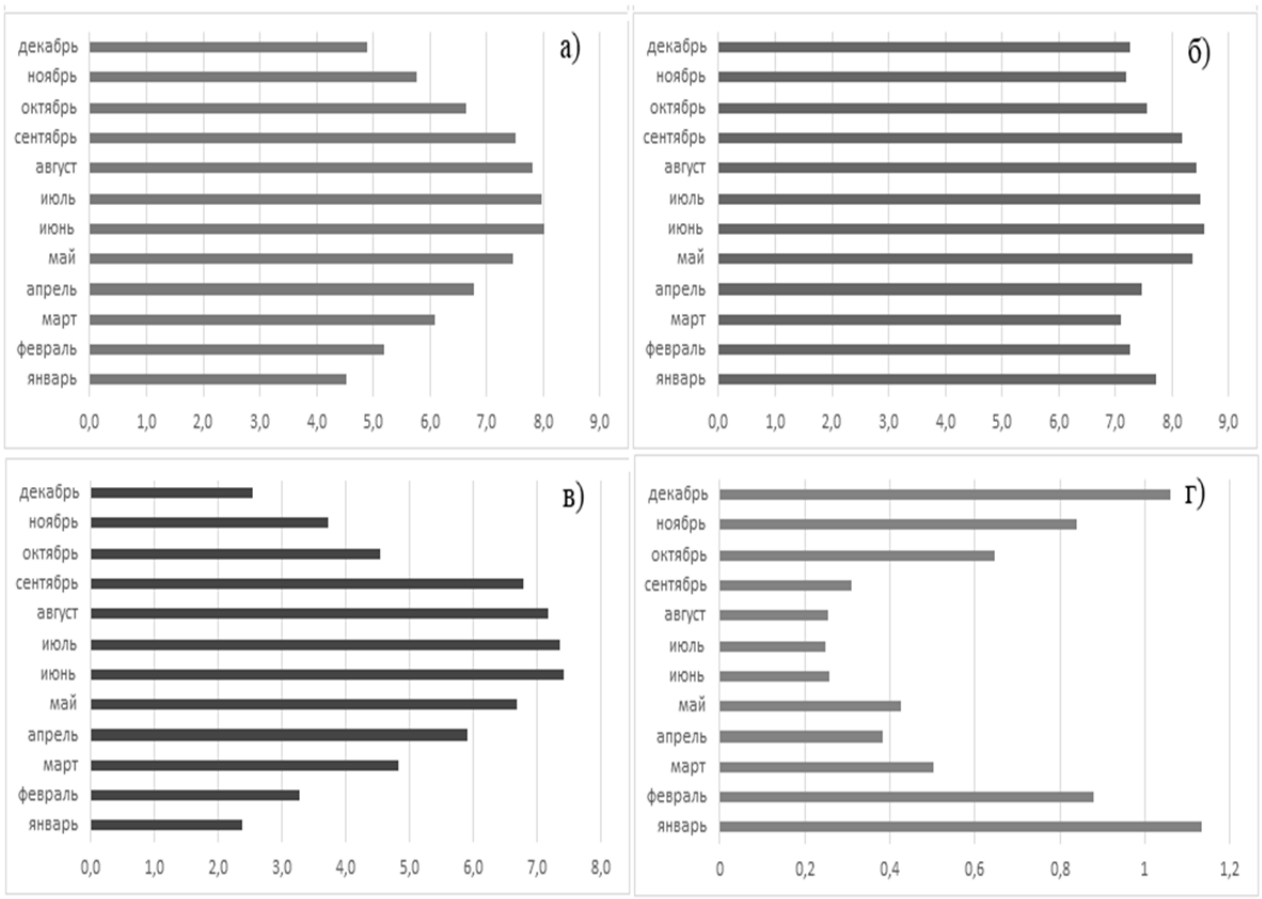


Рис. 3. Средние (а), максимальные (б) и минимальные (в) значения, средние квадратические значения разности температур (°С) в нижнем 1,5-километровом слое атмосферы в районе аэродрома Иркутск в 1948–2019 гг.

Оценка вероятности обледенения самолетов в районе аэродрома Иркутск у поверхности Земли и на высотах стандартных изобарических поверхностей АТ-850 гПа (1,5 км), АТ-700 гПа (3 км) и АТ-500 гПа (5 км), а также вероятности обледенения в облаках показала следующее. У поверхности Земли наиболее высокая вероятность обледенения самолетов отмечается в основном в холодный период года – с октября по март. В настоящее время на фоне наблюдаемых тенденций глобального и регионального повышения температур вероятность обледенения уменьшается в переходные сезоны года – весной и осенью, но, увеличилась в феврале. На высоте 1,5 км вероятность обледенения, наоборот, в феврале и марте уменьшалась, на уровне 3 км она возросла в апреле, а на

уровне 5 км не было выявлено четко выраженных тенденций в изменениях вероятности обледенения воздушных судов в районе аэродрома Иркутск.

Для оценки влияния облачности на возможное обледенение воздушных судов рассчитывались аномалии уходящей радиации от верхней границы облаков (Вт/м^2) по отношению к средним значениям за исследуемый период (1948–2019 гг.). Установлено, что в последние десятилетия (2000–2019 гг.) в период с апреля по октябрь увеличивается вероятность обледенения воздушных судов в облаках в районе аэродрома Иркутск.

Выводы

Проведенное исследование показало, что на этапах взлета и посадки, а также пилотирования воздушных судов вблизи тропопаузы в январе 2007–2019 гг. в районе аэродрома Иркутск преобладали положительные сдвиги скорости ветра, которые указывали на усиление ветра. Наиболее сильные вертикальные сдвиги ветра были связаны с вторжением арктического воздуха с северо-восточными потоками на высотах, ориентированными с территории Якутии.

На этапах взлета и посадки превалировали факторы, указываюшие на адвекцию тепла, на высотах 5–10 км примерно равновероятны случаи влияния адвекции холода и тепла, а выше 12 км превалировал вклад адвекции холода на высотах.

Вероятность болтанки воздушных судов в районе аэродрома Иркутск максимальная зимой и летом, причем зимой преимущественно вне зоны облаков, а летом в облаках, хорошо развитых по вертикали. Усиление турбулентности на начальном и заключительном этапах пилотирования наиболее вероятно при наличии зоны повышенных барических и термических градиентов в условиях сближения циклона и антициклона. Кроме того, такие условия часто отмечаются при усилении ветра фронтального характера и под кромкой кучево-дождевых облаков.

В период 1948–2019 гг. не выявлено четко выраженных тенденций в изменениях термической составляющей турбулентности в районе аэродрома Иркутск. Однако для авиационного прогноза важно учитывать, что характеристики турбулентности наиболее изменчивые с ноября по февраль.

При проведении предполетной подготовки на аэродроме Иркутск следует учитывать, что вероятность обледенения воздушных судов у поверхности Земли возрастает в феврале, а для полетов малой авиации – весной. В период с апреля по октябрь высока вероятность обледенения в зоне облаков и атмосферных осадков.

Список литературы

1. *Баранов А. М., Солонин С. В.* Авиационная метеорология. Л. : Гидрометеоиздат, 1981. 384 с.
2. Руководство по прогнозированию метеорологических условий для авиации / под ред.: К. Г. Абрамович, А. А. Васильева. Л. : Гидрометеоиздат, 1985. 304 с.

УДК 551.501

Исследование неустойчивости Кельвина – Гельмгольца в Иркутской области

А. А. Антипина (a.dzhonson@bk.ru), А. В. Георгиева (georgieva.1999@bk.ru), А. Ц. Добчинова (dobchinova.a@mail.ru)

Иркутский государственный университет, г. Иркутск

Аннотация. По данным наблюдений облачности Кельвина – Гельмгольца в разных физико-географических районах Иркутской области впервые выполнен анализ метеорологических и синоптических условий их образования на примере теплого периода 2020 г. Полученные данные хорошо отражают физический механизм волновой и сдвиговой структуры облачности, проявляется вклад крупномасштабной адвекции тепла и задерживающих слоев в нижней и средней тропосфере.

Ключевые слова: Иркутская область, облака, неустойчивость, волны Кельвина-Гельмгольца, теплый фронт, сдвиги ветра, инверсия температур.

Введение

Неустойчивость Кельвина – Гельмгольца представляет интерес для метеорологов, поскольку характеризует состояние атмосферы при наличии сдвигов ветра, которые оказывают существенное влияние как на процессы формирования циклонов и динамику атмосферных фронтов, а также условия пилотирования воздушных судов. Впервые данные явления были описаны Гельмгольцем и Кельвином в середине XIX в. Отмечалось, что в сечении, перпендикулярном границе раздела двух сред, различающихся скоростями, профиль скорости имеет точку перегиба (рис. 1). Как показал Рэлей, течение с наличием в профиле скорости точки перегиба является неустойчивым. В дальнейшем Рэлеем было установлено, что данное условие является необходимым (но не достаточным) для возникновения неустойчивости движения жидкости или газа. Например, течение Пуазейля теряет устойчивость при начальном параболическом профиле скорости, не имеющем точки перегиба. Экспериментальные и численные исследования показывают, что в отсутствие точки перегиба неустойчивость возможна, но, также демонстрируют развитие неустойчивости при большом разбросе различных параметров [1].

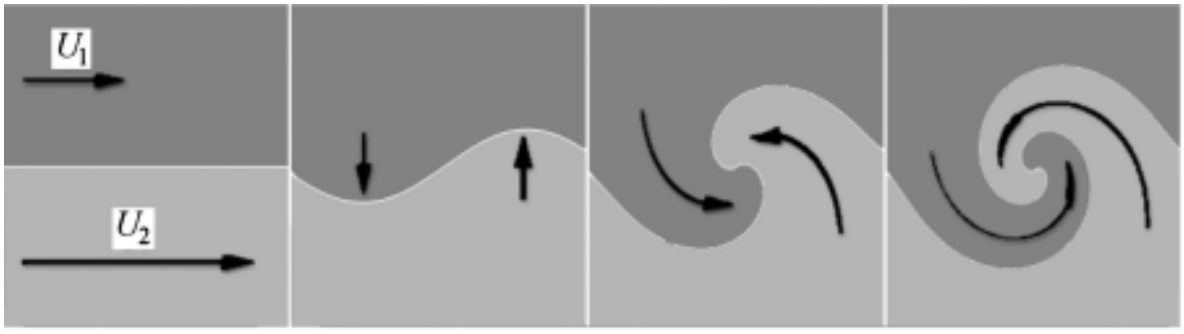


Рис. 1. Схема возникновения неустойчивости Кельвина – Гельмгольца в сдвиговом слое. Более светлая жидкость более легкая

В качестве примеров проявления данной неустойчивости в природе можно назвать сдвиговую неустойчивость при формировании облачных полей и ветровых волн в океанах и морях. Интересно, что они характерны и для физических процессов, протекающих на Солнце и в атмосфере планет солнечной системы (рис. 2).

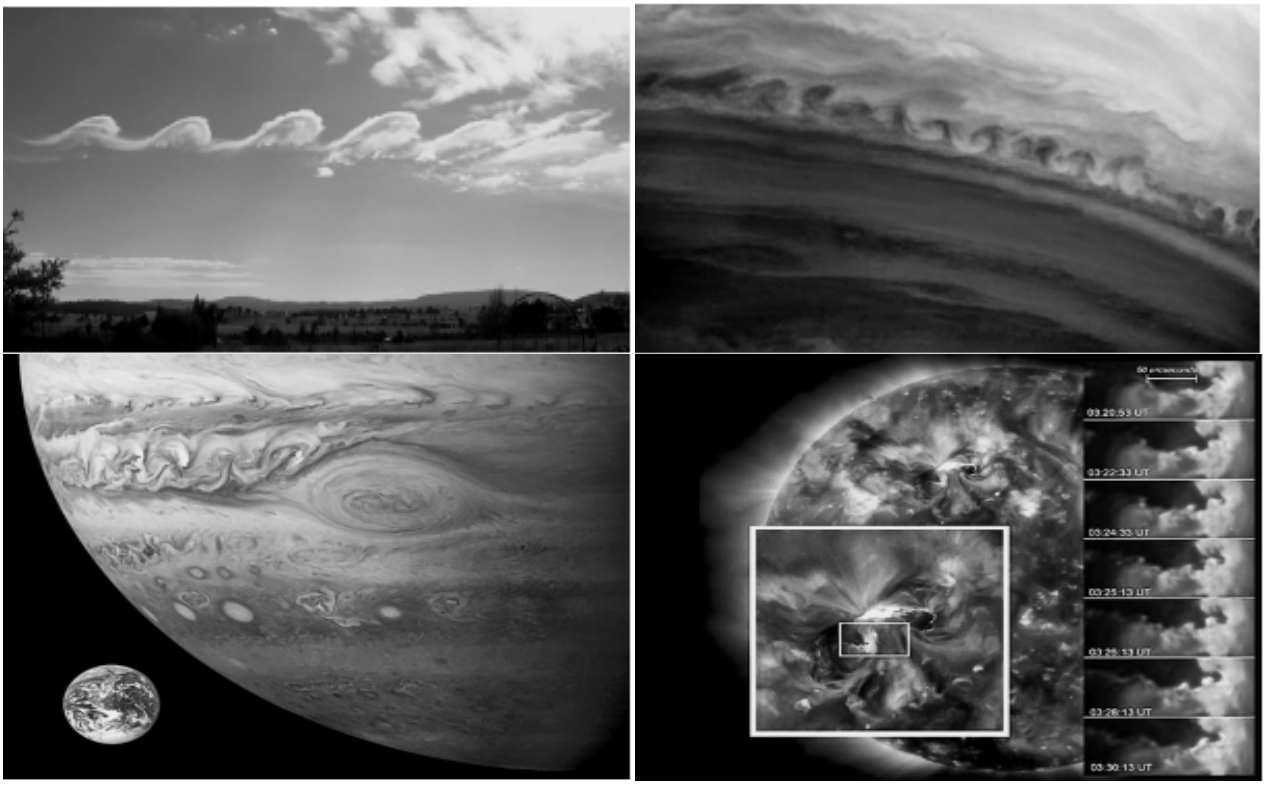


Рис. 2. Примеры неустойчивости Кельвина – Гельмгольца в природе

Неустойчивость Кельвина – Гельмгольца можно охарактеризовать как неустойчивые мелкомасштабные движения, происходящие вертикально и поперечно. Как правило, неустойчивость возникает, если число Ричардсона меньше 0,25. В метеорологии с проявлением данного вида неустойчивости связывают облака с гравитационным сдвигом или облака Кельвина – Гельмгольца. Для наличия сдвигов ветра благоприятны температурные инверсии, когда взаимодействующие слои воздуха имеют разную плотность и скорость ветра. При этом, как правило, верхние слои воздуха движутся с большей скоростью, и чем быстрее воздух поднимает верхний слой облака, через которое он проходит, тем более благоприятны условия для их формирования (рис. 3).

Следует отметить, что инверсии температуры – слои более теплого и сухого воздуха, что свойственно также слоям фронтальной температурной инверсии, поэтому неустойчивость облаков Кельвина – Гельмгольца нередко появляется при прохождении теплого атмосферного фронта. Так как теплый воздух более сухой, то этим можно объяснить сравнительно небольшую продолжительность жизненного цикла облаков Кельвина – Гельмгольца. Также благоприятные условия для их образования возникают в горных регионах и вблизи морских побережий. Считается, что неустойчивость может проявляться во всех ярусах облаков: в низких слоисто-кучевых, в высококучевых облаках среднего яруса и в перисто-кучевых облаках верхнего яруса.



Рис. 3. Схема формирования облаков Кельвина – Гельмгольца
в слоях температурной инверсии

Результаты исследований

Явление неустойчивости Кельвина – Гельмгольца – это явление, косвенно отражающее состояние устойчивости атмосферы, поэтому исследование метеорологических и синоптических условий их возникновения может стать ключевым фактором для более глубокого понимания физической природы его проявлений в атмосфере. В данной работе выполнен анализ синоптических условий наблюдаемых нами облаков Кельвина – Гельмгольца на территории Иркутской области 13 мая и 1 августа 2020 г. (рис. 4, 5) в разных районах – г. Иркутск, который расположен на юге Иркутско-Черемховской равнины и Усть-Илимск, который находится на северо-западе области. Интересно, что в летний период 2020 г. на территории Иркутской области мы дважды наблюдали эти редкие облака при развитии неустойчивости Кельвина – Гельмгольца.

Анализ приземных и высотных карт погоды показал, что облака Кельвина – Гельмгольца отмечались в Иркутске 13.05.2020 при прохождении теплого атмосферного фронта одного из циклонов, которые смещались сериями вдоль 50–60° с. ш. (рис. 6). В термобарическом поле отмечались значительные термические градиенты, фронтальная облачность хорошо прослеживалась на космическом снимке облачного покрова. По данным вертикального зондирования во всех слоях тропосферы отмечались сильные сдвиги скорости ветра, в слое 850–700 гПа слабо выраженная инверсия температуры воздуха.



Рис. 3. Неустойчивость Кельвина-Гельмгольца над г. Иркутском
13.05.2020 в 20:05 по местному времени (фото Георгиевой А. В.)

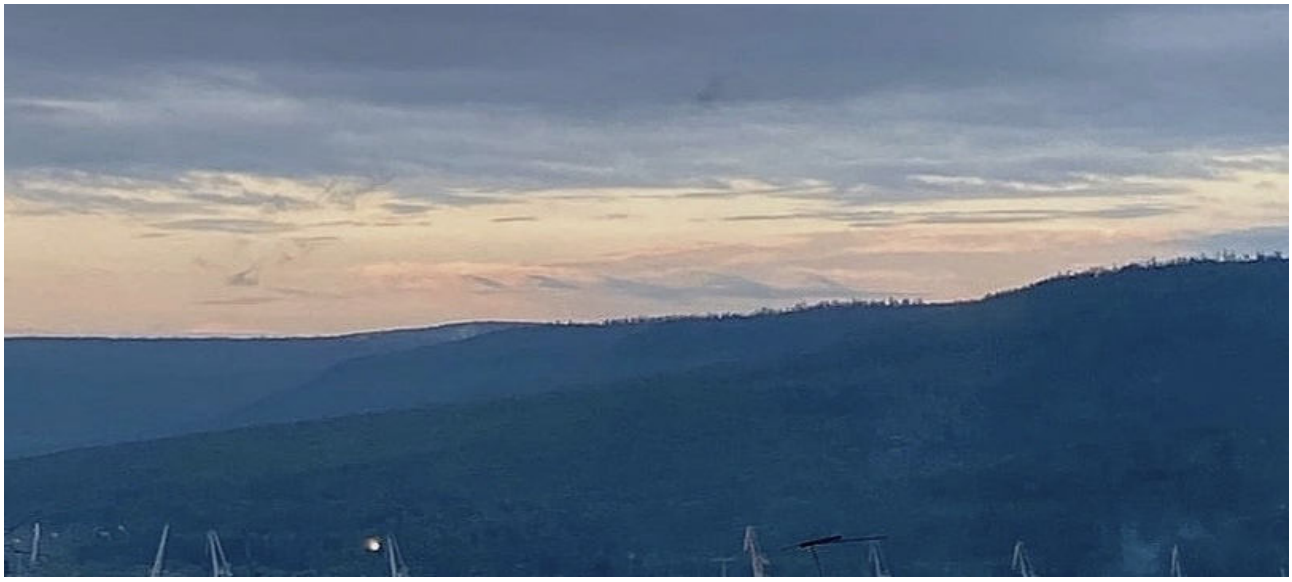


Рис. 4. Неустойчивость Кельвина-Гельмгольца над г. Усть-Илимском 01.08.2020 в 21:00 по местному времени (фото Георгиевой А. В.)

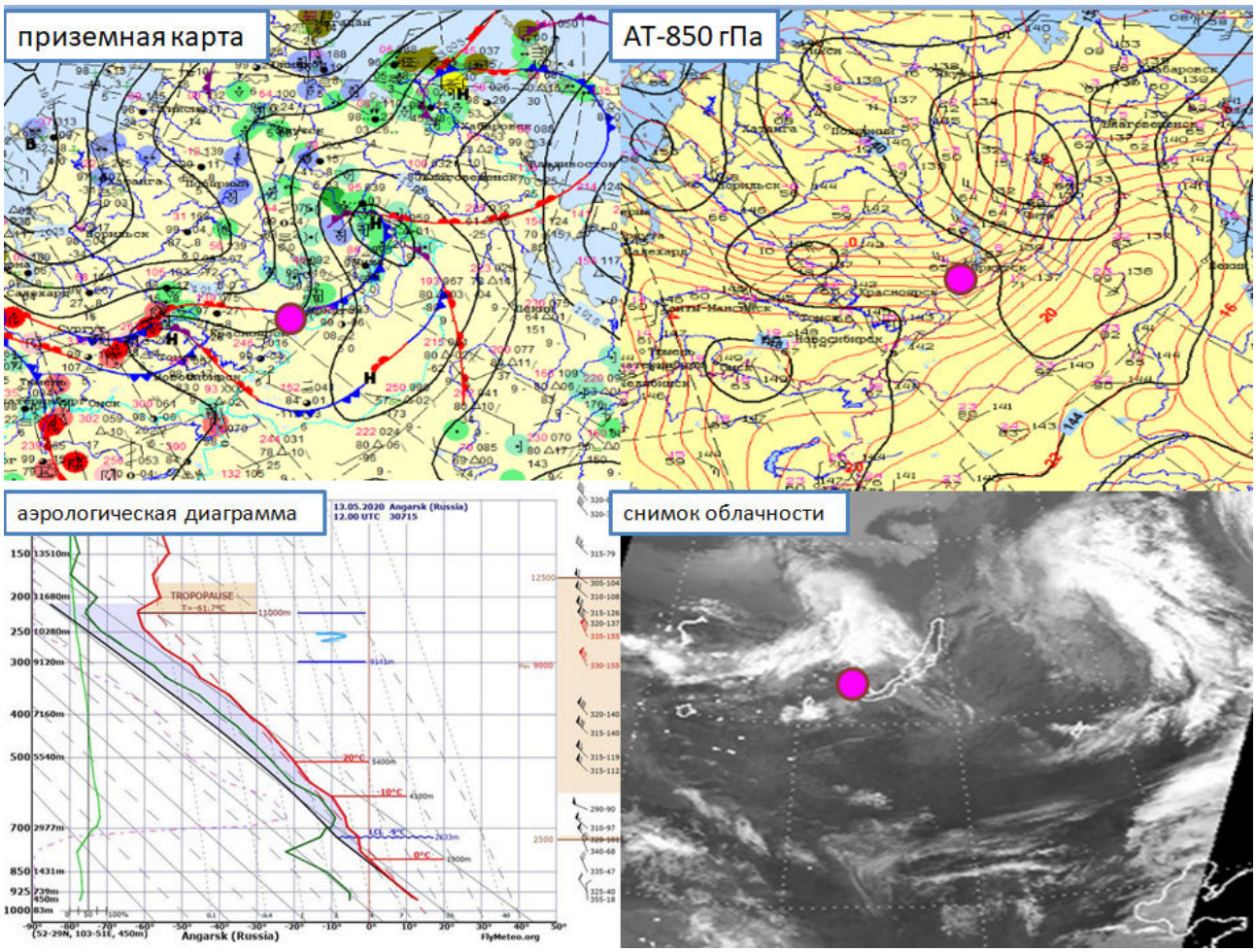


Рис. 6. Приземная и термобарическая карта (по данным Гидрометцентра России https://meteoinfo.ru), аэрологическая диаграмма (по данным https://flymeteo) и космический снимок облачности (по данным архива ИСЗФ СО РАН) 13.05.2020 в 12 всв
Точкой отмечен г. Иркутск

Для случая наблюдений облаков Кельвина – Гельмгольца над г. Усть-Илимском 01.08.2020 согласно данным синоптических карт на рис. 7 прослеживается влияние адвекции тепла при развитии ложбины циклона с центром над Забайкальем. По данным аэрологического зондирования сдвиги скорости ветра отмечаются в нижней и средней тропосфере, по направлению ветра в верхней тропосфере, а в слое 700–500 гПа два слоя приподнятой инверсии интенсивностью 0,2 и 1,4 °С и мощностью 200 и 212 м.

Выводы

Проведенное исследование позволило впервые для территории Иркутской области начать исследование условий образования редких форм облаков Кельвина – Гельмгольца, для развития которых характерно наличие сдвигов ветра и плотности воздуха. Данные формы облачности наблюдались в 2020 г. в теплое время года на севере и юге Иркутской области. В обоих случаях они отмечались при адвекции теплого воздуха и наличии сдвигов ветра (усиления скорости ветра по высотам преимущественно в нижней и средней тропосфере) и наличии задерживающих слоев на высотах от 1,5 до 5 км.

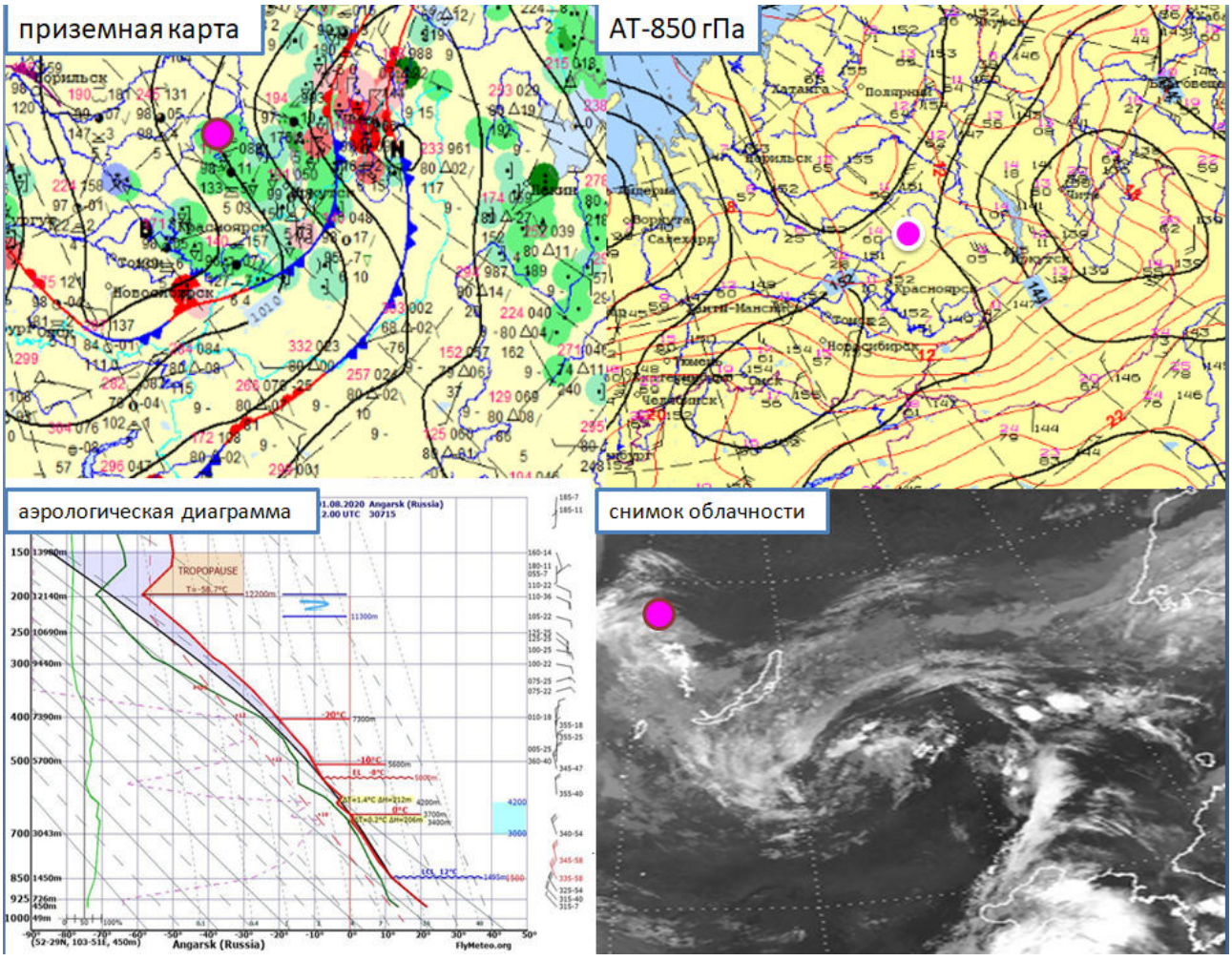


Рис. 7. Приземная и термобарическая карта (по данным Гидрометцентра России https://meteoinfo.ru), аэрологическая диаграмма (по данным https://flymeteo) и космический снимок облачности (по данным архива ИСЗФ СО РАН) 01.08.2020. в 12 всв
Точкой отмечен г. Усть-Илимск

Такие условия тесно согласуются с механизмом формирования неустойчивости Кельвина – Гельмгольца. Обращает внимание, что при образовании облаков над г. Иркутском отмечался динамически значимый атмосферный фронт и более сильные ветры по высотам, тогда как в формировании сдвиговых волн и неустойчивости над г. Усть-Илимском, скорее всего, дополнительный вклад внесли горные волны на подветренных склонах возвышенностей. На наш взгляд, следует продолжить начатое исследование и на большем количестве исходных данных типизировать условия их формирования, которые играют важную роль для оценки условий пилотирования воздушных судов, которые существенно осложняются при наличии сдвигов ветра на высотах.

Список литературы

1. *Биркгоф Г.* Гидродинамика: Методы, факты : подобие : пер. со 2-го перераб. англ. изд. / под ред. Гуревича М. И. и Смирнова В. А. М. : Изд-во иностр. лит., 1963. 244 с.

2. *Евстигнеев Н. М., Магницкий Н. А.* Нелинейная динамика начальной стадии ламинарно-турбулентного перехода в задаче развития неустойчивости Кельвина-Гельмгольца // Труды ИСА РАН. 2013. Т. 63. С. 45–46.

УДК 551.506.3

Метеорологические условия образования гололедно-изморозевых отложений на территории Иркутской области

И. И. Леонов (leonov@geogr.msu.ru), Н. Н. Соколихина (natalia.sokolikhina@gmail.com)

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, г. Москва

Аннотация. Приведено описание метеорологических условий формирования различных видов голодно-изморозевых обложений на территории Иркутской области.

Ключевые слова: гололед, изморозь, опасные явления погоды, неблагоприятные явления погоды.

Введение

В настоящее время на кафедре метеорологии и климатологии географического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова ведется работа по изучению опасных гидрометеорологических явлений на территории России. В типовой перечень опасных метеорологических явлений, помимо других, входят сильные гололедно-изморозевые отложения, вызывающие обледенение поверхности земли, деревьев, линий электропередач, технических средств и различных объектов хозяйственной деятельности человека [3]. Статистика свидетельствует о возрастающем во всем мире ущербе от опасных погодных и климатических явлений [5]. Данная статистика применима и к территории России, где наблюдается устойчивый тренд к увеличению количества опасных явлений погоды [2]. Наиболее сильно по отношению к гололедно-изморозевым явлениями этот тренд проявляется в последние 10 лет.

Для минимизации экономических потерь необходимо проводить исследование метеорологических условий формирования гололедно-изморозевых отложений на территории России для дальнейшей разработки методов их прогнозирования.

Обледенение в атмосфере в классическом понимании – это отложение льда любого вида на поверхности сооружений, ветвях деревьев, проводах, на покрытиях дорог, аэродромов и пр. [4].

В работе рассмотрены условия формирования двух основных типов гололедно-изморозевых отложений. Первый тип – это обледенение, возникающие в процессе замерзания выпадающих атмосферных осадков (гололед). Второй тип – это внутриоблачное обледенение, возникающее в процессе сублимации водяного пара или замерзания переохлажденных капель воды на различных объектах (кристаллическая и зернистая изморозь).

Материалы и методика

Исследование условий формирования гололедно-изморозевых отложений проводилось по данным наземных метеорологических станций, доступных на сайте ВНИИГМИ-МЦД [1]. Из архива о срочных наблюдениях были отобраны 25 метеорологических станций Иркутской области (табл.). В ходе работы был рассмотрен период с 1981 по 2010 г.

Таблица

Список метеорологических станций Иркутской области

Индекс	Название
24713	Наканно
29393	Червянка
29594	Тайшет
29698	Нижнеудинск
29789	Верхняя Гутара
30028	Ика
30069	Перевоз
30209	Ершово
30219	Максимово
30230	Киренск
30252	Мамакан
30309	Братск
30328	Орлинга
30337	Казачинское
30437	Карам
30504	Тулун
30521	Жигалово
30536	Баргузинский заповедник
30612	Балаганск
30627	Баяндай
30703	Инга
30710	Иркутск-обсерватория
30716	Хомутово
30727	Большое Голоустное
30815	Хамар-Дабан

Для каждой из станций были отобраны метеорологические параметры, которые необходимо учитывать в первую очередь: температура воздуха по сухому термометру, относительная влажность воздуха, скорость и направление ветра для каждого срока, когда были зафиксированы погодные явления, которые могут приводить к образованию гололедно-изморозевых явлений.

В соответствии с кодом КН-01, образование изморози можно ожидать при наблюдении в срок просвечивающего или сплошного тумана с отложением изморози (код 48 и 49). Образование гололеда ожидается при наблюдении слабой, умеренной или сильной замерзающей мороси или замерзающего дождя, либо ледяного дождя (коды 56, 57, 66, 67, 79). Также учитывались замерзающая морось или дождь за последний час (код 24). Кроме этого, отбирались любые жидкие осадки, выпадающие при температуре воздуха ниже 0 °С (коды 50–55, 58–59, 60–65, 68–69, 80–82).

Далее для каждого явления были построены графики дифференциальных функций распределения температуры, относительной влажности воздуха и скорости ветра в момент начала явления.

Результаты

В результате обработки данных были отобраны 1772 случая возможного образования изморози и 167 случаев образования гололеда. Ниже представлена диаграмма, показывающая количество различных метеорологических явлений, которые могли приводить к образованию гололедно-изморозевых отложений (рис. 1).

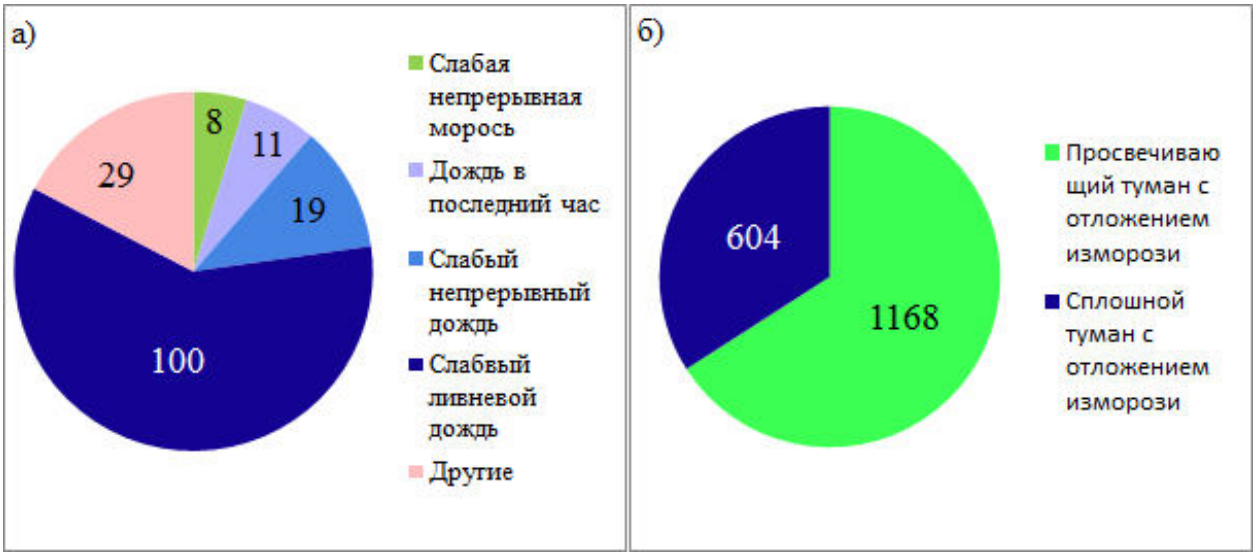


Рис. 1. Количество погодных явлений, при которых вероятно образование а) гололеда, б) изморози

Для Иркутской области характерно наибольшее количество явлений, связанных с образованием изморози, так как данный регион располагается преимущественно в континентальной восточносибирской области умеренного климатического пояса. Зимой температура воздуха очень часто опускается ниже 30 °С, что создает благоприятные условия для образования кристаллической изморози. Фронтальные процессы не играют такой важной роли в формировании гололедно-изморозевых отложений как, например, фронтальные процессы на Юге России. С этим связано небольшое количество зафиксированных случаев образования гололеда.

В коде КН-01 явления погоды под номерами 48 и 49 (просвечивающий и сплошной туман с отложением изморози) не разделяются на изморозевые отложения двух видов: зернистую и кристаллическую изморозь, хотя эти различия имеют принципиальную важность. Кристаллическая изморозь – продукт сублимации водяного пара, тонкие, нитевидные образования льда, разрушающиеся при воздействии ветра и, как правильно, неспособные привести к неблагоприятным последствиям. Зернистая изморозь – продукт намерзания переохлажденных капель воды на предметах. Такая изморозь более прочная, имеет большую плотность и нередко достигает опасных значений.

На рисунке ниже представлена дифференциальная функция распределения температуры воздуха в момент регистрации на станциях тумана с отложением изморози (рис. 2). На графике отчетливо видны две моды. Первая мода располагается в интервале от –45 до –35 °С. Эта мода соответствует условиям формирования кристаллической изморози. Вторая мода (от –20 до –5 °С) описывает температурные условия формирования зернистой изморози. Однако кристаллическая изморозь обычно регистрируется намного чаще, чем зернистая, а зернистая изморозь обычно имеет более «теплые» условия формирования (от –16 до 0 °С), поэтому можно предполагать, что часть явлений из интервала от 16 °С и ниже также принадлежит к условиям формирования кристаллической изморози.

Влажностные условия формирования изморозевых отложений описаны дифференциальной функцией распределения относительной влажности (рис. 3). Функция имеет два экстремума. Первый экстремум, соответствующий 75–80 % описывает условия формирования кристаллической изморози, которая может формироваться при не очень высоких значениях относительной влажности воздуха. Второй экстремум 95–100 % соответствует зернистой изморози, для формирования которой необходимо наличие больших значений относительной влажности воздуха.

Изморозь, как правило, образуется при низкой скорости ветра или при его отсутствии. Дифференциальная функция распределения скорости ветра при образовании изморози хорошо согласуется с этими данными (рис. 4). Больше половины случаев туманов с отложением изморози наблюдалось во время штиля. Вероятно, что больша́я доля туманов наблюдавшихся при нулевой скорости ветра приводила к образованию кристаллической изморози, а при ненулевой скорости ветра к образованию зернистой изморози.

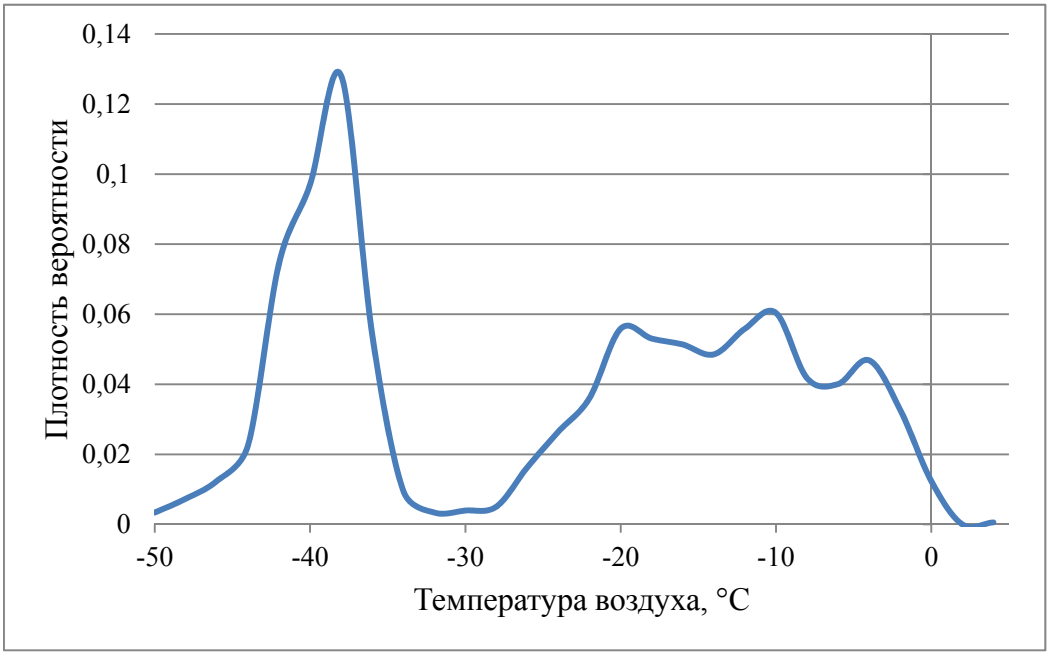


Рис. 2. Дифференциальные функции распределения температуры воздуха во время образования изморози



Рис. 3. Дифференциальные функции распределения относительной влажности воздуха во время образования изморози

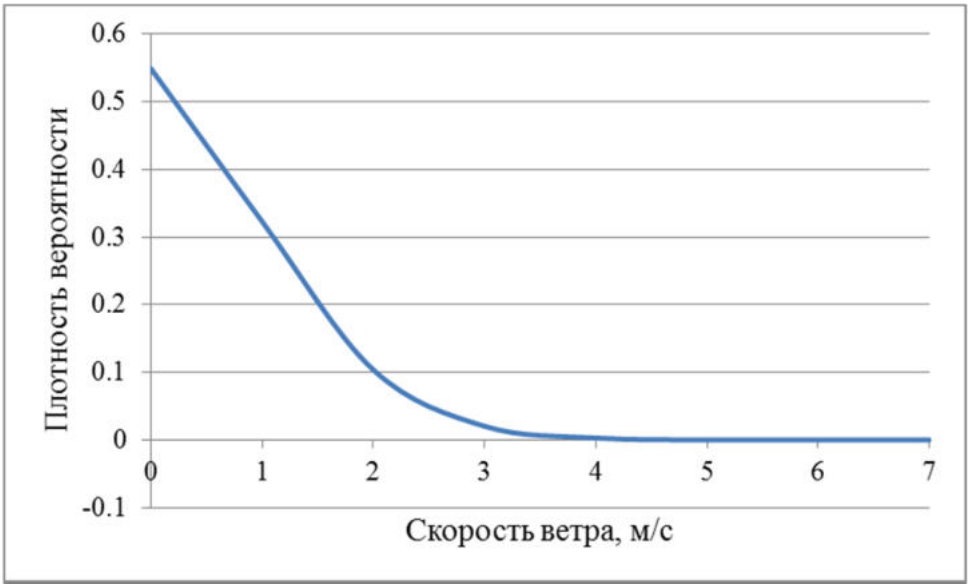


Рис. 4. Дифференциальные функции распределения скорости ветра во время образования изморози

В направлении ветра не наблюдается какой-либо закономерности, это связано с его небольшой скоростью, а также со сложным рельефом местности, из-за которого сильное влияние в распределении направления ветра имеют микроклиматические особенности.

Гололед чаще всего образуется при около нулевой отрицательной температуре воздуха, данные срочных наблюдений на метеорологических станциях Иркутской области хорошо согласуются с этим фактом (рис. 5). Около 95 % случаев отобранных явлений погоды наблюдалось при температуре воздуха выше –5 °С.

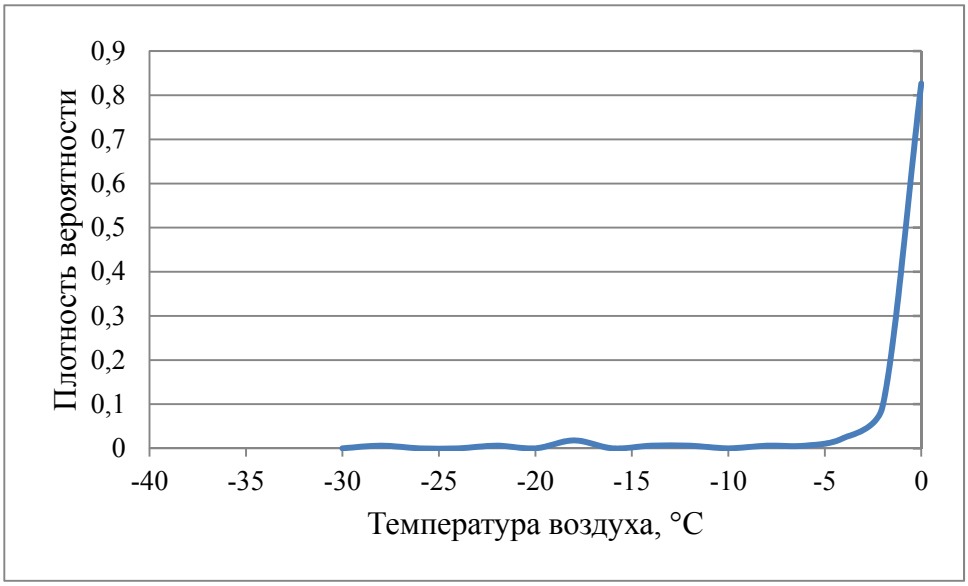


Рис. 5. Дифференциальные функции распределения температуры воздуха во время образования гололеда

Образование гололеда чаще всего происходит во время нахождения территории в области теплого сектора циклона. С этим связано наличие высокой относительной влажности воздуха во время выпадения жидких осадков при отрицательной температуре воздуха (рис. 6).



Рис. 6. Дифференциальные функции распределения относительной влажности воздуха во время образования гололеда

Отсутствие ветра или его небольшая скорость не является необходимым условием образования гололеда. Однако выбранные в качестве гололедообразующих явлений, в большинстве случаев, происходили при скорости ветра меньше 5 м/с (рис. 7).



Рис. 7. Дифференциальные функции распределения скорости ветра во время образования скорости ветра

Преобладающее направление ветра при образовании гололедных отложений, так же как и в случае с исследованием изморози, выявить не удается. Причины такие же, сильные различия рельефа и условий подстилающей поверхности на метеорологических станциях Иркутской области.

Выводы

В ходе работы были рассмотрены метеорологические условия образования гололедно-изморозевых отложений на территории Иркутской области. Для каждого типа отложений были выбраны явления погоды, приводящие к гололедно-изморозевым отложениям определенного типа в соответствии с кодом КН-01.

На основании этих данных были построены функции распределения, описывающие температурно-влажностные и ветровые условия образования отложений каждого типа.

Полученные результаты могут быть использованы для усовершенствования методик прогнозирования гололедно-изморозевых явлений, в том числе и численных прогнозов.

Список литературы

1. Описание массива срочных данных об основных метеорологических параметрах на станциях России : Свидетельство о гос. регистрации базы данных № 2014620549 ВНИИГИМЦД / О. Н. Булыгина, В. М. Веселов, В. Н. Разуваев, Т. М. Александрова. URL: http://meteo.ru/data/163-basicparameters#описание-массива-данных

2. *Голубев А. Д., Жемчугова Т. Р., Сидоренков Н. С.* Опасные гидрометеорологические явления // Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2012 год / Росгидромет. М., 2013. С. 63–67.

3. РД 52.04.563-2002. Инструкция. Критерии опасных гидрометеорологических явлений и порядок подачи штормового сообщения. В. И. Кондратюк (руководитель разработки), Е. А. Федорова (ГГО), Н. Н. Бобровицкая (ГГИ), В. Ф. Гридасов (ВНИИСХМ), Ю. В. Лупачев (ГОИН).

4. *Хромов С. П., Мамонтова Л. И.* Метеорологический словарь. Л. : Гидрометеоиздат, 1974. 586 с.

5. 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 / eds. by T. F. Stocker, D. Qin, G. -K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley. Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom and New York, USA, 2013. 1535 p.

УДК 551.555(571.53)

Исследование ветрового режима на аэродромах Иркутской области и Республики Бурятия

С. А. Линникова (svetlanchik.g@rambler.ru)[1], С. В. Олемской (olemskoy@mail.ru)[1,2]

[1] Иркутский государственный университет, г. Иркутск
[2] Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск

Аннотация. Статья посвящена исследованию ветрового режима на аэродромах Иркутской области и Республики Бурятия по данным ежедневных метеорологических наблюдений. Рассмотрен многолетний режим средней и максимальной скорости ветра, рассчитана повторяемость различных градаций направлений ветра. С точки зрения негативного влияния на взлет и посадку воздушных судов сильного ветра выделяются аэродромы Улан-Удэ и Иркутск, где сказывается влияние неоднородного рельефа и крупных городов, а также повышенных термических и барических градиентов при смещении южных циклонов.

Ключевые слова: Иркутская область, Республика Бурятия, сильный ветер, орография, роза ветров.

Введение

Ветром называют движение воздуха относительно земной поверхности. Ветер характеризуется скоростью и направлением и, таким образом, представляет собой вектор, который может раскладываться на три ортогональные составляющие. Относительно траектории полета воздушного судна – это встречный/попутный (продольный) ветер, боковой ветер и восходящий/нисходящий поток (вертикальная составляющая). За исключением особых случаев, вертикальная составляющая ветра в атмосфере обычно мала в сравнении с обеими горизонтальными компонентами. Поэтому часто, когда говорят о ветре, принимают в расчет только горизонтальный ветер, дующий параллельно земной поверхности [6].

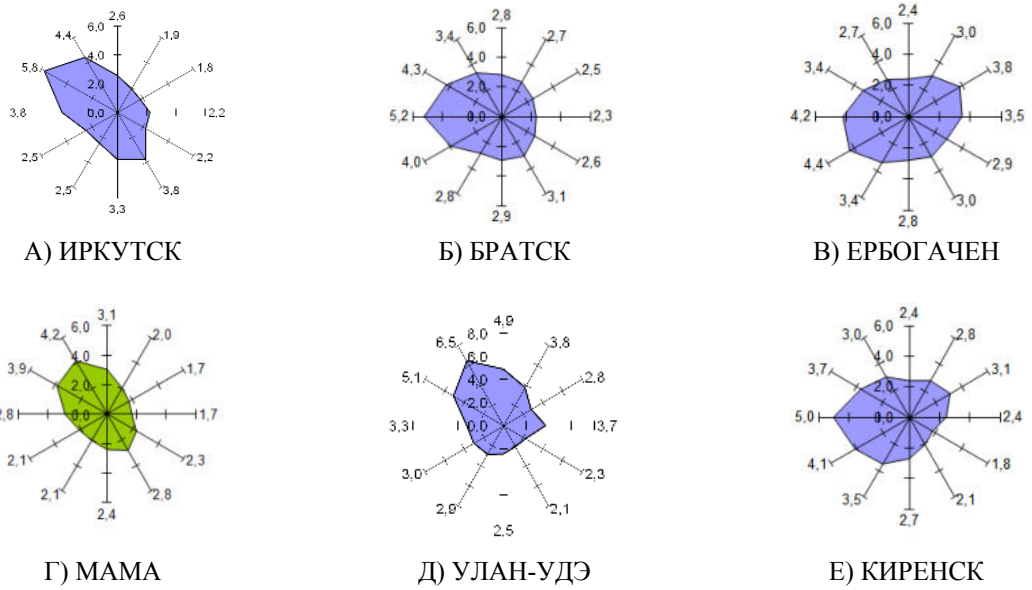
Среди прочих характеристик физического состояния атмосферы ветер оказывает наиболее существенное влияние на движение воздушного судна на всех этапах полета. Сильные сдвиги ветра в нижнем слое также оказывают резкое воздействие на ВС. Они включены в перечень опасных для авиации явлений погоды [1; 5].

Влияние ветра на параметры движения воздушного судна наиболее существенно на малых высотах, и в особенности при взлете и посадке. Например, взлет и посадку самолета лучше всего производить против ветра, поскольку встречный ветер увеличивает воздушную скорость и подъемную силу, в результате уменьшается длина разбега самолета по взлетно-посадочной полосе при взлете и длина пробега во время посадки. Поэтому при проектировании и строительстве взлетно-посадочных полос их ориентируют, по возможности, по преобладающему направлению ветра [2; 3].

В авиации направление ветра определяется по приборам от истинного меридиана. Осреднение происходит за 10 мин до срока выпуска сводки за пределы аэродрома и за 2 мин по аэродрому. Порывы указываются по отношению к средней скорости в случае отличия на 3 м/с, если ветер боковой (в каждом аэропорту свои градации), и в остальных случаях через 5м/с [4].

Результаты исследований

Различные географические, орографические, циркуляционные и климатологические условия расположения аэродромов Иркутской области и Бурятии обусловливают специфические ветровые режимы на аэродромах Иркутск, Братск, Ербогачен, Мама, Улан-Удэ, Киренск со своими характерными особенностями. В работе выполнено исследование характеристик ветра на аэродромах на аэродромах Иркутской области и Республики Бурятия за 2008–2019 гг. (рис. 1, 2). Установлено, что преобладающими на аэродроме Иркутск в течение года являются ветры северо-западного [290–310º] (20,1 %) и восточного [080–100º] (17,5 %) направлений. Далее по повторяемости следуют юго-восточные ветры [140–160º] (11,7 %) и ветры южной четверти [170–190º] (9,3 %). Реже всего (<3 % случаев/год) отмечаются градации направлений ветра: [200–220º], [230–250º], [350–010º] и [020–040º] (рис. 1, А).



А) ИРКУТСК Б) БРАТСК В) ЕРБОГАЧЕН

Г) МАМА Д) УЛАН-УДЭ Е) КИРЕНСК

Рис. 1. Средняя годовая повторяемость различных градаций направления ветра на аэродромах Иркутской области и Республики Бурятия

Средняя годовая скорость ветра на аэродроме Иркутск составляет 3,1 м/с. Наибольшее число случаев в год приходится на градации скорости ветра 1–2 м/с (43,1 %) и 3–5 м/с (40,9 %). Штили в среднем за год наблюдаются в 7,2 % случаев. Ветры ≥15 м/с отмечаются в 0,4 % случаев. В исследуемый период среднее число дней с ветром ≥15 м/с составило 11,1/год, а со скоростью ≥20 м/с – 0,8/год.

На аэродроме Братск сезонные ветровые нагрузки ВПП распределены следующим образом. Преобладающими на аэродроме Братск в течение года являются ветры западного направления [260–280º] со средней годовой скоростью 5,2 м/с (19,8 %), юго-западного направления [230–250º] со средней скоростью 4,0 м/с (15,0 %) и северо-западного направления [290–310º] со средней скоростью 4,3 м/с (10,2 %). Реже всего (2,8 % случаев/год) отмечался ветер северной четверти [350–010º] со средней скоростью 2,8 м/с (рис. 1, Б).

Средняя годовая скорость ветра составляет 3,2 м/с. Штили в среднем за год наблюдаются в 8,3 % случаев. Ветры со средней скоростью ≥15 м/с отмечаются в 283 случаях, что составляет 0,4 % случаев от общего числа наблюдений за ветром. 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.

Преобладающими на аэродроме Ербогачен являются штили (22,6 %) и ветры юго-западного направления [230–250º] (13,8 %) и [200–220º] (12,2 %). Реже всего (2,6 %) отмечаются градации юго-восточного ветра [110–130º] (рис. 1, В).

Средняя годовая скорость ветра на аэродроме Ербогачен составляет 3,3 м/с. Наибольшее число случаев в год приходится на градации скорости ветра 1–2 м/с (35,8 %) и 3–5 м/с (29,7 %). Ветры ≥15 м/с отмечались в 0,8 % случаев. Среднее число дней с ветром ≥15 м/с составляет 2,3/год, а со скоростью ≥20 м/с – 1,2/год.

На аэродроме Мама в течение года преобладающими являются ветры юго-восточного направления: [140–160º] со средней скоростью 2,8 м/с (23,3 %) и [110–130º] со средней скоростью 2,3 м/с (13,3 %). Далее по повторяемости следуют штили (21,4 %) и ветры северо-западного направления [320–340º] со средней скоростью 4,2 м/с (12,9 %). Реже всего в течение года отмечались ветры [350–070º] (4,5 %) и [200–250º] (2,8 %) (рис. 1, Г).

Средняя годовая скорость ветра на аэродроме Мама составляет 2,6 м/с. Наибольшее число случаев наблюдений за ветром в целом за год (без учета штилей) приходится на слабый ветер со скоростью 1–2 м/с (54,4 % случаев) и ветер со скоростью 3–5 м/с (37,5 % случаев). Ветры со скоростью более 15 м/с отмечались редко и в сумме составили 0,3 % случаев за год. В исследуемый период среднее число дней с ветром градации ≥15 м/с в целом за год составило 7,8, а со скоростью ≥20 м/с – 0,6.

В течение года преобладающими на аэродроме Улан-Удэ являются штили в 39,5 % случаев, далее следуют ветры северо-западного направления [290–340º], повторяемость которых составляет 25 % случаев, западного направления [260–280º], повторяемость которых составляет 9,2 % случаев. Далее по повторяемости зафиксированы северные ветры [350–010º] (5,4 %) и юго-западные [230–250º] (4,9 %). Реже всего (<2 % случаев) за год отмечается направление ветра в диапазонах [110–130º], [140–160º] и [170–190º] (рис. 1Д).

Средняя годовая скорость ветра составляет 3,6 м/с. Наибольшее число случаев за год (без учета штилей) приходится на ветер со скоростью 3–5 м/с (24,7 % случаев) и слабый ветер со скоростью 1–2 м/с (20,4 % случаев). Ветры более 15 м/с отмечаются редко, в 0,8 % случаев. За исследуемый период среднее число дней с ветром ≥15 м/с за год составляет 14,8, а со скоростью ≥20 м/с – 1,8.

На аэродроме Киренск в течение года преобладающими являются штили (37,7 %), а также ветры юго-западного [200–220º] (13,8 %) и [230–250º] (8,6 %) и южного [170–190º] (7,1 %) направлений. Реже всего (<2 % случаев/год) отмечались градации направлений ветра восточной и юго-восточной четверти: [080–100º] и [110–130º] (рис. 1, Е).

Средняя годовая скорость ветра составляет 3,1 м/с. В течение года (без учета штилей) наибольшая средняя скорость ветра (5,0 м/с) приходится на градации направления [260–280º], а наименьшая (1,8 м/с) – на [110–130º]. Ветры ≥15 м/с отмечаются в 0,1 % случаев. В исследуемый период среднее число дней с ветром ≥15 м/с составляет 1,6/год, а со скоростью ≥20 м/с – 0,1/год.

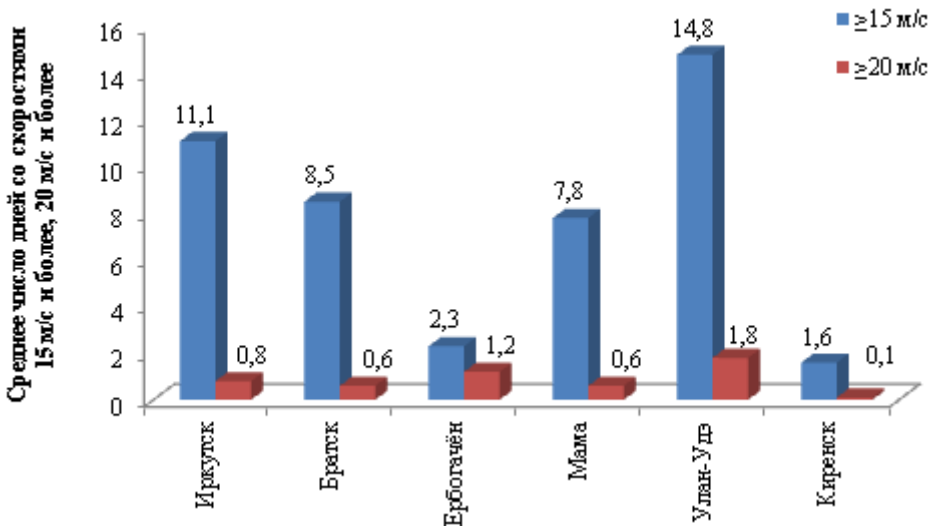


Рис. 2. Среднее число дней со скоростями ветра ≥15 м/с, ≥20 м/с на аэродромах

Выводы

На территории Иркутской области и Бурятии ветровой режим аэродромов имеет различный характер, обусловленный особенностями рельефа местности и циркуляционными факторами. Так, на аэродроме Иркутск максимум повторяемости имеют ветры северо-западного направления, на аэродроме Братск – западного направления, на аэродроме Мама – юго-восточного направления, а на аэродромах Ербогачен, Улан-Удэ, Киренск в течение года господствует штиль. Одновременно с этим, максимальная среднегодовая скорость ветра (без учета штиля) в течение года наблюдается на аэродроме Улан-Удэ.

Анализ среднего числа дней со скоростями ветра ≥15 м/с и ≥20 м/с показал, что максимальное количество дней с сильным ветром отмечается на аэродроме Улан-Удэ. Далее по количеству случаев следует аэродром Иркутск. Благоприятными с точки влияния ветрового режима на взлет и посадку воздушных судов являются аэродромы Ербогачен и Киренск, где наблюдается минимальное количество дней в среднем за год со скоростями ветра ≥15 м/с.

Список литературы

1. Авиационные факторы риска. ВМО. Программа обучения и подготовки ETR-№20/ВМО-ТД-№ 1390. Женева, 2007. 53 с.
2. *Баранов А. М., Солонин С. В.* Авиационная метеорология. Л. : Гидрометеоиздат, 1981. 383 с.
3. Авиационная метеорология / А. М. Баранов, О. Г. Богаткин, В. Ф. Говердовский, В. Д. Еникеева. СПб. : Гидрометеоиздат, 1992. 347 с.
4. *Богаткин О. Г.* Основы авиационной метеорологии. СПб. : Изд. РГГМУ, 2009. 339 с.
5. *Васильев А. А., Вильфанд Р. М.* Прогноз погоды. М., 2008. 60 с.
6. *Шакина Н. П., Иванова А. Р.* Прогнозирование метеорологических условий для авиации. М. : Триада лтд, 2016. 312 с.

УДК 551.461:551.468(265.5)

Штормовые нагоны на российском побережье Японского, Охотского и Берингова морей

Ю. В. Любицкий (yuvadlub@gmail.com)

Дальневосточный региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт, г. Хабаровск

Аннотация. Приведены примеры возникавших на российском побережье дальневосточных морей России штормовых нагонов, во время которых затапливались населенные пункты, береговые сооружения и транспортные коммуникации. Рассмотрены основные особенности режима штормовых нагонов. Представлен обзор методов краткосрочного прогноза штормовых нагонов на побережье Японского, Охотского и Берингова морей.

Ключевые слова: штормовые нагоны, методы краткосрочного прогноза, дальневосточные моря, численное моделирование.

Введение

Штормовые нагоны являются одним из наиболее опасных природных явлений. Во многих прибрежных районах Мирового океана нагоны иногда приводят к катастрофическим последствиям. Например, во время нагона 12–13 ноября 1970 г. в Бангладеш погибли 300 тыс. человек (по неофициальным данным – 500 тыс. человек), 2 мая 2008 г. в Мьяме жертвами нагона стали 146 тыс. человек, 29 августа 2005 г. в результате затопления Нового Орлеана (США) погибли 1200 человек [6].

На российском побережье Японского, Охотского и Берингова морей штормовые нагоны никогда не приводили к массовой гибели людей. Это является следствием ряда причин.

Во-первых, прибрежные районы Дальнего Востока слабо заселены. Во-вторых, наиболее крупные населенные пункты на побережье морей (Владивосток, Находка, Петропавловск-Камчатский, Магадан и др.) расположены на относительно возвышенной местности. В-третьих, из-за узости и приглубости шельфа морей в большинстве районов отсутствуют условия для возникновения катастрофических нагонов (например, максимальная величина нагона в Новом Орлеане в 2005 г. достигала 7,5–8,5 м [6]).

Тем не менее, штормовые нагоны на побережье дальневосточных морей часто приводят к значительному экономическому ущербу, так как во время нагонов затапливаются и разрушаются жилые и производственные объекты, гидротехнические сооружения, элементы транспортной инфраструктуры. Следовательно, задача своевременного и качественного оповещения населения, государственных органов, МЧС, хозяйственных организаций информацией о возможности возникновения и интенсивности штормовых нагонов является весьма актуальной. Для решения данной задачи необходимо разрабатывать новые и совершенствовать существующие методы прогнозов штормовых нагонов.

Штормовые нагоны на российском побережье дальневосточных морей

На бóльшей части побережья дальневосточных морей максимальная величина штормовых нагонов по данным наблюдений над уровнем моря не превышает 1 метра.

Тем не менее, в отдельных районах нагоны могут быть очень значительными. Например, максимальная на российском побережье Японского, Охотского и Берингова морей величина штормового нагона, зарегистрированная с помощью инструментальных наблюдений, составляет 272 см (17–18 октября 1977 г., порт Москальво, Сахалинский залив Охотского моря). Полученная оценка сопоставима с характеристиками наибольших нагонов в Санкт-Петербурге (совпадает с максимумом седьмого по величине нагона в Санкт-Петербурге за всю историю существования города) [6].

По материалам наблюдений максимальная величина нагонов в Анадырском заливе Берингова моря составляет 161 см (Анадырь), в заливе Креста Берингова моря (Эгвекинот) – 124 см [3].

Так как ряды наблюдений над уровнем моря на российском побережье дальневосточных морей в основном имеют небольшую продолжительность, можно предположить, что возможные максимальные величины штормовых нагонов могут существенно превышать приводимые оценки.

В качестве примера рассмотрим ситуацию, возникшую 9 декабря 1926 г. на северо-западном побережье Охотского моря.

Штормовой нагон был вызван глубоким циклоном, вначале перемещавшимся над Тихим океаном в северо-восточном направлении вдоль Курильских островов, затем изменившим направление движения и вышедшим в северо-западную часть Охотского моря. К сожалению, отсутствие надежных синоптических карт с достаточной дискретностью и малочисленность имеющихся материалов метеорологических наблюдений для данного периода времени не позволяют детально рассмотреть развитие процесса и рассчитать характеристики этого штормового нагона с помощью численного моделирования.

Полностью были смыты п. Мунук и два дома в п. Алдома вместе с хозяевами. Во время нагона в этом районе погибли 12 человек. В п. Новая Иня разрушило дома, прибрежные районы были затоплены на расстоянии 8–10 км от моря. Смыло поселок, находившийся на месте действующего в настоящее время Охотского рыбокомбината.

В с. Аян были залиты метеостанция и советские учреждения, смыты все береговые склады и товарные пакгаузы. Исходя из данной информации, характеризующей границы зоны затопления, установлено, что максимальная величина нагона в Аяне достигала 4,5 м.

Практически полностью был затоплен о. Лангр (в настоящее время о. Байдукова) с расположенными на острове поселком и рыбокомбинатом.

Наблюдения над уровнем моря во время нагона выполнялись только на о. Лангр. Измерения уровня воды производились также на двух гидрологических постах, расположенных на устьевом участке р. Амур. Максимальная величина

нагона на о. Лангр составила 220–230 см, в г. Николаевске-на-Амуре (48 км от моря) – 110–130 см, в с. Мариинском (326 км от моря) – 30–40 см.

Как отмечалось ранее, на бóльшей части российского побережья Японского, Охотского и Берингова морей штормовые нагоны относительно невелики. Тем не менее, практически на всем побережье, при совпадении максимумов нагонов с полными водами прилива, часто возникают опасные природные явления, представляющие угрозу для жизни людей и наносящие значительный материальный ущерб.

29 августа – 2 сентября 2016 г. под действием тайфуна Лайонрок в заливе Петра Великого (Японское море) сформировался штормовой нагон, наибольшая величина которого в различных береговых пунктах по данным наблюдений над уровнем моря достигала 63–73 см. В результате подъема уровня моря были затоплены зоны отдыха и пляжи на берегах Амурского и Уссурийского заливов, прибрежные дороги на о. Русский, пирсы в Спортивной Гавани г. Владивостока [9].

25 августа 2018 г. затоплено побережье залива Петра Великого западнее г. Находка (Приморский край). Залило зоны отдыха в Ливадии, Руднево, Волчанце. В этих поселках размыты пляжи и подъездные дороги к ним, смыты палаточные лагеря отдыхающих.

Во время штормового нагона 8–9 ноября 1995 г. в г. Холмске (япономорское побережье о. Сахалин) в морском торговом и рыбном портах затоплены защитные сооружения [4]. «На жестяно-баночной фабрике г. Холмска разрушен электроцех, два бытовых помещения, склад мехцеха на 800 кв. м, повреждено 2750 м кабельных линий, разрушено 150 м причальной стенки» [4]. В Невельском районе подтопило шахты «Шебунино» и «Горнозаводская», в г. Невельске повреждены причальные линии и разрушена кислородная станция [4].

Неоднократно во время штормовых нагонов затапливался порт Корсаков и прилегающие к нему районы (залив Анива Охотского моря) (рис. 1).



Рис. 1. Территория морского порта г. Корсаков во время нагона 8–9 ноября 1995 г.

8–9 ноября 1995 г. железнодорожный мост в южном районе порта, соединяющий пирс и причал, был сдвинут волнами на 1,5 м. «Непригодны к восстановлению 3 портальных крана «Альбатрос» грузоподъемностью 20 т, значительно повреждены металлоконструкции и электооборудование остальных 15 портальных кранов» [4]. Железнодорожное полотно размыто на протяжении 400 м. «Испорчен, разбросан груз: уголь 200 т, 400 куб. м круглого леса, 250 т экспортной целлюлозы, 54 большегрузных контейнера» [4].

7 октября 1990 г. в порту Москальво (Сахалинский залив) частично затоплен причал, разрушены подъездные пути. В домах по ул. Набережной пос. Озерпах (Амурский лиман) затоплены подполья. В поселке сдвинуты мосты, залит насос холодильника. На рыбозаводе пос. Нижнее Пронге разбит льдобунт, ряжи водозаборника, частично разрушен рыбоприемник.

Значительный нагон возник 22 декабря 2014 г. на северо-западном побережье Охотского моря. В пос. Морском подтопило 10 жилых домов, возникла угроза затопления дизельной электростанции. В пос. Охотске залило территории морского порта и котельной, 18 жилых домов.

В с. Аян подтопило 500 м взлетно-посадочной полосы в аэропорту, залило оперативный блок и трансформатор на станции АЗС.

Очень часто (например, в 2018–2019 гг. семь раз) опасные природные явления, вызванные штормовыми нагонами, возникают на западном побережье полуострова Камчатка. Из-за подъема уровня моря прекращается транспортное сообщение между поселками, расположенными в данном районе, в зимний период времени автомобильные дороги на побережье заваливает морским льдом.

11–12 ноября 2013 г. в пос. Крутогоровском Соболевского района (западное побережье полуострова Камчатка) подтопило 6 домов, смыло водовод, поселок остался без холодного водоснабжения. Были залиты придомовые участки в пос. Ичинский, нанесен существенный ущерб Ичинскому рыбоперерабатывающему заводу. Был разрушен участок дороги от 115 до 125 км автотрассы Начики-Октябрьский.

Во время штормового нагона 29 декабря 2018 г. в г. Петропавловске-Камчатском залиты морской водой автомобили, припаркованные у проходной рыболовецкого колхоза им. Ленина в районе Сероглазка. В пос. Авача подтопило гаражи в гаражно-лодочном кооперативе.

15–16 декабря 2008 г. в пос. Корф (беринговоморское побережье полуострова Камчатка) подтоплены восемь жилых домов, котельная, тубдиспансер, трансформаторные подстанции. В поселке отключено энергоснабжение. Население поселка эвакуировано.

30 октября 2017 г. во время штормового нагона в с. Крабозаводское (о. Шикотан) затоплена территория филиала «Крабозаводское» компании ЗАО «Курильский рыбак» (рис. 2). Максимальная величина штормового нагона при этом по данным наблюдений составила всего 46 см.

«18–19 октября 1961 г. в районе пос. Анадырь… уровень воды в лимане поднялся на 1,5 м выше своего невозмущенного состояния. Под напором воды и льда был поврежден пирс Анадырского морского порта, разбито о причал 3 баржи, из-за поднятия уровня на второй рыббазе льдом полностью снесен причал, смыта часть грузов» [3].



Рис. 2. Территория филиала «Крабозаводское» компании ЗАО «Курильский рыбак» на о. Шикотан во время нагона 30 октября 2017 г.

Значительная протяженность Японского, Охотского и Берингова морей, сложность их ледового режима и морфометрии, разнообразие характера атмосферных процессов над акваторией морей определяют необходимость исследования условий формирования и режима штормовых нагонов для каждого локального района в отдельности. Такое исследование выходит за рамки статьи, поэтому рассмотрим только основные особенности и закономерности режима штормовых нагонов на побережье дальневосточных морей.

Штормовые нагоны возникают при перемещении над морем тайфунов или глубоких циклонов (наиболее значительные нагоны формируются при приземном атмосферном давлении в центре барических образований 950–960 гПа). Подъем уровня моря, наиболее существенный на побережье и шельфе морей, происходит в результате воздействия на водную поверхность сильных ветров и падения приземного атмосферного давления. Иногда этот подъем усиливается резонансными явлениями [9].

Продолжительность штормовых нагонов на побережье дальневосточных морей зависит от скорости перемещения тайфунов и циклонов над морем и изменяется в диапазоне от 12 ч до десятка суток. В основном нагоны имеют продолжительность 36–72 ч.

Штормовые нагоны на побережье Японского, Охотского и Берингова морей в основном возникают (и имеют наибольшую интенсивность) в осенне-зимний период времени, когда над Дальним Востоком усиливается циклоническая активность. В летние месяцы значительные нагоны в большинстве районов не формируются. Исключением является материковое побережье Японского моря. Данная особенность объясняется тем, что именно летом на акваторию Японского моря выходит большинство тайфунов из тропической области Тихого океана.

Интересно, что наиболее значительные штормовые нагоны на северных побережьях Охотского (Охотск, Магадан) и Берингова (Эгвекинот) морей возникают в январе–марте, при максимальном развитии ледяного покрова. Данный факт получил объяснение с помощью численного моделирования совместной динамики воды и льда [8] – наличие на поверхности моря дрейфующего льда, даже сплоченностью 10 баллов, приводит лишь к некоторому (на 10–15 %) уменьшению величины нагонов по сравнению с ситуацией, когда при аналогичном атмосферном воздействии дрейфующий лед отсутствует.

Более существенное влияние на величину штормовых нагонов оказывает припай. Именно из-за наличия припая в вершине Анадырского залива (Анадырь), в Сахалинском заливе (о. Байдукова, Москальво) и Амурском лимане (Озерпах, Нижнее Пронге) значительные нагоны в январе – марте никогда не формируются.

Многолетние тенденции увеличения повторяемости и/или интенсивности нагонов на побережье дальневосточных морей не прослеживаются. Следовательно, не подтверждается гипотеза, предложенная различными исследователями, об увеличении повторяемости опасных природных явлений в последние десятилетия в результате глобального потепления климата Земли. Представляется, что наиболее часто значительные штормовые нагоны на побережье Японского, Охотского и Берингова морей возникали в 80-х гг. XX в., когда период понижения глобальной температуры воздуха сменился резким потеплением. Тем не менее, для проверки данного предположения необходимы дополнительные исследования.

Методы краткосрочного прогноза штормовых нагонов на побережьедальневосточных морей

Методы прогноза штормовых нагонов на побережье дальневосточных морей разрабатывались с 40-х гг. XX в.

В течение нескольких десятилетий создавались физико-статистические методы, ориентированные на прогнозирование возможности возникновения опасных нагонов с помощью анализа синоптической обстановки и расчет максимальной величины нагонов в отдельных береговых пунктах с помощью регрессионного анализа [1–3].

В качестве предикторов в уравнениях регрессии разных методов прогноза использовались продолжительность действия и скорость ветра (иногда проекции скорости ветра на эффективное нагонное направление), приземное атмосферное давление в центре циклона, количество замкнутых изобар в циклоне,

градиенты приземного атмосферного давления, коэффициенты разложения барических полей по естественным ортогональным функциям [1–3].

В рамках развития данного направления, с помощью метода спектральной регрессии, учитывающего частотную структуру рассматриваемых процессов, были построены уравнения, позволяющие рассчитывать изменения нагонной составляющей суммарного уровня моря в 11 пунктах, расположенных на побережье Японского, Охотского и Берингова морей, по прогнозируемым характеристикам ветра и приземного атмосферного давления в этих пунктах [1–3].

Физико-статистические методы прогноза штормовых нагонов длительное время успешно применялись в оперативной работе дальневосточных управлений по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (УГМС) Росгидромета, позволяя решать задачу обеспечения народно-хозяйственных организаций информацией о возможности возникновения опасных явлений в отдельных районах.

Данные методы имеют ряд недостатков. Во-первых, прогностические уравнения могут быть построены только для пунктов, в которых выполнялись длительные наблюдения над уровнем моря. Во-вторых, качество выпускаемых прогнозов существенно ухудшается при возникновении нестандартных или экстраординарных ситуаций. В-третьих, большинство физико-статистических методов не воспроизводит (или делает это некорректно) изменения нагонной составляющей суммарного уровня моря во времени.

Поэтому более перспективным представляется создание методов краткосрочных прогнозов штормовых нагонов, базирующихся на численном гидродинамическом моделировании процессов динамики вод.

Впервые для дальневосточных морей метод прогноза нагонов, реализующий данный подход, был разработан в 1989–1990 гг. [5]. Объектом моделирования является устьевая область р. Амур: Сахалинский залив, Амурский лиман, частично устьевой участок реки (до г. Николаевска-на-Амуре). Использована двумерная нелинейная нестационарная численная модель. Технологическая линия метода прогноза работала в автоматизированном режиме. Для атмосферного форсинга модели по приземным прогностическим картам Японского метеорологического агентства (JMA) для опорных точек определялись характеристики ветра и приземного атмосферного давления. Эта информация, а также сведения о стоке р. Амур в замыкающем створе реки (с. Богородское) и состоянии ледяного покрова в пределах всей области расчета вводились в ЭВМ вручную.

Использование метода прогноза в оперативной работе ФГБУ «ДальневосточноеУГМС» доказало эффективность метода – из 10 значительных нагонов величиной более 1 м, сформировавшихся в устьевой области р. Амур в 1992–1997 гг., прогнозами были предусмотрены девять [5].

С 2014 г. по май 2019 г. включительно в производственной деятельности ФГБУ «Камчатское УГМС», «Колымское УГМС», «Дальневосточное УГМС» и «Сахалинское УГМС» использовался разработанный в ФГБУ «ДВНИГМИ» метод краткосрочного прогноза суммарного (включающего сгонно-нагонную, приливную и фоновую составляющие) уровня моря на побережье Охотского

моря и Татарского пролива, тихоокеанского побережья полуострова Камчатка [7]. Заблаговременность прогнозов составляла 48 ч, прогноз выпускался для 34 береговых пунктов.

Структурным элементом технологической линии данного метода прогноза являлась двумерная численная гидродинамическая модель для расчета штормовых нагонов. Пространственный шаг сеточной области модели составлял 10 км. При моделировании нагонов использовались прогностические поля ветра и приземного атмосферного давления с дискретностью шесть часов и пространственным шагом 50 км, рассчитанные в рамках региональной атмосферной численной модели Гидрометцентра России (автор В. М. Лосев).

Информация о состоянии ледяного покрова на акватории дальневосточных морей формировалась вручную по ледовым картам Японского метеорологического агентства. В районах со сплоченностью ледяного покрова 9–10 баллов исключалось воздействие касательного напряжения ветра на водную поверхность.

В 2014–2016 гг. в ФГБУ «ДВНИГМИ» разработан новый метод краткосрочного (с заблаговременностью 72 ч) прогноза колебаний суммарного уровня моря дальневосточных морей [8]. Метод работает в автоматическом режиме.

Ядром данного метода является двумерная численная модель совместной динамики воды и льда, используемая для расчета пространственно-временных изменений сгонно-нагонной составляющей суммарного уровня моря. Принятая постановка задачи позволяет корректно учесть влияние ледяного покрова на процессы развития и трансформации штормовых нагонов – для дрейфующего льда учитываются касательные напряжения трения на границах разделов воздух–лед и лед–вода.

Пространственный шаг сеточной области модели равен 7,5 км. Для отдельных районов (например, шельфа о. Сахалин) предусмотрена реализация вложенных сеток с пространственным шагом 2,5 км. Сеточная область численной модели включает северную часть Японского моря, что позволяет рассчитывать прогнозы для пунктов, расположенных на побережье Приморского края.

Для форсинга численной модели совместной динамики воды и льда используются прогностические поля приземного атмосферного давления и ветра (на высоте 10 м), рассчитанные с помощью региональной атмосферной численной модели WRF-ARW, пространственный шаг сетки которой равен 15 км. Дискретность метеорологической информации в расчетах уровня моря составляет один час.

Данные о ледовой обстановке на акватории дальневосточных морей считываются с сайта Японского метеорологического агентства в цифровом виде и приводятся в узлы сетки численной модели совместной динамики воды и льда. Для расчета величины стока р. Амур используются оперативные сведения об уровне воды и ледовых явлениях в замыкающем створе реки, поступающие по каналам связи.

Прогноз ожидаемых изменений уровня моря рассчитывается на кластере CRAY XC-40 ФГБУ «Дальневосточное УГМС» два раза в сутки (в сроки от 00 и 12 часов ВСВ).

Прогноз выпускается для 57 береговых пунктов, расположенных в зоне деятельности пяти дальневосточных УГМС Росгидромета. В рамках сеанса прогноза для каждого управления формируется текстовый файл с таблицей ожидаемых ежечасных значений суммарного уровня моря и его сгонно-нагонной и приливной составляющих для пунктов, перечень которых определен данным УГМС. При возможности возникновения в этих пунктах штормового нагона, величина которого превышает заданный критерий, в файле выводится соответствующее информационное сообщение. Файлы с результатами прогнозов в автоматическом режиме передаются в УГМС по электронной почте.

Оперативные (производственные) испытания метода прогноза проводились в ФГБУ «Камчатское УГМС», «Колымское УГМС», «Дальневосточное УГМС», «Сахалинское УГМС» и «Приморское УГМС» в период времени с июля 2017 г. по сентябрь 2018 г. включительно.

В результате испытаний установлено, что качество прогноза штормовых нагонов на побережье дальневосточных морей с помощью разработанного метода в целом удовлетворяет требованиям руководящих документов Росгидромета.

В период испытаний метода прогноза были зарегистрированы семь опасных природных явлений, когда затапливались населенные пункты, береговые сооружения и объекты. Изменения уровня моря во время шести из этих ситуаций были успешно предусмотрены выпущенными прогнозами.

Центральная методическая комиссия по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам (ЦМКП) Росгидромета на заседании от 18 апреля 2019 г. приняла решение «рекомендовать использовать разработанный метод в оперативной практике ФГБУ «Камчатское УГМС», «Колымское УГМС», «Сахалинское УГМС», «Дальневосточное УГМС», «Приморское УГМС» в качестве метода основного численного прогноза уровня моря».

Заключение

Штормовые нагоны на российском побережье Японского, Охотского и Берингова морей часто приводят к возникновению ситуаций, угрожающих жизни людей, и наносят значительный материальный ущерб.

В ФГБУ «ДВНИГМИ» разработаны методы краткосрочного прогноза данного опасного природного явления, базирующиеся на численном гидродинамическом моделировании динамики вод и современных информационных технологиях [7; 8].

Для усовершенствования и развития этих методов в дальнейшем планируется решать следующие задачи:

– перехода на трехмерные численные модели расчета динамики вод для более адекватного представления физики рассматриваемых процессов;

– повышения качества информации о состоянии ледяного покрова на акватории морей (в настоящее время информация Японского метеорологического агентства не позволяет идентифицировать зоны припая и оценить возрастные виды и толщину льда).

Следует отметить, что прогностическими службами дальневосточных УГМС Росгидромета востребованы сведения не только об ожидаемых штормо-

вых нагонах. В бóльшей степени прогнозистам необходима информация о возможности возникновения и интенсивности опасных природных явлений, вызывающих подтопление береговых объектов и сооружений. Такие явления имеют комплексный характер и формируются многими причинами – не только ветровым нагоном, но и приливами, эффектами, порожденными ветровым волнением (прибой, накат, волновой нагон), а также сейшевыми колебаниями уровня моря.

Создание методов прогнозов опасных явлений, учитывающих все перечисленные факторы, является одной из первоочередных задач ФГБУ «ДВНИГМИ».

Список литературы

1. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. 8. Японское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. СПб. : Гидрометеоиздат, 2003. 398 с.

2. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. 9. Охотское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. СПб. : Гидрометеоиздат, 1998. 342 с.

3. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. 10. Берингово море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. СПб. : Гидрометеоиздат, 1999. 300 с.

4. *Като Э., Миськов О. А., Шевченко Г. В.* Штормовые нагоны на побережье острова Сахалин в конце XX века // Динамические процессы на шельфе Сахалина и Курильских островов. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2001. С. 160–176.

5. *Любицкий Ю. В.* Метод краткосрочного прогноза штормовых нагонов в устьевой области Амура // Метеорология и гидрология. 2000. № 5. С. 86–96.

6. *Любицкий Ю. В., Шевченко Г. В., Елисов В. В.* Штормовые нагоны // Мировой океан. Т. 1. Геология и тектоника океана. Катастрофические явления в океане. М. : Научный мир, 2013. С. 559–575.

7. Результаты испытаний метода краткосрочного прогноза изменений суммарного уровня моря на побережье Охотского моря, Татарского пролива, тихоокеанском побережье Курильских островов и полуострова Камчатка / Ю. В. Любицкий, Е. М. Вербицкая, С. О. Романский, Л. П. Кравчук, О. И. Новикова, В. Б. Тюрнин, М. Е. Кузнецов // Информационный сборник № 42. М. ; Обнинск: ИГ–СОЦИН, 2015. С. 93–110.

8. *Любицкий Ю. В.* Метод краткосрочного прогноза уровня моря на побережье и акватории Охотского и Японского морей и на восточном побережье полуострова Камчатка // Труды ДВНИГМИ. Владивосток : Дальнаука, 2017. Вып. 155. С. 32–68.

9. *Любицкий Ю. В.* Штормовой нагон в заливе Петра Великого (Японское море), вызванный тайфуном Лайонрок (29 августа – 2 сентября 2016 г.) // Вестник ДВО РАН. 2018. № 1. С. 31–39.

УДК 551.515.3

Особенности распределения пыльных бурь по территории России

А. С. Нагуманова (alena. nagumanova@mail.ru)

Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К. А. Тимирязева, г. Москва

Аннотация. Рассматриваются метеорологические условия возникновения пыльных бурь. Анализируется продолжительность по годам данного природного явления на территории России (дней).

Ключевые слова: ветер, направление ветра, пыльные бури, скорость ветра, среднее число дней, станции, температура.

Пыльные бури – атмосферные явления в виде переноса большого количества пыли ветром с земной поверхности в слое высотой несколько метров со значительным ухудшением горизонтальной видимости [1; 3]. Они являются одним из наиболее опасных метеорологических явлений для сельского хозяйства [3]. Их негативное воздействие проявляется в механическом разрушении почвенного покрова, обеднении почв за счет потери питательных веществ, повреждении сельскохозяйственных культур и снижении их урожайности. При этом существует довольно ограниченный перечень культур, способных противостоять таким неблагоприятным атмосферным явлениям, при этом увеличивая потенциальную продуктивность почвы, например, люцерна изменчивая [6; 7]. Риск пыльных бурь для сельского хозяйства определяется величиной причиняемого ущерба, которая зависит от повторяемости этого опасного стихийного явления, его интенсивности и площади пораженной территории. Воздействие пыльных бурь приводит к снижению стоимости земель в пострадавших районах [8].

Одним из основных метеорологических элементов, от которого зависят формирование, интенсивность и продолжительность пыльных бурь, является скорость ветра. Направление ветра в процессе формирование пыльных бурь не имеет решающего фактора, оно сказывается лишь в силу того, имеются ли естественные или искусственные преграды на пути воздушного потока [9].

В то же время установлено, что пыльные бури наблюдаются при продолжительном воздействии ветра, мало меняющего направления. В начале пыльных бурь скорость ветра обычно составляет 7–10 м/с, но в дальнейшем может составлять 18–23 м/с, при сильных пыльных бурях на отдельных станциях фиксировалась до 25–28 м/с [5].

Важную роль играет эрозия почвы, в значительной мере обусловливается динамическими воздействующими потоками. Чем больше скорость ветра и чем продолжительнее ее механическое воздействие, тем интенсивнее почвенная эрозия, поэтому прогноз пыльных бурь не мыслим без прогноза скорости ветра. Прогноз скорости ветра может быть несколько упрощен, для начала достаточно определить будет ли скорость ветра больше или меньше 10 м/с.

В таблице приведена вероятность возникновения пыльных бурь на территории в зависимости от скорости ветра.

Таблица 1

Вероятность возникновения пыльных бурь (%) при разной скорости ветра

Месяц	Скорость ветра в м/с					
	Менее 10	10–12	13–15	16–18	19–21	Более 21
Январь	-	-	-	19	90	90
Февраль	-	6	50	50	80	90
Март	1	26	33	41	50	70
Апрель	4	14	28	32	43	-
Май	3	10	35	40	45	-
Июнь	4	6	25	30	50	-
Июль	4	6	25	30	50	-
Август	5	42	42	50	80	-
Сентябрь	5	25	35	50	90	-
Октябрь	2	7	15	20	50	-

Возникновение пыльных бурь (см. табл.) учитывалось только в связи с увеличением скорости ветра, независимо от состояния подстилающей поверхности. Не учитывался и тот факт, что увеличение скорости ветра в осенний и весенний период связано с прохождением фронтальных разделов и выпадению значительных осадков.

Следует отметить, что скорость ветра при пыльных бурях колеблется в сравнительно широких пределах от 6–10 до 20 м/с и более, причем максимум повторяемости разных скоростей на различных станциях приходится на различные интервалы. Пыльные бури в различных пунктах определяются региональными особенностями синоптических процессов или даже отдельных проявлений синоптических процессов, и состоянием почвы.

Пыльные бури наблюдаются как при ясном небе, так и при облаках самых разнообразных форм. Но вообще, особенно летом, развитие пыльных бурь происходит чаще при ясном небе, высокой температуре и низкой относительной влажности. Фронтальные пыльные бури холодных фронтов сопровождаются началом падения температуры. Однако дальнейшее понижение температуры уже связано с улучшением видимости. По-видимому, это объясняется тем, что при сплошной облачности исключается нагрев подстилающей поверхности, слабее происходит вертикальный обмен и, в итоге, структура ветра выглядит спокойнее, чем в ясные дни.

В Европейской части России пыльные бури чаще всего наблюдаются на территориях Волгоградской, Ростовской, Астраханской областей, Краснодарского и Ставропольского краев, в Республике Калмыкия. Как показывают результаты многолетних наблюдений, в данных регионах они могут возникать в течение всего года, хотя в зимние месяцы отмечаются крайне редко: один раз в несколько лет. Максимальная повторяемость обычно приходится на весенне-летний период. На указанной территории число дней с пыльной бурей в среднем за год колеблется от 1 до 10, уменьшаясь в Предкавказье – до 0,3–2. В отдельных районах Волгоградской области ввиду местных особенностей (прежде всего из-за разной степени открытости) оно достигает 12–18.

Число дней с пыльной бурей может существенно меняться от года к году. В наиболее засушливые и ветреные годы оно значительно превышает средние значения, возрастая до 20–25. Повсеместно наиболее вероятны весенние пыльные бури [9].

Продолжительность пыльной бури в среднем невелика и составляет около 5–10 ч. Однако весной, когда наблюдается наибольшее число дней с сильным ветром, в 20–30 % случаев возможны бури, продолжающиеся 15–20 ч и более. Особенно интенсивны пыльные бури в засушливые годы [2].

В большинстве случаев на территории рассматриваемых областей и краев пыльные бури возникают при ветрах восточных направлений [10].

На бóльшей части Среднего Поволжья пыльные бури преимущественно наблюдаются с апреля по октябрь. Повторяемость сильных ветров в весенние и летние месяцы невелика и число дней с пыльной бурей за этот период составляет в среднем около 1–5. Несколько чаще пыльные бури возникают в Саратовской и Оренбургской областях, особенно в их юго-восточных и южных районах, граничащих с Казахстаном, 20 дней в год. Наибольшая повторяемость пыльных бурь приходится на летние месяцы. Продолжительность в среднем не превышает 5–10 ч, а лишь в начале осени, когда в процессах циркуляции начинается переход к зимнему режиму и усиливается циклоническая деятельность, продолжительность пыльных бурь может достигать 20 ч и более.

Довольно часты пыльные бури на юге Западной Сибири. В основном они отмечаются с апреля по октябрь. В Омской области за этот период в среднем бывают до 10 дней с пыльной бурей, а в отдельные годы до 30 дней. Продолжительность может достигать 15–20 ч.

В настоящее время наиболее часты пыльные бури в степных районах юга России: Ростовской области, Краснодарском и Ставропольском краях, Республике Крым. В большинстве степных районов Северного Кавказа 1–5 дней в году с пыльными бурями, а в юго-восточных районах Ростовской области, на северо-востоке Ставропольского края их более 10, в отдельных районах – 15–20 дней.

В связи с тем, что основная часть территории Северного Кавказа расположена в зоне сурового, континентального климата с большой повторяемостью сильных ветров, формирование пыльных бурь происходит здесь нередко. Большую повторяемость имеют кратковременные пыльные бури, особенно в теплую половину года, но они не приносят заметного вреда. Продолжительные, пыльные бури наблюдаются реже.

Начинаются пыльные бури преимущественно в первой половине дня, особенно это характерно для кратковременных, они наблюдаются только в дневные и вечерние часы. Возникновение кратковременных пыльных бурь обычно связано с усилением ветра и грозами при прохождении холодных фронтов в теплое время года.

Формирование сильных пыльных бурь происходит в штормовой зоне, возникающей на периферии антициклонов при их сближении с областями низкого давления. В подавляющем большинстве случаев сильные пыльные бури бывают связаны с южной или юго-западной периферии антициклонов, где преобладает ветер восточного или юго-восточного направления [11].

Важную роль в формировании пыльных бурь играет режим осадков. В процессе формирования пыльных бурь большую роль играют продолжительные периоды без осадков или их незначительное количество. Выпадающие осадки увлажняют почву, увеличивают ее влагозапасы, благоприятствуют развитию растительности, возникновение при этом пыльных бурь маловероятно.

Пыльным бурям в феврале и апреле обычно предшествует продолжительный период с недобором осадков. Недобор влаги осенью не приводит к формированию пыльных бурь весной, если в зимний период происходило отложение снежного покрова достаточной высоты. Режим осадков зимой в начале весны оказывает решающий фактор влияния на степень увлажнения почвы и на возможность формирования пыльных бурь весной. Важное значение в формировании пыльных бурь принадлежит структуре почвы.

Таким образом, показано, что дальнейшее изучение этого природного явления поможет повысить заблаговременность его прогноза и снизить его неблагоприятные последствия для различных отраслей экономики.

Список литературы

1. Практикум по агрометеорологии и агрометеорологическим прогнозам / А. И. Белолюбцев., В. А. Сенников, И. Ф. Асауляк, Л. Н. Коровина, С. М. Авдеев. М. : Трнаслог, 2015 284 с.

2. *Глушко А. Я., Разумов В. В., Рейхани М. Д.* Деградация земель юга Европейской части России под воздействием пыльных бурь// Юг России: экология, развитие. 2010. № 1. С. 146–151

3. *Говорушко С. М.* Влияние природных процессов на человеческую деятельность. Владивосток: ДВО РАН, 1999. С. 215–218

4. *Колобков Н.* Пыльные бури // Альманах. «На суше и на море». 1961. Вып. 2. С. 24

5. Методические рекомендации по оформлению курсовых работ : метод. Рекомендации / сост. Цай С. Н., Магулян А. О. Туапсе : 2018. 23 с.

6. *Лазарев Н. Н., Кольцов А. В., Авдеев С. М.* Формирование урожаев многолетними бобовыми и злаковыми травами в засушливых условиях // Сборник научных трудов Российской сельскохозяйственной академии им. К. А. Тимирязева № 275. М. : МСХА, 2003. 196 с.

7. Изменение агрохимических свойств дерново-подзолистой почвы и урожайности бобовых и бобово-злаковых травостоев при их долголетнем использовании / Н. Н. Лазарев, С. М. Авдеев, Л. Ю. Демина, В. Г. Яцкова // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 2011. № 1. С. 9–18.

8. Природно-техногенные воздействия на земельный фонд России и страхование имущественных интересов участников земельного рынка. М. : Госкомзем РФ, 2006. С. 252.

9. *Романова Е. Н., Гобарова Е. О., Жильцова Е. Л.* Методы использования систематизированной климатической и микроклиматической информации. СПб. : Гидрометиздат, 2000. 159 с.

10. Экология справочник. URL: https://ru-ecology.info/term/9914/ (дата обращения: 09.09.2020).

11. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/sinopticheskie-usloviya-formirovaniya-pylnyh-bur-v-stavropolskom-krae (дата обращения: 09.09.2020).

УДК 551.515.4

Сопряженность положения грозовых ячеек с высокими значениями индексов неустойчивости атмосферы на юго-востоке Западной Сибири

О. Е. Нечепуренко (o.e.nechepurenko@gmail.com)[1], В. П. Горбатенко (vpgor@tpu.ru)[1], Д. А. Константинова (da_konstantinova@mail.ru)[1], К. Н. Пустовалов (const.pv@yandex.ru)[1,2]

[1] Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск
[2] Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск

Аннотация. В целях повышения точности прогнозирования конвективных опасных явлений проведен эксперимент по сравнению пространственного положения грозовых разрядов, зафиксированных однопунктовым грозопеленгатором Boltek, и полей атмосферной неустойчивости. Для определения зон неустойчивости атмосферы над юго-востоком Западной Сибири использовались индексы Total Totals и K-index, определяемые по данным аэрологического зондирования и реанализа ERA5. Результаты сравнения показывают хорошую пространственную сопряженность полей высоких значений индексов неустойчивости по данным реанализа ERA5 и фактических положений грозовых ячеек. Валидация вычисленных по реанализу ERA5 значений индексов неустойчивости с аэрологическими показала, что меньшая ошибка в согласованности данных по двум разным методикам наблюдается для индекса Total Totals. Следовательно, для прогноза пространственного положения конвективных облаков, продуцирующих грозы над юго-востоком Западной Сибири, перспективно использовать индекс Total Totals, значения которого можно рассчитать как по результатам аэрологических измерений, так и восстанавливать по данным спутникового зондирования.

Ключевые слова: грозопеленгатор-дальномер (ГПД), реанализ, аэрологическое зондирование, индексы неустойчивости.

Конвективная деятельность ежегодно вызывает большое количество неблагоприятных и опасных явлений во всем мире (грозы, интенсивные ливневые дожди, град, шквалы, микропорывы, торнадо и др.), причем для Западной Сибири частота таких событий растет [1; 2]. Для оценки вероятности развития грозовых облаков и сопутствующих конвективных явлений разработаны индексы неустойчивости, которые дают качественную и количественную оценку степени неустойчивости атмосферы.

Прогноз пространственного распределения грозовой облачности и мест потенциальных молниевых разрядов характеризуется особой актуальностью, в связи с этим целью исследования послужила качественная оценка сопряженности центров повышенной неустойчивости атмосферы и зарегистрированных грозовых очагов разной интенсивности. Грозы регистрировались однопунктным грозопеленгатором Boltek, а очаги конвективной неустойчивости определялись по данным реанализа ERA5 и результатам аэрологического зондирования.

Для исследования выбраны 28–29 июня 2008 г., погодные условия которых обусловлены одной синоптической ситуацией с проявлением грозовой активности на территории юго-востока Западной Сибири, куда отнесены Томская, Новосибирская и Кемеровская области. Исходя из поставленной цели, были изучены синоптическая картина и термодинамическое состояние нижней и средней тропосферы.

Материалы и методы

Факт наличия грозы и пространственное положение грозовых ячеек определялось на основе регистраций молниевых разрядов однопунктовым грозопеленгатором-дальномером (ГПД) Boltek LD-250. Грозопеленгатор установлен на базе учебной лаборатории кафедры метеорологии и климатологии ГГФ ТГУ (56,46° с. ш., 84,93° в. д.) и является единственной в Западной Сибири точкой отслеживания грозовых явлений ближнего и дальнего действия (далее ГПД Томск). LD-250 позволяет детектировать разряды молний посредством программного обеспечения NexStorm Lite в непрерывном автоматическом режиме в радиусе до 480 км [3; 4]. Процесс обработки информации происходит в программе RimDataLightning, в выходном файле которого содержится информация о полярности и времени разряда и координатах точки удара молнии. Визуализация точек на карте с полярной системой координат с центром в г. Томске отображает текущее положение грозовых очагов и позволяет отслеживать их движение в режиме реального времени.

Степень развития конвекции и вероятность образования опасных конвективных явлений зависят от толщины влажнонеустойчиво-стратифицированных слоев, которые качественно оценены в индексах K-index (KIND) [5] и Total Totals index (TOTL) [6]:

$$KIND = (T_{850} - T_{500}) + TD_{850} - (T_{700} - TD_{700}) \quad (1)$$

$$TOTL = T_{850} + TD_{850} - 2T_{500} \quad (2)$$

где KIND и TOTL – значения индекса неустойчивости, ºС; T_{850}, T_{700}, T_{500} – температура на уровнях 850, 700 и 500 гПа, соответственно, ºС; TD_{850}, TD_{700} – температура точки росы на уровнях 850 и 700 гПа, соответственно, ºС.

Для оценки пространственно-временной изменчивости термодинамических характеристик атмосферы проводился расчет значений индексов неустойчивости KIND и TOTL по данным реанализа ERA5 [7]. Реанализ ERA5 создан Европейским центром среднесрочных прогнозов (ECMWF) и является пятым поколением реанализа глобальных атмосферных наблюдений ECMWF. Его преимуществами являются непрерывные ряды данных за период с 1979 г. по настоящее время и высокое пространственно-временное разрешение (0,25×0,25° и 1 ч соответственно) [8]. Согласно [9], реанализы ECMWF предыдущих поколений обладали наилучшей среди всех реанализов точностью описания температурного режима Сибири, что должно было передаться их приемнику.

Для каждого дня отобраны результаты регистраций молниевых разрядов Boltek за 00 и 12 UTC в виде карт, содержащих координаты молниевых разрядов за 1 ч. Построено пространственное распределение индексов неустойчивости TOTL и KIND по данным реанализа ERA5, обработка и визуализация данных реанализа проводилась в математическом пакете MATLAB. Результаты аэрологического зондирования атмосферы, проводимое на станциях WMO ID: 29634 Новосибирск, WMO ID: 29231 Колпашево и WMO ID: 29839 Барнаул в стандартные сроки 00 и 12 UTC (что соответствует 7 и 19 часам местного времени), привлекались для валидации значений индексов неустойчивости KIND и

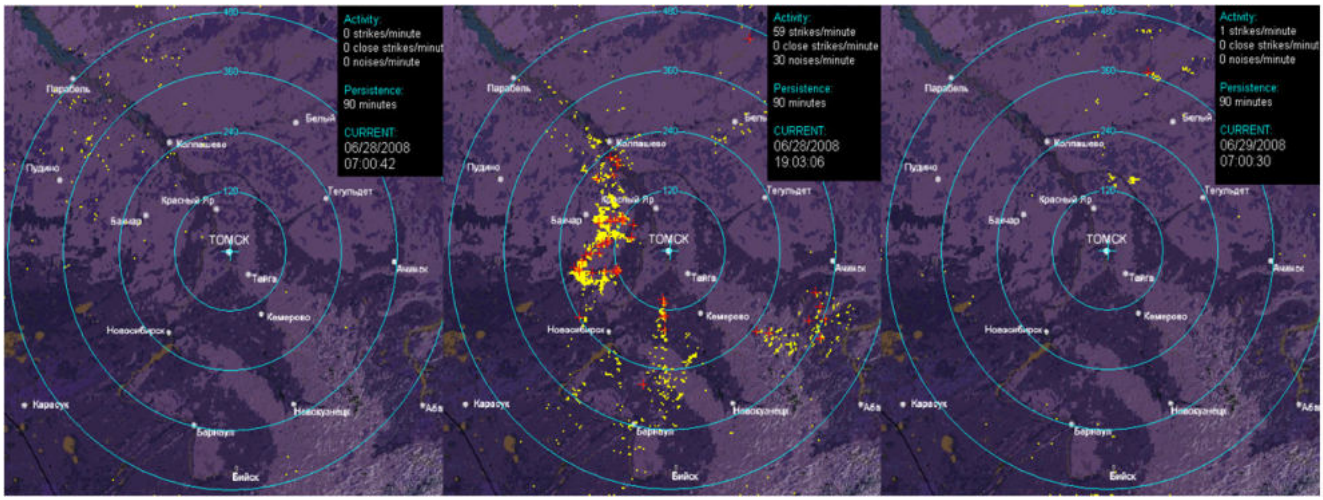
TOTL, рассчитанных по данным реанализа ERA5 за то же время, а также для анализа характеристик неустойчивости атмосферы на основе температурно-влажностных профилей, полученных на ближайших к очагам гроз аэрологических станциях [10].

Результаты

Известно, что средняя многолетняя плотность разрядов молнии в землю в умеренных широтах варьируется в пределах 1–7 разр./км^2 год. Размеры очагов максимальных значений плотности разрядов молнии в землю (6–7 разр./км^2 год) составляют около 700 км^2 [11]. В рамках настоящих исследований мы попытаемся оценить изменчивость значений индексов неустойчивости атмосферы в зависимости от активности грозового процесса за каждый день исследуемого периода. При этом плотность разрядов молнии оценивалась в час, ближайший к аэрологическому сроку и выбраны площади, занятые грозами, которые расположены вблизи аэрологических станций. Активность грозового процесса поделена на категории «сильные» – более 50 разрядов в минуту, «умеренные» – 50 разрядов в минуту и «слабые» грозы с 1–20 разрядами в минуту.

Погодные условия определялись активной циклонической деятельностью в виде серии циклонов. В теплых секторах смещавшихся на восток циклонов субтропический воздух выносился далеко на север [12], что способствовало прогреву подстилающей поверхности и наличию температурных контрастов, благоприятных для развития конвективной деятельности. По данным метеорологических наблюдений в Новосибирской, Томской, Кемеровской областях и Алтайском крае, днем 28 июня и в течение двух последующих суток регистрировались дожди, местами сильные, грозы, град диаметром 7–11 мм, при грозах отмечалось шквалистое усиление ветра до 18–24 м/с [12]. Трекинг грозовых ячеек по картам Boltek говорит о юго-восточном смещении грозовых ячеек.

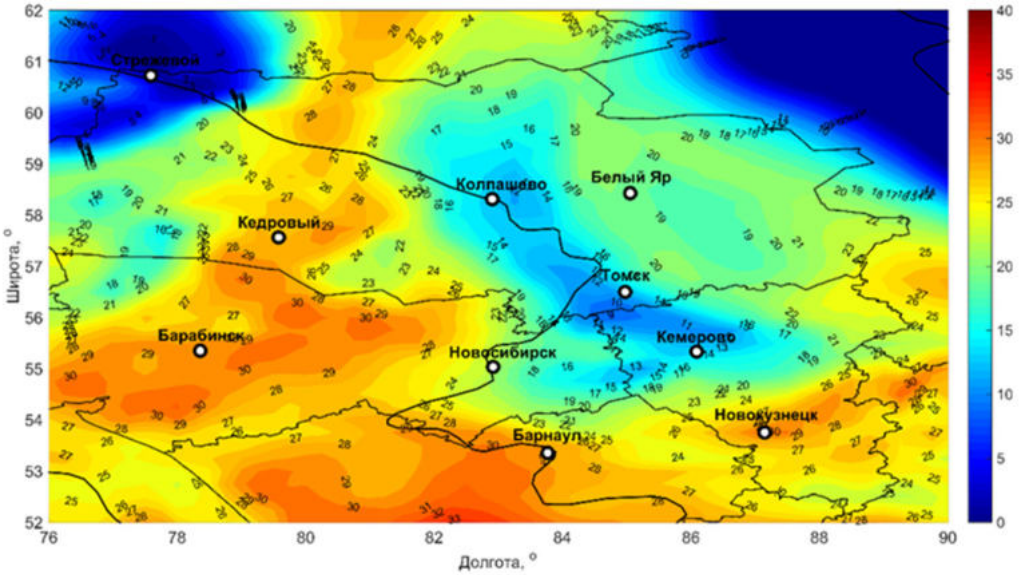
Согласно пороговым значениям индексов, определенным в [13], состояние атмосферы за 28 и 29 июня определялось как сильно неустойчивое вплоть до 90%-ной вероятности развития грозы и других опасных конвективных явлений над рассматриваемой областью. Вариации значений индексов прямо пропорциональны степени развития грозового очага; другими словами, значения индексов KIND и TOTL будут тем выше, чем более мощный процесс конвекции, который выражается большей площадью очага и большим количеством разрядов молний согласно результатам мониторинга ГПД. Пространственное расположение областей высоких значений индексов неустойчивости по данным реанализа ERA5 (рис. 2–4), в целом, согласуется с фактическими положениями грозовых очагов (рис. 1). Предконвективное состояние атмосферы за 28 июня (00 UTC) по аэрологическим данным характеризуется диапазоном значений индекса KIND от 27,1 °C (ст. Новосибирск) до 36,3 °C (ст. Колпашево), TOTL – 47,0–61,0 °C соответственно. Согласно регистрации Boltek (рис. 1, *б*) к сроку 12 UTC на исследуемой территории наблюдались слабые грозы в районе станции Новосибирск (значения индекса TOTL 49,0 °C, KIND 28,7 °C) и умеренные – в Колпашево (значения индекса TOTL 50,5 °C, KIND 33,1 °C). К следующему дню значения индексов понизились, с сохранением потенциала для развития конвективной деятельности.



а *б* *в*

Рис. 1. Карта разрядов молний ГПД Томск за 28 июня:
(а) 00 UTC, (б) 12 UTC и 29 июня (в) 00 UTC

а



б

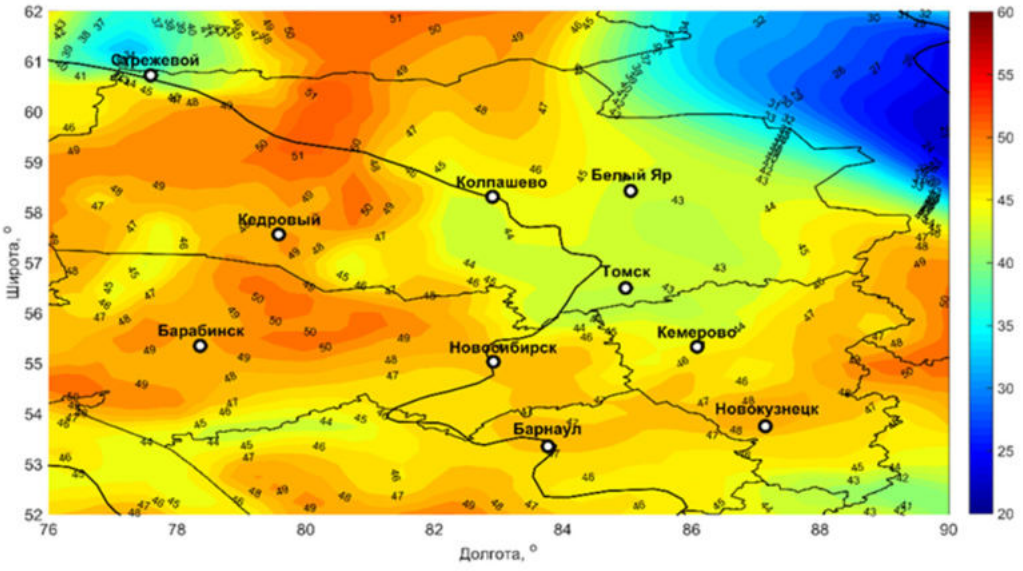


Рис. 2. Пространственное распределение значений индексов неустойчивости KIND (а) и TOTL (б) за 28 июня (00 UTC) по данным реанализа ERA5

Далее проведено сравнение абсолютных значений KIND и TOTL, полученных в пунктах аэрологических наблюдений (табл.) по пространственно интерполированным полям реанализа ERA5 и рассчитанных на основе данных температурно-ветрового зондирования. Согласованность осредненных значений реанализа с выбранными в качестве эталонных аэрологическими данными оценивалась на основе средней абсолютной ошибки прогноза MAE (mean root error), которая характеризует среднее значение погрешности без учета ее знака (с точностью до 0,1) [14]. Качественное согласие получено для значений индекса TOTL (MAE 3,8 ºС), в то время как для KIND абсолютная ошибка превысила 11,1 ºС. Несмотря на то что оба индекса характеризуют степень развития конвекции, основанную на вертикальном градиенте температуры, такую значительную разницу можно связать с тем, что KIND учитывает еще и вертикальную протяженность слоев высокой влажности и включает в себя информацию о характеристиках влажности на уровне 700 гПа, в то время как индекс TOTL менее детально описывает термодинамическое состояние слоя неустойчивости атмосферы.

Таблица

Значения индексов неустойчивости TOTL и KIND за 28–29 июня по данным аэрологического зондирования и реанализа ERA5

Дата	Данные	Время	TOTL (°C)	KIND (°C)
28.06	Новосибирск / ERA5	00:00	47 / 47	27 / 22
	Колпашево / ERA5		49 / 44	33 / 14
	Барнаул / ERA5		61 / 47	36 / 29
	Новосибирск / ERA5	12:00	49 / 42	29 / 7
	Колпашево / ERA5		51 / 44	33 / 16
	Барнаул / ERA5		46 / 41	30 / 7
29.06	Новосибирск / ERA5	00:00	49 / 52	29 / 23
	Колпашево / ERA5		45 / 48	32 / 35
	Барнаул / ERA5		51 / 49	30 / 26

Заключение

Сравнительный анализ положения очагов неустойчивости, построенных по данным реанализа ERA5 с фактическими положениями грозовых очагов в день, когда на территории Западной Сибири была зарегистрирована мощная гроза, на качественном уровне показал их хорошее согласие. Валидация значений индексов неустойчивости из реанализа ERA5 на основе эталонных значений, рассчитанных по результатам аэрологического зондирования, показала их преимущественное занижение. При этом лучшее количественное согласие отмечается для индекса TOTL (средняя абсолютная ошибка прогноза равна 3,8 ºС). Количественное расхождение значений индексов, полученных из реанализа ERA5, с эталонными значениями (по данным аэрологического зондирования), предположительно, обусловлено интерполяцией пространственных полей метеорологических величин, используемых для расчета значений индексов неустойчивости в узлах сетки, в результате которой происходит «сглаживание» пространственных неоднородностей микро- и мезомасштаба и, как следствие, занижение максимальных значений.

Получено, что при слабых грозах значения индекса TOTL не превысили 49,0 °C, KIND – 28,7 °C, для умеренных гроз характерно значение TOTL, равное 50,5°, KIND – 33,1 °C.

Дальнейшее исследование нацелено на определение корреляционных связей между индексами неустойчивости и плотностью молниевых разрядов, для чего планируется дополнительно привлекать данные WWLLN и информацию с геостационарного спутника FY-4a (продукт LMI). Отметим, что ранее для территории юго-востока Западной Сибири было получено, что пространственное распределение значений индексов TOTL, получаемых на основе продукта MOD07_L2, перспективно для выявления положения очагов грозовой облачности [15]. Поскольку в настоящее время в климатические модели внедряются параметризации молниевой активности, связывающие частоту молниевых вспышек с характеристиками конвективной облачности и продуцируемых ею опасных явлений, результаты представленной работы могут быть интересны и актуальны в этом аспекте.

а

б

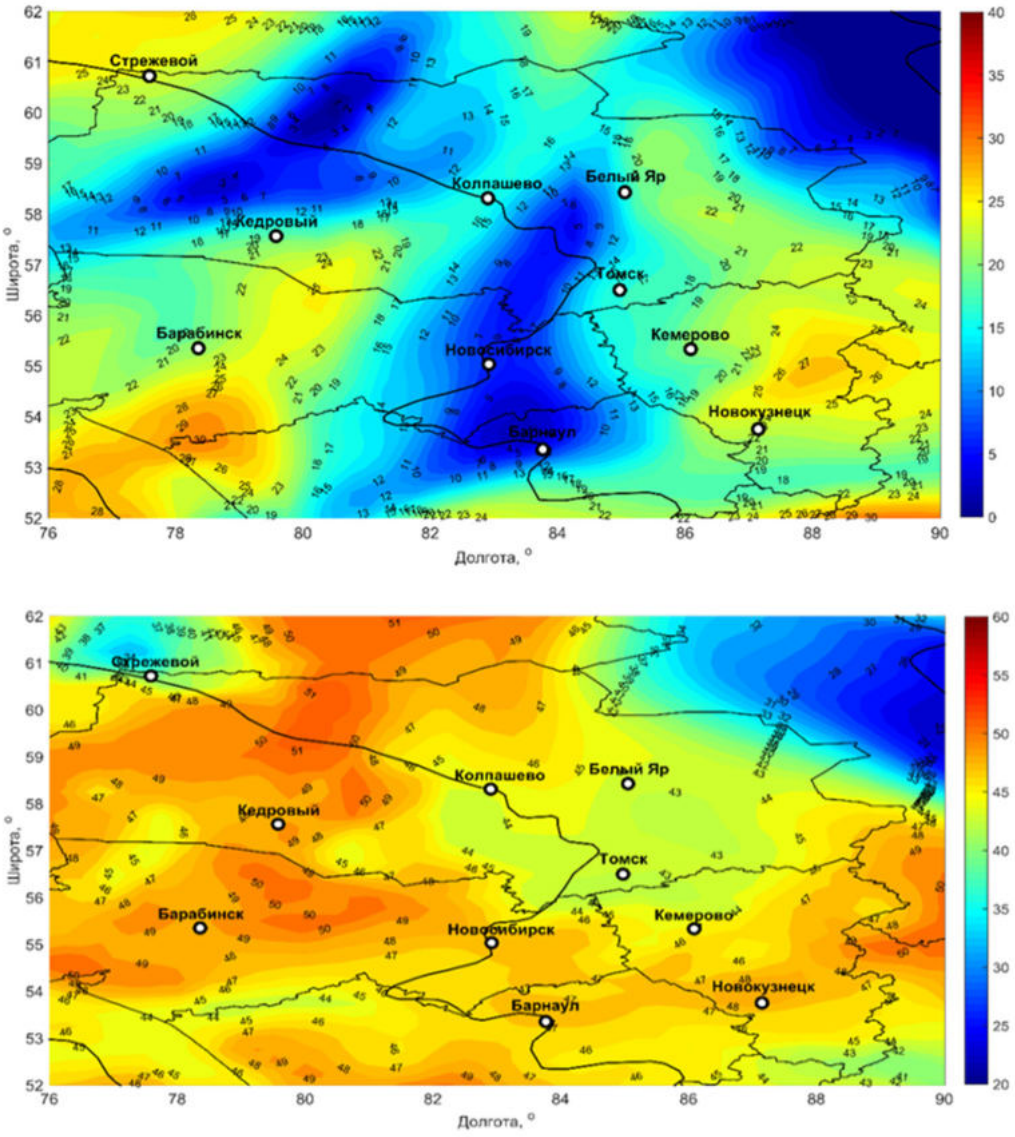


Рис. 3. Пространственное распределение значений индексов неустойчивости KIND (а) и TOTL (б) за 28 июня (12 UTC) по данным реанализа ERA5

а

б

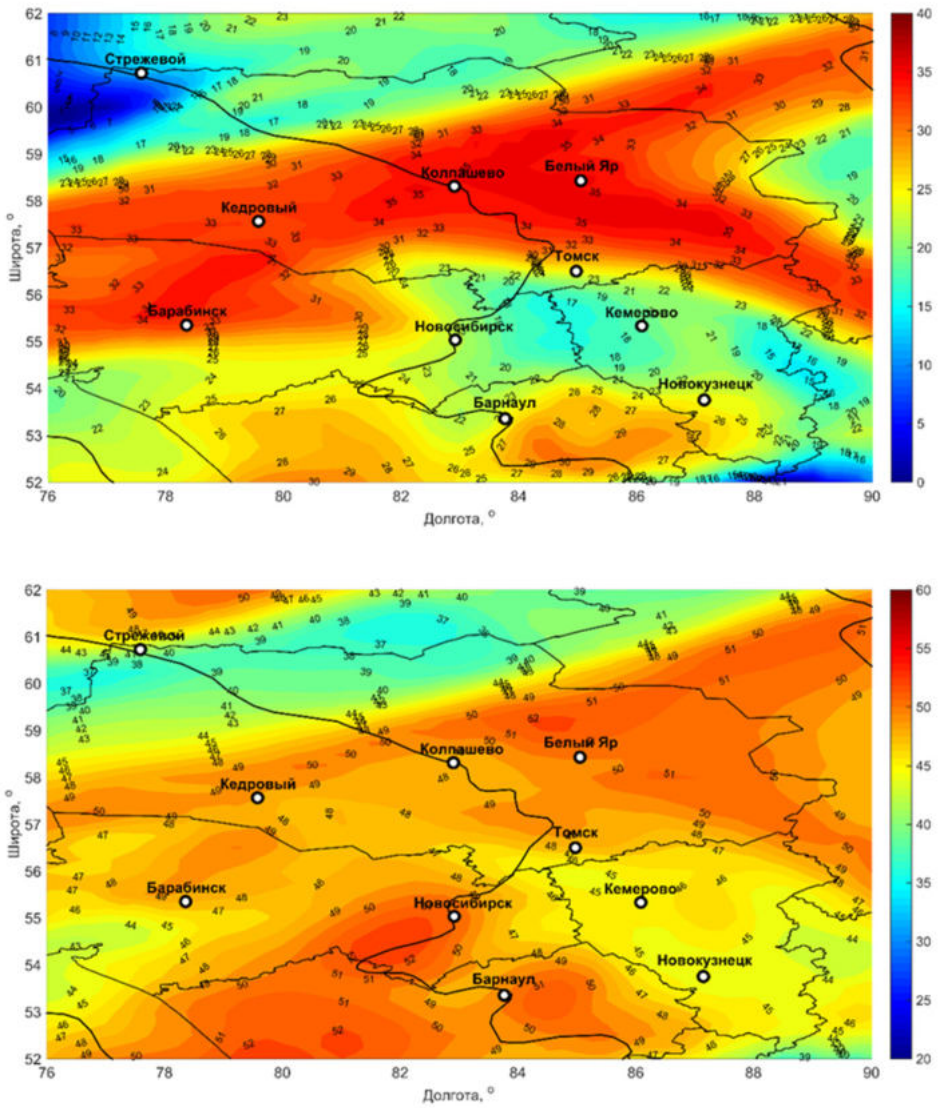


Рис. 4. Пространственное распределение значений индексов неустойчивости KIND (а) и TOTL (б) за 29 июня (00 UTC) по данным реанализа ERA5

Список литературы

1. Климатология осадков разного генезиса в Северной Евразии / А. В. Чернокульский, Ф. А. Козлов, О. Г. Золина, О. Н. Булыгина // Метеорология и гидрология. 2018. № 7. С. 5–18.

2. *Кужевская И. В., Пустовалов К. Н., Шарапова А. А.* Характеристика конвективных кластеров, восстановленные по данным инструментов зондирования ATOVS // Фундаментальная и прикладная климатология. 2018. Т. 2. С. 69–85.

3. *Верхулевский К. М.* Системы обнаружения и прогнозирование грозовых явлений производства компании «Boltek» // Метеорология и гидрология. 2015. № 7. С. 93–104.

4. *Константинова Д. А., Горбатенко В. П.* Результаты регистрации молний над юго-восточной территорией Западной Сибири // Известия вузов. Физика. 2011. Т. 54, № 11/3. С. 156–162.

5. *George J. J.* Weather forecasting for aeronautics. Academic Press, 1960. 684 p.

6. *Miller R. C.* Notes on analysis and severe storm forecasting procedures of the Air Force Global Weather Central. Technical Report. Headquarters, Air Weather Service, USAF, 1972. 190 p.

7. Copernicus Climate Change Service. ERA5 hourly data on single levels from 1979 to present. URL: https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=form (дата обращения: 20.03.2020).

8. ERA5: data documentation. URL: https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA5%3A+data+documentation#ERA5:datadocumentation-Introduction (дата обращения: 20.03.2020).

9. Анализ региональных климатических процессов Сибири: подход, данные и некоторые результаты / Е. П. Гордов, В. Ю. Богомолов, Е. Ю. Генина, Т. М. Шульгина // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. 2011. Т. 9, № 1. С. 56–66.

10. Department of Atmospheric Science University of Wyoming. URL: http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html (дата обращения: 27.03.2020).

11. *Ершова Т. В., Горбатенко В. П.* Параметры молниевой активности по инструментальным измерениям // Вестник Томского государственного педагогического университета. 2011. № 5 (107). С. 150–154.

12. *Васильев Е. В. Лукьянов В. И., Найшуллер М. Г.* Аномальные гидрометеорологические явления на территории Российской Федерации в июне 2008 г. // Метеорология и гидрология. 2008. № 9. С. 111–122.

13. Индексы неустойчивости атмосферы и их пороговые значения, оптимальные для прогноза гроз над Сибирью / О. Е. Нечепуренко, В. П. Горбатенко, Д. А. Константинова, В. В. Севастьянов // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 2 (368). С. 44–59.

14. Оценка успешности численного прогноза элементов погоды по мезомасштабной модели атмосферы высокого разрешения TSUNM3 / А. А. Старченко, И. В. Кужевская, Л. И. Кижнер, Н. К. Барашкова, М. А. Волкова, А. А. Барт // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32, № 1. С. 57–61.

15. Идентификация мезомасштабной конвекции и гроз по данным MODIS и аэрологического зондирования / В. П. Горбатенко, С. Ю. Кречетова, М. Ю. Беликова, О. В. Разумова // Вестник Томского государственного университета. 2012. № 365. С. 169–174.

УДК 551.515.001.572

Некоторые особенности использования модели WRF-ARW для прогноза перемещений и интенсивности тропических циклонов

С. А. Петриченко (psa@typhoon.obninsk.ru)

Научно-производственное объединение «Тайфун» Росгидромета, г. Обнинск

Аннотация. Представлены результаты прогностических расчетов траекторий ряда тропических циклонов сезонов 2017–2019 гг. для разных вариантов конфигурации модели. Получены количественные оценки ошибок прогнозов перемещения и интенсивности ТЦ при моделировании без и с применением блока внедрения (инициализации) первоначального вихря для двух рабочих комплектов расчетных сеток и двух величин скорости первоначального вихря: 15 и 20 м/с. Анализ полученных количественных оценок показал, что в среднем, внедрение первоначального вихря не оказывает принципиального влияние на качество прогнозов, но только в тропической зоне. Показано, что эффективность использования модели зависит от близости границ внешней расчетной сетки к точке начала счета.

Ключевые слова: тропические циклоны, перемещение, интенсивность, моделирование, прогноз, диагноз, модель WRF-ARW, параметризация, ошибки прогноза.

Введение

Тропические циклоны (ТЦ) относятся к наиболее интенсивным вихрям синоптического масштаба тропической атмосферы, образующимся главным образом над поверхностью океана. Скорость ветра в них может превышать 50 м/с, что зачастую приводит к значительному экономическому ущербу и человеческим жертвам, особенно в случае выхода ТЦ на сушу. Заблаговременный прогноз траекторий и интенсивности тропических циклонов позволяет, в случае необходимости, произвести эвакуационные и подготовительные мероприятия в районе, на который надвигается стихийное бедствие (в России это Дальний Восток). В связи с этим возможность своевременного и достаточно детализированного прогноза траектории ТЦ дает возможность проводить локальную, а не широкомасштабную подготовку обеспечения безопасности людей и объектов инфраструктуры от разрушительного воздействия ТЦ.

В прогнозе траекторий ТЦ в последнее время достигнуты значительные успехи. Прогноз интенсивности – менее развитая область; и результаты прогноза, даваемые различными прогностическими центрами, значительно отличаются друг от друга. В настоящее время весьма широко применяется универсальная система атмосферного моделирования Weather Research and Forecasting (WRF), с ядрами Advanced Research WRF (ARW) и Nonhydrostatic Mesoscale Model (NMM), предназначенная для использования, как в исследовательских целях, так и для метеорологического прогнозирования. Она представляет собой гибкую, открытую к модификациям программную систему, находящуюся в свободном доступе (Public Domain). В последнее время модели WRF за рубежом стали широко использоваться для прогноза интенсивности и перемещения ТЦ [6–8]. Началось применение для этих целей модели WRF NMM и в Дальневосточном регионе России [1].

Нами использовался «тайфунный» вариант модели WRF – модель AHW (Advanced Hurricane WRF) с динамическим ядром ARW, в которой предусмотрена возможность использования расширенного набора схем параметризации турбулентных потоков в пограничном слое и подключения одномерной модели квазиоднородного слоя океана. В ядре поддерживается моделирование с помощью вложенных расчетных сеток.

В процессе проведенных ранее работ были получены результаты, необходимые для окончательного формирования рабочей конфигурацией модели AHW, пригодной для тестовых испытаний в оперативном режиме.

1. Был определен ограниченный набор комплектов схем параметризации физических процессов на подсеточном масштабе на базе диагностических расчетов перемещения ТЦ [2].

2. Для более адекватного описания процессов в пограничном и приземном слоях атмосферы, с целью возможного использования рабочей модели не только в тропических, но и в более высоких широтах, было проведено моделирование изменчивости метеопараметров в пограничном слое в средних широтах для большого диапазона рассматриваемых метеоситуаций. Результаты моделирования сравнивались с результатами натурных наблюдений на высотной метеорологической мачте (ВММ) НПО «Тайфун», что позволило определиться с выбором схем параметризации пограничного и приземного слоев [3].

3. Были проведены прогностические расчеты перемещения большого количества ТЦ с инициализацией первоначального вихря напрямую из данных глобальной модели для отобранных комплектов параметризационных схем. Расчеты проводились на двух сетках. Внешняя базовая сетка имела разрешение 9 км, а внутренняя движущаяся, привязанная к центру циклона – 3 км. Сделанные по результатам расчетов оценки ошибок прогноза позволили выполнить статистически обеспеченный выбор конфигурации модели AHW для прогнозов, в описанных условиях, перемещения тропических циклонов в северо-западной части Тихого океана [4].

4. Были проведены работы по сравнению прогнозов перемещения ТЦ, полученных без и с использованием процедуры внедрения первоначального вихря. Расчеты проводились для различных стадий развития ТЦ, шаг внешних сеток составлял 9, 12 и 18 км, шаг внутренних подвижных сеток, привязанных к центру вихря, – 3, 4 и 6 км соответственно. Расчеты были сделаны для различных значений начальной скорости внедренного вихря, а именно 15, 20, 25 и 30 м/с. Было установлено, что при увеличении шага расчетных сеток, увеличение скорости начального вихря не способствует увеличению успешности прогноза. Если модельный циклон не развивался без внедрения первоначального вихря, то использование процедуры внедрения, независимо от скорости вихря, не приводило к возникновению модельного циклона [5].

В настоящем докладе представлены результаты прогностических расчетов циклогенеза для значительного количества ТЦ в северо-западной части Тихого океана, что позволило сделать количественные оценки ошибок прогноза перемещения и интенсивности ТЦ без и с использованием процедуры внедре-

ния первоначального вихря. Сделаны оценки влияния близости точки начала счета к границам расчетной области, а также влияния внедрения первоначального вихря на прогноз перемещения ТЦ при выходе в высокие широты.

Влияние на расчетную траекторию близости границ внешней расчетной сетки к точке начала счета

Прогноз перемещения тропического циклона не предполагает априорного знания области, на которой придется производить прогностические расчеты. Однако всегда известна начальная точка, координаты центра ТЦ в момент начала прогноза. Это знание позволяет в той или иной мере успешно представлять область прогнозирования ТЦ. Достаточно важен вопрос влияния удаленности границ внешней сетки от точки начала прогноза. Был выполнен ряд модельных расчетов для одного ТЦ с использование диагностических данных на сетках 3 (внутренняя) – 9 (внешняя) км с целью прояснения этого вопроса. На рис. 1–3 представлены расчетные траектории тайфуна 201705 Noru для одного и того же отрезка реального трека без и с внедрением первоначального вихря для различной величины областей интегрирования. Начало моделирование – стадия развитого тайфуна и дальше переход в стадию заполнения.

Точка начала движения вихря (координаты точки начала прогноза): 22,8 с. ш., 140,4 в. д.

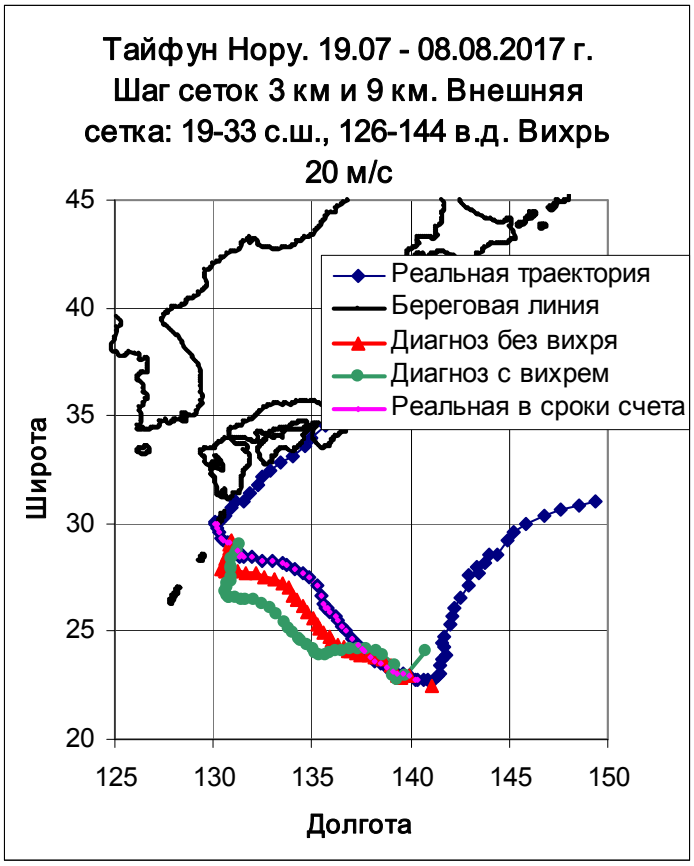


Рис. 1. Минимальное расстояние точки начала счета от границ расчетной области

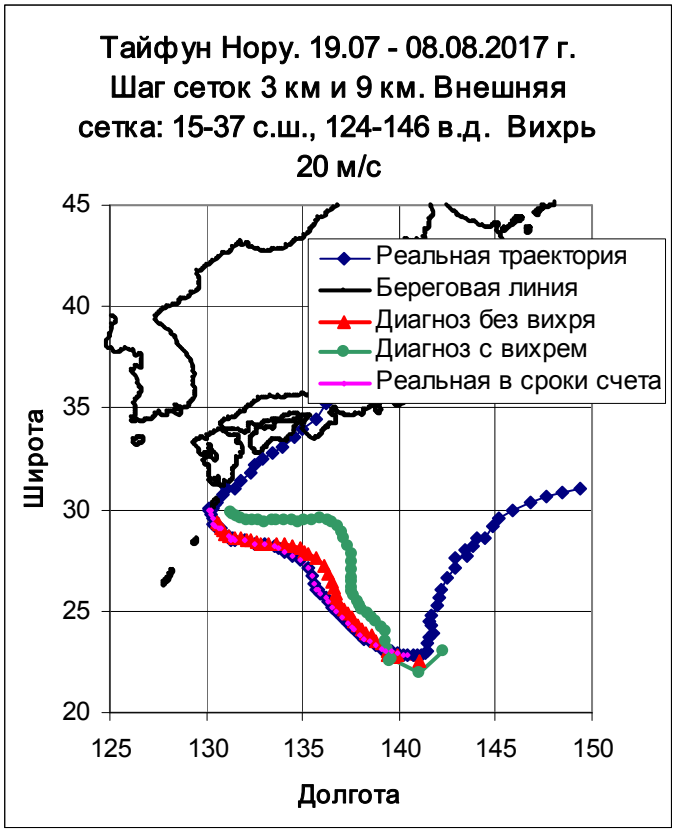


Рис. 2. Среднее расстояние точки начала счета от границ расчетной области

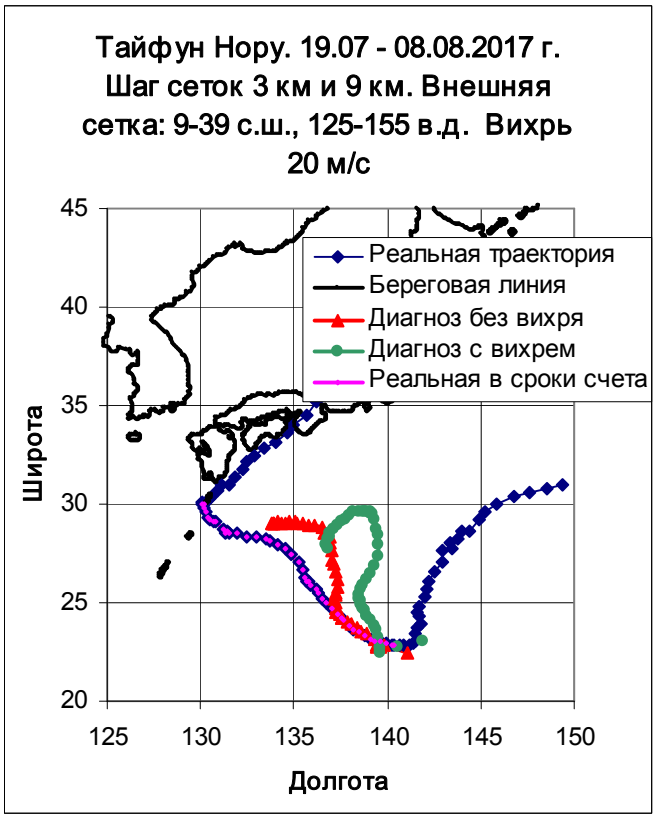


Рис. 3. Максимальное расстояние точки начала счета от границ расчетной области

На рисунках хорошо видно, что положение начальной точки счета относительно границ внешней сетки (границы внешней сетки указаны в заголовке каждого рисунка) влияет, и достаточно существенно, на модельную траекторию. Можно оценить оптимальное расстояние начальной точки от границ внешней сетки в 6–7°. На рисунках также видно, что внедрение первоначального вихря в условиях, когда существует естественный интенсивный циклон, приводит к ухудшению моделирования перемещения ТЦ.

Влияние внедрения первоначального вихря на прогноз перемещения при выходе ТЦ в высокие широты

Поскольку нас в первую очередь интересовали тропические циклоны, затрагивающие в своем перемещении российский Дальний Восток, то был рассмотрен ряд случаев выхода ТЦ за пределы тропической зоны, севернее 35° с. ш. Было установлено, что достаточно часто встречаются ситуации, когда при выходе ТЦ в более высокие широты (севернее 30° с. ш.) внедрение вихря может существенно ухудшить прогноз перемещения ТЦ. К сожалению, мы не смогли установить причины такого аномального поведения некоторых расчетных траекторий. Ниже представлены примеры таких случаев.

На рис. 4 и 5 показаны прогностические траектории тайфуна Конг-Рей (201825 Kong-Rey), рассчитанные для двух участков его перемещения. На рис. 4 перемещение ТЦ происходит полностью над акваторией южнее 30 градуса северной широты. Все три модельных трека удачно описывают движение реального ТЦ.

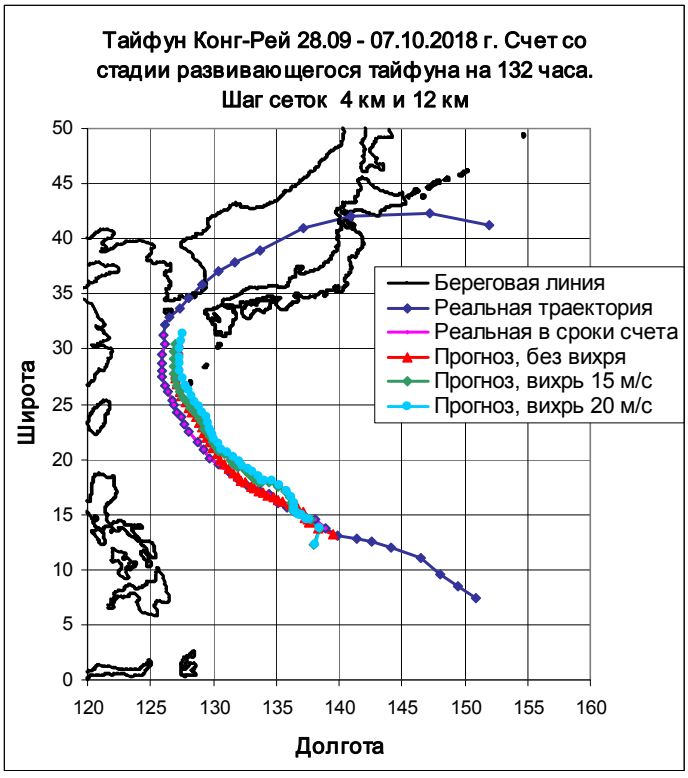


Рис. 4. Прогностические траектории тайфуна Конг-Рей южнее 30° с. ш.

На рис. 5 представлен кусок траектории ТЦ, захватывающий и более высокие широты. В этом случае хорошо видно характерное изменение направления перемещения прогностического ТЦ с внедренным первоначальным вихрем после пересечения модельным циклоном тридцать пятого градуса северной широты. Прогностическая траектория, полученная при расчетах без внедрения первоначального вихря, достаточно успешно описывает перемещение реального ТЦ. При расчетах с внедрением первоначального вихря со скоростями 15 и 20 м/с расчетные траектории демонстрируют поворот на 90° влево от направления перемещения реального ТЦ после выхода в высокие широты. К сожалению, как уже упоминалось выше, мы не выяснили причину такого поведения модельных ТЦ при расчетах с внедрением первоначального вихря.

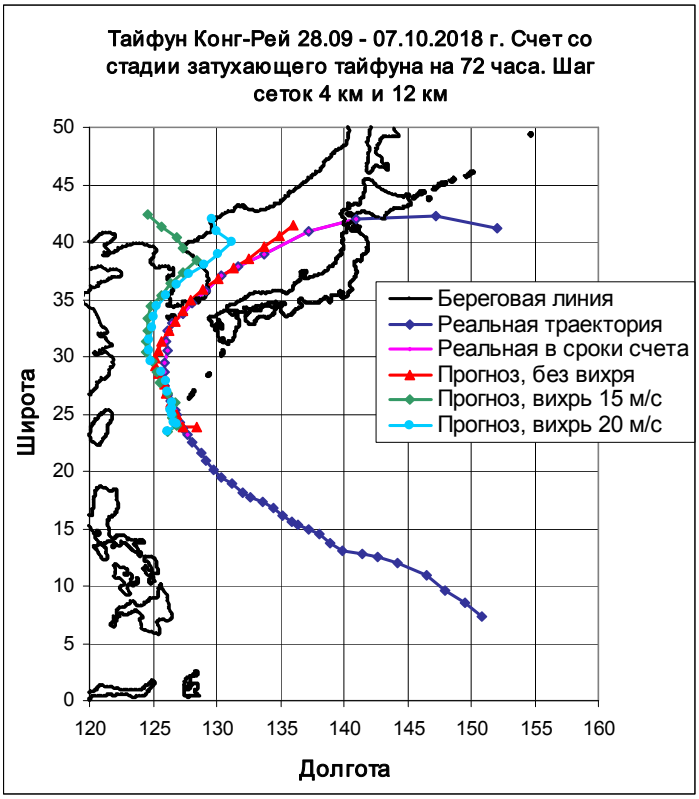


Рис. 5. Прогностические траектории тайфуна Конг-Рей захватывающие широты севернее 35° с. ш.

Ошибки прогноза перемещения и интенсивности ТЦ

При рассмотрении отдельных конкретных тропических циклонов, результатов их модельных расчетов с использованием диагностических или прогностических данных, можно увидеть практически любые варианты прогностических траекторий, более или менее часто повторяющиеся, поэтому относительно объективную оценку применимости конкретной конфигурации модели дает только расчет средних ошибок прогноза. Для этого были рассмотрены все сделанные нами расчеты траекторий ТЦ сезонов 2017–2019 гг. Всего в оценках участвовало 11 тропических циклонов, для каждого из которых прогностические и диагностические расчеты проводились несколько раз на разных стадиях

их развития независимо от района перемещения. В окончательном варианте ошибки прогноза перемещения и интенсивности вычислялись для модельных циклонов, рассчитанных на сетках 3–9 км и 4–12 км без и с внедрением первоначального вихря со скоростями 15 и 20 м/с. В качестве реальных данных для каждого ТЦ использовались оценки координат и интенсивности от Японского метеорологического агентства (JMA).

На рисунке 6 представлены оценки среднего отклонения прогностических траекторий ТЦ от реальных различной заблаговременности для указанных выше сезонов при расчетах на сетках 3–9 км. Каждая точка на линиях ошибок, получена при осреднении результатов 20–25 прогнозов.



Рис. 6. Ошибки прогноза перемещений ТЦ

Аналогичные, мало отличающиеся результаты были получены и при расчетах на сетках 4–12 км. Как хорошо видно на рисунке в среднем ошибки прогноза перемещения ТЦ для траекторий, полученных без и с внедрением первоначального вихря, примерно одинаковы (необходимо отметить, что участки траекторий с резким изменением направления перемещения после выхода в высокие широты при расчете ошибок не учитывались).

Для сравнения на эти рисунки нанесены результаты консенсусного прогноза JTWC (Joint Typhoon Warning Center) для тайфунов 2017 г. Для тайфунов 2018 г. итоговый доклад не удалось получить на портале военно-морской океанографии США (Naval Oceanography Portal). Приведенные результаты расчетов позволяют сделать вывод, что при заблаговременности до пяти суток прогноз перемещения ТЦ, сделанный на сформированной нами рабочей конфигурации модели AHW, независимо от района перемещения, не хуже консенсусного прогноза JTWC.

Необходимо также отметить следующее. Существенный вклад в ошибку прогноза перемещения ТЦ дает качество крупномасштабных прогностических полей, которые используются для расчета граничных условий. Для подтверждения этого, на рис. 7 приведены оценки среднего отклонения модельных траекторий ТЦ от реальных различной заблаговременности, рассчитанные для тех же ситуаций, что и на рисунке 6 на комплекте сеток 3–9 км с использованием для расчета начальных и граничных условий полей объективного анализа вместо прогностических.

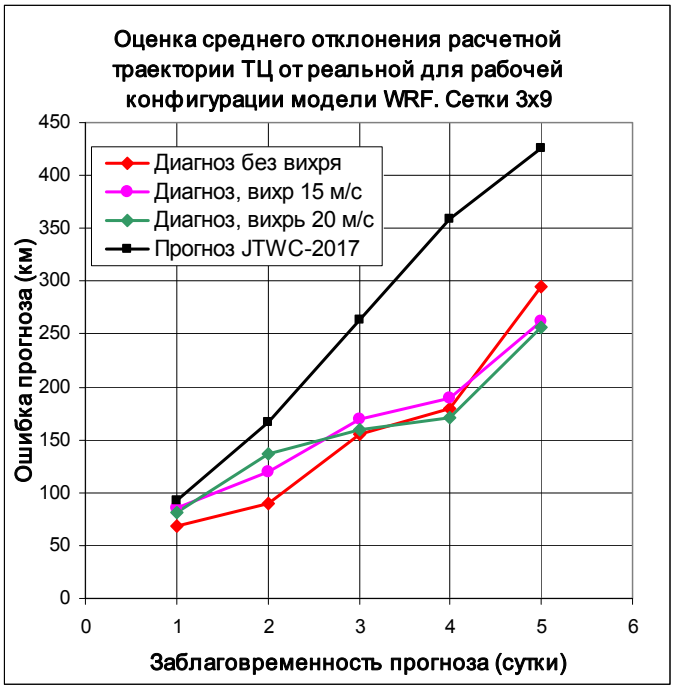


Рис. 7. Ошибки квазипрогноза перемещений ТЦ

Возрастание ошибок с ростом заблаговременности при использовании в качестве входных диагностических данных можно объяснить уже ошибками самой модели и качеством полей объективного анализа.

На рис. 8 показаны оценки среднего отклонения расчетного значения минимального давления от реального для тех же циклонов и ситуаций, которые представлены на рис. 6. Средняя величина ошибок расчета минимального давления находится на уровне ошибок определения минимального давления в реальных тропических циклонах.

Резюме

В результате проведенных работ была сформирована рабочая конфигурация тайфунного варианта модели WRF-ARW (AHW), на которой было проведено значительное количество диагностических и прогностических расчетов реальных тропических циклонов. Показаны некоторые особенности использования модели, например, расстояние начальной точки от границ расчетной области, целесообразность использования процедуры внедрения начального вихря и т. д.

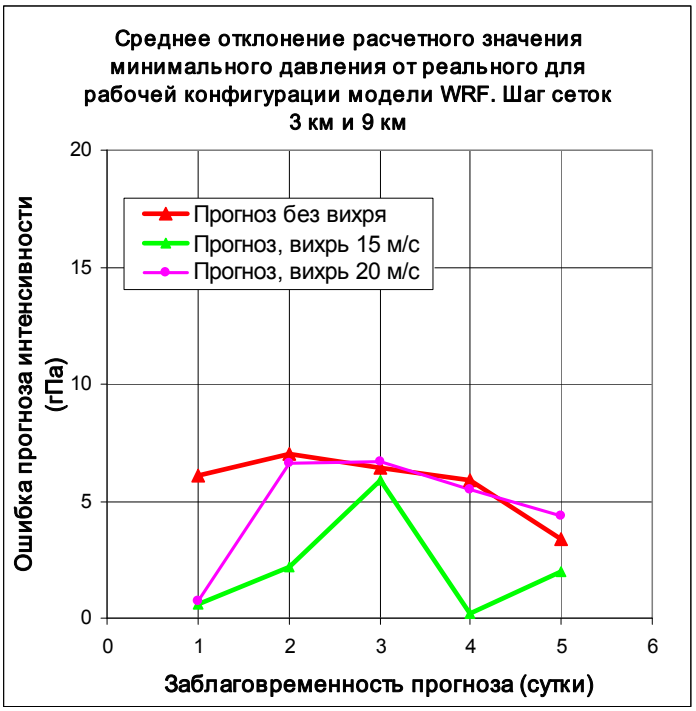


Рис. 8. Ошибки прогноза интенсивности ТЦ

На основе статистической обработки результатов прогностических расчетов генезиса ТЦ были получены количественные оценки ошибок прогнозов перемещения и интенсивности. Сравнение полученных количественных оценок ошибок прогноза перемещения ТЦ с консенсусным прогнозом JTWC (Joint Typhoon Warning Center) показало, что прогноз перемещения ТЦ, данный на сформированной рабочей конфигурации модели AHW не хуже прогноза JTWC. Мы считаем целесообразным использование апробированной конфигурации модели AHW в реальной оперативной практике.

Список литературы

1. Оценка предсказуемости перемещения тайфунов моделью WRF / В. В. Крохин, Г. Г. Баранов, А. Ю. Филь, Л. И. Евдокимова // Труды ФГБУ ДВНИГМИ. 2015. Вып. 155. С. 204–224.

2. *Новицкий М. А., Петриченко С. А., Тереб Л. А.* Зависимость расчетной траектории тропического циклона северо-западной части Тихого океана от выбора параметризаций физических процессов при использовании модели AHW // Метеорология и гидрология. 2014. № 12. С. 17–28.

3. *Петриченко С. А., Новицкий М. А.* Выбор оптимальных схем параметризации пограничного и приземного слоев в модели WRF для прогноза изменчивости метеопараметров в пограничном слое атмосферы // Гидрометеорология и экология: научные достижения и перспективы развития : тр. II Всерос. конф. Санкт-Петербург. 19–20 дек. 2018 г. СПб. : Химиздат, 2018. С. 528–531.

4. *Петриченко С. А., Новицкий М. А., Тереб Л. А.* Использование модели AHW для прогноза перемещения тропических циклонов // Восточно-Европейский научный журнал. 2018. № 3(31). Т. 3. С. 34–41.

5. *Петриченко С. А., Ераньков В. Г.* Сравнительный анализ прогноза перемещения тропического циклона с помощью модели AHW с использованием процедуры внедрения первоначального вихря и без нее // Закономерности формирования и воздействия морских, атмосферных опасных явлений и катастроф на прибрежную зону РФ в условиях глобальных климатических и индустриальных вызовов : материалы Междунар. науч. конф. Ростов-на-Дону. 13–23 июня 2019 г. Изд. ЮНЦ РАН, 2019. С. 86–89.

6. *Davis C. et al*. Prediction and landfalling hurricanes with the Advanced Hurricane WRF Model // Monthly Weather Review. 2008. Vol. 136. P. 1990–2004.

7. *Pu Zh., Li X., Zipser E. J.* Diagnosis of the initial and forecast errors in the numerical simulation of the rapid intensification of hurricane Emily (2005) // Weather and Forecasting. 2009. Vol. 24. P. 1236–1251.

8. *Vijay Tallapragada.* Expansion of NCEP Operational Hurricane Weather Research and Forecast Model Forecast Guidance to all Global Tropical Cyclones. 2015 International Workshop on Typhoon and Flood – APEC Experience Sharing on Hazardous Weather Events and Risk Management. 27–29 May, 2015, Taipei, Taiwan. Handbook. P. 103.

УДК 551.46

Пространственные характеристики ветрового волнения в Азовском море при разных фазах движения циклона

А. А. Полозок (polozok.umi@gmail.com)[1], В. В. Фомин (v.fomin@ukr.net)[1], И. Н. Фомина (irina.fomina@ukr.net)[2]

[1] Морской гидрофизический институт РАН, г. Севастополь
[2] Севастопольское отделение Государственного океанографического института имю Н. Н. Зубова, г. Севастополь

Аннотация. Представлены пространственные характеристики ветрового волнения в Азовском море при разных фазах движения циклона. Для этих целей проведена настройка совместной модели ADCIRC+SWAN, подготовлена неструктурированная расчетная сетка, определены траектории движения циклона и для каждой из траекторий выполнены расчеты высот значительных волн и скоростей ветра.

Ключевые слова: волнение, Азовское море, циклон, SWAN, ADCIRC.

Актуальность исследования и используемые модели

Исследование особенностей влияния атмосферных циклонов на ветровое волнение в Азовском море – актуальная задача. При определенных скоростях и направлениях движения атмосферные циклоны становятся эффективными генераторами значительных повышений уровня моря.

В данной работе проведена оценка интенсивности ветрового волнения в Азовском море в зависимости от траектории движения циклонов. Для исследования подъемов уровня в Азовском море при различных типах ветрового воздействия использована реализованная на неструктурированных сетках совместная численная модель *ADCIRC + SWAN*.

При проведении расчетов *ADCIRC* [3] и *SWAN* применяется общая неструктурированная сетка, используется один и тот же набор *CPU*, реализовано последовательное выполнение программных кодов.

Неструктурированная расчетная сетка включает 178565 узлов и 348735 треугольных элементов, охватывая Азовское море и Керченский пролив (рис. 1). Длины сторон треугольных ячеек не постоянны и изменяются от 50 до 800 м. Для южной границы Керченского пролива предусмотрено условие свободного прохождения.

Описание используемой для моделирования ветрового волнения аналитической модели циклона представлено в работе [1]. Максимальные скорости ветра возникают между границей циклона и его центром.

Основой выбора параметров циклона являлись представленные в работе [2] оценки, согласно которым возникающие над Азово-Черноморским бассейном циклонические образования имеют характерный диаметр порядка 500–700 км, перепад давления составляет от 10 до 20 гПа, а скорость перемещения циклонов изменяется от 5 до 10 м/с.



Рис. 1. Применяемая для моделирования ветрового волнения в Азовском море неструктурированная расчетная сетка

Результаты моделирования

Основной целью моделирования являлось рассмотрение особенностей пространственного распределения характеристик ветрового волнения в Азовском море для различных траекторий перемещения модельного циклона. Основные сведения о траекториях перемещения центра циклона представлены в таблице.

Таблица

Траектории движения центра циклона (Т1 – Т3) при радиусе циклона 300 км, скорости перемещения циклона 40 км/ч, перепаде давления между периферией и центром циклона 20 гПа

Тип траектории	Начальная широта центра циклона, ° с. ш.	Начальная долгота центра циклона, ° в. д.	Угол наклона траектории, °
Т1	46,25	29,25	0
Т2	48,25	29,25	0
Т3	44,25	29,25	0

В таблице угол наклона траектории отсчитывался относительно оси x, которая направлена против часовой стрелки на восток. Выбор начальной долготы центра циклона основан на допущении, что в начальный момент времени при любом значении начальной координаты по широте центра циклона зона пониженного давления располагалась за пределами Азовского моря.

Выбранные траектории соответствуют варианту перемещения циклона с запада на восток в широтном направлении. Авторами работы рассчитаны поля уровня моря и ветрового волнения (рис. 2–7) на неструктурированной сетке при радиусе циклона равном 300 км, скорости перемещения циклона 40 км/ч и перепаде давления между периферией и центром циклона – 20 гПа. Общее время интегрирования – 72 ч.

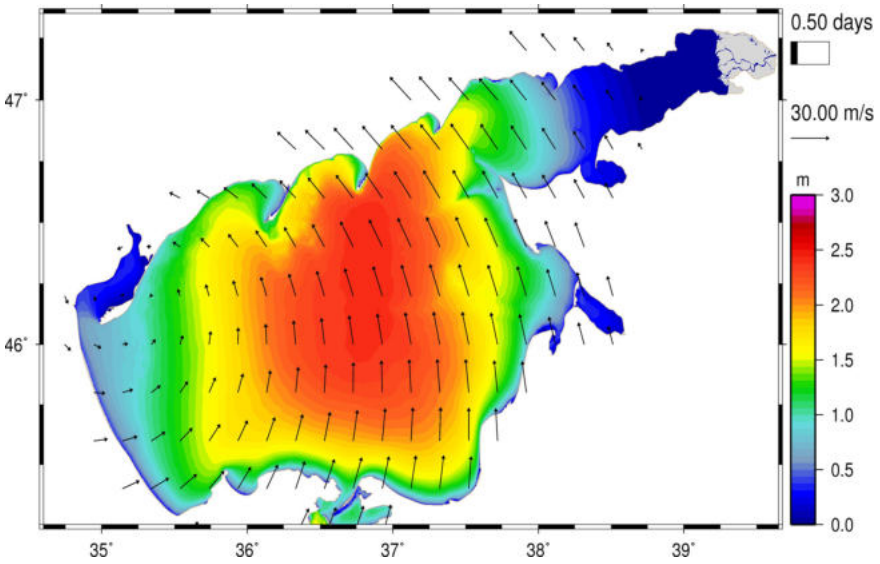


Рис. 2. Высота значительных волн (м) и скорость ветра для траектории Т1 при t = 12 ч

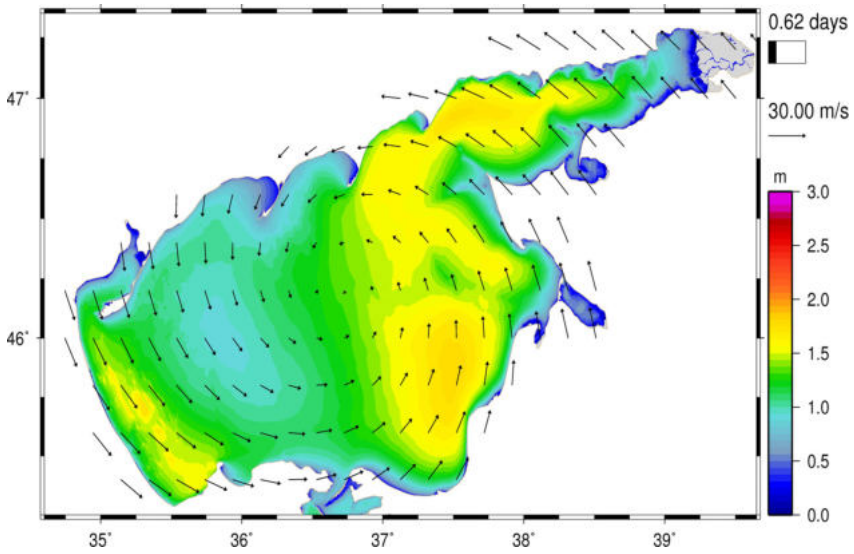


Рис. 3. Высота значительных волн (м) и скорость ветра для траектории Т1 при t = 15 ч

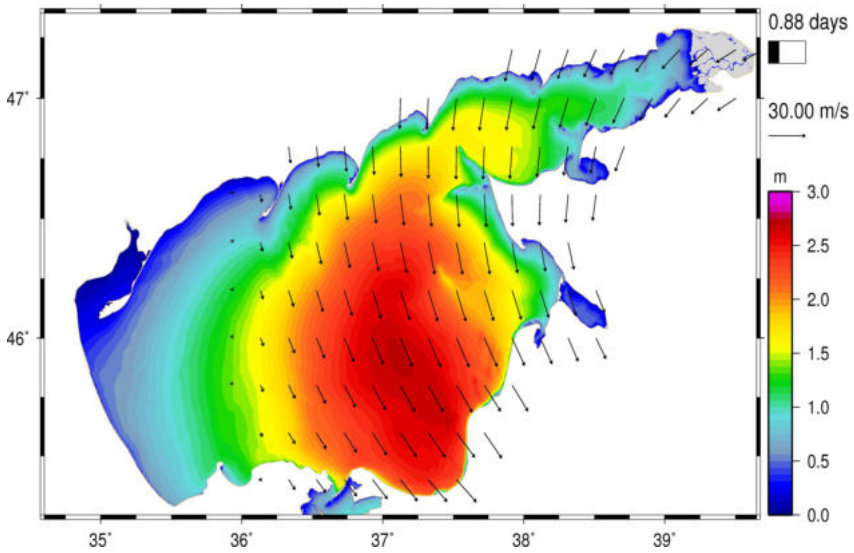


Рис. 4. Высота значительных волн (м) и скорость ветра для траектории Т1 при t = 21 ч

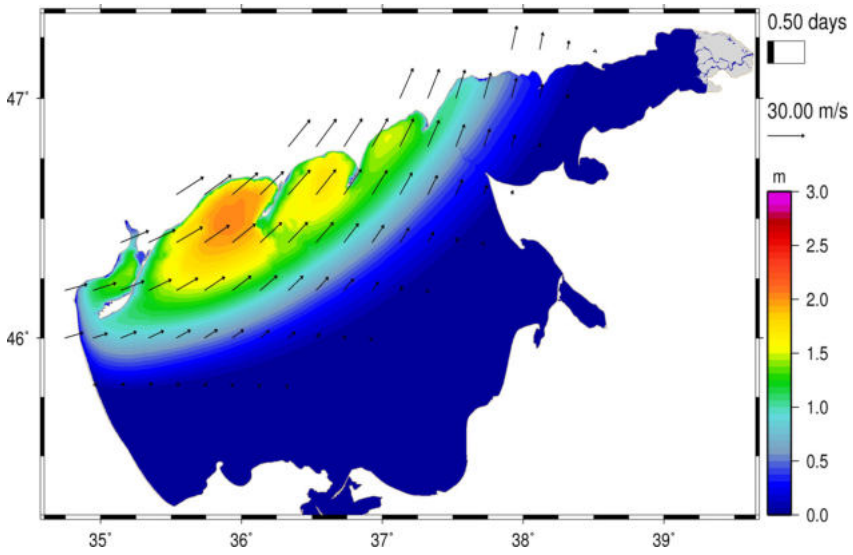


Рис. 5. Высота значительных волн (м) и скорость ветра для траектории Т2 при t = 12 ч

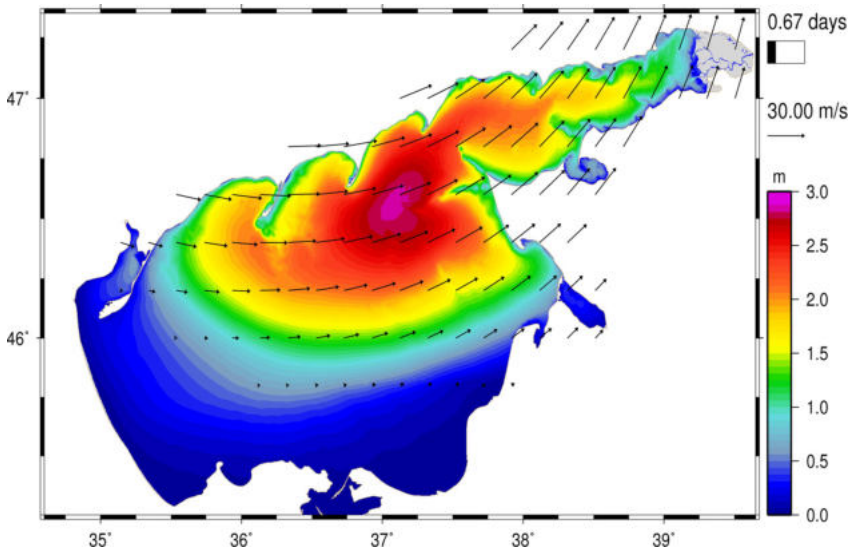


Рис. 6. Высота значительных волн (м) и скорость ветра для траектории Т2 при t = 15 ч

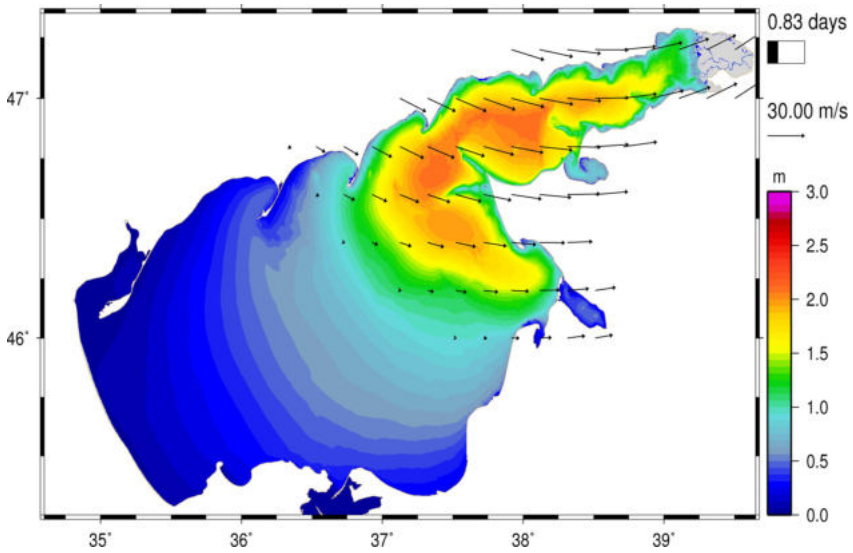


Рис. 7. Высота значительных волн (м) и скорость ветра для траектории Т2 при t = 20 ч

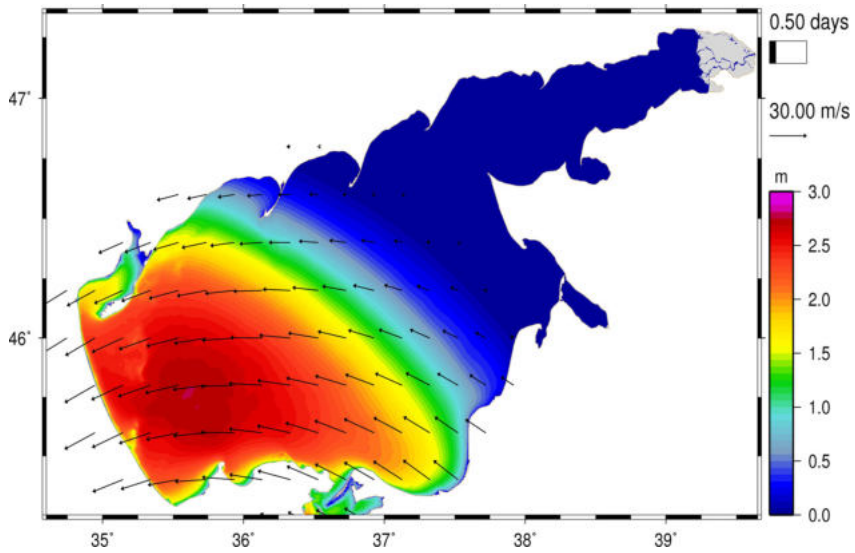


Рис. 8. Высота значительных волн (м) и скорость ветра для траектории Т3 при t = 12 ч

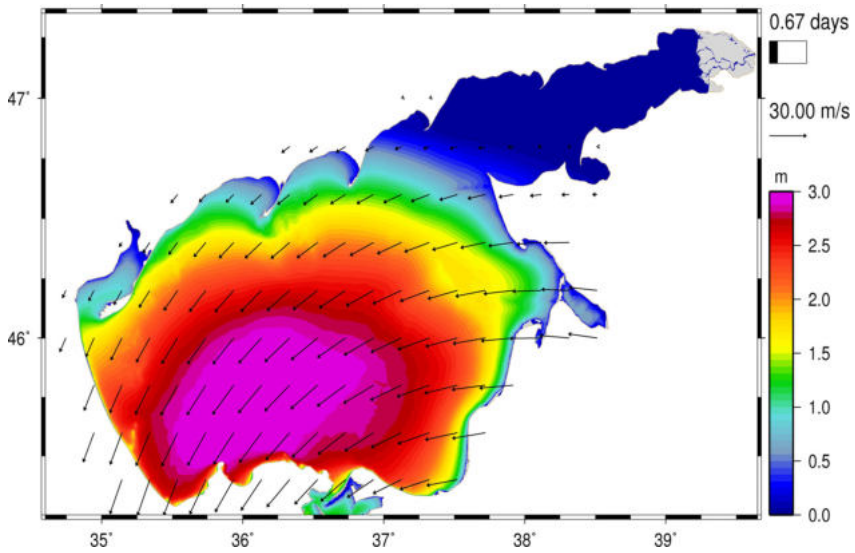


Рис. 9. Высота значительных волн (м) и скорость ветра для траектории Т3 при t = 16 ч

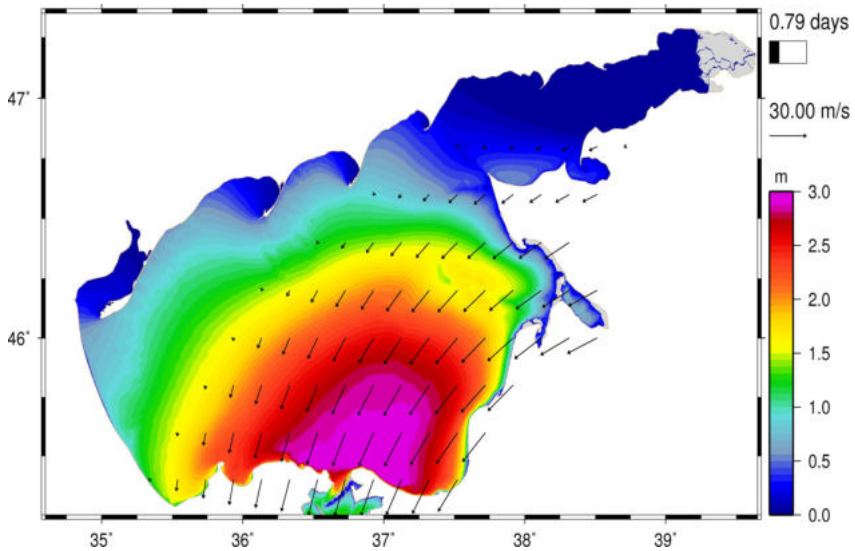


Рис. 10. Высота значительных волн (м) и скорость ветра для траектории *Т*3 при *t* = 19 ч

Выводы по работе

На рисунках 2–7 приведены характерные поля высот значительных волн (*SWH*) в Азовском море для траекторий Т1 и Т2. Стрелками показывается направление скорости ветра в циклоне; длина стрелок прямо пропорциональна величине скорости ветра.

При выбранной траектории Т1 центр циклона пересекает центральную часть Азовского моря, передвигаясь с запада на восток. При выходе передней части циклона на акваторию моря ветрами южных румбов формируется обширная область интенсивного волнения (*SWH* превышает 2 м), вытянутая в меридиональном направлении (рис. 2). При дальнейшем движении циклона происходит смещение этой области на восток.

В момент расположения центра циклона над центром моря происходит снижение скорости ветра и ослабевание волнения (рис. 3). Дальнейшее перемещение циклона на восток сопровождается усилением ветра и изменением его направления на северо-западное. Как результат – формирование области интенсивного волнения в районе юго-восточного побережья Азовского моря (рис. 4).

При движении по траектории Т2 циклон воздействует на Азовское море южной периферией. В начале движения циклона над морем дует юго-западный ветер, в результате чего формируются очаги волнения в районе кос северного побережья (рис. 5). Затем интенсивность волнения продолжает возрастать, захватывая северную часть моря с Таганрогским заливом (рис. 6). Дальнейшее передвижение циклона на восток способствует ослабеванию ветра и затуханию волнения (рис. 7).

Перемещающийся по траектории Т3 циклон воздействует на Азовское море северной периферией. В начале движения циклона ветер восточного направления создает области волнения в южной и юго-западной части моря (рис. 8). При дальнейшем развитии шторма волнением оказывается охвачена вся глубоководная часть Азовского моря.

Значительные высоты волн порядка 3 м возникают в районе южного побережья (рис. 9–10).

Работа выполнена в рамках темы Госзадания № 0827-2018-0004 МГИ РАН.

Список литературы

1. *Белокопытов В. Н., Фомин В. В., Ингеров А. В.* О комплексных исследованиях опасных природных явлений в Азово-Черноморском бассейне // Морской гидрофизический журнал. 2017. № 3. С. 32–48.

2. Об эволюции южных циклонов, выходящих на Черное море и территорию Украины, по данным спутниковых и наземных измерений / Г. А. Гришин, Т. М. Баянкина, Е. И. Калинин, М. М. Лундберг // Исследования Земли из космоса. 1991. № 3. С. 89–95.

3. *Dietrich J. C., Kolar R. L., Luettich R. A.* Assessment of ADCIRC's Wetting and Drying Algorithm // Proceedings of the XV International Conference on Computational Methods in Water Resources. 2004. Vol. 2. P. 176–177.

УДК 556.535.2/3

Наводнение на южных притоках Байкала в июле 2019 года

В. Н. Синюкович (sin@lin.irk.ru)[1], И. А. Чернявская (ermar23@mail.ru)[2], С. С. Шелемба[2]

[1] Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск
[2] ФГБУ Иркутское УГМС, г. Иркутск

Аннотация. Рассмотрены условия формирования максимальных расходов и уровней воды притоков Байкала летом 2019 г. в районе г. Байкальска, где располагаются полигоны отходов целлюлозно-бумажного комбината. Выполнено сопоставление наблюдавшихся экстремумов с показателями паводка 1971 г. Полученные данные свидетельствуют о происходящих в современных условиях изменениях механизма формирования паводков, связанных с общими изменениями климата и указывают на необходимость дальнейших исследований в этом направлении.

Ключевые слова: наводнение, паводок, расход воды, уровень.

Введение

На побережье оз. Байкал в районе г. Байкальска располагаются различные хозяйственные объекты, среди которых особое место занимал целлюлозно-бумажный комбинат (ЦБК). Предприятие работало с 1966 г. и после его остановки (2013 г.) вблизи г. Байкальска на Солзанском и Бабхинхом полигонах остаются практически бесхозными около 6 млн т отходов. Высокая увлажненность территории и горный рельеф способствуют формированию на протекающих здесь водотоках высоких паводков и селей, представляющих опасность для жителей г. Байкальская, объектов инфраструктуры, а также создающих угрозу разрушения или переполнения сооружений полигона и попадания токсичных отходов в оз. Байкал. В этих условиях изучение условий формирования выдающихся паводков и возможность их предвидения становятся особенно актуальными. Своеобразным подтверждением реальности развития подобных гидрометеорологических событий служит наводнение на реках в районе г. Байкальска в июле 2019 г., сопровождавшееся разрушением некоторых хозяйственных объектов и требующее всестороннего изучения механизма его формирования для своевременного предвидения высоких подъемов воды и подготовки защитных мероприятий.

Гидрологические условия территории

Рассматриваемая территория располагается на северо-западном склоне хребта Хамар-Дабан и относится к наиболее увлажненным районам внутри горного обрамления котловины оз. Байкал. Влажные воздушные потоки преобладающего северо-западного переноса беспрепятственно проникают сюда через Приморский хребет по долине р. Ангары и обусловливают повышенную увлажненность склонов и благоприятные условия формирования стока рек [2]. Протекающие здесь реки (Утулик, Хара-Мурин, Бабха, Харлахта, Солзан, Большая и Малая Осиновки) имеют горный характер и вследствие незначительного удаления водораздельной части хребта от Байкала (30–35 км) характе-

ризуются, за исключением рр. Утулик и Хара-Мурин, небольшими водосборными площадями – менее 200 км^2. На их водный режим значительное влияние оказывает высота местности и ее орографическое строение. Большие уклоны и крутизна склонов определяют небольшое время склонового добегания вод и незначительные потери на фильтрацию, а ливневые осадки одновременно охватывают всю водосборную территорию рек и обусловливают исключительно большие модули стока, предопределяя формирование высоких дождевых паводков и селей. Средний модуль стока исследуемых рек составляет 20–25 л/с с км^2 [4], тогда как в среднем для бассейна оз. Байкал он близок к 4 л/с с км^2 [1]. Среди рассматриваемых водотоков, в соответствии с размерами водосборной площади, наиболее высокой удельной водоносностью отличается р. Малая Осиновка, наиболее низкой – р. Утулик (табл.).

Таблица

Некоторые гидроморфометрические характеристики водотоков

Река	Площадь бассейна, км^2	Длина, км	Средний уклон	Максимальный расход воды,	
				м^3/с	л/с с км^2
Утулик	965	86	0,016	1320	1380
Хара-Мурин	1150	86	0,018	1670	1480
Бабха	87	23	0,054	293*	3370
Харлахта	16,5	10	0,078	9,87	667
Солзан	154	34	0,037	515**	3340
Большая Осиновка	27,1	12	0,065	232*	8560
Малая Осиновка	7,0	6,5	0,135	80*	11400

*данные [5] соответствуют 1%-ной обеспеченности;
** получено по косвенным данным.

Подъем воды в половодье на реках территории выражен слабо вследствие постепенного таяния снега по высотным зонам, поэтому дождевые паводки по величине расходов воды обычно выше и приурочены к ливневым осадкам, выпадающим в июне-июле.

Результаты и обсуждение

Наводнение в Иркутской области летом 2019 г. наиболее высоким и разрушительным было на левобережных притоках р. Агары, берущих начало в горах Восточного Саяна. На южных притоках Байкала паводки были существенно ниже и приходились на конец июля, тогда как на притоках Ангары наиболее высокой была июньская волна паводков (рис. 1).

Формированию июльских паводков на южных притоках Байкала способствовала активная циклоническая деятельность и выпадение обильных осадков. На метеостанции в Байкальске за 27–29 июля зафиксировано 295 мм осадков, а на станции Хамар-Дабан 477 мм (180 % месячной нормы). Сопоставление с соответствующими данными 1971 г. указывает на некоторую схожесть осадкоформирующих процессов в предпаводочный период. В обоих случаях влагу на Прибайкалье приносили южные циклоны. В 1971 г. циклон образовался над территорией Монголии вблизи Улан-Батора [3], а в 2019 г. на юге Красноярско-

го края. При этом осадки, сформировавшие наводнение в 2019 г., уступали показателям 1971 г. сравнительно немного, в то время как расходы воды рассматриваемых рек на пике паводка 2019 г. оказались меньше приблизительно вдвое (рис. 2).

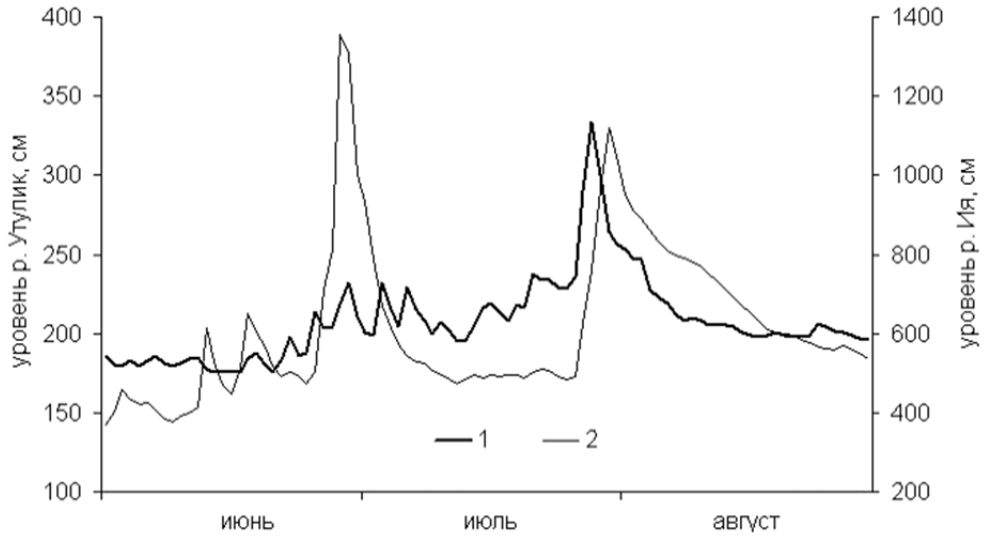


Рис. 1. Сравнительный ход уровней летом 2019 г. на рр. Утулик (1) и Ия (2)

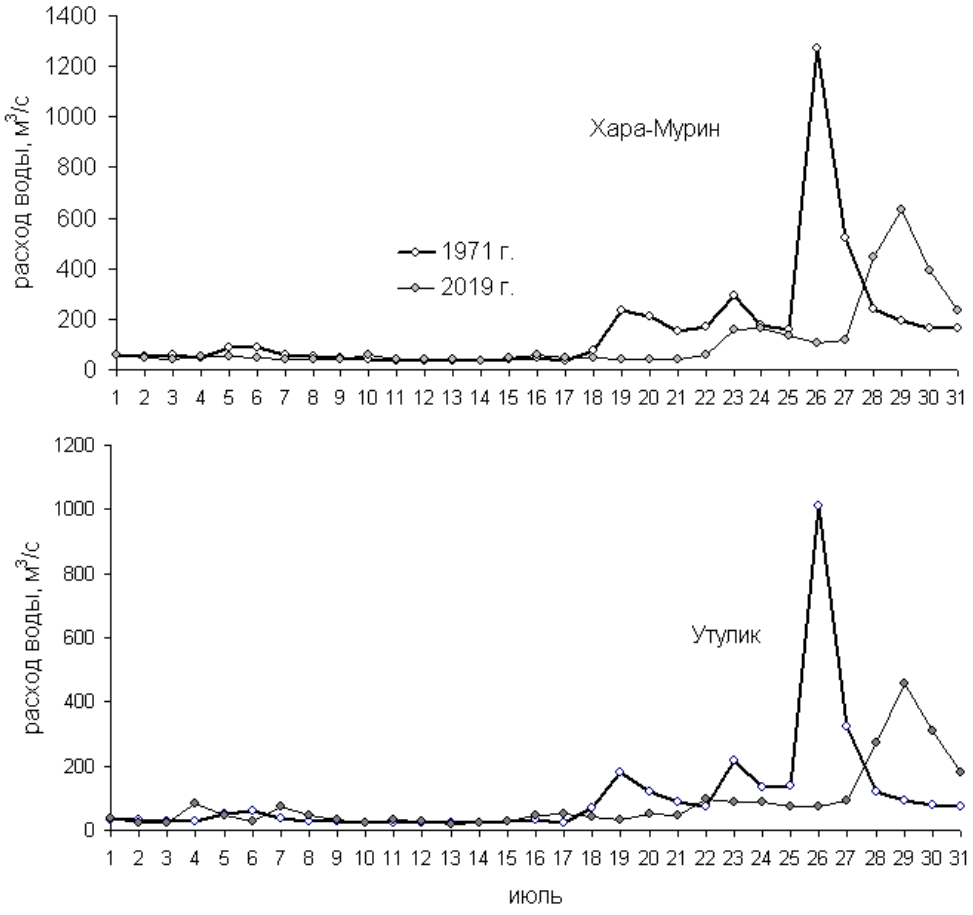


Рис. 2. Паводки 1971 и 2019 гг. на изученных водотоках

Очевидно, такие различия обусловлены как разной динамикой дождей, так и разным увлажнением подстилающей поверхности. Так, если суточному максимуму осадков предшествовало несколько дождливых дней, то на пике осадков обеспечивается высокое влагонасыщение рыхлых отложений и минимум потерь воды на инфильтрацию (коэффициент стока приближается к единице). В тех случаях, когда наибольшее количество осадков выпадает в первые дни дождливого периода, то значительная их часть расходуется на инфильтрацию и пополнение запасов грунтовых вод, снижая поверхностный сток.

Нельзя исключать и влияние других факторов, к числу которых относится высокая вероятность перекрытия русел водотоков обломочным материалом и древесной растительностью с образованием стихийных «водохранилищ», прорыв которых сопровождается исключительно высокими расходами воды. В связи с этим следует отметить, что на протекающей вблизи р. Слюдянки, например, уровень воды в паводок 2019 г., наоборот, был выше, чем в 1971 г.

Не касаясь других нюансов формирования наводнений можно говорить, что паводок 2019 г. на южных притоках Байкала в районе г. Байкальска все же оказался достаточно высоким и сопровождался затоплением прибрежных территорий и разрушением отдельных сооружений (мост через р. Солзан в г. Байкальске, защитные стенки на реках Бабха и Бол. Осиновка). На некоторых водотоках паводки носили характер селевых (плотность потока менее 1100 кг/м^3), т. е. могли перерасти в сели и привести к более серьезным последствиям для экологии и хозяйства региона. Для полигона отходов БЦБК при этом возрастает угроза не только разрушения карт-накопителей с отходами, но и опасность их переполнения дождевыми водами.

Еще одной особенностью формирования паводков на юге Прибайкалья в 2019 г. является повышение роли динамики и активности высотного циклогенеза и высотных фронтальных зон, что связано, очевидно, с изменениями климата и усилением блокирующих процессов в циркуляции атмосферы [6].

Заключение

Паводок на южных притоках Байкала в районе г. Байкальска в июле 2019 г. по высоте подъема вод несколько уступал наводнению 1971 г. при близких характеристиках выпавших осадков. Это свидетельствует как о возможной перестройке синоптических условий формирования ливневых паводкообразующих осадков в регионе и разным состоянием подстилающей поверхности исследуемой территории, так и недостаточной изученностью этих явлений. Отличительной особенностью формирования ливневых осадков в регионе является возрастающая роль высотных барических образований. Необходимость дальнейших исследований формирования паводков на этой территории определяется недостаточной инженерной защитой хозяйственных объектов на южном побережье Байкала, в том числе и уязвимостью размещенных в районе г. Байкальска полигонов промышленных отходов БЦБК.

Список литературы

1. *Афанасьев А. Н.* Водные ресурсы и водный баланс бассейна оз. Байкал. Новосибирск : Наука, 1976. 239 с.

2. *Латышева И. В., Синюкович В. Н., Чумакова Е. В.* Современные особенности гидрометеорологического режима южного побережья оз. Байкал // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2009. № 2. С. 117–133.

3. *Макаров С. С.* Сели Прибайкалья. Иркутск : Изд-во Ин-та географии им. В. Б. Сочавы СО РАН. 2012. 111 с.

4. *Синюкович В. Н., Троицкая Е. С.* Средний сток рек байкальской котловины и его определение при недостаточности наблюдений // География и природные ресурсы. 2000. № 4. С. 60–64.

5. Технический отчет по инженерно-гидрологическим изысканиям на реках южного Прибайкалья для проектирования защитных гидротехнических сооружений. Иркутск : ИркутскТИСИЗ, 1966. 241 с.

6. *Sinyukovich V. N., Latysheva I. V., Makukhin V. L.* Catastrophic floods on the southern tributaries of Lake Baikal and features of the atmospheric circulation // Limnology and Freshwater Biology. 2020. Vol. 4, N 1. P. 564–565.

УДК 556.535.3

Влияние максимальных за год суточных сумм осадков на изменение уровней и расходов воды в реках Иркутско-Черемховской равнины в теплое время года на примере реки Ия близ города Тулуна

И. А. Смирнов (ivan-2-2-99@yandex.ru), Е. А. Дронова (edronova@rgau-msha.ru)

Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К. А. Тимирязева, г. Москва

Аннотация. Приведен анализ влияния максимальных суточных сумм осадков на изменение уровней и расходов воды в р. Ия близ г. Тулуна. Отмечено, по каким параметрам и за какой период проводился анализ.

Ключевые слова: максимальные суммы осадков, изменение уровней и расходов воды, паводки.

Иркутско-Черемховская равнина расположена на юге Иркутской области в предгорьях Восточного Саяна. Вследствие такого расположения местные реки, берущие начало в Саянах, подвержены преимущественно паводковым процессам в теплое время года. Это наиболее густонаселенный и важный в хозяйственном плане регион области, поэтому актуальной является оценка выпадения экстремальных осадков на данной территории и их влияния на изменение уровней воды в реках [1; 2].

В этой статье приводится анализ влияния максимальных за год суточных сумм осадков на изменение уровней и расходов в р. Ия близ г. Тулуна. Данный пункт выбран для анализа как один из самых наглядных в плане возникновения паводков в данном регионе и как имеющий наиболее достаточный объем необходимых данных для анализа.

Стоит сказать о том, по каким параметрам и за какой период проводился анализ. Для начала с сайта [4] были взяты среднесуточные данные по дням за сезон с мая по сентябрь об уровнях рек с 2008 по 2019 г. в сантиметрах. К ним соответственно были добавлены также среднесуточные значения расходов воды в водотоке ($м^3/с$) [4] и суточные суммы осадков (мм) [3].

Для большей полноты картины были взяты такие же данные за период с 1938 по 1988 г. Однако за этот период в свободном доступе отсутствуют данные об уровнях воды в р. Ия, поэтому анализ был проведен по среднесуточным расходам, взятым с сайта [5]. За период с 1989 по 2007 г. в открытом доступе отсутствуют какие-либо вообще гидрологические характеристики.

На снимках НИЦ «Планета», а также в сводках МЧС России, критической точкой начала подтопления для г. Тулуна значится уровень воды в р. Ия, равный 700 см. Однако для большей наглядности для анализа были взяты также пороговые значения уровней воды в реке, равные 500 и 600 см.

Для того чтобы перейти к соответствующим значениям расходов, все они за период с 2008 по 2018 г., будучи привязанными к сопутствующим значениям уровней воды за сезон с мая по сентябрь, были ранжированы в убывающем порядке последних.

По полученному ряду с помощью специализированных функций Microsoft Excel был проведен регрессионный анализ, определена зависимость расхода от уровня воды в реке (рис. 1).

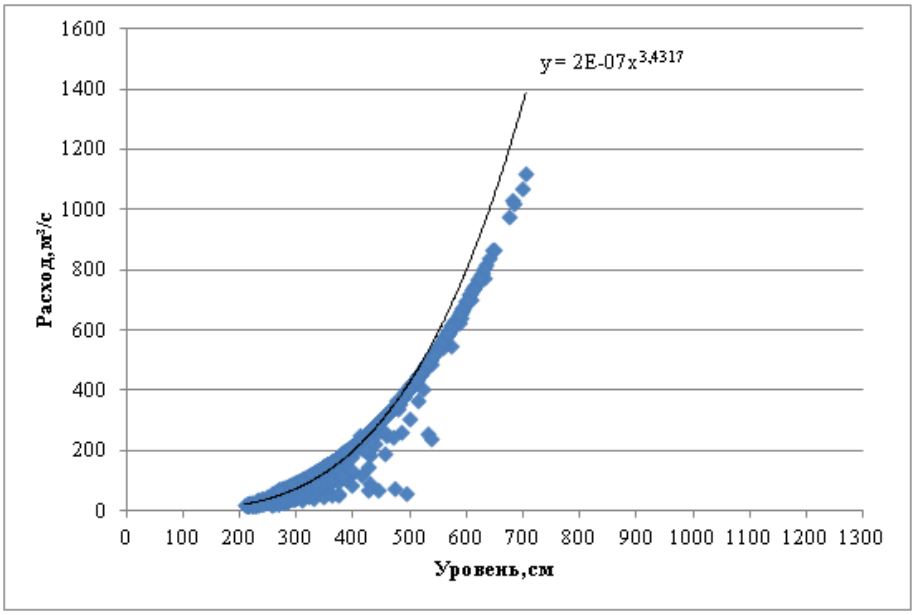


Рис. 1. Поле корреляции между уровнем и расходом воды в р. Ия близ г. Тулуна по данным 2008–2018 гг.

Коэффициент детерминации R-квадрат равен 0,9589 (95,89 %), что может свидетельствовать о корректности и приемлемости выбранной зависимости.

В итоге для значений уровней вод в реке, составляющих 500 см, 600 см и 700 см, были приняты расходы, равные соответственно 410, 696 и 1085 м³/с.

Проведя анализ, можно сказать, что за периоды с 1938 по 1988 г. и с 2008 по 2019 г. за сезон с мая по сентябрь были отмечены 339 раз, когда расход воды в р. Ия близ г. Тулуна превысил значение в 410 м³/с. Из них 121 раз с расходом свыше 696 м³/с, а в 23 случаях – свыше 1085 м³/с, т. е. с уровнем воды выше точки начала подтопления – 700 см. Максимальные среднесуточные расходы воды в р. Ия по годам и даты, когда они отмечались, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Максимальные за год среднесуточные расходы воды в р. Ия близ г. Тулуна и даты, когда они были зафиксированы

Год	Максимальный расход, м³/с	Дата	Год	Максимальный расход, м³/с	Дата
1938	768	25 авг	1971	902	13 авг
1939	1070	21 июн	1972	1020	16 июл
1940			1973	1150	06 июн
1941	1050	23 июл	1974	812	27 май
1942	1000	11 июн	1975	690	12 авг
1943	467	23 июн	1976	621	14 июн
1944	1790	12 сен	1977	947	19 июл
1945	513	13 авг	1978	824	09 июн
1946	944	07 июл	1979	703	21 май

Окончание табл. 1

Год	Максимальный расход, м³/с	Дата	Год	Максимальный расход, м³/с	Дата
1947	1210	20 авг	1980	2510	04 авг
1948	1040	31 июл	1981	1630	22 авг
1949	1030	28 июл	1982	1000	22 май
1950	780	20 июн	1983	534	10 июн
1951	727	23 май	1984	2550	24 июл
1952	1440	02 июл	1985	911	24 июл
1953	1120	03 июл	1986	1102	17 июл
1954	1180	16 июл	1987	1260	22 июл
1955	1040	04 июл	1988	1180	18 июл
1956	600	01 июн	2008	733	22 июн
1957	789	02 июн	2009	669	02 авг
1958	839	06 авг	2010	1120	04 июн
1959	1710	21 июн	2011	640	07 июл
1960	1460	05 авг	2012	869	02 сен
1961	1060	13 июл	2013	744	16 июн
1962	1440	19 июл	2014	410	01 июн
1963	950	06 июл	2015	659	15 июл
1964	749	08 июл	2016	809	21 авг
1965	772	21 май	2017	440	28 авг
1966	981	07 авг	2018	≈900	29 июл
1967	1350	24 авг	2019	≈3500	29 июн
1968	454	10 июн	Среднее	1029	09 июл
1969	651	22 май	Максимальное	≈3500	12 сен
1970	988	27 май	Минимальное	410	21 май

Теперь можно оценить, как максимальные за сезон с мая по сентябрь суточные суммы атмосферных осадков, отмеченные по метеостанции г. Тулуна, влияли на изменение расходов и уровней воды в р. Ия в данном пункте.

Таблица 2

Влияние максимальных суточных сумм осадков на изменение уровней и расходов в р. Ия близ г. Тулуна

Год	Максимальная сумма осадков за сутки, мм	Дата	Был достигнут максимальный расход воды в реке	Был превышен расход в		
				410 м³/с	696 м³/с	1085 м³/с
1938	60,5	26 июля	–	–	–	–
1939	44,5	2 августа	–	+	+	–
1940						
1941	73,3	29 июля	–	+	+	–
1942	22,2	10 июля	–	+	+	–
1943	25,5	29 августа	–	–	–	–
1944	29,4	12 июля	–	+	–	–
1945	36	19 июн	–	+	–	–
1946	35	1 сент.	–	+	–	–
1947	48	17 июля	–	+	–	–
1948	47,4	1 августа	–	–	–	–
1949	26,2	14 июля	–	+	+	–

Продолжение табл. 2

Год	Максимальная сумма осадков за сутки, мм	Дата	Был достигнут максимальный расход воды в реке	Был превышен расход в		
				410 м³/с	696 м³/с	1085 м³/с
1950	34,5	10 июляя	–	–	–	–
1951	22,9	25 июляя	–	+	–	–
1952	82,9	11 июляя	–	+	+	–
1953	22,4	13 июня	–	–	–	–
1954	29,6	13 августа	–	–	–	–
1955	24,4	13 августа	–	–	–	–
1956	19,9	16 июня	–	–	–	–
1957	18,8	20 августа	–	–	–	–
1958	58,5	12 августа	–	–	–	–
1959	29,3	15 июня	+	+	+	+
1960	75,8	1 августа	+	+	+	+
1961	32,6	28 июля	–	+	+	–
1962	23,8	1 июля	–	+	+	–
1963	26	1 августа	–	–	–	–
1964	34,2	1 июля	–	–	–	–
1965	15,1	11 сент.	–	–	–	–
1966	45	30 июля	–	+	+	–
1967	29,4	24 июн	–	+	–	–
1968	47,1	28 июля	–	+	–	–
1969	18	24 августа	–	–	–	–
1970	34,4	27 июля	–	+	–	–
1971	48,7	10 августа	+	+	+	–
1972	42,3	23 июля	–	+	–	–
1973	31,6	3 июля	–	+	–	–
1974	27,8	15 май	–	–	–	–
1975	36,2	8 августа	+	+	–	–
1976	33,9	22 июля	–	+	–	–
1977	50	26 июля	–	–	–	–
1978	20,5	31 июля	–	+	–	–
1979	30,5	24 августа	–	–	–	–
1980	39,3	30 июля	+	+	+	+
1981	38	17 августа	+	+	+	+
1982	36,2	26 июн	–	+	+	–
1983	62	27 августа	–	+	–	–
1984	28,4	25 июля	–	+	+	+
1985	41	14 июн	–	+	–	–
1986	100,8	6 августа	–	+	–	–
1987	38,5	1 сент.	–	–	–	–
1988	39,1	31 августа	–	–	–	–
2008	25,4	15 июн	–	–	–	–
2009	78,4	30 июля	–	–	–	–
2010	54,6	11 июня	–	+	–	–
2011	35,4	28 августа	–	–	–	–
2012	32,5	5 июля	+	+	+	–
2013	21,3	20 августа	–	–	–	–
2014	22,2	29 августа	–	–	–	–
2015	31	10 июля	–	–	–	–
2016	24,9	4 августа	–	–	–	–
2017	16,7	25 августа	+	+	–	–

Окончание табл. 2

Год	Максимальная сумма осадков за сутки, мм	Дата	Был достигнут максимальный расход воды в реке	Был превышен расход в		
				410 м³/с	696 м³/с	1085 м³/с
2018	56,2	14 августа	–	+	–	–
2019	104	27 июля	–	+	+	+
Сумма			8	35	17	6

По табл. 2 можно сказать, что повышение расходов и уровней воды в анализируемой реке до максимальных значений за сезон с мая по сентябрь не всегда зависит от максимальных суточных осадков. Совпадение этих двух показателей за данные 62 года было отмечено всего 8 раз.

К повышению значений расходов воды в водотоке свыше 410 м³/с максимальные суточные осадки привели в 35 случаях, свыше 696 м³/с – в 17 случаях. В шести из семнадцати лет, в которых были отмечены повышения уровней воды в р. Ия сверх 700 см, к ним привели максимальные суточные суммы осадков.

Отдельно можно выделить максимальные суточные осадки в 2019 и 1986 гг., превысившие 100 мм. И если в первом случае они привели ко второму за сезон пику паводка на реке, недобравшему примерно 230 см до отмеченного месяцем ранее рекордного значения в 1357 см, то в случае 1986 г. такая сумма осадков не оказала серьезного влияния на изменение гидрологических показателей реки в данном пункте, расход воды увеличился лишь до 517 м³/с (уровень менее 600 см). В первую очередь подобное можно объяснить иным распределением осадков по территории, в частности, выше по течению реки.

В заключение можно еще раз отметить, что максимальные суточные осадки не всегда приводят к повышению расходов и уровней воды в анализируемой реке до максимальных значений, и возникновение катастрофических паводков во многом будет обусловливаться не только величиной осадков, но и их продолжительностью, типом, интенсивностью и распределением по территории.

Список литературы

1. *Котова Н. А.* Мониторинг и прогнозирование неблагоприятных и опасных гидрологических явлений на территории Иркутской области // Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России : материалы II Всерос. науч.-практ. конф. Иркутск, 5–7 июня 2019 г. С. 318–324.

2. *Тимофеева С. С.*, *Эглит В. Э., Морозова О. В*. Мониторинг наводнений на территории Иркутской области на основе ретроспективного анализа // Вестник ИрГТУ. 2011. № 9(56). С. 82–89.

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). Доступ к данным ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД». URL: http://meteo.ru/data (15.02.2020).

4. Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации, агенство водных ресурсов. Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО). URL: https://gmvo.skniivh.ru/ (дата обращения: 15.02.2020).

5. R-ArcticNET: A Regional, Electronic, Hydrographic Data Network For the Arctic Region. Iya At Tulun. URL: http://www.r-arcticnet.sr.unh.edu/v4.0/ (дата обращения: 15.02.2020).

УДК 535.2

Особенности рассеяния и ослабления инфракрасного излучения частицами сажи

Л. Т. Созаева (ljk_62@rambler.ru)

Высокогорный геофизический институт, г. Нальчик

Аннотация. Исследованы характеристики рассеяния инфракрасного излучения аэрозолем в окне прозрачности атмосферы. Показано, что максимальные значения ослабления, поглощения и обратного рассеяния отмечаются в диапазоне размеров аэрозоля $1{,}5 < r < 2\,мкм$ с абсолютным максимумом при $r \approx 1{,}5\,мкм$. Создание аэрозольного слоя с такими размерами частиц может обеспечить парниковый эффект для эффективной защиты растений от радиационных заморозков.

Ключевые слова: радиационные заморозки, дисперсность аэрозоля, инфракрасное излучение, парниковый эффект, выхолаживание радиации.

Заморозки наносят серьезный ущерб сельскому хозяйству. Так, например, по данным Министерства сельского хозяйства Ставропольского края (ЮФО), в результате заморозков в первой половине апреля 2020 г. потери урожая по семечковым культурам могут составить до 70 %, по косточковым – до 90 %. Общий убыток в выручке от продаж – около полумиллиарда рублей. И это только по Ставропольскому краю. В связи с этим защита урожая от воздействия заморозков приобретает особую актуальность. Для этого применяется ряд методов, среди которых широкое распространение получили методы защиты от радиационных заморозков. Известно, что основной причиной формирования радиационных заморозков является выхолаживание земной поверхности за счет инфракрасного теплового излучения. Предлагается создать аэрозольный слой в атмосфере (парниковый эффект) для уменьшения выхолаживания.

Целью настоящей работы является выбор дисперсности аэрозоля, обеспечивающий максимальное поглощение инфракрасного излучения земли в окне прозрачности атмосферы. Для достижения поставленной цели исследовались особенности взаимодействия аэрозольных частиц с электромагнитным излучением. Рассматривалась задача дифракции, простейшим случаем которой является рассеяние на однородном шаре Ми. В этом случае поперечные сечения обратного рассеяния c, общего рассеяния c_p, ослабления c_{oc} и поглощения c_n аэрозольных частиц рассчитываются по следующим выражениям:

$$\sigma(\lambda, m, r) = \frac{\lambda^2}{4\pi}\left|\sum_{n=1}^{\infty}(-1)^n(2n+1)(a_n + b_n)\right|^2, \quad (1)$$

$$\sigma_p(\lambda, m, r) = \frac{\lambda^2}{2\pi}\sum_{n=1}^{\infty}(2n+1)\left[|a_n|^2 + |b_n|^2\right], \quad (2)$$

$$\sigma_{oc}(\lambda, m, r) = \frac{\lambda^2}{2\pi}(-\mathrm{Re})\sum_{n=1}^{\infty}(2n+1)(a_n + b_n), \quad (3)$$

$$c_n = c_{oc} + c_p \quad (4)$$

где λ – длина волны электромагнитного излучения; m – относительный комплексный показатель преломления; r – радиус частицы аэрозоля.

Допустим, что аэрозоль монодисперсный. Тогда при сжигании дымообразующего состава в единице объема создается число частиц аэрозоля N, которое определяется общей массой M диспергируемого дымообразующего вещества и объемом диспергирования

$$N = \frac{3M}{4\pi r^3 \rho V} \tag{5}$$

где $\rho \approx 1{,}35$ г/см$^{3-}$ плотность частиц; V – объем диспергирования, равный $V = L \cdot l \cdot h$ (L – длина пути диспергирования в м; l – ширина области диспергирования в м; а h – толщина слоя аэрозоля в м).

В случае, когда масса диспергированного аэрозоля равна 1 г/м^3, в соответствии с (1)–(5), выражения для расчета отражаемости, коэффициентов ослабления и поглощения принимают вид:

$$\eta(\lambda, m, r) = \frac{3M}{4\pi r^3 \rho V}\sigma = 1{,}77\frac{c}{r^3}, \tag{6}$$

$$k_{oc}(\lambda, m, r) = \frac{3M}{4\pi r^3 \rho V}\sigma_{oc} = 1{,}77\frac{\sigma_{oc}}{r^3}, \tag{7}$$

$$k_n(\lambda, m, r) = \frac{3M}{4\pi r^3 \rho V}\sigma_n = 1{,}77\frac{\sigma_n}{r^3}. \tag{8}$$

где η k_{oc}, k_n выражены в м$^{-1}$; σ σ_{oc}, σ_n – в мкм^2; r – в мкм.

Согласно закону Бугера, интенсивность проходящего через аэрозольную среду излучения J определяется выражением:

$$J = J_0 e^{-k_{oc}h}, \tag{9}$$

где J_0 – интенсивность падающего излучения.

В соответствии с (9) степень уменьшения интенсивности восходящего инфракрасного излучения земли в аэрозольном слое толщиной h, может быть рассчитана по формуле:

$$\frac{J_0}{J} = e^{k_{oc}h}. \tag{10}$$

В качестве аэрозоля, обладающего способностью сильно поглощать солнечную и земную радиацию в широком диапазоне длин волн (от 0,25 до 13 мкм), выделяется сажа.

Были исследованы характеристики рассеяния электромагнитного излучения в диапазоне длин волн $8 \leq \lambda \leq 14\,мкм$ от частиц сажи с размерами $1 \leq r \leq 6\,мкм$ (рис. 1). Кривые поперечных сечений обратного рассеяния (штрихпунктирные) носят осциллирующий характер. На малых длинах волн кривые имеют вид, близкий к виду затухающей синусоиды, колеблющейся относительно асимптотического значения, равного примерно 0,12. В длинноволновой части инфракрасного излучения эта зависимость имеет монотонно возрастающий характер до размера $r \approx 2{,}5\,мкм$ с последующей осцилляцией. Кривые поперечников ослабления (сплошные) и рассеяния (пунктирные) с увеличением радиуса рас-

тут монотонно и, начиная с $1{,}5 \div 2\,мкм$, стремятся к своим асимптотическим значениям.

Так как задача состоит в определении оптимальных размеров частиц аэрозоля для создания парникового эффекта, то нас интересуют радиусы аэрозоля, при которых отражаемость максимальна.

Оказалось, что на длине волны λ=8 мкм отражаемость максимальна при радиусах аэрозоля $1 \leq r \leq 1{,}3\,мкм$, на λ=9 мкм – $1{,}2 \leq r \leq 1{,}4\,мкм$, на λ=10 мкм – $1{,}3 \leq r \leq 1{,}5\,мкм$ и на длине волны λ=11 мкм –$1{,}4 \leq r \leq 1{,}7\,мкм$ [1].

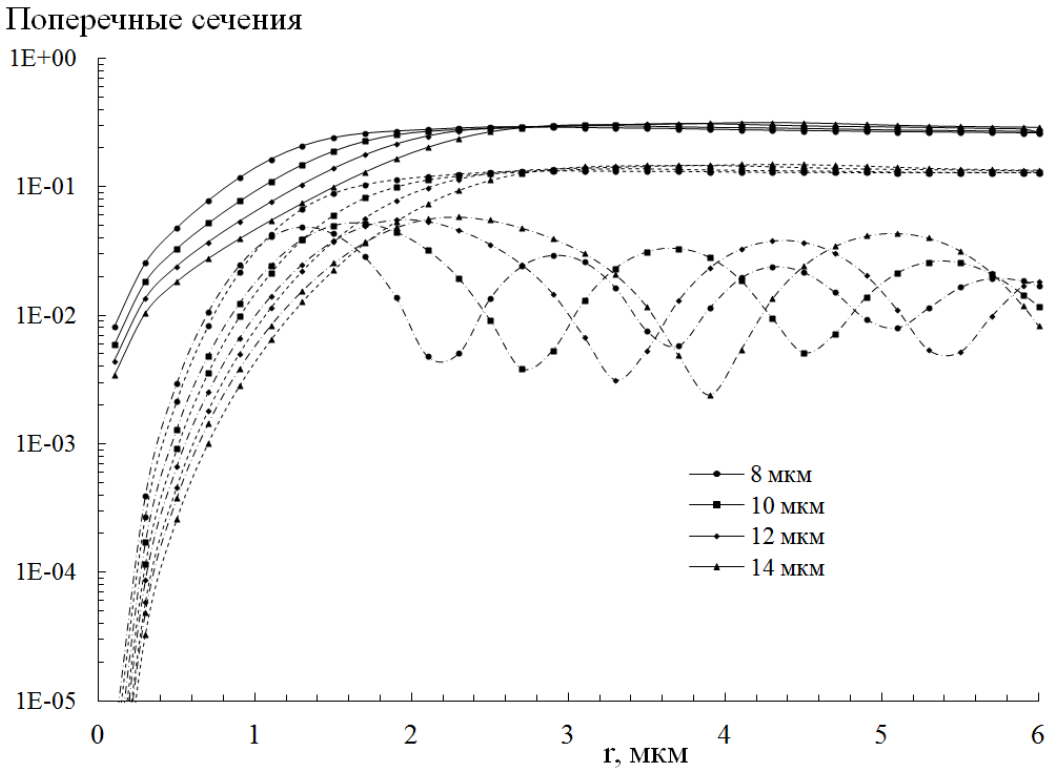


Рис. 1. Поперечные сечения ослабления (сплошные линии), полного (пунктирные) и обратного (штрихпунктирные линии) рассеяния для различных длин волн

Таким образом, при указанных радиусах парниковый эффект достигается с наименьшими потерями лучистой энергии (выхолаживание атмосферы минимальное).

На рис. 2 представлено семейство кривых зависимости потерь интенсивности инфракрасного излучения в аэрозольном слое h = 1 м от длины волны для частиц сажи с различными радиусами [2; 3].

Из рис. 2 следует, что при толщине аэрозольного слоя h = 1 м, с массовой концентрацией сажи 1 г/м^3 и дисперсностью $1{,}5 \leq r \leq 2{,}0\,мкм$ можно достичь двукратного уменьшения интенсивности инфракрасного излучения. Расчеты показали, что при толщине такого аэрозольного слоя порядка h=10 м обеспечивается практически полное поглощение инфракрасного излучения в окне прозрачности атмосферы.

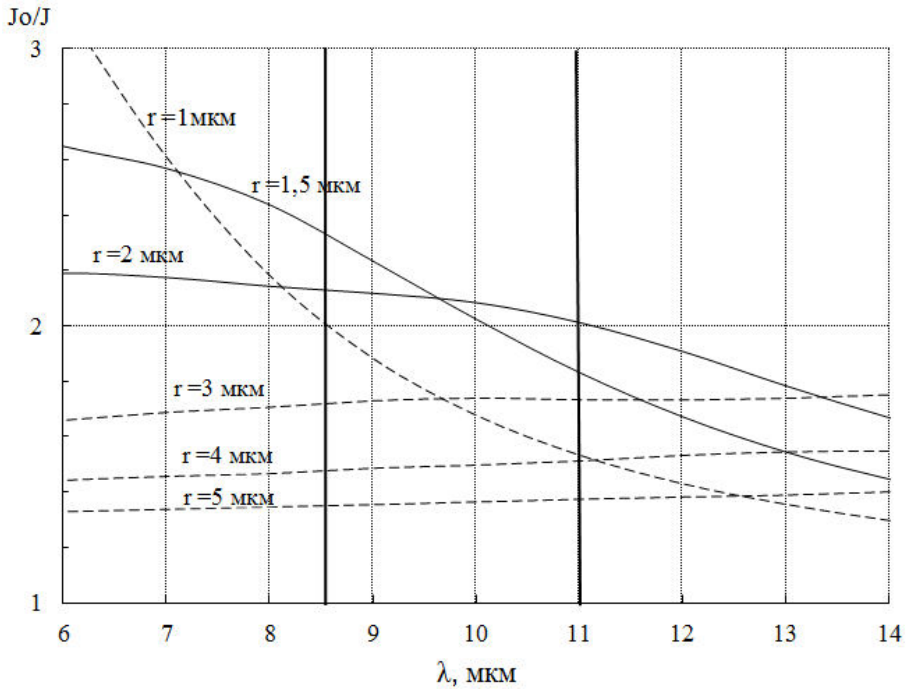


Рис. 2. Зависимость степени уменьшения интенсивности восходящего инфракрасного излучения в окне прозрачности атмосферы от длины волны и размера частиц

В заключение отметим, что:

1. На основе решения задачи теории рассеяния установлено, что значения коэффициентов поглощения, ослабления и отражаемости в основном зависят от размера аэрозоля и длины волны падающего излучения.

2. В окне прозрачности атмосферы $8{,}5 < \lambda < 11\,мкм$ максимальные значения ослабления, поглощения и отражаемости отмечаются в диапазоне размеров аэрозоля $1{,}5 \leq r \leq 2\,мкм$ с абсолютным максимумом при $r \approx 1{,}5\,мкм$.

Таким образом, для применения предлагаемого способа целесообразно создать специальные генераторы непрерывного действия с производительностью около 0,1 кг/с и размерами аэрозоля $1{,}5 \div 2\,мкм$.

Список литературы

1. *Андриевская В. Ю., Созаева Л. Т.* Тепловое излучение и рассеяние частицами сажи в инфракрасном диапазоне длин волн // Труды конференции молодых ученых ВГИ, посвященной 90-летию профессора Г. К. Сулаквелидзе. КБСХА, 2004. С. 109.

2. *Созаева Л. Т, Малкаров Х. Ж.* Оптимизация дисперсности искусственного аэрозоля для защиты растений от радиационных заморозков // Материалы V конференции молодых ученых. КБНЦ РАН, 2005. С. 130.

3. Рассеяние, ослабление и поглощение инфракрасного излучения искусственным аэрозолем / М. Т. Абшаев, Х. Ж. Жакамихов, Х. Ж. Малкаров, Л. Т. Созаева // Труды ВГИ. 2011. Вып. 95. С. 121.

УДК 551.583

Тренды эрозионно-опасных дождей на территории Европейской части России за период 1966–2019 гг.

Н. А. Чижикова (nelly.chizhikova@kpfu.ru)[1], В. Н. Голосов[2], О. П. Ермолаев[1], С. С. Мухарамова[1]

[1] Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань
[2] Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, г. Москва

Аннотация. Проанализированы зональные особенности трендов частоты и количества осадков эрозионно-опасных дождей на Европейской территории России за период 1966–2019 гг., как отражение влияния климатических изменений на формирование стока и смыва со склонов в теплое время года.

Ключевые слова: эрозионно-опасные дожди, Европейская территория России, ЕТР, тренды.

Введение

К эрозионно-опасным дождям относятся осадки, суточное количество которых составляет более 10 мм [2], но при этом согласно результатам многолетнего мониторинга за темпами смыва почв с распахиваемых склоновых водосборов более 75–80 % суммарных потерь почвы пришлось на экстремальные ливни, суточное количество которых более 40–50 мм [3]. Целью данной работы является анализ зональных особенностей трендов частоты выпадения эрозионно-опасных ливней на ЕТР за период 1966–2015 гг., как отражения влияния климатических изменений на формирование стока и смыва со склонов в теплое время года.

Материалы и методы

Данные о суточном количестве осадков сети метеорологических станций [1; 4] предоставлены Российским исследовательским институтом гидрометеорологической информации – Мировым центром данных (meteo.ru). Из всего списка станций, относящихся к ЕТР, на основании длины временной серии и количества отсутствующих данных для анализа были выбраны 167 (рис. 1). Критерием послужила длина временного ряда, который должен покрывать период 1966–20195 гг. и иметь не более 5 % пропущенных лет наблюдений. Из ряда данных исключались те года, в теплый период которых было пропущено более 5 % суточных наблюдений (взят более строгий критерий по сравнению с рекомендациями [7]).

В качестве критерия эрозионно-опасных осадков взята суточная сумма осадков, превышающая 10 мм [2]. Границы теплого сезона на каждой станции были выделены таким образом, чтобы минимизировать вероятность наблюдения твердых осадков (снега). Анализ срочных метеонаблюдений показал, что 99,9 % квантиль температуры воздуха на момент выпадения осадков в твердой форме 90 % метеостанций приходится на 5 °С. В соответствии с данным результатом анализа, границы теплого сезона на каждой станции были вычислены как медианы дат начала и дат конца периода года, в течение которого минимальная суточная температура воздуха превышает 5 °С (табл.).

Таблица

Список ландшафтных провинций и природных зон (по Физико-географическому атласу мира 1964 г.), количество метеорологических станций, статистики осадков

№	Ландшафтная провинция	Природная зона	Число станций	Дата начала теплого сезона (в среднем по зоне)	Дата окончания теплого сезона (в среднем по зоне)	Сумма осадков сезона, мм (в среднем по зоне)	Число дней с суточной суммой осадков более 10 мм (в среднем по зоне)
1	Мурманское прибрежное плато	Тундра	4	11.07	19.08	74	1,9
2	Тимано-Канинская равнина с низкими останцовыми горами	Тундра	3	21.07	16.08	36	0,9
3	Северо-Восточная приморская холмистая равнина	Тундра	2	17.07	09.08	37	0,9
4	Пай-Хойская останцовая холмистая возвышенность	Тундра	1	28.07	06.08	15	0,4
5	Большеземельская морено-холмистая равнина	Северная тайга – тундра	0	–	–	–	–
6	Кольское низкогорье	Северная тайга – тундра	2	05.07	02.08	76	2,0
7	Беломорская многоозерная холмисто-грядовая низина	Северная тайга	5	30.06	14.08	97	2,6
8	Западно-Карельская возвышенность	Северная тайга	2	29.06	15.08	113	3,4
9	Двинско-Мезенская равнина, расчлененная широкими долиннообразными понижениями	Северная тайга	4	07.07	12.08	79	2,4
10	Тиманский кряж	Северная тайга	0	–	–	–	–
11	Печорская низменность с крупными болотными массивами	Северная тайга	6	10.07	05.08	54	1,5
12	Приполярный Урал	Северная тайга	0	–	–	–	–
13	Южно-Карельская холмисто-сельговая равнина	Средняя тайга	3	15.–06	29.08	178	5,4
14	Прионежская морено-холмистая равнина с плоскими заболоченными водоразделами	Средняя тайга	3	28.06	19.08	133	3,9

Продолжение табл.

№	Ландшафтная провинция	Природная зона	Число станций	Дата начала теплого сезона (в среднем по зоне)	Дата окончания теплого сезона (в среднем по зоне)	Сумма осадков сезона, мм (в среднем по зоне)	Число дней с суточной суммой осадков более 10 мм (в среднем по зоне)
15	Двинско-Вычегодская равнина с плоскими заболоченными водоразделами и широкими долинообразными понижениями	Средняя тайга	7	26.–06	11.08	109	3,1
16	Тиманский кряж	Средняя тайга	0	–	–	–	–
17	Печорская повышенная равнина	Средняя тайга	2	25.06	14.08	126	3,7
18	Средневысотный Северный Урал	Средняя тайга	0	–	–	-	–
19	Прибалтийская морено-холмистая озерная равнина	Южная тайга (смешанные леса)	8	15.06	01.09	196	5,9
20	Валдайско-Смоленско-Московская возвышенность с морено-холмистым рельефом	Южная тайга (смешанные леса)	8	13.06	27.08	201	6,0
21	Верхневолжская равнина с обширными «полесьями»	Южная тайга (смешанные леса)	13	12.06	28.08	183	5,4
22	Вятско-Камская возвышенная равнина	Южная тайга	7	13.06	26.08	163	4,9
23	Холмисто-увалистый Средний Урал	Южная тайга	2	25.06	12.08	139	4,3
24	Заболоченная зандровая долина Полесья	Южная тайга (смешанные леса)	2	31.05	07.09	236	7,3
25	Север Среднерусской возвышенности	Южная тайга (смешанные леса)	2	01.06	07.09	242	7,1
26	Среднерусская возвышенность, расчлененная оврагами	Лесостепь (широколиственные леса)	6	29.05	12.09	229	7,0
27	Окско-Донская (Тамбовская) аллювиальная равнина	Лесостепь (широколиственные леса)	4	03.06	06.09	190	5,7
28	Приволжская возвышенность, расчлененная оврагами	Лесостепь (широколиственные леса)	4	06.06	02.09	180	5,3
29	Аллювиальная низменная равнина Заволжья	Лесостепь (широколиственные леса)	3	05.06	05.09	154	4,4
30	Высокое Заволжье, расчлененное оврагами	Лесостепь (широколиственные леса)	4	11.06	29.08	140	4,0

Окончание табл.

№	Ландшафтная провинция	Природная зона	Число станций	Дата начала теплого сезона (в среднем по зоне)	Дата окончания теплого сезона (в среднем по зоне)	Сумма осадков сезона, мм (в среднем по зоне)	Число дней с суточной суммой осадков более 10 мм (в среднем по зоне)
31	Южный Урал	Лесолуговая зона	4	25.06	12.08	123	3,7
32	Донско-Волжская возвышенная расчлененная равнина	Степь	12	26.05	12.09	169	5,0
33	Донецкий кряж	Степь	0	–	–	–	–
34	Возвышенность Ергени	Степь	2	06.05	30.09	169	4,8
35	Причерноморская низменная равнина	Степь	2	28.04	08.10	229	7,3
36	Прикубанская равнина	Степь	4	30.04	04.10	272	8,5
37	Ставропольское возвышенность – платообразное куполовидное поднятие и северные предгорья Кавказа	Степь	2	09.05	30.09	295	9,4
38	Возвышенное сыртовое Заволжье	Степь	4	03.06	04.09	122	3,3
39	Аллювиальная низменная равнина Заволжья	Степь	2	31.05	09.09	128	3,5
40	Прикаспийская низменная равнина	Полупустыня	4	19.05	20.09	110	2,8
41	Прикаспийская низменность	Пустыня	3	03.05	29.09	107	2,7
42	Дагестанские горные пустыни	Пустыня	2	22.04	25.10	186	4,9
43	Горный Крым	Лесолуговая зона	1	23.04	20.10	235	6,6
44	Горные хребты Северного Кавказа	Лесолуговая зона	7	03.06	16.09	288	9,0
45	Западно-Кавказская провинция	Влажные субтропические леса	3	24.05	01.10	545	16,2

Для каждой станции были рассчитаны временные ряды различных индексов эрозионно-опасных дождей: 1) сумма осадков, суточная сумма которых превышает 10 мм; 2) сумма осадков, суточная сумма которых превышает 40 мм; 3) число дней осадков, суточная сумма которых превышает 10 мм; 4) число дней осадков, суточная сумма которых превышает 40 мм; 5) максимальная сумма осадков, выпадающих за один дождевой период (несколько дней подряд), 6) максимальная двухдневная сумма осадков.

Для каждой временной серии (погодной станции) тренд осадков был оценен с помощью обобщенных аддитивных моделей местоположения, масштаба и формы (Generalized additive models for location, scale, and shape, GAMLSS) [5], связывающих анализируемую характеристику осадков с календарным годом. Данные линейные модели позволяют оценивать как линейные, так и нелинейные тренды, а также учитывать различные законы распределения зависимых переменных. Для каждой временной серии было выбрано наиболее подходящее распределение зависимой переменной с помощью оптимизационного алгоритма, реализованного в пакете gamlss [6]. Все многообразие возможных форм динамики (изменения) осадков во времени было сведено к двум моделям трендов эрозионно-опасных осадков: 1) монотонная (увеличение, уменьшение), 2) немонотонная (унимодальная, парабола с вершиной вверху или внизу). Для каждой временной серии осадков создавались две конкурентные модели тренда осадков: с монотонным линейным поведением и унимодальным на основе полинома второй степени. Выбор модели, наилучшим образом описывающей динамику осадков для выбранной временной серии, был выполнен на основе информационного критерия Акаике (Akaike information criterion, AIC). Для анализа пространственных закономерностей изменения режима осадков тренды были разделены на две группы: текущий рост (монотонный рост или рост после спада), текущий спад (монотонный спад или спад после роста).

Результаты обобщены по ландшафтным зонам (рис. 1).

Результаты и обсуждение

Тренды подавляющего большинства изучаемых индексов эрозионно-опасных осадков являются статистически незначимыми, однако наблюдается пространственная (зональная) согласованность тенденций.

В настоящее время лесная зона характеризуется преобладанием тенденций к росту количества и суммы осадков, суточное количество которых составляет более 10 мм (рис. 2, *А*), что характерно в большей степени для западной ее части (Южно-Карельская холмисто-сельговая равнина, Прионежская морено-холмистая равнина, Прибалтийская морено-холмистая озерная равнина), и в меньшей для южной и восточной границ (зона южной тайги, зона смешанных лесов).

Лесостепная и степная зоны в настоящее время в большей степени характеризуются снижением количества осадков и частоты эрозионно-опасных дождей, пример на рис. 2, *Б*. Анализ нелинейных траекторий показал, что пиковые изменения частот и сумм осадков в этой зоне наблюдались в районе 1990 г., после чего последовало их снижение.

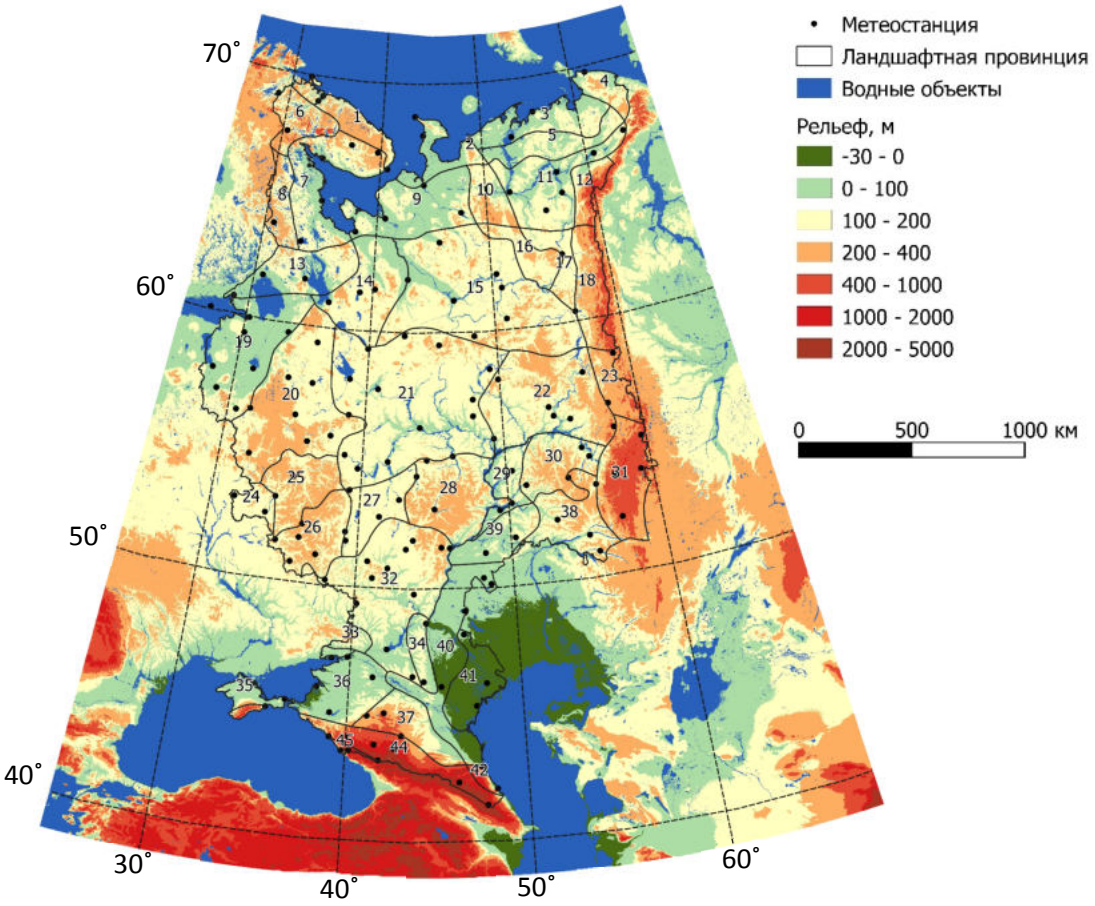


Рис. 1. Карта метеостанций и ландшафтных провинций (по Физико-географическому атласу мира 1964 г.). Цифровые метки обозначают ландшафтные провинции. Описание провинций приведено в табл. 1

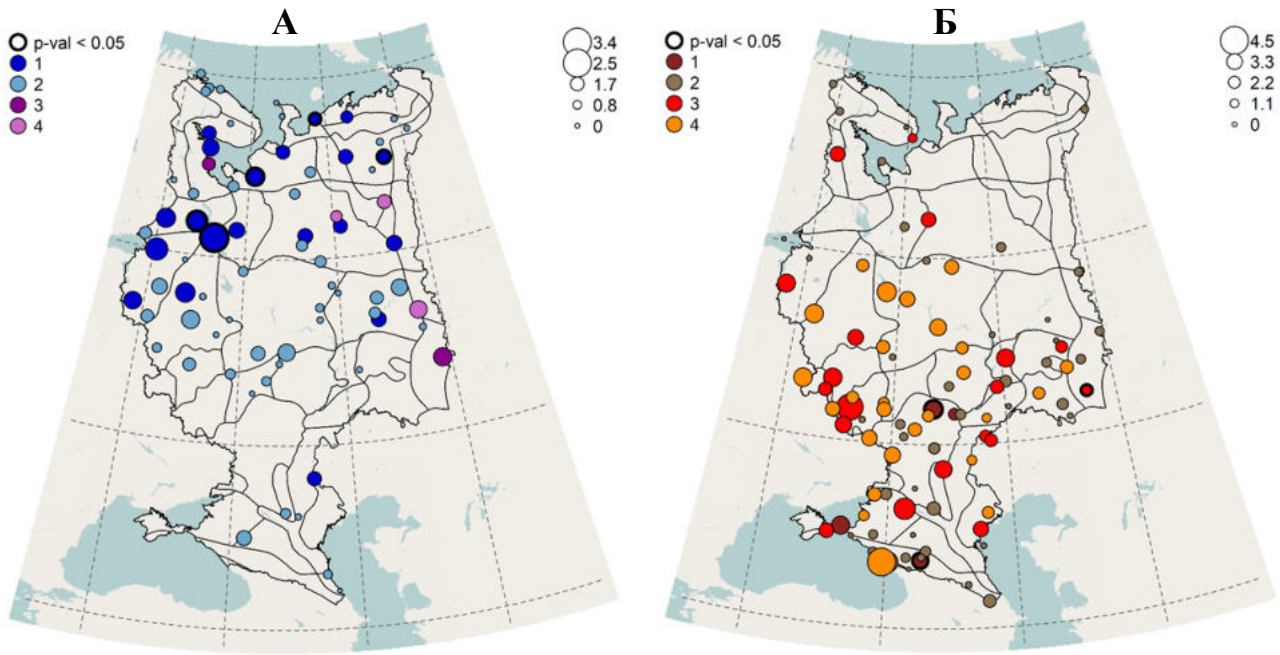


Рис. 2. Тренды числа дождей теплого сезона, выпадающих суточным количеством более 10 мм в сутки. Размер значка показывает амплитуду изменений с 1966 по 2019 г. **А**: текущие тренды роста числа дождей. 1 – линейный рост числа дождей, модель

оптимальна по AIC. 2 – линейный рост числа дождей, AIC модели меньше AIC модели с полиномом. 3 – полиномиальный тренд, текущий рост числа дождей после спада, модель оптимальна по AIC. 4 – полиномиальный тренд, текущий рост после спада, AIC модели меньше AIC модели линейного тренда. **Б**: Текущие тренды снижения числа дождей. 1 – линейный спад числа дождей, модель оптимальна по AIC. 2 – линейный спад числа дождей, AIC модели меньше AIC модели с полиномом. 3 – полиномиальный тренд, текущий спад после роста, модель оптимальна по AIC. 4 – полиномиальный тренд, текущий спад после роста, AIC модели меньше AIC модели линейного тренда

Работа поддержана Российским научным фондом, проект №19-1700064.

Список литературы

1. *Веселов В. М.* Архивы Госфонда на ПЭВМ и технология их организации // Труды Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации. 2002. Т. 170. С. 16–30.

2. *Ларионов Г. А.* Эрозия и дефляция почв. М. : МГУ, 1993. 200 с.

3. *Edwards W. M., Owens L. B.* Large storm effects on total soil loss // Journal of Soil and Water Conservation. 1991. Vol. 46. P. 75–78.

4. Daily Temperature and Precipitation Data for 223 U.S.S.R. Stations / V. N. Razuvayev, E. G. Apasova, R. A. Martuganov, P. Steurer, R. Vose. ORNL/CDIAC, Numerical data package – 040. Oak Ridge National laboratory, Oak Ridge, Tennessee, USA, 1993.

5. *Rigby R. A., Stasinopoulos D. M.* Generalized additive models for location, scale and shape (with discussion) // Applied Statistics. 2005. Vol. 54, part 3. P. 507–554.

6. Flexible Regression and Smoothing: Using GAMLSS in R / D. M. Stasinopoulos, R. A. Rigby, G. Heller, V. Voudouris, F. De Bastiani. Chapman and Hall/CRC, 2017.

7. *Zolina O.* Change in intense precipitation in Europe // Kundzewicz Z. W. (eds.). Changes in Flood Risk in Europe. IAHS Press, Wallingford, Oxfordshire, UK, 2012. Special Publication N 10.

ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ НА ТРАНСФОРМАЦИЮ ПРИРОДНЫХ И СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

УДК 551.583.1

Оценка изменения продолжительности отопительного сезона в Санкт-Петербурге

Е. В. Гайдукова (oderiut@mail.ru), С. В. Шаночкин (shasv@mail.ru),
И. О. Винокуров (vinig@rshu.ru)

Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург

Аннотация. Проанализированы даты начала и окончания отопительного сезона в Санкт-Петербурге за последние 15 лет. Проведена оценка изменений температуры воздуха прошлого и текущего климатов. Сделана долгосрочная сценарная оценка изменений климата по различным моделям. Выявлено, что при реализации определенных климатических моделей следует ожидать уменьшение продолжительности отопительного сезона.

Ключевые слова: изменение климата, дата начала отопительного сезона, дата окончания отопительного сезона, температура воздуха, котельная.

Введение

При планировании городского хозяйства рассматриваются тенденции устойчивого развития регионов на десятилетия вперед с учетом всех факторов, в том числе и изменений климата. Подобное планирование касается и такого вопроса как начало и конец отопительного сезона.

Целью исследования является оценка изменения дат начала/окончания и продолжительности отопительного сезона в Санкт-Петербурге на основе многолетней статистики наблюдений за погодными характеристиками и использования сценарных климатических оценок метеорологических величин.

Оценка сроков и продолжительности отопительного сезона в Санкт-Петербурге

Отопительный сезон (ОС) – период года, когда устойчивая среднесуточная температура наружного воздуха меньше или равна +8 °С. За последнее десятилетие даты начала и окончания ОС показаны на рис. 1 [1].

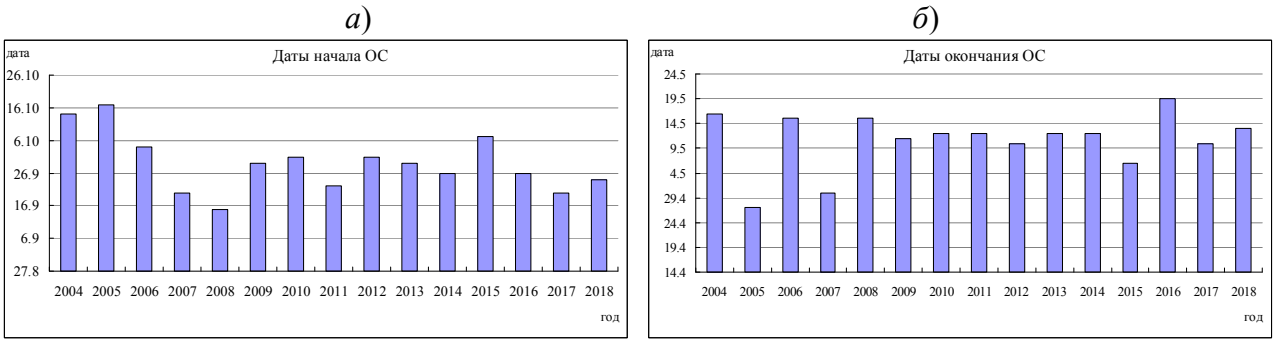


Рис. 1. Даты начала (а) и окончания (б) отопительного сезона

Самая ранняя дата начала отопительного сезона была в 2008 г. – 15 сентября, а позднее наступление отопительного сезона отмечено в 2005 г. – 17 октября. Окончание отопительного сезона не так сильно отличается по годам, особенно в период с 2009 по 2014 г. Отопление отключается, когда значение среднесуточной температуры воздуха не менее +8 °С, и держится это значение в течение пяти дней.

В 2008–2007 гг. продолжительность отопительного сезона составила 224 дня, в 2008–2009 г. – 232 дня, в 2016–2017 г. – 242 дня. Кстати, отопительный сезон 2019–2020 г. стал самым длительным за последние 40 лет. Его продолжительность составила 254 дня. На продолжительность отопительного сезона 2019/20 было оказано воздействие многих косвенных факторов.

Формирование базы данных для перспективных оценок

Для оценки изменения дат и продолжительности ОС необходимо выбрать репрезентативные метеорологические станции, которые характеризовали бы климат и погодные условия Санкт-Петербурга.

В издании «Климат Санкт-Петербурга и его изменения» 2010 г. [3] используются следующие метеостанции: Санкт-Петербург, Воейково, Белогорка. В книге «Климат Ленинграда» [2] анализируются метеостанции: Санкт-Петербург, Белогорка, Токсово, Лисий Нос, Ломоносов, Ропша, Любань.

Были выбраны метеостанции Санкт-Петербург и Белогорка, так как продолжительные ряды наблюдений за метеохарактеристиками имеются в открытом доступе на сайте meteo.ru.

Для анализа отопительного сезона были выбраны следующие периоды:

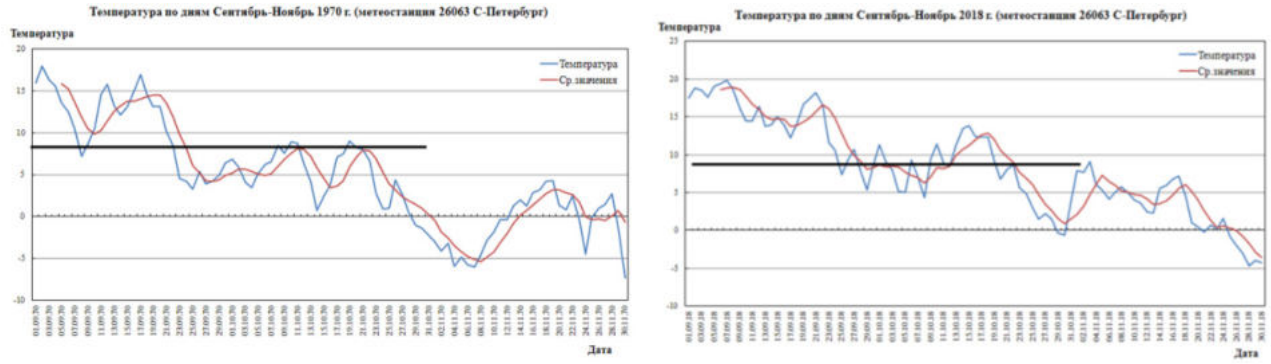
– начало ОС может начаться в период с 1 сентября по 1 декабря;

– окончание ОС может произойти в период с 1 апреля по 1 июня.

Анализируемый многолетний период наблюдения за среднесуточной температурой воздуха составил с 1970 по 2018 г. Этот период был поделен на два подпериода с 1970 по 1999 г. и с 2000 по 2018 г. Первый подпериод характеризует климат прошлого, а второй период – климат настоящего.

Анализ и прогноз метеорологических характеристик

Были построены хронологические графики температуры воздуха для м/ст. Санкт-Петербург и Белогорка для различных лет, с интервалом в 10 лет, для месяцев начала ОС. Учитывая географическую близость выбранных метеостанций, графики схожи. На рис. 2 показаны примеры графиков.



а *б*

Рис. 2. Графики хода температуры воздуха для м/ст. Санкт-Петербург для сентября, октября и ноября, 1970 г. (а) и 2018 г. (б)

Было выявлено, что температура воздуха за последние несколько десятилетий имеет устойчивый тренд на увеличение, и, следовательно, начало отопительного сезона должно сдвигаться по срокам в сторону более позднего наступления.

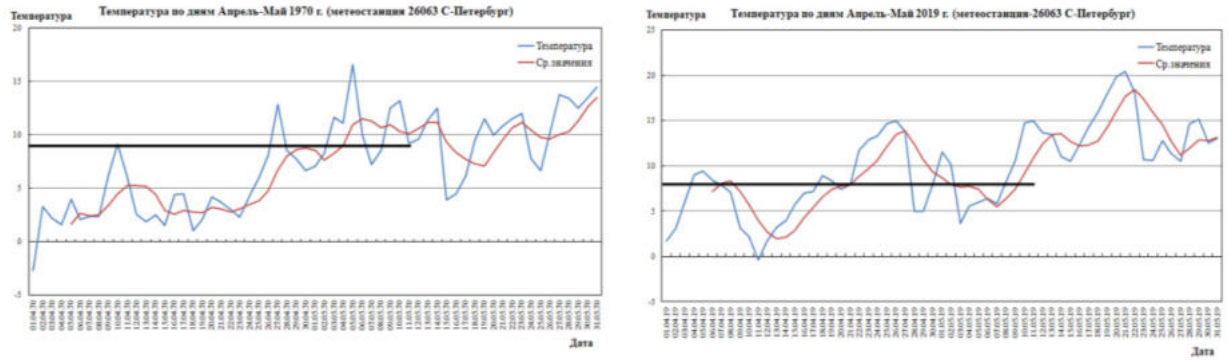
Температурный тренд, приходящийся на окончание ОС, изменился с конца XX в. до нашего времени незначительно, но ход температурного показателя в 70-х, 80-х и 90-х гг. XX в. был более резким, скачкообразным. С началом XXI в. температура атмосферного воздуха изменялась плавней, а средняя температура за этот период постепенно поднималась (см. рис. 3).

Для двух периодов (с 1970 по 1999 г. и с 2000 по 2018 г.), а также для всего периода наблюдений (с 1970 по 2018 г.) были построены хронологические графики температур, осредненных за каждый день за рассматриваемый многолетний период. На рис. 4 видно, что период с 1970 по 1999 г. был холоднее.

На каждом графике рис. 4 есть временной промежуток, который остается стабильным от периода к периоду: промежуток времени на 40–46-е сут. от начала ОС (с первого числа сентября месяца) и 27–32-е сут. от конца ОС (от первого числа апреля). В эти промежутки наблюдалась примерно одинаковая погода. Данный факт заслуживает более пристального изучения.

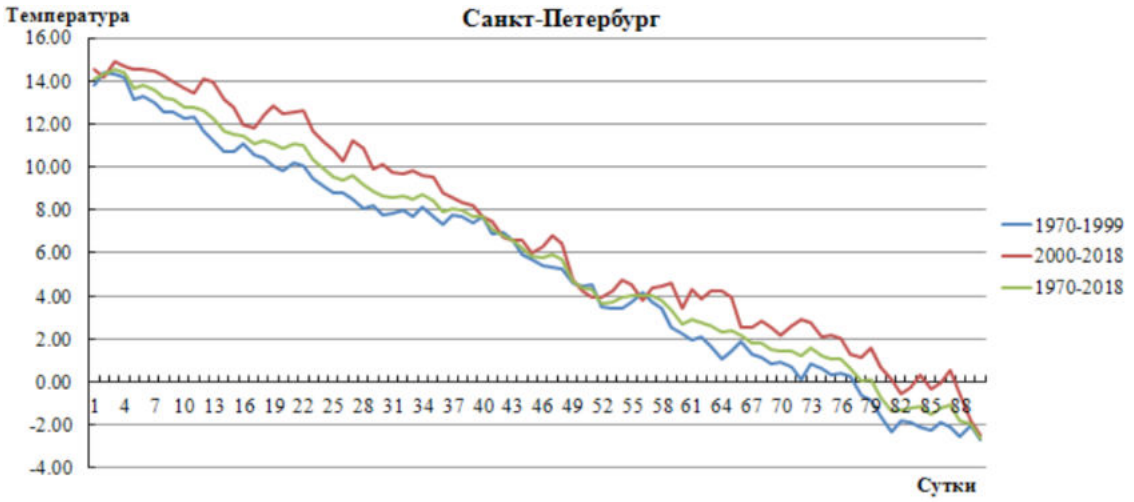
По данным метеостанции Санкт-Петербург даты начала ОС в последние десятилетия XX в. приходились на 25–34-е сут. от первого сентября, даты начала ОС в начале XXI в. приходятся на 34–37-е сут. По метеостанции Белогорка началу ОС будут соответствовать 16–22-е сут. для периода 1970–2000 гг. и 25–34-е сут. – для периода 2000–2018 гг.

Для долгосрочной оценки гидрометеорологических характеристик были выбраны модели из сценария RCP4. 5 [4]: модель Центра климатических прогнозов и исследований Хэдли *HadGEM2* и модель Института Макса Планка *MPI-ESM*. Выбор этих моделей определился тем, что они дают наибольшее совпадение прогнозных и натурных метеорологических данных на ретроспективном материале. Кроме того была сделана оценка по ансамблевой модели, освещающей весь диапазон возможных изменений температуры приповерхностного воздуха при условиях сценария RCP4.5.

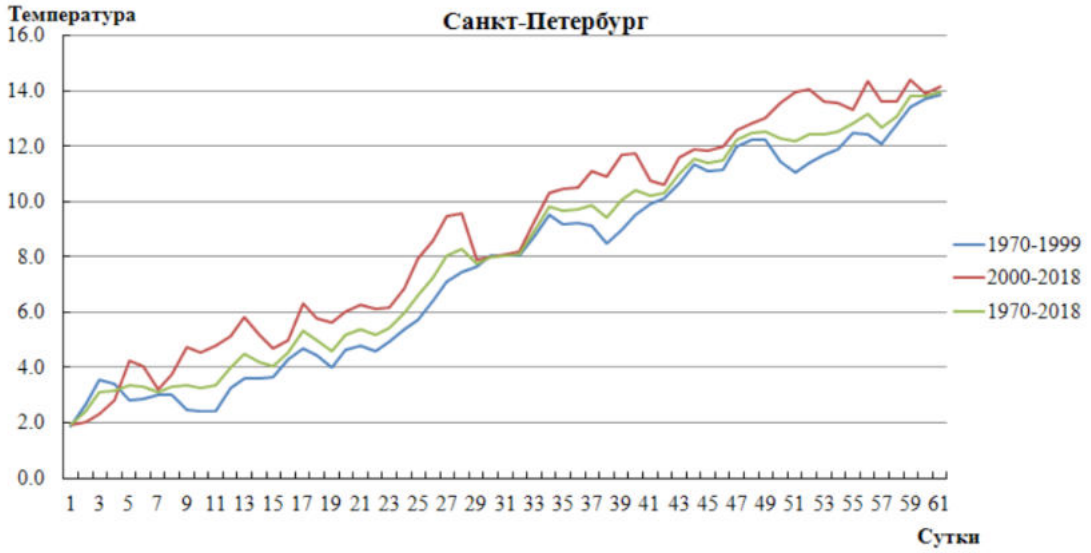


а *б*

Рис. 3. Графики хода температуры воздуха для м/ст. Санкт-Петербург для апреля и мая, 1970 г. (*а*) и 2019 г. (*б*)



а



б

Рис. 4. Среднемноголетние суточные температуры воздуха:
а, б – даты от начала ОС с 1 сентября по 1 декабря; *в, г* – даты окончания ОС с 1 апреля по 1 июня

Оценка по ансамблевой модели

К 2060 г. дата начала отопительного сезона в г. Санкт-Петербург будет предположительно приходиться на конец октября (см. рис. 5). Окончание ОС будет происходить в последних числах апреля или первых числах мая месяца. Можно предположить, что с учетом климатических сценариев Пятого доклада МГЭИК [5], и полученных на их основе моделей, и учитывая общее потепление климата, а также соответственно позднее начало отопительного сезона, продолжительность ОС к 2060 может существенно сократиться и составит примерно в среднем 200–220 сут.

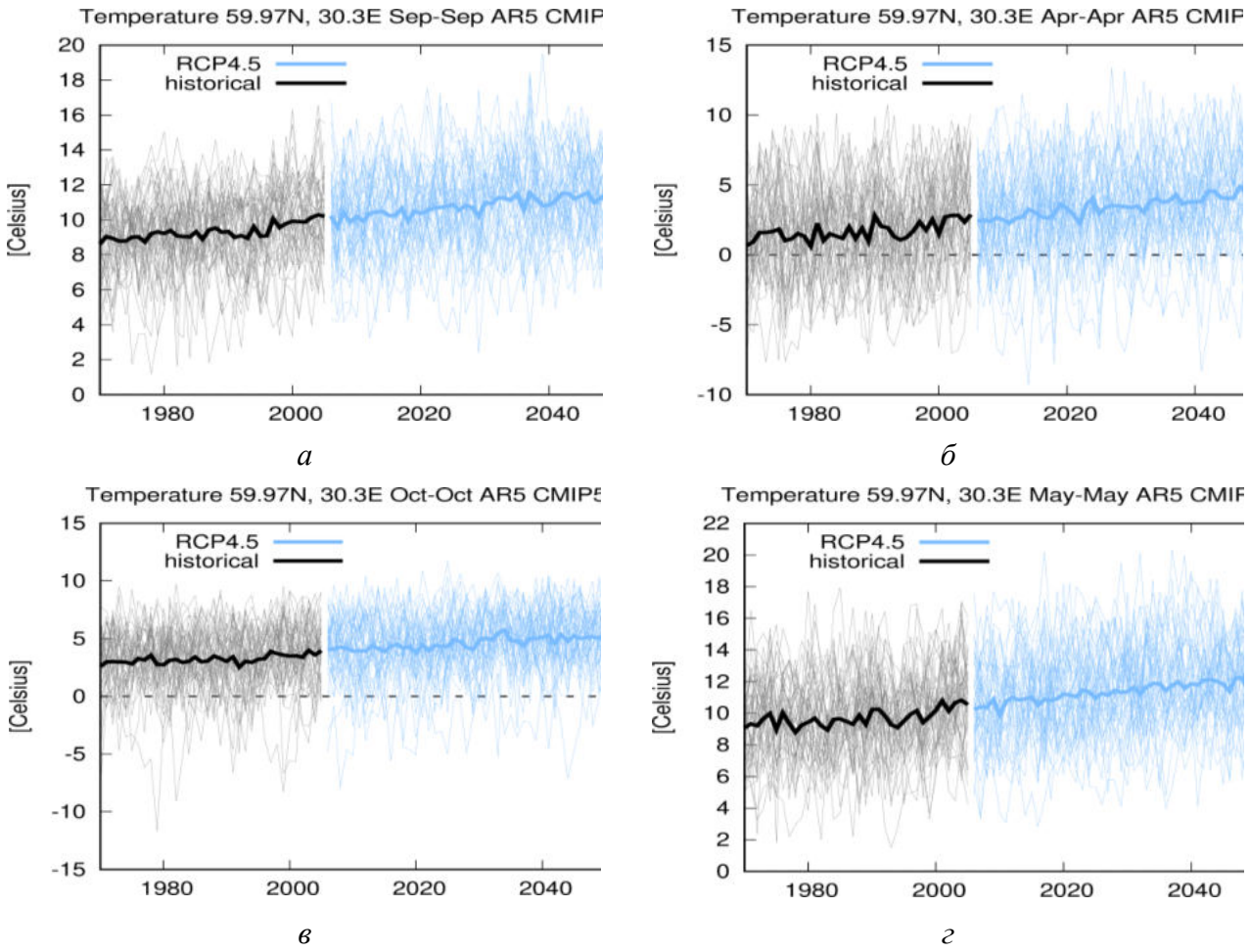


Рис. 5. Сценарная оценка по ансамблевой модели Пятого доклада МГЭИК для м/ст. Санкт-Петербург для сентября (*а*), октября (*б*), для апреля (*в*), мая (*г*)

Оценка по моделям HadGEM2 и MPI-ESM

По выбранным моделям *HadGEM2* и *MPI-ESM* оценивались среднемесячные значения температур воздуха. На рис. 6 приведены графики изменения сценарных температур воздуха по рассматриваемым моделям.

По модели *MPI-ESM* начало отопительного сезона ожидается в сентябре в 2031, в 2020 и 2057 гг. – в октябре. По климатическим моделям *HadGEM2* начало ОС следует ожидать в октябре, кроме периода с 2024 по 2029 г., в котором даже возможно понижение температуры ниже отметки 0 °С.

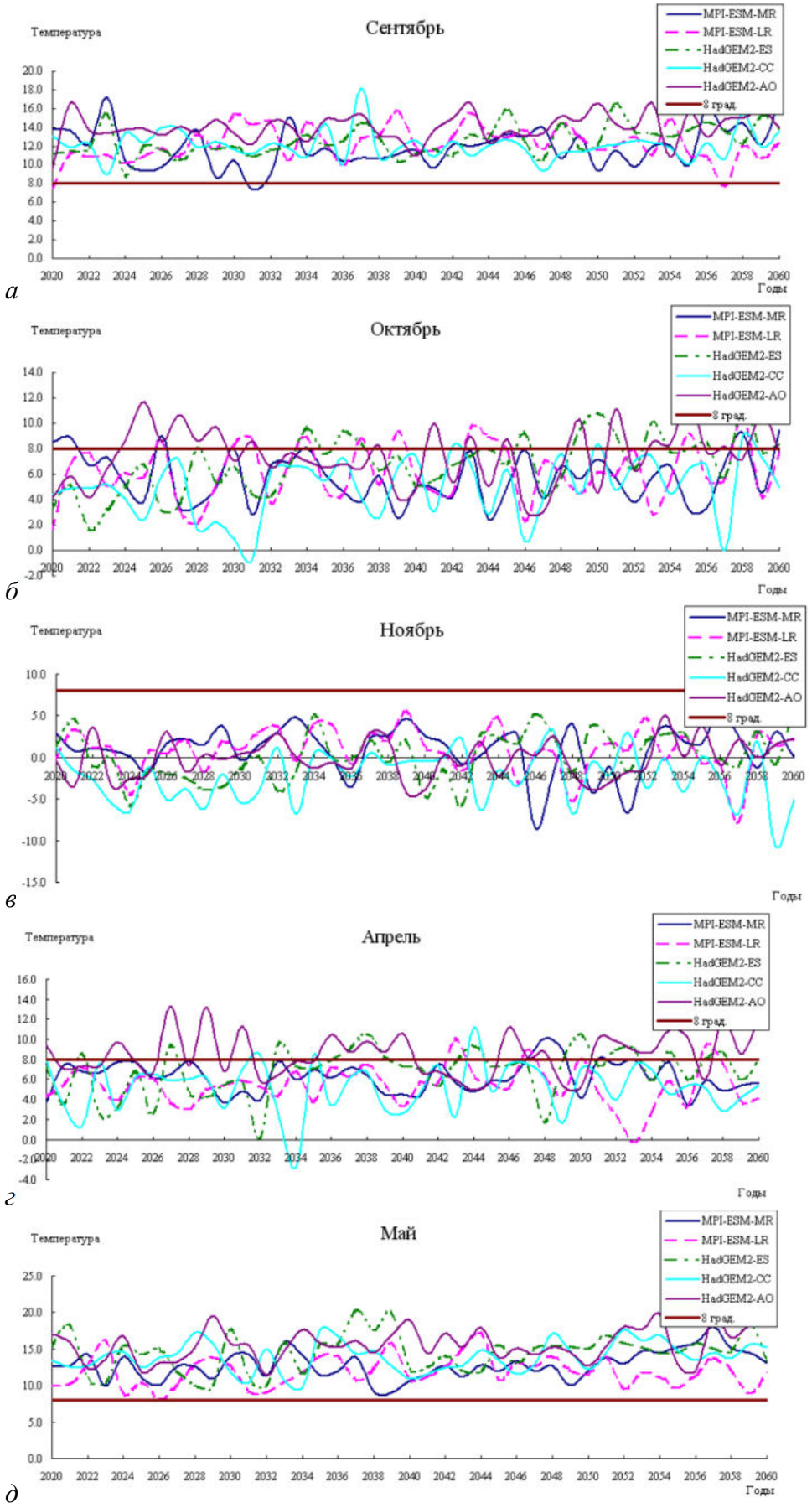


Рис. 6. Сценарная оценка температуры воздуха по разным климатическим моделям для м/ст. Санкт-Петербург для сентября (*а*), октября (*б*) и ноября (*в*), для апреля (*г*) и мая (*д*)

Окончание ОС при реализации моделей *MPI-ESM*, начиная с 2024 г., самое ранее можно ожидать в апреле месяце, за исключением периодов с 2022 по 2024 г. и с 2032 по 2035 г. Развитие по моделям *HadGEM*2 будет самым неблагоприятным. И не одна модель изменения климата не предполагает окончания ОС в мае месяце.

Выводы

В результате оценки изменения дат и продолжительности отопительного сезона в Санкт-Петербурге на основе многолетней статистики наблюдений за погодными характеристиками получено, что продолжительность отопительного сезона к настоящему времени уменьшилась из-за более позднего наступления дат начала и относительно неизменных дат окончания отопительного сезона. При сценарных оценках метеорологических величин получено, что продолжительность отопительного сезона к 2060 г. может существенно сократиться и составит примерно в среднем 200–220 сут. в зависимости от рассматриваемой климатической модели.

Исследование частично реализовано при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования, грант № FSZU-2020-0009.

Список литературы

1. ГУП «ТЭК СПб». URL: https://www.gptek.spb.ru/ (дата обращения: 23.05.2020).
2. Климат Ленинграда / под ред. Ц. А. Швер [и др.]. Л. : Гидрометеоиздат, 1982. 252 с.
3. Климат Санкт-Петербурга и его изменения / под ред. В. П. Мелешко, А. В. Мещерской, Е. И. Хлебниковой. СПб. : Гл. геофиз. обсерватория им. А. И. Воейкова, 2010. 254 с.
4. IPCC. URL: http://www.ipcc-data.org (дата обращения: 01.06.2020).
5. KNMI Climate Change Atlas. URL: https://climexp.knmi.nl/plot_atlas_form.ru (дата обращения: 02.06.2020).

УДК 551.510.42

Влияние климатических изменений на трансформацию геосистем геодинамически активных территорий (методология исследования и картографирования)

Т. И. Коновалова (tkonov@mail.ru)[1,2]

[1]Иркутский государственный университет, г. Иркутск
[2]Институт географии им. В. Б. Сочавы, г. Иркутск

Аннотация. Приводятся результаты комплексной реконструкции трансформации геосистем региона с учетом как климатических, так и тектонических преобразований за период позднего кайнозоя. Представлена методология картографирования трансформации геосистем и карта направления преобразования геосистем. Исследование основано на использовании теоретического и практического многолетнего опыта разработок в области системных исследований географической среды геодинамически активных территорий.

Ключевые слова: геосистема, климат, тектоника, необратимые преобразования, методика картографирования.

Введение

Принято считать, что климатические и геоботанические факторы являются ведущими в выявлении особенностей преобразования геосистем. Но изучение на их основе является спорным, когда необходимо установить трансформацию геосистем, расположенных вблизи центров тектонической активности. Особую актуальность исследование приобретает для района Байкальской природной территории. Одним из основных критериев для отнесения оз. Байкал к объектам всемирного природного наследия ЮНЕСКО стали уникальность одноименной рифтовой системы, которая определила его формирование, а также развитие интенсивных неотектонических процессов. В соответствии с требованиями конвенции ЮНЕСКО «Об охране всемирного культурного и природного наследия» был принят Федеральный закон от 01.05.1999 № 94-ФЗ «Об охране озера Байкал», в котором введено понятие Байкальской природной территории (БПТ).

Основная задача исследования заключалась в формировании представления о механизмах трансформации геосистем геодинамически активного региона. Объект исследования – геосистемы Байкальской природной территории. Для нее характерно сочетание геодинамических режимов слабоактивной платформы, рифтового и предрифтового режима, а также горной области. Здесь ранее были проведены палеогеографические, неотектонические, геоморфологические, геоботанические, ландшафтные исследования, мелкомасштабное и локальное крупномасштабное картографирование ландшафтов, их компонентов. Наряду с этим практически не установлена специфика трансформации геосистем, модификация которых может усилить негативное воздействие на окружающую среду БПТ.

Проведенные исследования базируются на информационном синтезе данных и знаний о районе исследований, основанном на результатах многолетних наземных и аэровизуальных маршрутных наблюдений с применением методов

комплексных физико-географических исследований, сравнительно-географического, генетического, картографического. Выявление характера трансформации геосистем в позднем кайнозое базировалось на синтезе опубликованных данных о тектоническом развитии территории, изменении климата (в том числе и с учетом итогов реализации международного проекта «Байкал-бурение»).

Современные представления о трансформации геосистем

В ряде современных исследований изменение климата рассматривается как один из факторов трансформации природных комплексов, в связи с чем принято изучать их преобразования с учетом сложившегося тренда естественных изменений. Констатируется, что будущие антропогенные выбросы CO_2 будут продолжать способствовать потеплению климата в течение более чем тысячелетия, благодаря временным масштабам, необходимым для удаления этого газа из атмосферы. Это подтверждает полезность использования знаний о природных условиях позднемелового периода в качестве аналога для прогноза грядущих преобразований [7]. Прежде всего рассматриваются две эпохи – миоценовая и плиоценовая. Климатический оптимум середины миоцена считается самой теплой фазой в истории Земли за последние 15 млн лет. Поднятие Гималаев на среднюю высоту 4–5 км в позднем миоцене оказало влияние на глобальную атмосферную циркуляцию и развитие Азиатского муссона. Эпоха плиоцена, по сравнению с другими теплыми периодами в геологическом прошлом Земли, характеризуется уникальным сочетанием близкого к современному уровню концентрации CO_2 в атмосфере, а также палеогеографической и палеобиологической обстановкой [8].

Существует зависимость между средней температурой на континентах, рельефом и орографией. Охлаждение глобального климата за последние несколько миллионов лет может быть связано с уменьшением содержания CO_2 в атмосфере, вызванном усилением процесса выветривания в тектонически активных регионах [9]. Обратные связи между различными компонентами Земной системы (атмосфера, биосфера, литосфера, криосфера и океаны в гидросфере) все чаще признаются в качестве факторов влияния на изменения ландшафтов, произошедших за последние 11 700 лет в межледниковый период, называемый эпохой голоцена.

Обсуждение результатов исследования

Геосистема представляет собой взаимосвязанные компоненты природы, которые подчиняются закономерностям, действующим в географической оболочке. Трансформация геосистемы – это преобразование, изменение ее основных свойств. Трансформация может произойти в результате развития геосистем, изменения вещественно-энергетического обмена и взаимосвязей геосистемы.

Анализ научных публикаций показал, что большинство исследователей связывают происходящие изменения природной среды территории Сибири с развитием процессов аридизации и усилением континентальности климата. Вместе с тем расположение района исследований на границе геодинамически

активных зон обусловило необходимость комплексной реконструкции трансформации геосистем региона с учетом как климатических, так и тектонических преобразований.

С позиций тектоники литосферных плит Байкал и Алтае-Саянская горная область возникли в результате столкновения двух тектонических макроплит – Индийской и Евразийской. Под напором Индийской плиты литосферное поле внутренней Азии было раздроблено на серию микроплит и блоков. Этот процесс проявился и в пределах древней Сибирской платформы, фундамент которой был разбит разломами на блоки. Следующим этапом стал отход Амурской плиты от Евразиатской, что привело к образованию Байкальской рифтовой зоны. Крупные тектонические коллизии сопровождались поднятием гор, изменением климата, излиянием лав и неоднократным оледенением высоко поднятых участков вдоль границы Сибирской платформы.

Вместе с развитием Байкальской рифтовой зоны и Саяно-Байкальской горной областей сложилась тенденция изменения климата, связанная с похолоданием, усилением степени континентальности и аридизации, которая прослеживается на протяжении около 30 млн лет. Начало этого этапа восходит к олигоцену (≈38–25 млн лет), когда резко возросло интенсивность развития процессов горообразования и климатических изменений, достигая своих наибольших изменений в четвертичном периоде. В это время формируются крупные поднятия на территории восточной и южной частей региона и происходит первое похолодание, которое сопровождается понижением средней январской температуры на 3 °С и годовой суммы атмосферных осадков на 300 мм [5]. Формируется умеренно-теплый климат. Тропические элементы флоры, развитые на всей территории региона в условиях средиземноморского климата, заменяются широколиственными крупнотравными лесами [1]. В пределах предгорных прогибов и Байкальской рифтовой зоны формируются своеобразные экологические ниши, в которых появляются геосистемы, в составе которых встречаются компоненты различных термических периодов [2].

В миоцене (≈25–7 млн лет) происходит новое похолодание и дальнейшая ксерофитизация климата ($t°_{I}$ – от 0 до +3 °С; $t°_{VII}$ +30 °С; $\Sigma_{мм}$ – 1200–1000 мм). На обширных пространствах Восточной Сибири формируется умеренный климат с постепенным увеличением сухости и четкой сезонной дифференциацией. Трансформируется и литогенетический тип осадков: происходит смена господствующей среды осадконакопления с кислой на щелочную, общее сокращение глинистого материала в осадочных толщах, накопление извести. Многочисленны дуб, бук, граб, вяз, липа, пихта.

В плиоцене (≈5,5–3,5 млн лет) подъем хребтов и нагорий на востоке привел к возникновению орографических преград, которые оказали влияние на циркуляцию атмосферы. Значительную роль стал играть Сибирский антициклон, который к концу эпохи превратился в мощный циркуляционный фактор и повлиял на трансформацию геосистем. В системе атмосферной циркуляции усилился западный перенос воздушных масс. Происходит интенсивное похолодание и усилением континентальности климата. В эту эпоху климат региона

характеризуется резко выраженной сезонностью, продолжительной и холодной зимой ($t°_{I}$ – от –5 до –10 °С; $t°_{VII}$ – 15–20 °С; $\Sigma_{мм}$ – 600–800 мм). Плиоцен – узловой этап формирования и дифференциации тайги. Дальнейшее усиление его дифференциации обусловило распад тайги на множество региональных типов. В западной части и в горах Южной Сибири, где сказывалось отдаленное влияние океанического климата, получили развитие темнохвойно-таежные геосистемы, на большей части региона – светлохвойно-таежные, впоследствии – с доминированием лиственницы сибирской (Larix sibirica), наиболее приспособленной к условиям континентального климата. В южных аридных областях региона обострение континентальности климата нашло выражение в усилении процессов опустынивания – сокращении поверхностного стока, замещении лесов степями.

На рубеже неогенового и четвертичного периодов произошла наиболее значительная, по сравнению с другими эпохами, активизация тектонических процессов, связанных с развитием Байкальской рифтовой зоны и альпийской эпохой горообразования и очередное похолодание климата. Это привело к оледенению гор, поскольку климатические условия не способствовали развитию покровного оледенения в регионе. По мере похолодания неуклонно обострялись черты континентальности климата, уменьшалась относительная влажность воздуха, сокращалось общее количество атмосферных осадков. Характерно появление и длительное сохранение снежного покрова, способствующего выхолаживанию и иссушению воздуха ($t°_{I}$ – минус 25 °С; $t°_{VII}$ – 15 °С; $\Sigma_{мм}$ – 400–600 мм). В этот период совершилось окончательное преобразование тайги. С этим этапом связано начало процесса деградации восточного рубежа ареала лиственницы сибирской и распространение лиственницы даурской на запад и юг. Во время сартанской ледниковой эпохи (27–18 тыс. лет) произошло повсеместное развитие многолетней мерзлоты. Дальнейшее изменение климата происходило в сторону потепления, но сухость осталась. Изменение тайги проходило по линии флористического обеднения.

Голоцен ознаменовался активизацией тектонических процессов. Происходит формирование Восточно-Сибирской подобласти светлохвойных лесов, которая заняла всю территорию к востоку от Енисея (южнее 60° с. ш.). В позднем голоцене завершается становление современной ландшафтной структуры региона. В пределах региона происходит современная трансформация геосистем, связанная с развитием Байкальской рифтовой зоны и дальнейшим усилением континентальности климата.

Анализ публикаций, посвященных исследованию тектоники и геодинамики Центральной Азии, указывает на существенную роль горизонтальных движений земной коры в формировании структуры рельефа на новейшем этапе. Вся область от Тибета до гор юга Сибири уподобляется зоне «торошения», в котором отдельные «торосы» – микроплиты – перемещаются, подчиняясь общему субмеридиональному сжатию, связывая, таким образом, чрезвычайную динамичность региона с древним заложением и длительной унаследованностью границ микроплит [6]. В пределах окраин Байкальской рифтовой зоны проис-

ходит формирование переходного рельефа, в котором отражается появление у границ платформенных равнин первых признаков процесса горообразования и нарастание его интенсивности до степени, характерной для горных областей. Черты переходности характерны также для тектонических процессов, геологического строения, почвенного и растительного покрова, а вместе с ними – ландшафтной структуры. Переходные зоны отличаются повышенной мобильностью происходящих в них процессов, что наглядно проявляется в быстрой экспансии тех или иных контактирующих здесь геосистем при изменении ландшафтных условий.

Сложившаяся тенденция усугубляется антропогенным воздействием. Резонанс естественных и антропогенно – обусловленных тенденций развития процессов аридизации геосистем способствует структурным изменениям большинства таежных геосистем. Например, в настоящее время в равнинных и подгорных условиях правобережья Ангары при показателях радиационного индекса сухости порядка 1,0 отмечается функционирование темнохвойно-таежных геосистем, приуроченных к области проявления сезонной и многолетней мерзлоты. Их современное существование обеспечивается протаиванием мерзлых слоев почвы, которое обеспечивает водоснабжение растений во время сухого периода начала вегетации растительности. Это помогает геосистемам сохранять на определенное время свою «независимость» относительно региональных ландшафтных условий.

Интенсивная лесоэксплуатация лесных типов геосистем обусловила, наряду с естественными процессами ксерофитизации и антропогенное остепнение территории: усиление сухости воздуха и почв, обмеление рек, исчезновение притоков с площадью водосбора менее 5 км^2. Наряду с антропогенной нарушенностью лесных типов геосистем, обусловленной лесоэксплуатацией, отмечается их интенсивная пирогенная трансформация. Маршрутные и дистанционные аэровизуальные исследования, проведенные в этих районах, дешифрирование космических снимков показали, что для большинства местоположений, примыкающих к рр. Ангаре, Илиму, Лене, где была или отмечается в настоящее время интенсивная антропогенная деятельность, характерны устойчиво-длительно-производные типы геосистем, которые максимально соответствуют современным условиям среды и при снятии антропогенной нагрузки не восстанавливаются до исходного состояния. Происходит расширение площадей светлохвойно-таежных, преимущественно лиственничных геосистем и оттеснение темнохвойных на более высокие уровни.

В районах размещения крупных промышленных производств, широкомасштабных рубок леса, пашен и др. происходит трансформации вещественно-энергетических потоков, в частности, при формировании «островов тепла» и загрязнении среды. Исследования показали, что разница летних температур между антропогенными объектами (поля, поселки), таежными и подтаежными светлохвойными геосистемами превышает 20 °С. Загрязнение окружающей среды усугубляет ситуацию. Так даже низкая концентрация загрязняющих веществ, в частности SO_2, в районах воздействия промышленных центров опре-

деляет развитие процессов обезвоживания растений. В сфере интенсивного техногенного воздействия отмечается снижение прироста сосняков, очаговое усыхание, отсутствие возобновления.

Подгорные травяные низкоравнинные геосистемы подвергаются наиболее интенсивной антропогенной нагрузке: сельскохозяйственной, горнодобывающей. На них воздействуют крупные промышленные предприятия, которые относятся к числу наиболее опасных загрязнителей окружающей среды России. Слаборасчлененный рельеф низких равнин слабо препятствует распространению поллютантов.

Синтез полученных данных позволяет утверждать, что геосистемы восточных и в большей мере юго-восточных частей региона подвержены структурным перестройкам, что требует разработки особых, заповедных мер охраны природы на этой территории.

Картографирование трансформации геосистем

В процессе картографирования рассматриваются геосистемы двух главных категорий иерархии – региональной и топологической. Первые воспроизводят особенности зонально-секторно-высотного положения и общие черты развития регионов, вторые – локальные закономерности, определяющие характер и степень преломления фоновых признаков в конкретных местных ситуациях. Такое дифференцированное рассмотрение важно для правильного использования материалов геосистемного картографирования.

Так, к примеру, на небольших площадях и в ограниченные промежутки времени процессы и явления могут быть весьма изменчивы. При увеличении площадей их особенности сглаживаются, приобретают устойчивость, свойственную рассматриваемому району. Это подобно временной закономерности, когда, чем больше период наблюдений за явлением, тем устойчивее средняя величина его характеристик. Поэтому при экстраполяции данных, полученных на стационарах, используются показатели, обусловленные фоновыми закономерностями, «очищенными» от локальных возмущений, а свойства отдельных геосистем можно воссоздать только при условии знания закономерностей локального преломления фоновых признаков. К примеру, климатический режим геома – это модификация климата подзоны, возникшая под влиянием особенностей рельефа, почвенно-растительного комплекса и др. Поэтому для каждой зоны или провинции существуют свои геоморфологические, гидроклиматические и почвенно-ботанические критерии разграничения геомов.

Систематизация аналитического материала базируется также на учете выявленных эволюционных тенденций трансформации геосистем – качественного системного изменения, для которого свойственны необратимость и возникновение внутренних противоречий.

Для процесса развития геосистем характерны не жесткие, а плавные стыковки этапов, создающие переходные пространственно-временные пояса, которые должны найти отражение в легендах карт. В этом случае при картографировании геосистем целесообразно выделение переходных зон и отображение разновременных (гетерохронных) и разнородных по генезису (гетерогенных)

типов геосистем. В концептуальную модель современных карт заложены новые представления о преобразующей динамике геосистем.

В легенды карт для всех групп фаций введены категории: «мнимокоренные экстраобластные малоустойчивые» (геосистемы, которые относятся к какой-либо физико-географической области, но встречающиеся в силу определенных условий за ее пределами); «серийные факторальные – наименее устойчивые», воспроизводящие историю развития и современную преобразующую динамику. Сопоставление тех или иных типов геосистем с выявленным трендом преобразований за период позднего кайнозоя позволяет воссоздать перспективу их развития, в частности, через отображение условно-длительно-производных типов геосистем, которые устойчивы во времени и не возвращаются к исходным состояниям.

Группы фаций систематизируются в зависимости от факторов, влияющих на отклонения от фоновой нормы. Главнейшие направления «локализации» изменений фоновой нормы – это факторально-динамические ряды. К примеру, литоморфный ряд – сокращение мощности почвы и усиленное вовлечение в геосистему первичного минерального субстрата; гидроморфный – превращение сухопутных фаций в коллекторы влаги в системе естественного дренажа; криоморфный – снижение количества тепла, появление горизонта длительно действующей мерзлоты; стагнозный – углубление застаивания вещества, подтягивание к геосистеме грунтовых вод, замещение почвы отмершей органикой [4]. Предположительный порядок смены одного состояния другим показан в легенде карты через взаимосвязанный набор групп фаций, например, в порядке возрастания гидроморфности местоположений. В этом анализе проявляется косвенная возможность оценки влияния согласованности процессов на изменение типа или подтипа процесса организации геосистем региона вплоть до разрушения геосистемы и формирования новых взаимосвязей [3]. Для создания синтезированной карты организации геосистем регионов необходимо систематизировать данные, отраженные в современной карте геосистем.

Выводы

В статье рассмотрена методология исследования трансформации геосистем. Интенсивность и направление модификаций оценивается на фоне выявленного тренда эволюционных преобразований геосистем за период позднего кайнозоя. Сложившиеся тенденции трансформации региональной структуры геосистем свидетельствуют о дальнейшем развитии процессов аридизации, сформировавшихся еще в плиоцене. В районах интенсивного антропогенного воздействия БПТ в настоящее время формируется потенциальный аналог преобразования геосистем в плиоцене за счет развития процессов остепнения.

Исследование выполнено за счет средств государственного задания (№ госрегистрации темы АААА-А17-117041910167-0) и при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-05-00253.

Список литературы

1. *Белова В. А.* Растительность и климат позднего кайнозоя юга Восточной Сибири. Новосибирск : Наука, 1985. 160 с.

2. *Коновалова Т. И.* Уникальность геосистем и функциональное зонирование центральной экологической зоны оз. Байкал // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2011. Т. 2. С. 107–119.

3. *Коновалова Т. И.* Организация геосистем и ее картографирование // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2012. Т. 2. С. 150–162.

4. *Крауклис А. А.* Факторально-динамические ряды таежных геосистем и принципы их построения // Доклады Института географии Сибири и Дальнего Востока. 1969. Вып. 22. С. 15–25.

5. *Синицын В. М.* Природные условия и климаты территории СССР в раннем и среднем кайнозое. Л. : Изд-во Ленингр. ун-та, 1980. 104 с.

6. Мегагеоморфология Азии: некоторые итоги изучения рельефа континента / Д. А. Тимофеев, [и др.] // Известия АН. Серия географичская. 2001. № 4. С. 8–13.

7. Are there pre-Quaternary geological analogues for a future greenhouse warming? / A. M. Haywood, A. Ridgwell, D. J. Lunt, D. J. Hill, M. J. Pound, H. J. Dowsett, A. M. Dolan, J. E. Francis, M. Williams // Phil. Trans. R. Soc. Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2011. Vol. 3, N 13. P. 933–956. http://doi.org/10.1098/rsta.2010.0317

8. Climate and environment of a Pliocene warm world / U. Salzmann, M. Williams, A. M. Haywood, A. Johnson, S. Kender, J. Zalasiewicz // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. 2011. Vol. 309, Issues 1–2. P. 1–8. https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2011.05.044

9. The Response of Magnesium, Silicon, and Calcium Isotopes to Rapidly Uplifting and Weathering Terrains: South Island, New Zealand / Ph. A. E. Pogge von Strandmann, K. R. Hendry, J. E. Hatton, L. F. Robinson // J. Frontiers in Earth Science. 2019. Vol. 7. Article 240. https://doi.org/10.3389/feart.2019.00240

СОВРЕМЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ В ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ

УДК 004.9

Развитие перспективных информационных систем для гидрометеорологического обеспечения потребителей

Е. Д. Вязилов (vjaz@meteo.ru)

Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных, г. Обнинск

Аннотация. Представлена информация о направлениях развития автоматизированных систем, связанных с цифровой трансформацией гидрометеорологического обеспечения потребителей. Приведены примеры отечественных и зарубежных систем метаданных. Рассмотрены идеи для реализации основных этапов обработки данных – интеграции, автоматического выявления опасных явлений, доведения, использования, принятия решений руководителями предприятий на основе использования гидрометеорологической информации.

Ключевые слова: метаданные, гидрометеорологические данные, интеграция, прикладная обработка, доведение, использование, принятие решений, мониторинг работы систем.

Введение

Основными барьерами адаптации к опасным природным явлениям (ОПЯ) являются неадекватность оценки обстановки по цифровым показателям, отсутствие систематизированных сведений о возможных воздействиях явлений на промышленные предприятия и население, рекомендаций для принятия решений. Бывают случаи несвоевременного доведения информации о возможном проявлении явления до органов государственного управления, руководителей промышленных предприятий и населения, находящегося в опасной зоне. Органы государственного управления заняты своими делами и не всегда вовремя реагируют на прогнозы ОПЯ. Поэтому необходимо организовать принудительное оповещение для ознакомления руководителей со сложившейся обстановкой современными средствами – с помощью мобильных интернет-устройств. Руководителям предприятий надо давать оценку возможного ущерба, иначе они не будут предпринимать превентивных действий.

Цифровая трансформация (ЦТ) – это радикальное изменение гидрометеорологического обеспечения промышленных предприятий и органов государственной власти, новая бизнес-модель использования гидрометеорологической информации в бизнес-процессах предприятий, на которые воздействует окружающая среда. Отличиями новых бизнес моделей в эпоху ЦТ являются:

- быстрый поиск необходимых данных за счет использования комплекса объектов метаданных;
- использование интегрированных, распределенных и неоднородных данных из различных источников;
- повышение уровня автоматизации процессов выявления ОПЯ для каждого промышленного предприятия, вида деятельности;
- доведение необходимых данных до потребителей в соответствии с их требованиями по составу необходимых параметров и загрузка данных во внешние информационные системы предприятий;
- визуализация данных с помощью приложений МетеоАгент (оперативные сведения об ОПЯ), Информационная панель о состоянии гидрометеорологической обстановки в точке и МетеоМонитор (детализированная информация в пространстве и во времени);
- оптимизация использования гидрометеорологической информации при принятии решений за счет получения прогнозов возможных воздействий окружающей среды на предприятия и их виды деятельности, а также оценки возможного ущерба и расчет ожидаемой стоимости превентивных мероприятий до начала ОПЯ.

1. Метаданные и нормативно-справочная информация

Метаданные необходимы, чтобы данные могли быть обнаружены, поняты, оценены, признаны пригодными для использования по стандартам качества. Необходимы метаданные в виде сведений о массивах и базах данных (БД), организациях, наблюдательных подразделениях, платформах, проектах, программных средствах, нормативно-методических документах (НМД), рис. 1. Наиболее известными системами метаданных являются:

- SeaDataNet:(EC): EDMED – общие сведения о наборах данных (4246); EDMO – сведения об организациях (4300); EDMERP – сведения о проектах (3252), https://edmerp.seadatanet.org/search; CDI – общий индекс данных, который идентифицирует каждую единицу хранения (станция, срок наблюдений, др.) – 2300 тыс. океанографических станций, https://cdi.seadatanet.org/search; CSR – сведения о рейсах НИС в объеме около 50 тыс., https://csr.seadatanet.org/;
- ЕСИМО (Россия): ЦБМД – сведения о массивах и БД, форматах данных, проектах, организациях, наблюдательных платформах, программных средствах (более 20000 экземпляров), http://www.esimo.ru/meta/; сведения об информационных ресурсах (более 3000), http://www.esimo.ru/srbd_data/index.jsp; CODES – классификаторы (около 500), http://www.esimo.ru/meta/codes/; ЕСП – единый словарь параметров (около 2500), http://data.oceaninfo.ru/udopweb/ index.jsp; Автоматизированная система учета наблюдательных подразделений, http://asunp.meteo.ru;
- GCMD (США) – общие сведения о данных по природной среде (более 12000), http://gcmd.nasa.gov;
- Pangea (Германия) – сведения о массивах данных, проектах, программных средствах (более 500000), http://www.pangaea.de.

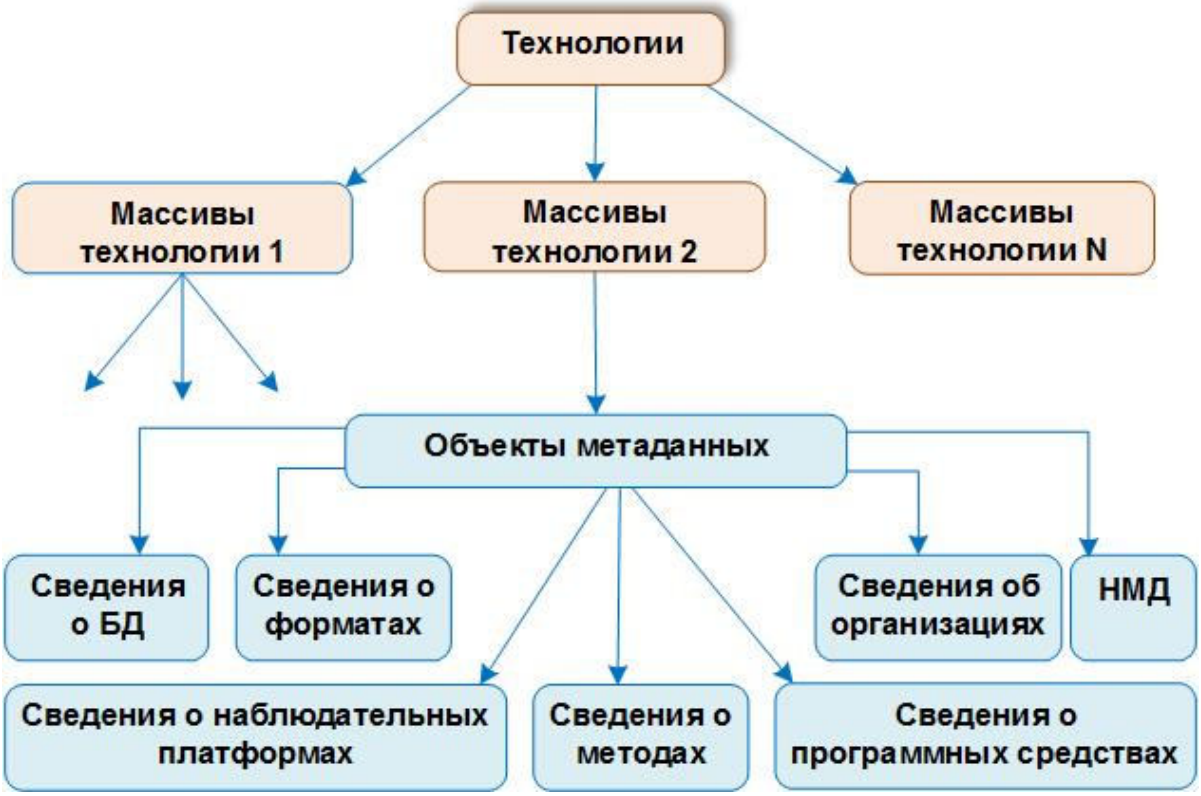


Рис. 1. Модель описания различных объектов метаданных

В Росгидромете применяются международные, национальные, ведомственные и локальные классификаторы и коды. Их количество оценивается в несколько тысяч. Для их поиска требуется иметь единую БД нормативно-справочной информации с используемыми классификаторами и кодами. Эта БД должны включать сведения о каждом классификаторе и сами классификаторы.

Для взаимодействия ИС, эксплуатируемых в различных странах и организациях, необходимо понимание локальных имен атрибутов, используемых в интегрированных системах. То есть необходим маппинг из локальных в общесистемные имена на основе Единого словаря параметров (http://esimo.ru/portal/portal/esimo-user/metadata).

2. Интеграция данных

Для того чтобы распределенные, неоднородные данные были доступны для использования из одного или нескольких источников, через один интерфейс, чтобы данными можно было легко обмениваться, доставлять любому потребителю автоматически, они должны быть интегрированы [5]. Технологическая схема интеграции, обработки и использования интегрированных данных представлена на рис. 2.

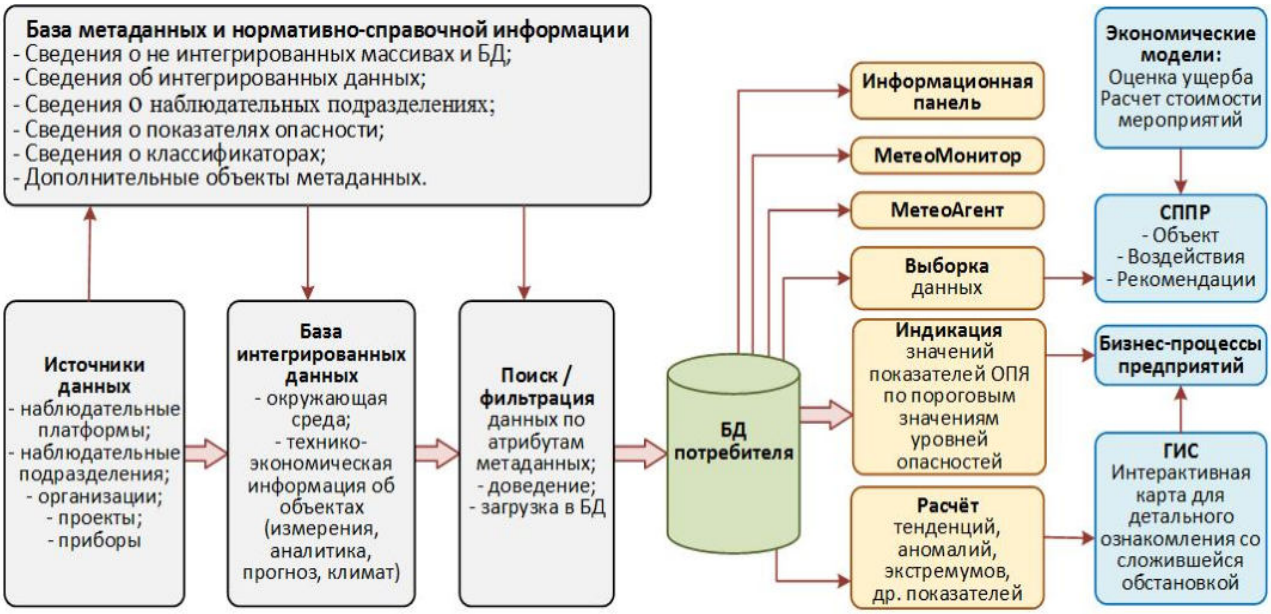


Рис. 2. Технологическая схема интеграции, обработки и использования данных.

3. Автоматическое выявление ОПЯ

Предприятиям фактически нужна гидрометеорологическая информация, когда значения показателей ОПЯ превышают пороговые значения для конкретных объектов, видов деятельности с указанием уровня опасности. Для этого требуется:

- разработать технологию для комплексного и адресного информационного обслуживания за счет автоматической доведения информации об ОПЯ до руководителей предприятий, органов государственной власти и населения;
- создать средства оценки состояния показателей окружающей среды по уровням опасности (индикация значений) для объектов промышленности, видов деятельности с выходом на более подробное рассмотрение ситуаций (карты изолиний текущих, прогностических, климатических данных).

Создание БД пороговых значений показателей ОПЯ производится с учетом типа объекта и видов деятельности с помощью «светофора» по следующей шкале: зеленый – нормальная ситуация, желтый – умеренно возмущенная, оранжевый – опасная, красный – катастрофическая.

Входной информацией для определения пороговых значений показателей ОПЯ на объекты и виды деятельности служат значения измеренных параметров в точке измерений (станция, буй), или узлах регулярной сетки. ОПЯ выделяются, как на уровне пункта наблюдений (превышение показателя зарегистрировано в одном пункте наблюдений), так и района (зарегистрировано в нескольких точках пространства). При этом используются как предупреждения Росгидромета об ОПЯ, так и опасности, выявленные на основе наблюденных и прогностических данных.

Результатом работы этого блока является постоянно обновляемая БД с опасными ситуациями для каждого объекта и вида деятельности. Формируемые сведения об ОПЯ должны удовлетворять следующим требованиям: минималь-

ный объем информации, выдаваемой руководителю; наличие ссылки на более детальное представление информации (МетеоМонитор); отображение в форме, непосредственно пригодной для использования без необходимости выполнения вычислений или преобразований.

4. Приложение по отбору и передаче сведений об ОПЯ

При гидрометеорологическом обеспечении потребителей необходимо использовать официальные «Штормовые предупреждения и оповещения» Росгидромета. Эти предупреждения составляются наблюдателями или синоптиками, передаются по Глобальной системе телесвязи (ГСТ) и загружаются в интегрированную БД. В первом варианте сведения об ОПЯ выявляются наблюдателями на гидрометеорологической станции и передаются в коде WAREP. Эти сообщения можно применять для выявления объектов и видов деятельности, на которые влияют выявленные ОПЯ, с использованием пороговых значений показателей для рассматриваемых объектов. Второй вариант, это когда синоптики в прогностических центрах на основе анализа текущей обстановки, прогностических карт и других материалов, дают прогноз ОПЯ и передают его заинтересованным предприятиям [4].

Должна быть обеспечена возможность перенастройки состава отслеживаемых ОПЯ и пороговых значений показателей для конкретного предприятия. При выявлении ОПЯ устанавливается причина ее возникновения. Знание причин ОПЯ позволяет предсказать его развитие и возникновение новых явлений, причинами возникновения которых может являться первое явление.

Организация автоматического обслуживания руководителей в случае ОПЯ призвана обеспечить повышение информативности руководителей предприятий, быстрое ознакомление со сложившейся обстановкой с помощью:

- автоматической индикации показателей среды в виде «светофора» для различных уровней опасности;
- отбора и передачи поступивших штормовых оповещений;
- передачи сведений об ОПЯ, включая предоставление сведений о воздействиях и рекомендаций для поддержки решений, выдачу сведений о возможном ущербе и затратах на превентивные мероприятия;
- отображения сложившейся обстановки при помощи информационной панели для детального знакомства с гидрометеорологической обстановкой.

5. Приложение «Метеоагент»

Приложение «МетеоАгент» предназначено для визуализации сведений об ОПЯ на основе полученного смс-сообщения с адресом приложения для получения списка возможных воздействий и рекомендаций [3; 6; 7]. Это приложение устанавливается на компьютере руководителя и автоматически активизируется при получении смс-сообщения от системы доведения. Программа «МетеоАгент» настраивается потребителем под конкретный объект, гидрометеорологическую станцию или географическую область, пороговые значения показателей. Для каждого из видов хозяйственной деятельности существуют свои ограничения деятельности, например, связанные с сильным ветром, которые могут

не совпадать с общими градациями сильного ветра, установленными в имеющихся нормативных документах [1; 2]. В сообщении находится ссылка на приложение «МетеоМонитор» для получения более детальной информации о сложившейся обстановке.

До потребителей доводятся не данные, а сведения об ОПЯ или аномальные отклонения текущих и прогностических значений показателей от климатических значений для конкретных промышленных объектов и видов деятельности, и не по инициативе потребителя, а путем автоматической доставки на интернет-устройство.

6. Приложения «Информационная панель» и «МетеоМонитор»

Кроме смс-сообщения руководитель должен увидеть состояние показателей о сложившейся обстановке. Для этого должно использоваться приложение для визуализации показателей в виде информационной панели. Приложение показывает изменения значений наблюденных и прогностических параметров, отмечаемых на иконках приборов, с указанием уровня их опасности. Рядом с каждым параметром помещаются графики их изменения за последние 5–10 сроков, а также аномалии и тенденции. При обновлении данных в источниках автоматически обеспечивается актуальность данных на приборной доске. В таком приложении информация отображается в более компактном виде на экране. И одного взгляда на такую форму отображения достаточно для понимания сложившейся обстановки. При необходимости руководитель может получить детализированную информацию с помощью приложения МетеоМонитор на портале Единой государственной системы информации об обстановке в Мировом океане (ЕСИМО) по району, отображающую динамику изменения показателей в виде карты со слоями для различных параметров [5], http://esimo.ru.

Программный интерфейс приложения МетеоМонитор, предназначенного для более детального знакомства с гидрометеорологической обстановкой в точке или по району с наблюденными, прогностическими и климатическими данными, должен обеспечить следующие формы представления информации:

- карты распространения ОПЯ в пространстве;
- графики изменения показателей во времени;
- таблицы значений параметров окружающей среды в конкретных пунктах наблюдений или ближайших к населенному пункту узлах регулярной сетки;
- результаты индикации значений, показывающей состояние показателей, для отдельных объектов и видов деятельности;
- списки сообщений об ОПЯ;
- средства сигнализации об опасности звуковыми и цветовыми средствами.

7. Доставка информации во внешние информационные системы предприятий

В настоящее время необходимо, чтобы данные об ОПЯ использовались в автоматизированных бизнес-процессах предприятий для постоянного их учета,

например, скорость и направление ветра необходимо учитывать при разгрузке угля в морском порту, находящемся на территории города. В этом случае руководитель предприятия подписывается на доставку необходимых данных. При этом в зависимости от бизнес-процесса данные могут поставляться для точки, района или траектории. Если предприятие находится в определенной точке, то наблюденные данные поставляется по пункту наблюдений, который ближе всего находится к предприятию, а прогностическая информация – по ближайшему к объекту узлу сетки. Если предприятие представляет собой динамический объект (судно), то для него выбираются пункты наблюдений и узлы сетки по всему маршруту судна.

Средства доставки информации до потребителей включают подписку на данные с их размещением на удаленных ftp-серверах или отправкой данных по электронной почте; на новостные ленты для документов, новостей, сообщений, телеграмм из ГСТ.

Для разработки бизнес-процессов, которые решаются с помощью гидрометеорологических данных, необходимо уточнить показатели, которые влияют на выполнение бизнес-процессов; определить опасные ситуации на основе пороговых значений показателей, получаемых на регулярной основе; доставить сведения об ОПЯ на объект и загрузить значения показатели в БД. Для максимально эффективной доставки данных должны быть реализованы возможности:

- доведения данных непосредственно в БД информационных систем предприятий, а не загрузка их в боксы электронной почты или на ftp-сервера;
- организации доставки данных по событию обновления данных;
- мгновенного получения уведомлений на любые сбои при доставке для немедленного их устранения, не допуская влияния последствий на бизнес-процессы потребителей;
- мониторинга всех доставок данных для оценки их соответствия настройкам.

8. Поддержка решений

Основная идея создания системы поддержки принятия решений заключается в следующем. Зная условия окружающей среды, можно заранее определить перечень воздействий среды на промышленные объекты и население. Зная воздействия, можно определить рекомендации для принятия решений. Для разработки такой системы необходимо решить следующие задачи:

- осуществить сбор, формализацию, занесение в БД и хранение сведений о воздействиях различных ОПЯ на промышленные объекты и население, http://armexpert.oceaninfo.ru:81/;
- формализовать рекомендаций для принятия решений с учетом возможных воздействий для различных объектов, видов деятельности, уровней опасности, уровней принятия решений;
- разработать программные средства автоматического выявления, доведения и визуализации сведений об ОПЯ;
- реализовать средства ввода, редактирования и визуализации сведений о воздействиях и рекомендаций в зависимости от сложившейся обстановки;

- разработать экономико-математические модели оценки возможного ущерба до начала явления и расчета затрат на превентивные мероприятия.

9. Оценка ущерба и расчет стоимости превентивных мероприятий

Материальный ущерб принято оценивать в натуральных и денежных единицах. Сводку о материальном ущербе обычно дают в натуральных единицах, например, количество разрушенных мостов, домов, промышленных зданий, количество поврежденных зданий, число летальных исходов; число заболевших лиц; число раненых и травмированных и т. п.

Потенциальный ущерб от ОПЯ может содержать материальный ущерб, связанный с утратой имущества предприятий, культурных ценностей, здоровья населения; полным или частичным уничтожением различного имущества физических лиц. Кроме того, возможен ущерб окружающей среде. Могут появиться затраты, связанные с исками со стороны потерпевших сторон; штрафами за последствия инцидента (разлив химических веществ); стоимостью восстановительных работ и ликвидацией последствий инцидента. Убытки от ОПЯ определяются прекращением отдельных видов производственных работ, потерей груза; ухудшением качества перевозимой продукции; разрушением (гибелью, смывом) или необходимостью ремонта перевозимого оборудования, уменьшением балансовой стоимости основных фондов объектов (рекреации, туризма, производства, жилого фонда), уменьшением выпуска продукции (материалов), простоем объекта при необходимости выплачивать зарплату из-за возникших ОПЯ; увеличением времени на выполнение работ.

После явления возникают затраты на спасение; аварийно-восстановительные мероприятия; лечение раненых; зарплату работников при проведении аварийно-восстановительных мероприятий. Эти затраты складываются из стоимости ремонта зданий; выплат населению из фонда социального страхования на период временной и постоянной нетрудоспособности; недополученной прибыли различными организациями.

Для принятия решения, кроме возможного ущерба, необходимо знать и стоимость превентивных мероприятий. Расчеты стоимости превентивных мероприятий складывается из затрат на: заработную плату работников, участвующих в превентивных мероприятиях; аренду техники для вывоза грузов из зоны опасности; обучение сотрудников; приобретение дополнительного оборудования; строительство временных ограждающих дамб, валов в период наводнения; эвакуацию людей, вынужденное перемещение материальных и технических средств, укрытие материалов; расходные материалы.

10. Системы мониторинга аппаратно-программных средств

Реализация единого технологического процесса сбора, обработки и использования информации у потребителя требует обеспечения высокой надежности работы всех программно-аппаратных средств (автоматических метеостанций, баз данных, ГИС-серверов и других программных приложений), а также контроля доставки информации потребителям. Для этого необходимо применить систему мониторинга аппаратно-программных средств – единую для

всей ИТ-инфраструктуры Росгидромета. Чтобы на любом уровне управления можно было видеть состояние инфраструктуры, работоспособность техники, информационных ресурсов и программных средств.

Заключение

Впервые представлена идея развития информационных систем Росгидромета для повышения уровня автоматизации гидрометеорологического обеспечения потребителей, начиная от сбора данных и заканчивая их использованием у потребителя.

При этом ИТ-инфраструктура Росгидромета должна обеспечить непрерывные процессы наблюдений; сбора данных в УГМС и далее в прогностических центрах; интеграции данных; обмена и доведения данных в другие внешние системы; доставки сведений об ОПЯ до потребителей в виде СМС-сообщений; визуализации данных для детального знакомства с гидрометеорологической ситуацией с помощью приложения МетеоМонитор; использования информации в бизнес-процессах и принятия решений (приложение МетеоАгент, установленное на интернет-устройстве потребителя). Эти и другие современные технологии предлагают новые инструменты, которые необходимы для реализации перехода от традиционной «лоскутной» автоматизации к сквозной технологии обслуживания потребителей «от наблюдения до принятия решения». В результате должен поменяться способ предоставления сервисов, сам характер использования ГМИ в бизнес-процессах предприятий.

Список литературы

1. РД 52.27.881-2019. Руководство по гидрометеорологическому обеспечению морской деятельности. М. : Гидрометцентр России, 2019. 132 с.

2. РД 52.88.699. Положение о порядке действий учреждений и организаций при угрозе возникновения и возникновении опасных природных явлений (с изм.). М. : Росгидромет, 2008. 31 с.

3. *Вязилов Е. Д.* Новые подходы по доведению информации об опасных гидрометеорологических явлениях и повышению информированности лиц, принимающих решения // Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций : XVI Всерос. науч. конф. Москва, 27–28 сент. 2017 г. : сб. материалов. М. : МЧС России : Антистихия, 2017. С. 40–44. https://static.mchs.ru/upload/site1/document_file/w5PgTGcnn5.pdf.

4. *Положение* о порядке информирования населения и других заинтересованных пользователей об угрозах возникновения опасных метеорологических явлений на территории РФ с использованием информационно-коммуникационной сети Интернет : утв. Приказом Росгидромета № 341 от 05.08.2016.

5. *Вязилов Е. Д.*, *Михайлов Н. Н.* Интеграция данных о морской среде и деятельности. Инфраструктура спутниковых геоинформационных ресурсов и их интеграция // Сборник научных статей / под ред. М. А. Попова, Е. Б. Кудашева. Киев : Карбон-Сервис, 2013. С. 174–181.

6. *Viazilov E. D.* Development of hydrometeorological services to support decisions of enterprise leaders: Examples from the Russian Federation. United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNISDR). The UN Global assessment report on disaster risk reduction 2019 (GAR19). United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNISDR). Contributing Paper to GAR 2019 (Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction). 2019. 26 p. https://www.preventionweb.net/publications/view/66441/.

7. *Viazilov E. D., Mikheev A. S.* Formalization of Disasters Impacts on Enterprises and Population, and Recommendations for Decision-making. Data Analytics and Management in Data Intensive Domains // Selected Papers of the XX International Conference on Data Analytics and Management in Data Intensive Domains (DAMDID/RCDL-2019). Kazan, Russia. October 15–18, 2019. P. 95–106. http://ceur-ws.org/Vol-2523/paper11.pdf.

УДК 528.88+528.855+551.584.2.

Сопоставление наземных и космических температурных данных за 2015–2018 годы для территории острова Кунашир (Большая Курильская гряда): первые результаты

М. Ю. Грищенко (m.gri@geogr.msu.ru)[1,2], П. Г. Михайлюкова (polinam_20@mail.ru)[1]

[1] Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, г. Москва
[2] Государственный природный заповедник «Курильский», пос. Южно-Курильск

Аннотация. Представлены первые результаты сопоставления наземных и космических температурных данных для территории острова Кунашир. На острове действует Государственный природный заповедник «Курильский», силами сотрудников которого организована сеть наземных наблюдений за температурой воздуха. В качестве космических данных использованы снимки в 10-м канале съемочной системы TIRS, установленной на ресурсном спутнике Landsat 8. Съемка в этом канале ведется в диапазоне 10,30–11,30 мкм. Выявлено, что наименьшие различия между наземными данными о температуре воздуха и космическими данными о температуре поверхности характерны для лесных сообществ в зимнее время (при отрицательных температурах).

Ключевые слова: тепловые космические снимки; Landsat; iButton; Кунашир.

Географическая характеристика

Кунашир – самый южный остров Большой Курильской гряды, его длина составляет 123 км, ширина – до 30 км. Остров омывается с севера и запада Охотским морем, с юга и востока – Тихим океаном. Кунашир отделяется от японского острова Хоккайдо проливами Кунаширским и Измены, от острова Итуруп – проливом Екатерины, а от островов Малой Курильской гряды – Южно-Курильским проливом. Рельеф острова преимущественно низкогорный, реже – среднегорный, холмистый, равнинный; четко выражено вулканическое происхождение основных форм. Остров образован четырьмя вулканическими массивами, которые соединены низменными перешейками. Наивысшая точка острова – вулкан Тятя высотой 1819 м. Берега острова преимущественно скалистые, обрывистые с узким каменистым пляжем, реже – пологие с песчаными дюнами и песчаными пляжами; береговая линия очень слабо изрезана. Реки острова имеют преимущественно горный характер, долины глубоко врезаны, нередко встречаются пороги и водопады. Для водотоков характерен выраженный паводковый режим; расходы увеличиваются при прохождении тайфунов в период с июля по октябрь включительно. Озера лагунного и вулканического происхождения.

Климат Кунашира океанический, с влажным прохладным летом и сравнительно холодной для этих широт зимой. Годовое количество осадков достигает 1500 мм, максимум приходится на июль, август и сентябрь. Средняя температура самого холодного месяца (февраль) в Южно-Курильске составляет всего –5°С; средняя температура самого теплого месяца (августа) составляет 16°С, немногим ниже температура в сентябре. Для острова характерна исключительно

высокая относительная влажность воздуха, обычно не опускающаяся ниже 60 %, а также большое количество дней с туманом и повышенная облачность. Стоит отметить выраженную пространственную дифференциацию климатических показателей в пределах территории острова: так, на сравнительно более сухом и менее облачном охотоморском побережье Кунашира температура воздуха может летом достигать 30 °С при безоблачной погоде со слабым ветром, в то время как на расстоянии 15 км, на соседнем, тихоокеанском побережье, температура воздуха может не подниматься выше 15 °С, идти моросящий дождь.

На Кунашире и прилегающих островах действует Государственный природный заповедник «Курильский», сотрудниками которого организована сеть метеонаблюдений на основе температурных датчиков iButton и автоматических метеостанций (Davis Vantage Pro II и Oregon Scientific WMR 2) [1].

Материалы и методы

В качестве наземных данных использованы датчики iButton DS1922L-F5#, точность которых составляет ±0,5 °С при температурах от –10 до +65 °С. Период измерений температуры воздуха начался в 2015 г. и закончился в 2018 г. Датчики установлены в разных ландшафтных условиях (над поверхностью травяно-кустарничкового яруса в нелесных сообществах и под пологом леса – в лесных) на высоте 1,5–2 м над поверхностью почвы. Ранее установлено, что космические данные высокого пространственного разрешения для городских территорий характеризуют скорее температуру воздуха, чем температуру поверхности [2]; для природных территорий наблюдается хорошее соответствие между космическими данными и наземными данными о температуре воздуха [1].

За этот же период проанализирован архив космических снимков со спутника Landsat 8, в результате чего отобрано 28 безоблачных изображений на остров Кунашир.

В качестве источников спутниковых измерений использован 10-й канала снимков со спутника Landsat 8 (съемочная система TIRS), регистрирующий собственное излучение объектов в диапазоне 10,30–11,30 мкм [3].

Расчет значений LST по данным снимков со спутника Landsat 8 выполнялся в несколько этапов, включающих [1]:

1) расчет спектральной плотности излучения;

2) атмосферную коррекцию;

3) пересчет значений яркости пикселов теплового канала в значения температуры.

Результаты и их обсуждение

При сопоставлении наземных и космических данных необходимо учитывать, что наземные измерения получены на некоторой высоте от поверхности растительного сообщества (в случае нелесных сообществ) или же, наоборот, под его пологом (в случае лесных сообществ) и характеризуют температуру воздуха, в то время как спутниковые измерения должны характеризовать температуру поверхности объекта, которая в зависимости от ландшафтов местности может являться поверхностью крон деревьев, участки открытых грунтов и т. п.

Сопоставление наземных и космических данных выполнялось на основе регрессионного анализа. Из набора наземных измерений, временная дискретность которых составляет 1 ч, отобраны те значения, которые наиболее близки к времени выполнения космической съемки. Для каждой пары «наземные данные / космические данные» вычислена разность значений. Если разность превышала 2 °С, то такая пара исключалась из дальнейшего анализа. Всего пар измерений, исключенных из анализа, оказалось 41 (~50 % от первоначальной выборки). Общее количество измерений, участвующих в регрессионном анализе, составило 37. Из них для 19 измерений (51 %) разность между наземными и спутниковыми измерениями температуры не превышает 1 °С, при этом для 12 (32 %) из них разность не превышает 0,5 °С.

Следует отметить, что минимальные разности между космическими и наземными температурными данными характерны, преимущественно, для отрицательных значений температуры. Так, из 12 пар измерений, разность которых не превышает по модулю 0,5 °С, 10 пар (83 %) это те, где температура ниже 0 °С. Таким образом, можно заключить, что максимальная точность измерения температуры воздуха спутниковыми методами достигается в зимний сезон при отрицательных температурах. В летнее время большая относительная влажность атмосферы может обусловливать различия в значениях температур, полученных двумя рассматриваемыми методами.

В ландшафтном отношении точки, для которых разность между космическими и наземными данными не превышает 0,5 °С, приурочены, главным образом, к участкам с густой лесной растительностью. Однако строгой зависимости точности определения значений температуры по космическим данным от ландшафтных особенностей местности не выявлено. Сложная структура природных объектов, включающая чередование густой лесной растительности с участками открытого пространства или почв/скальных выходов, наличие водных объектов обусловливает осреднение в пределах пиксела космического изображения значений температуры разных по своей природе объектов, в то время как наземные измерения фиксируют температуру, более детально пространственно локализованную. Это также может являться причиной больших расхождений между наземными и космическими данными. Следует отметить, что пары данных, исключенные из статистического анализа (разность значений температур превышает 2 °С) включают те точки, которые расположены на открытых пространствах с отсутствием плотной древесной растительности. Анализ этих случаев – задача дальнейших исследований.

В результате регрессионного анализа полученной выборки измерений установлена хорошая взаимосвязь между спутниковым данными и наземными измерениями. На рисунке приведен график и уравнение регрессии, отражающее эту взаимосвязь. Стандартная ошибка составила 0,95. Коэффициент R^2 (коэффициент детерминации) равен 0,99, что свидетельствует о тесной взаимосвязи наземных и спутниковых измерений, а это, в свою очередь, подтверждает высокую точность определения температуры воздуха для лесных сообществ острова Кунашир по космическим снимкам.

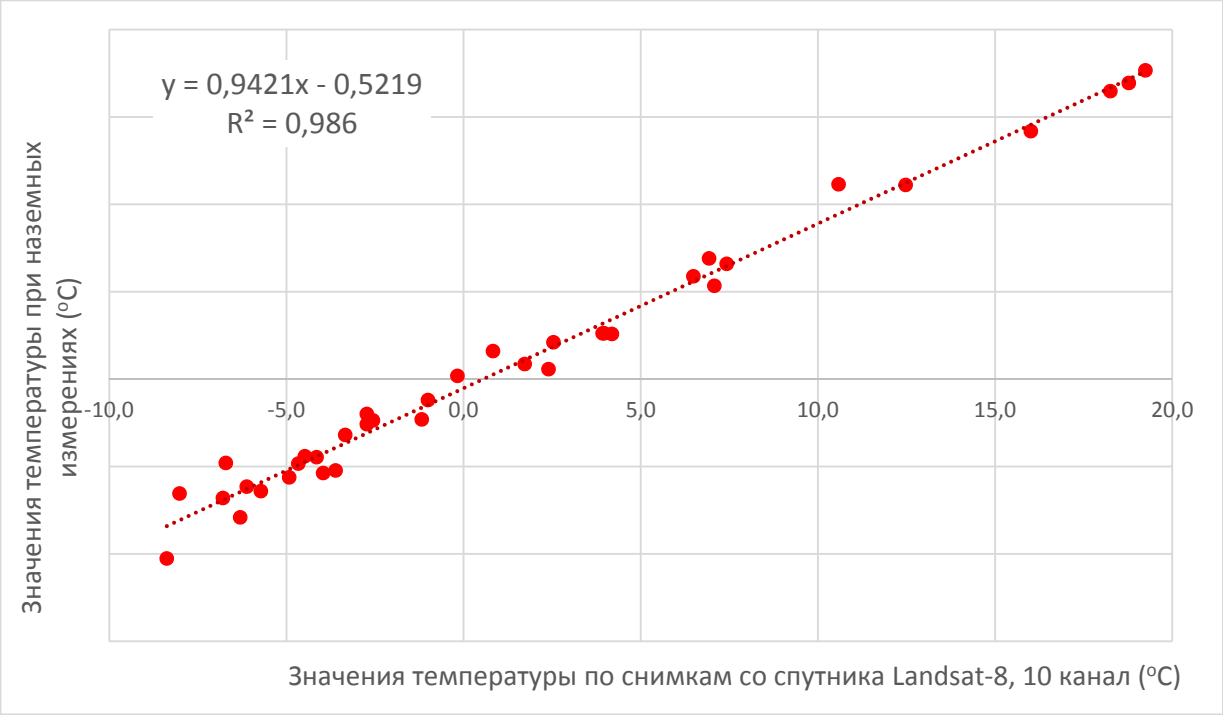


Рис. Сопоставление наземных и космических температурных данных: линейная регрессия

Выводы

Таким образом, можно заключить, что данные 10 канала съемочной системы TIRS спутника Landsat 8 являются достаточно точным источником информации о температуре воздуха в лесных сообществах. На примере разных районов острова Кунашир показано, что точность измерений для разных лесных сообществ практически одинакова и в большинстве случаев не превышает 1 °C. Установлено, что максимальная точность измерений достигается при измерениях в зимнее время при отрицательных температурах.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 1-05-00715 А.

Список литературы

1. *Грищенко М. Ю., Чернулич К. К.* Исследование связи наземных и космических температурных данных на примере островов Врангеля и Кунашир // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2019. Т. 63, № 5. С. 566–576.

2. *Varentsov M. I., Grishchenko M. Y., Wouters H.* Simultaneous assessment of the summer urban heat island in Moscow megacity based on in situ observations, thermal satellite images and mesoscale modeling // Geography, Environment, Sustainability. 2019. Vol. 12, N 4. P. 74–95.

3. Using the USGS Landsat 8 Product. U. S. Department of the Interior U. S. Geological Survey: Landsat Missions : [офиц. сайт Геологической службы США]. URL: http://landsat.usgs.gov/Landsat8_Using_Product.php (дата обращения: 02.03.2020).

УДК 004.67:551.5

Электронный научно-прикладной справочник «Климат России»

С. Г. Давлетшин (sdavletshin@meteo.ru), Н. Н. Коршунова (nnk@meteo.ru), Л. Т. Трофименко (tlt@meteo.ru), В. Н. Разуваев (razuvaev@meteo.ru)

Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных, г. Обнинск

Аннотация. Рассмотрена необходимость создания электронного справочника. Дан перечень его таблиц. Описаны этапы его формирования. Представлены способы получения данных справочника.

Ключевые слова: климатическая информация, подготовка данных к анализу, статистические характеристики, обслуживание потребителей.

Увеличение потребности в климатической информации вызвано, во-первых, возросшей зависимостью хозяйственной деятельности человека от погодно-климатических условий из-за роста опасных и экстремальных явлений в условиях потепления климата. Во-вторых, рациональное ведение хозяйственной деятельности и ее планирование невозможно без учета климатических особенностей региона, а появление новых отраслей и новых производств, освоение новых территорий предъявляет новые требования к обслуживанию климатической информацией. Различные отрасли экономики в разной степени зависят от погодных условий, поэтому прикладные исследования и их результаты должны быть адресными, ориентированными на нужды и требования конкретного сектора экономики.

Предоставление актуальной климатической информации в виде набора таблиц различных статистических характеристик является основной целью создания электронного справочника. Технология ведения справочника предусматривает возможность регулярного обновления базы статистических характеристик. Пополнение информационной базы может производиться с разной периодичностью в зависимости от характеристик.

При расчете статистических характеристик данного справочника использовались методики, разработанные специалистами Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова при подготовке предыдущих справочных изданий.

При подготовке справочника была проведена огромная работа с управлениями Росгидромета по изучению спроса на гидрометеорологическую информацию. В результате перечень таблиц сформирован с учетом пожеланий потребителей гидрометеорологической информации.

Содержание справочника

Структура нового справочного издания разработана на основе «Научно-прикладного справочника по климату СССР» (год издания 1984–1989 гг.) [4], который содержит наиболее полный перечень характеристик, необходимых для прикладных и научных целей.

Справочник состоит из 15 частей:

- Часть 1. Климатические нормы.
- Часть 2. Температура воздуха.
- Часть 3. Температура почвы.
- Часть 4. Ветер.
- Часть 5. Атмосферное давление.
- Часть 6. Влажность воздуха.
- Часть 7. Атмосферные осадки.
- Часть 8. Снежный покров.
- Часть 9. Облачность.
- Часть 10. Атмосферные явления.
- Часть 11. Гололедно-изморозевые явления.
- Часть 12. Солнечная радиация и солнечное сияние.
- Часть 13. Метеорологическая дальность видимости.
- Часть 14. Специализированные климатические характеристики.
- Часть 15. Отраслевое приложение.

В первой части помещены климатические нормы за тридцатилетние периоды, рекомендованные ВМО для расчета норм.

Все разделы НПС, посвященные основным метеорологическим параметрам, (части 2–13), содержат базовые статистические характеристики. Под базовыми характеристиками здесь понимаются стандартные статистические характеристики – средние, среднеквадратическое отклонение, повторяемость, максимумы, минимумы и т. д. Эти климатические показатели дают представление об основных закономерностях режима метеорологических величин и позволяют переходить практически к любым прикладным специализированным характеристикам.

Впервые в справочное пособие включен раздел, посвященный метеорологической дальности видимости (часть 13). Этот параметр важен для всех видов транспорта, а особенно для авиации.

В части 14 справочника представлены специализированные климатические характеристики, к которым относятся различные комплексные величины температура – влажность, температура – ветер, ветровая нагрузка и другие климатические характеристики, представляющие интерес для различных отраслей экономики. Раздел дополнен расчетными климатическими характеристиками, которые широко используются в строительстве, сельском хозяйстве, а также других отраслях экономики. К ним относятся характеристики устойчивых морозов, расчетные температуры и характеристики отопительного периода, даты первого и последнего заморозков в воздухе и на почве, продолжительность безморозного периода, наибольшие скорости ветра различной вероятности, повторяемость случаев выпадения осадков более заданных пределов и др.

С целью максимального учета потребностей различных отраслей экономики в гидрометеорологической информации в зависимости от региональных особенностей данного региона справочник был дополнен разделом «Отраслевое

приложение», который содержит специализированные климатические характеристики для различных отраслей экономики.

Для отрасли «Сельское хозяйство» представлены следующие специализированные характеристики:

- гидротермический коэффициент Г. Т. Селянинова для характеристики засухи и избыточного увлажнения, который оценивает метеорологическую ситуацию по классификации: очень засушливо; засушливо, но недостаточно влажно; избыточно влажно;
- индекс засушливости Д. А. Педя, позволяющий судить о степени отклонения значений температуры и осадков от нормы (среднемноголетних значений) и классифицировать все случаи по степени засушливости или увлажнения, различая слабую, среднюю, сильную засуху и слабое, среднее, сильное избыточное увлажнение;
- суховей (ветер при высокой температуре воздуха и большом дефиците влажности), по классификации Е. А. Цубербиллер: слабый, средней интенсивности, интенсивный, очень интенсивный.

В строительстве используется температура воздуха, рассчитанная по формуле Чаплина по температуре воздуха за самый холодный месяц и абсолютному минимуму температуры, которая полезна при вычислении теплопотерь зданий и расчете систем отопления и вентиляции.

Для лесного хозяйства представлен индекс горимости по формуле В. Г. Нестерова, который рассчитывается по данным температуры воздуха в 13 час местного времени и дефициту точки росы и позволяет оценить пожароопасность региона по следующим классам опасности: горимость отсутствует или малая, средняя, высокая, особо опасная и чрезвычайно опасная.

Для отрасли «Здравоохранение и туризм» представлены два биоклиматических комплексных показателя, от которых зависит здоровье и самочувствие человека:

- число дней с суровой погодой по индексу суровости Бодмана, который рассчитывается по среднесуточным значениям температуры воздуха и скорости ветра и разделяется по классам: мало суровая, умеренно суровая, суровая, очень суровая, жестко суровая, крайне суровая;
- число дней с комфортной погодой. При этом используется индекс комфортности погоды (эффективная температура), которая рассчитывается по значениям относительной влажности воздуха и температуры воздуха и представлена для двух зон комфорта: России и США.

Материал в справочнике представляется в основном в табличной форме (рис. 1). По некоторым станциям помещается графический материал (рис. 2), например, по годовому ходу или многолетнему ходу некоторых метеорологических характеристик за центральные месяцы сезонов.

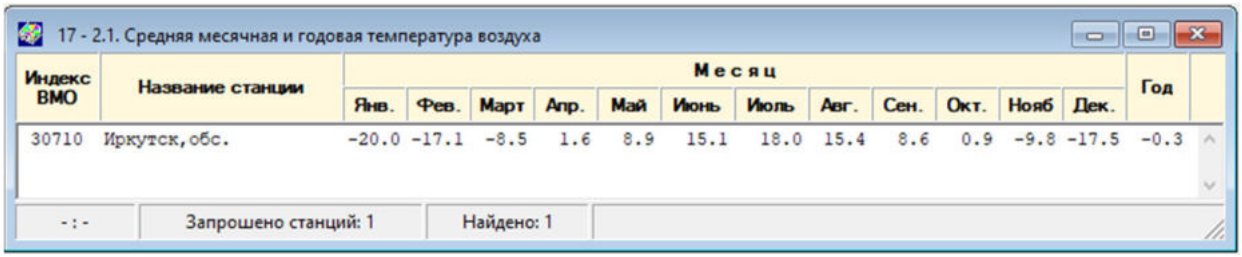


Рис. 1. Табличная форма представления данных в настольной версии справочника

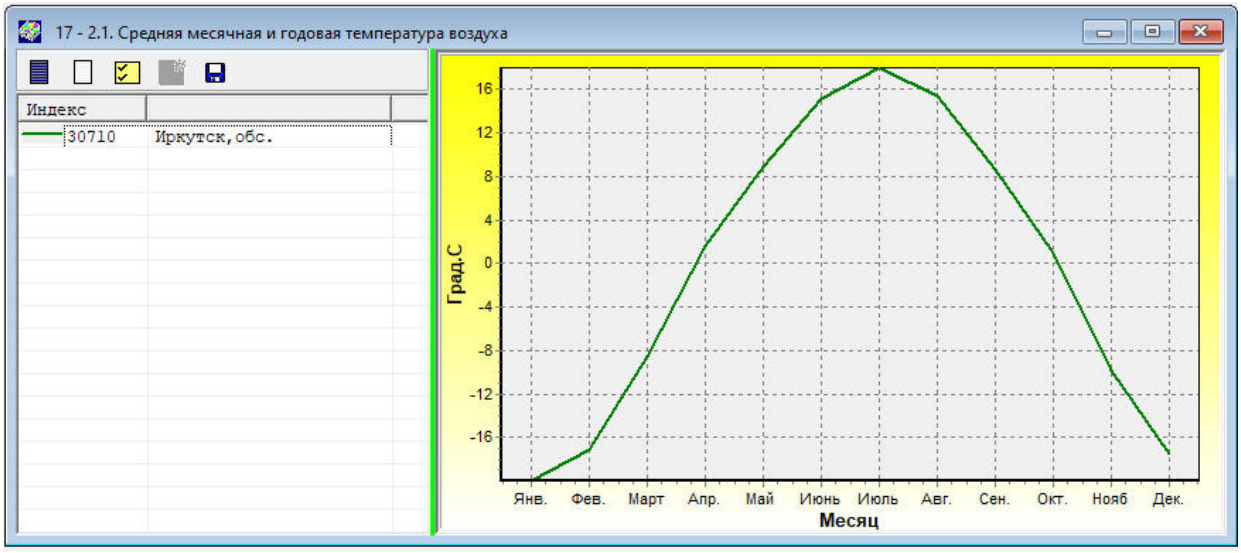


Рис. 2. Графическая форма представления данных в настольной версии справочника

Этапы формирования справочника

Расчет и формирование таблиц справочника осуществляется в несколько этапов:

1. Формирование необходимых каталогов.
2. Ввод исходных данных.
3. Контроль исходных данных.
4. Корректировка исходных данных.
5. Расчет необходимых статистических характеристик.
6. Формирование файлов с результатами расчетов в табличном виде.

Формирование каталогов является подготовительным этапом. Автоматизированная система формирования справочника использует следующие каталоги:

- каталог станций, который включает синоптический индекс станции, координатный номер станции, название станции, широту и долготу станции. При формировании каталога станций необходимо учитывать то, что у многих станций менялся координатный номер;
- каталог барометрических высот, который используется при расчете характеристик приземного давления. Он включает синоптический индекс, высоту барометра, временны́е характеристики (год, месяц, день, срок), начиная с которых действовала указанная высота и временны́е характеристики, в соответствии с которыми указанная высота перестала действовать;

- каталог часовых поясов, который используется при определении срока наблюдения, ближайшего к 13 часам поясного местного времени, а также сроков наблюдения, относящихся к дневному или ночному времени суток. Каталог включает: координатный номер станции, год и месяц наблюдения, номер часового пояса, тип участка станции, высоту станции над уровнем моря, начало местных суток, первый час от начала местных суток, первый срок от начала местных суток, широту и долготу станции.

Исходным материалом для получения климатических характеристик являются архивы Государственного фонда данных о состоянии природной среды (Госфонда) [2] различного временно́го разрешения (срочные, суточные, месячные). Эти архивы являются результатом работы автоматизированных систем первичной обработки режимной метеорологической информации станций на базе ЭВМ различных поколений, в том числе и на базе персональных ЭВМ (ПЭВМ).

Ввод исходных данных осуществляется постанционно. Очередность ввода станции определяется каталогом станций. Из каталога определяется координатный номер, по которому происходит поиск нужного файла, и синоптический индекс станции, который включается в ключевые элементы записи результирующего файла. Архивы Госфонда весьма разнообразны как по содержанию, так и по форматам: по содержанию – в силу того, что охватывают период более 100 лет, за который многократно изменялись программы наблюдений; по форматам – из-за того, что создавались в различное время, начиная с 70-х гг. XX в., на различной вычислительной технике: Минск-32, ЭВМ ЕС, ПЭВМ. Кроме того, одни из них ведут свое происхождение с перфокарт (и потому имею простую структуру), другие создавались и продолжают пополняться с помощью автоматизированных систем первичной обработки информации. В результате, при вводе исходных данных необходимо учитывать описанное выше разнообразие и при объединении данных различных архивов унифицировать структуру записи объединенного файла.

По каждой станции по фактическому наличию данных определяется фактический период наблюдений. Кроме того, реализована возможность формирования по каждому метеорологическому элементу более подробных сведений о полноте информации.

Контроль введенных данных осуществляется в два этапа:

1. Контроль на предельные значения каждого элемента с формированием файлов с сомнительными значениями.

2. Контроль на согласование значений метеорологических элементов с формированием файлов с забракованными значениями:

- средняя скорость ветра не должна превышать максимальную скорость ветра;
- атмосферное давление на уровне станции не должно превышать значение атмосферного давления на уровне моря (если станция не ниже уровня моря);

- средняя температура воздуха (средняя температура поверхности почвы) не должна превышать максимальную и не должна быть меньше минимальной температуры воздуха (поверхности почвы).

После анализа файла с забракованными величинами, проводится процедура корректировки данных. Существует несколько возможностей корректировки данных:

- конкретные исправления вводятся прямо с клавиатуры в соответствующие файлы;
- ошибочные данные в исходном файле программным способом заменяются на новые значения путем слияния исходного файла с предварительно сформированным файлом верных значений;
- конкретные исправления вносятся в файл для конкретной станции, года месяца и дня, задав эти координаты и сами значения как параметры процедуры.

Подсистема расчета статистических характеристик организована в виде библиотеки процедур, что, во-первых, позволяет последовательно и непрерывно расширять состав программного обеспечения по мере необходимости включения новых характеристик в справочное пособие. Во-вторых, вновь создаваемые процедуры без труда можно подключать к уже задействованным. В-третьих, процедуры не зависят от конкретного содержания исходных файлов, а настраиваются на него по параметрам, задаваемым на входе процедур. Имена исходных и результирующих файлов, имена выбираемых переменных, признак выборки периода лет для обработки (весь имеющийся период наблюдений или начальный и конечный год выборки лет), признак вида исходных данных (сроки или сутки) также задаются в виде входных параметров процедур. Это позволяет осуществлять расчеты для разных элементов, за разные периоды лет наблюдений, для разных типов исходных данных.

Результаты расчетов выводятся в текстовые файлы и представляются в табличном виде как записи с фиксированной шириной полей.

Просмотр и получение данных справочника

Существуют две версии программы для просмотра и получения данных справочника:

- классическая (настольная) версия, используемая в ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» и управлениях Росгидромета. Использование данной версии подробно описано в работе [1];
- web-версия (рис. 3), размещенная в открытом доступе на сайте ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», включающая информацию по 239 станциям, равномерно расположенным по территории России [3].

Обе версии принадлежат семейству информационных технологий Аисори [5].

Помимо регулярной актуализации информационной базы Научно-прикладного электронного справочника «Климат России», перечень таблиц справочника постоянно расширяется, что позволяет удовлетворить требования

различных отраслей экономики и интересы широкого круга пользователей. В 2019 г. в него были добавлены следующие таблицы:

- максимальное среднее месячное и годовое атмосферное давление (мб) на уровне станции;
- минимальное среднее месячное и годовое атмосферное давление (мб) на уровне станции;
- число дней с относительной влажностью не более 30 %;
- число дней с относительной влажностью не менее 80 %.

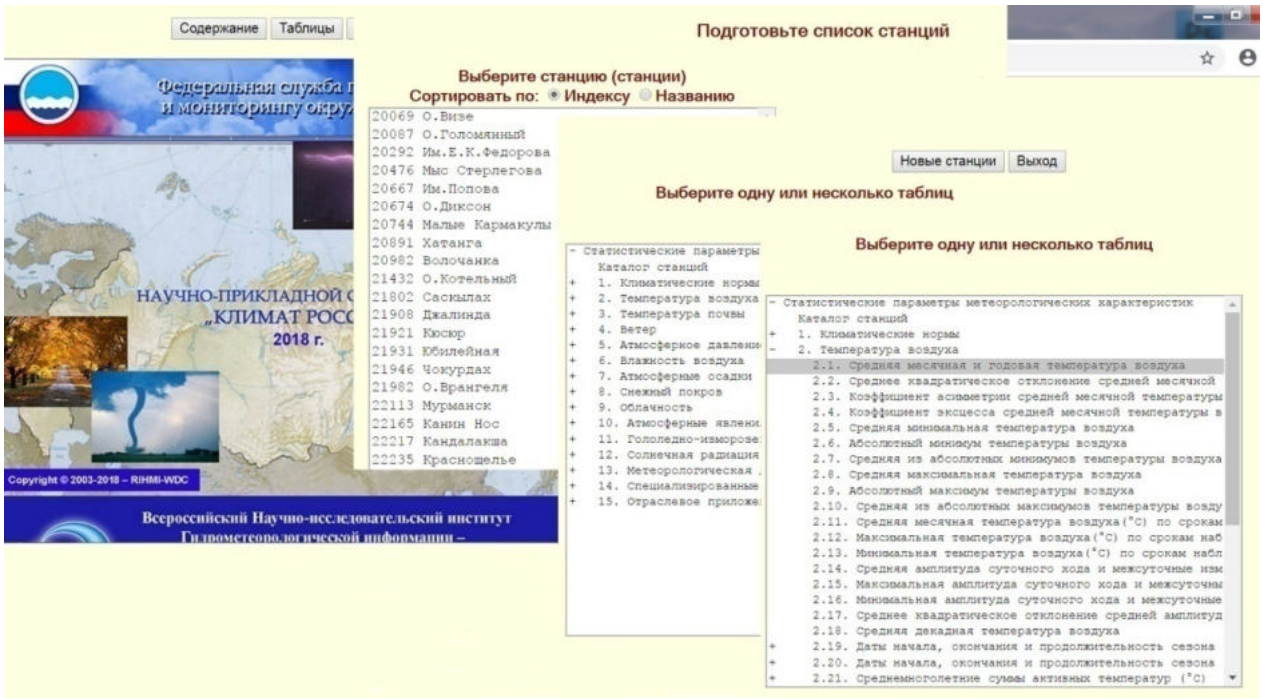


Рис. 3. Web-версия справочника

Заключение

Разрабатываемые климатические информационно-справочные продукты, в частности электронный научно-прикладной справочник «Климат России», должны обеспечить:

- адресное обслуживание климатической информацией различных отраслей экономики в условиях меняющегося климата с целью минимизации ущерба от неблагоприятных погодных и климатических условий, выработки эффективных методов адаптации к изменениям климата;
- свободный доступ к актуальной климатической информации.

Электронный научно-прикладной справочник «Климат России» позволяет многократно упростить процесс обслуживания потребителей климатической информацией. В настоящее время информационная база НПС «Климат России» состоит из набора 210 таблиц для 1832 станций. Версии справочника по зоне ответственности УГМС широко используются в практической деятельности. В 2019 г. к Web-версии справочника было выполнено около 9000 обращений.

Список литературы

1. Научно-прикладной электронный справочник «Климат России» / О. Н. Булыгина, В. М. Веселов, Н. Н. Коршунова, В. Н. Разуваев. М., 2012. 372 с. (Тр. ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» ; вып. 176).

2. Единый государственный фонд данных. URL: http://meteo.ru/egfd/142-about-egfd (дата обращения: 10.03.2020).

3. Научно-прикладной справочник «Климат России». URL: http://aisori.meteo.ru/ClspR (дата обращения: 10.03.2020).

4. Научно-прикладной справочник по климату СССР (1990). Сер. 3. Ч. 1–7. Вып. 1–34. Л. : Гидрометеоиздат.

5. Технологии Аисори. URL: http://meteo.ru/it/178-aisori (дата обращения: 10.03.2020).

УДК 004.65

Организация хранения и обработки пространственных гидрометеорологических данных на основе веб-геоинформационных платформ

И. В. Никулина (IrinkaEremenko@yandex.ru)[1], Е. В. Никонова (rta_nikonova@bk.ru)[2], В. А. Романюк (varomanyuk2020@gmail.com)[3], Д. В. Дорофеева (x-397-y@mail.ru) [1]

[1]Научно-исследовательская лаборатория дистанционного зондирования Земли Сахалинского государственного университета и Российской академии наук, г. Южно-Сахалинск
[2]ООО «Экологическая компания Сахалина», г. Южно-Сахалинск
[3]ООО «РН-СахалинНИПИморнефть», г. Южно-Сахалинск

Аннотация. Предложена структурная схема организации тематической базы гидрометеорологических данных на основе веб-геоинформационной платформы Scanex Web-GIS GeoMixer, ориентированная для исследования ледового режима дальневосточных морей. Рассмотрены примеры разработки программного обеспечения, организации хранения и визуализации отдельных видов данных для комплексного анализа имеющейся информации.

Ключевые слова: архив данных, База данных, веб-геоинформационная платформа, геопортал, гидрометеорологические данные, GeoMixer, программное обеспечение.

Введение

Значительная часть исследовательских работ, проводимых в Научно-исследовательской лаборатории дистанционного зондирования Земли Сахалинского государственного университета (СахГУ) и Российской академии наук (НИЛ ДЗЗ), представляет собой исследования и разработки в области изучения ледовых процессов в Охотском и Японском морях [1; 2; 3].

В НИЛ ДЗЗ накоплен большой объем пространственных данных, которые ежедневно пополняются космическими снимками, принимаемыми с помощью аппаратно-антенного комплекса Orbital Systems и гидрометеорологической информацией, получаемой из открытого доступа в сети интернет [6]. Ежедневно увеличивающийся объем архива НИЛ ДЗЗ затрудняет поиск, выборку необходимых данных и проведение их комплексного анализа. Внедрение геоинформационных технологий (ГИС) во внутренние системы гидрометеорологической базы данных (БД) позволяет управлять данными, их систематизировать, визуализировать отдельные цифровые слои.

Существует большое количество различных ГИС-приложений на основе которых возможно формирование системы управления базы данных (СУБД): Global Mapper, QGIS (открытое пользование), ArcGIS, MapInfo, ENVI и другое программное обеспечение (ПО), позволяющие работать с пространственными данными (векторными, растровыми, веб-данными, в том числе табличными и текстовыми). Эти программы имеют большой спектр возможностей, но все они разбиты по многочисленным ПО, что затрудняет комплексную работу с цифровыми и картографическими материалами.

Для решения проблемы хранения и пользования данными НИЛ ДЗЗ был создан тематический геопортал на основе веб-геоинформационной платформы Scanex Web-GIS GeoMixer, которая отвечает всем запрашиваемым требованиям пользователей: удобная форма хранения больших наборов растров и метаданных (каталог растров); обеспечение доступа к системе сбора, хранения и обработки пространственных данных, в том числе с учетом удаленного пользования; визуализация данных; обеспечение поиска по наборам данных; подключение внешних, в том числе открытых, источников данных; систематизация данных по разделам и тематике; возможность загрузки оперативных данных и выполнение их комплексного анализ.

Архив НИЛ ДЗЗ

Для удобства использования гидрометеорологической информации, накопленной в НИЛ ДЗЗ, был создан архив данных, систематизированный по отдельным разделам и тематикам и представленный в различных форматах: табличном, текстовом, растровом, векторном.

Раздел «Метеорологические данные» включает себя: данные о среднесуточной температуре воздуха, скорости и направлении ветра, количестве выпавших осадков (за период с 1881 г. по настоящее время); синоптические карты-схемы приземного анализа Japan Meteorological Agency (с 2001 по 2020 г).

Раздел космических снимков ежедневно пополняется оперативными данными со спутников Terra, Aqua, Suomi NPP, Fengyun 3B, NOAA 18/19, MetOp-A/B (в форматах GeoTIF, TIF и JPG) и архивными космическими снимками Terra, Aqua, Landsat 7/8, Sentinel-1/2 находящимися в открытом доступе в сети интернет.

В разделе «Ледовые карты» представлены:

– архивные (с 1971 по 2019 гг.) и оперативные (с 2007 по 2020 гг.) цветокодированные карты-схемы ледяного покрова Охотского и Японского морей, с периодичностью съемки один раз в пентаду, выполненные в микроволновом спектральном диапазоне. Размещаются в свободном доступе на сайте Японского метеорологического агентства (http://www.data.jma.go.jp.);

–черно-белые и цветные карты ледяного покрова в проливе Лаперуза (включая залив Анива), Охотском, Японском морях в целом (с 2004 по 2019 г.), отражающие сплоченность морского льда, получаемые с помощью микроволнового сканирующего радиометра AMSR2 (https://sharaku.eorc.jaxa.jp);

– карты-схемы сплоченности льда в южной части Охотского моря за период наблюдений с 1988 по 2019 г.

– ежедневные данные о состоянии ледяного покрова дальневосточных морей по данным мультиспектральной системы картирования (MASIE), полученные на основе совместного использования пассивного микроволнового и видимого диапазонов (https://nsidc.org/data/masie).

Раздел «Научная и техническая литература» включает в себя труды сотрудников лаборатории и других исследователей по тематикам: исследования морского льда; циркуляция атмосферы; гидрофизические, гидрохимические и гидробиологические особенности дальневосточных и арктических морей; прогнозирование гидрометеорологических параметров, анализ и обработка гидрометеорологических данных.

В Разделе «Программное обеспечение» размещено лицензированное ПО, инструкции по его установке и использованию, которое представлено следующими программами: ScanEx Image Processor; Scanex Task Flow; ScanMagic; ArcGIS Desktop 10. 2; Corel Draw 16. Кроме того, в данном разделе хранится ПО и наборы программных алгоритмов действий, разработанные на базе СахГУ:

1. Программный комплекс «ЛЕД», предназначенный для изучения ледового режима Охотского и Японского морей по данным ДЗЗ и расчета характеристик ледяного покрова [4; 7].

2. Макросы, позволяющие в автоматическом режиме обрабатывать получаемые данные: метеорологические (расчет суммы градусодней мороза и тепла, аномалий температуры, определение даты перехода температуры воздуха через 0 °С); ледовые (определение типов зим, суммарной площади льда).

3. Скрипты для автоматической загрузки карт и схем с интернет-ресурсов и размещения их в архиве лаборатории.

Гидрометеорологическая информация, поступающая из доступных интернет-источников, а также спутниковые снимки, обрабатываются сервером DBPS с помощью скриптов загрузки и ПО в автоматическом режиме. Вся информация размещается на сервере хранения данных НИЛ ДЗЗ (RAID-массив, объемом 42 ТБ) и внешних жестких дисках с возможностью организации доступа через облачные хранилища (MyCloud). Право на внесение изменений в архив есть только у администратора (модератора).

Организация данных в Scanex Web-GIS GeoMixer

Формирование БД геопортала НИЛ ДЗЗ осуществляется на основе веб-картографической интеграционной платформы Scanex Web-GIS GeoMixer и программных продуктах, находящихся в свободном доступе в сети интернет. Подобные продукты, как и их коммерческие аналоги, поддерживают все необходимые стандарты и протоколы, применяемые в работе с пространственными данными.

Для организации БД геопортала используется СУБД Postgre SQL 9.6.11, совместимая с GeoMixer. PostgreSQL – свободная объектно-реляционная система управления базами данных, базирующаяся на языке SQL и поддерживающая многие возможности стандарта SQL [9].

GeoMixer и PostgreSQL установлены на отдельную рабочую ЭВМ НИЛ ДЗЗ, подходящую по характеристикам под системные требования данного ПО. GeoMixer представляет собой web-интерфейс в виде сайта, доступного в пределах локальной сети лаборатории и глобальной сети интернет, что дает возможность одновременной работы с информацией из БД не зависимо от места нахождения пользователя.

Обслуживание GeoMixer осуществляется благодаря приложению – IIS (Internet Information Service), через которое присваивается IP-адрес сайту, где развернута тематическая карта ледовой обстановки, при этом формируя индивидуальное имя локальной и глобальной сети.

Самый трудоемкий этап создания тематической платформы в GeoMixer – систематизация исходных данных, подготовка к загрузке (преобразование в не-

обходимый формат, присвоение html кода и пр.), обновление информации. Для обработки и экспорта данных в GeoMixer используются вспомогательные ПО, например, GeoMixer File Browser (позволяет загружать файлы в директорию пользователя); GUI Image tiling – служит для преобразования растровых данных в формат *tiles [8].

При наполнении или обновлении GeoMixer происходит прямое обращение к серверу (API), на котором формируется программная библиотека для интеграции геоданных из GeoMixer в клиентскую карту.

Сервер GeoMixer дает возможность управлять отображением объектов на карте, загрузкой отдельных слоев и целых проектов из базы данных. Для каждого слоя создается географическая привязка к территории, что позволяет визуализировать данные независимо от формата и отображать их на карте. Поиск объектов по их пространственным и атрибутивным запросам позволяет связывать различную информацию, создавать иерархию слоев, что удобно при проведении анализа (рис. 1).

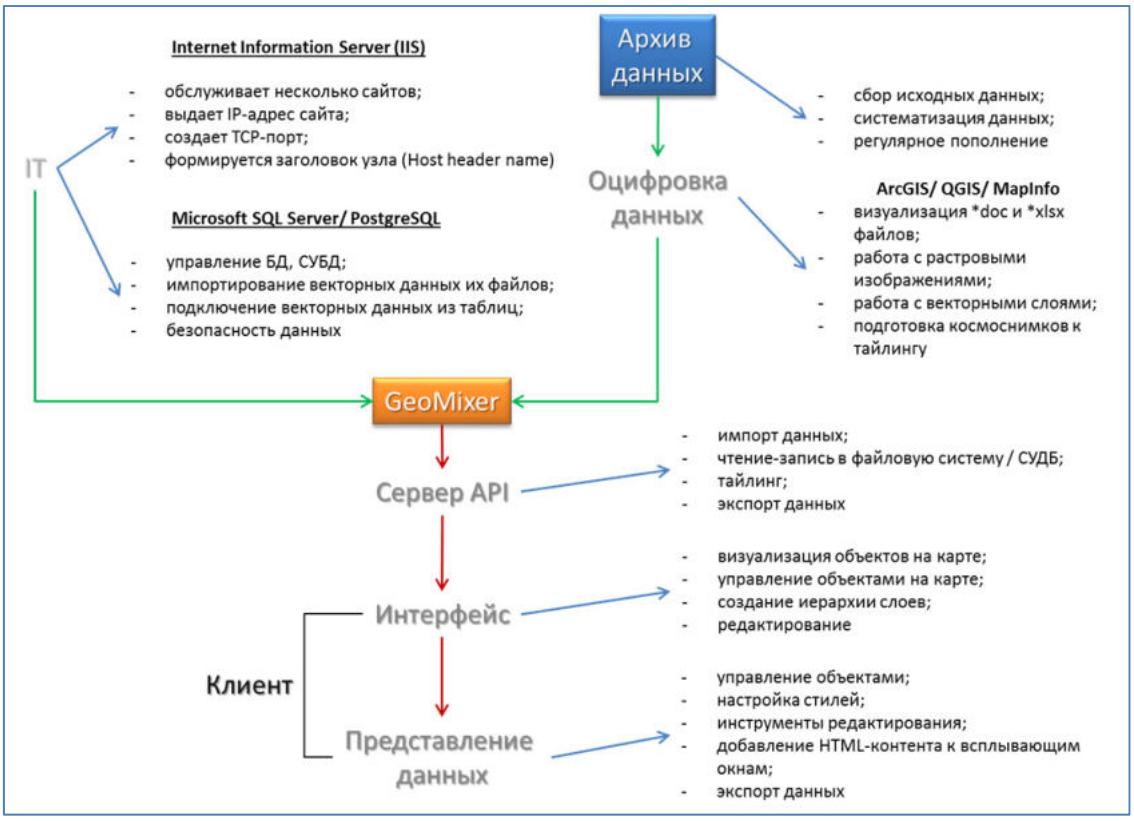


Рис. 1. Структура системы БД и интеграция данных в GeoMixer

Пример визуализации данных о местоположении кромки льда в Охотском море представлен на рис. 2. Дерево слоев позволяет управлять элементами на карте и создавать сложную иерархическую структуру, которая отличается: по стилю, порядку отображения, типу данных. Кромки льда разделяются по годам, месяцам, дням наблюдений (рис. 3). Каждая дата имеет свой стиль и настройки отображения, ссылки на исходные документы. Функция интегрирования (объединения), позволяет проводить анализ изменения кромки льда, динамики ледовитости исследуемых морей.

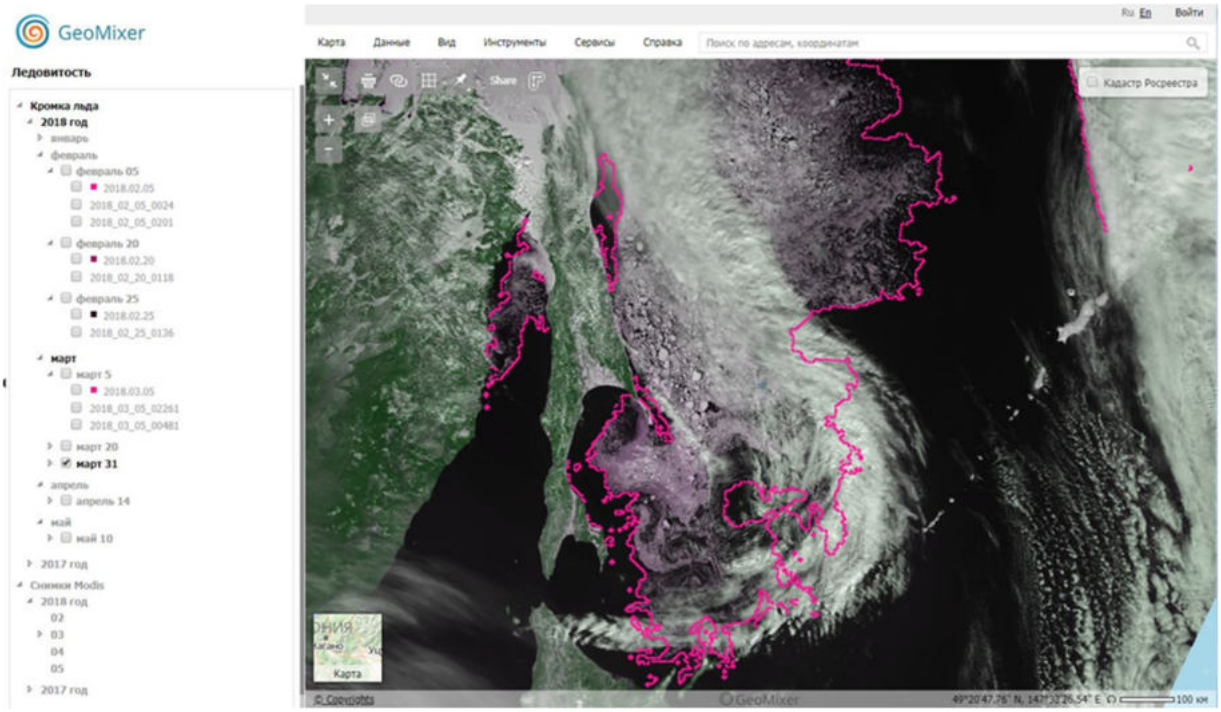


Рис. 2. Пример визуализации спутникового снимка Terra-MODIS с определенным местоположением ледовых кромок в среде Scanex Web-GIS GeoMixer

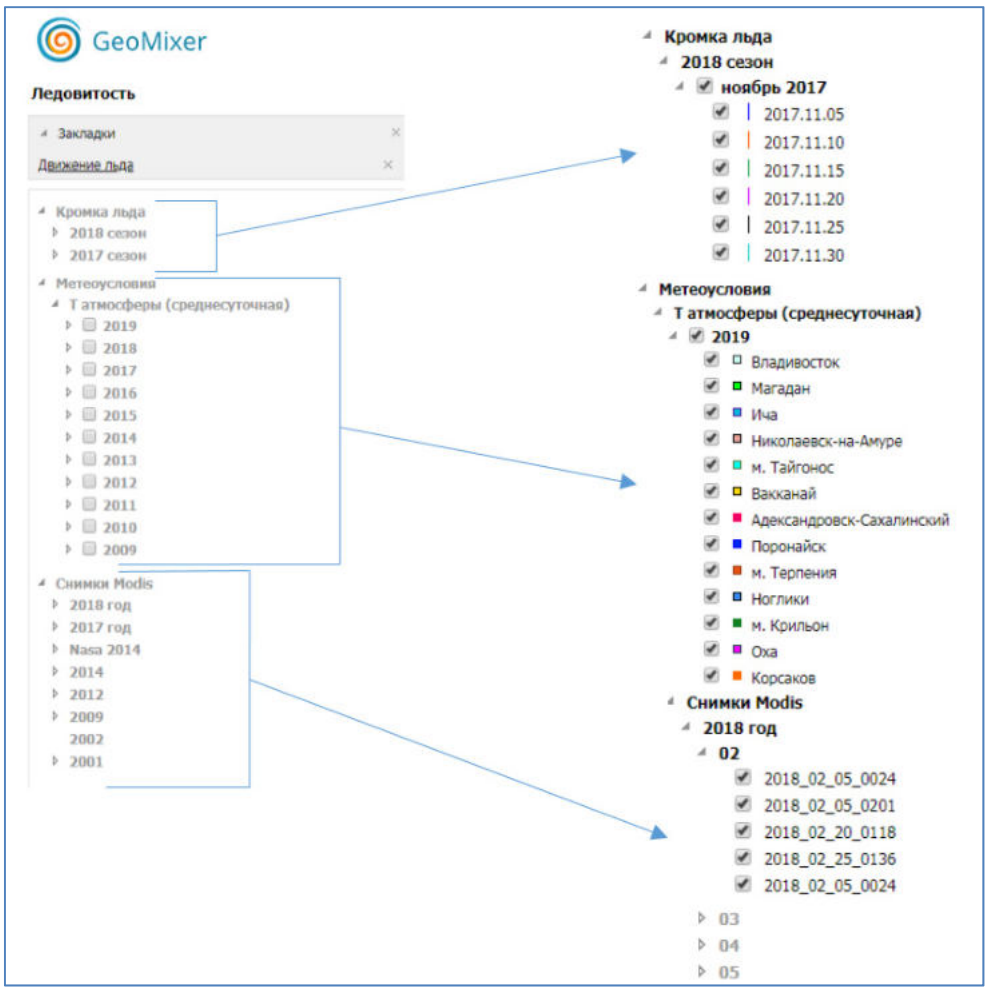
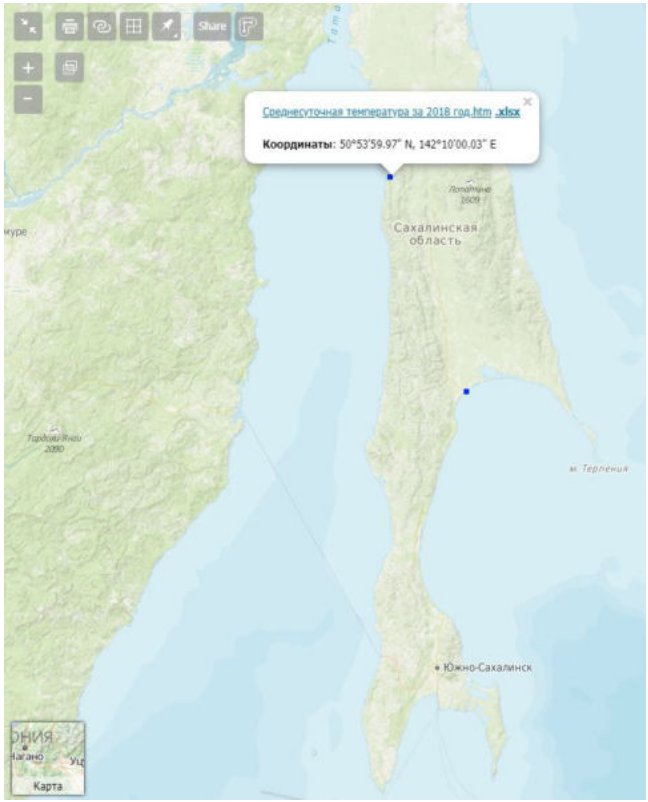


Рис. 3. Иерархическая структура отображения слоев в GeoMixer

Внедрение цифровой информационной системы позволяет разместить текстовые данные НИЛ ДЗЗ (гидрометеорологические, ледовые, астрологические и др.) в сводные таблицы единой базы данных, из которой далее возможно производить предметные выборки значений интересующих параметров. На рис. 4 представлен пример отображения данных о температуре воздуха на прибрежных гидрометеорологических станциях в среде GeoMixer.



Т сред.	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май
1	-4,9	-19,5	-9,2	-6,4	2,4
2	-5,7	-20,9	-5,7	2,5	3,0
3	-12,0	-19,7	-10,3	0,9	5,5
4	-10,9	-14,1	-10,2	-2,3	4,7
5	-14,1	-16,9	-13,5	-4,2	1,6
6	-15,0	-16,0	-14,0	-4,3	1,6
7	-16,0	-14,8	-13,5	-3,9	2,6
8	-16,9	-17,8	-10,6	-2,1	2,9
9	-15,9	-17,2	-8,9	-2,3	6,6
10	-13,8	-10,8	-12,1	-0,5	4,6
11	-20,4	-13,5	-12,2	0,6	2,4
12	-20,4	-17,6	-9,5	-2,5	2,0
13	-20,5	-17,4	-5,5	-4,2	7,3
14	-15,8	-19,7	-10,5	-0,9	8,3
15	-15,8	-18,5	-9,5	-2,1	7,5
16	-19,4	-17,0	-12,7	0,0	7,1
17	-18,0	-15,4	-11,2	8,2	4,4
18	-12,5	-14,7	-5,4	5,2	8,0
19	-20,1	-16,4	-8,0	1,2	7,6
20	-23,0	-17,0	-12,7	3,2	7,0
21	-21,5	-17,7	-7,1	1,2	7,4
22	-21,5	-17,8	-9,6	-0,6	10,3
23	-24,0	-17,9	-8,5	3,2	9,4
24	-17,5	-17,0	-0,3	2,4	9,0
25	-17,4	-9,5	-1,9	9,1	5,4
26	-13,3	-9,9	-1,6	9,9	4,8
27	-14,6	-13,0	4,3	-1,2	9,7
28	-17,2	-13,5	0,7	1,4	12,9
29	-19,7		-2,7	6,1	15,2
30	-16,5		-1,0	4,1	12,4
31	-15,5		-4,9		9,7
Ср_мес	*-16,4*	*-16,1*	*-7,7*	*0,7*	*6,5*
-563	*-509,7*	*-451,4*	*-237,8*	*-31,7*	
за 2017				*53,3*	*202,9*

Рис. 4. Представление данных о температуре воздуха на прибрежных гидрометеорологических станциях в Scanex Web-GIS GeoMixer

Важным преимуществом работы с геопорталом является возможность разделения доступа к данным различным пользователям в зависимости от выполняемых ими задач:

1. Администраторы и модераторы, отвечающие за пополнение базы данных и имеющие доступ ко всем возможностям геопортала (производят контроль поступающих данных и принимают решение о допуске их размещения);

2. Пользователи. Доступ разграничен в зависимости от выполняемых задач: гостевая группа имеет право только на поиск и просмотр данных; зарегистрированные пользователи – без специальных прав доступны функции загрузки/скачивания наборов данных; пользователи с расширенными возможностями имеют право на изменение хранимой на серверах геопортала пространственной информации [5].

Выводы

Создание геопортала решает проблему хранения больших массивов пространственных данных и одновременной работы с ними (не зависимо от их формата) и может успешно применяться при решении научно-исследовательских и практических задач. Важным преимуществом является также возможность расширенного доступа пользователей не зависимо от места их нахождения.

Представленная информационная система позволяет расширить доступ к результатам исследовательской деятельности НИЛ ДЗЗ, может быть использована как сотрудниками университета (научными сотрудниками, преподавателями), так и студентами различных направлений подготовки, обеспечивая внедрение технологий использования цифровой среды обучения.

Результаты настоящего исследования были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России (номер для публикаций: 5.9510.2017/8.9).

Список литературы

1. Районирование ледяного покрова Охотского и Японского морей / И. Г. Минервин [и др.] // Вестник РАН. 2015. Т. 85, № 1. С. 24–32.

2. Межгодовая динамика аномалий ледовитости Татарского пролива с 1882 по 2018 г. / В. М. Пищальник, Д. В. Дорофеева, И. Г. Минервин, И. В. Шумилов, И. В. Никулина // Известия ТИНРО. 2019. Т. 196. С. 114–122.

3. Анализ динамики аномалий ледовитости Охотского моря в период с 1882 по 2015 г. / В. М. Пищальник [и др.] // Известия ТИНРО. 2016. Т. 185. С. 228–239.

4. Основные принципы работы программного комплекса «ЛЕД» / В. А. Романюк, В. М. Пищальник, А. О. Бобков, И. Г. Минервин // Физика геосфер : Девятый Всероссийский симпозиум, 31 августа – 4 сентября 2015 г., Владивосток, Россия : материалы докл. Владивосток : Дальнаука, 2015. С. 556–561.

5. *Шевин А. В.* Проект типовой методики создания регионального геопортала // Вестник СГУГиТ. 2019. Т. 24, № 4. С. 176–187.

6. Отчет о НИР. Исследование особенностей ледового режима Охотского и Японского морей с применением ГИС-технологий (заключительный, 2019 г.) / рук. В. М. Пищальник. Рег. № НИОКТР АААА-Б17-117042810046-6. 28.04.2017. № гос. учета отчета: АААА-Б19-219013190008-4, 31.01.2019.

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015660472. Программный комплекс для расчета площади ледяного покрова в Охотском и Японском морях по данным ДЗЗ (ПК «ЛЕД»). Авт. В. М. Пищальник, А. О. Бобков, В. А. Романюк. Дата гос. рег. в Росреестре программ для ЭВМ: 01.10.2015.

8. Официальный сайт GeoMixer. Руководство пользователя. URL: http://geomixer.ru/ docs/ manual/tilingtools/ (дата обращения: 11.04.2020)

9. Официальный сайт PostgreSQL. URL: www.postgresql.org (11.04.2020)

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ АТМОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ

УДК 551.501.83

Региональные особенности изменения индекса рефракции в Бурятии, Якутии и Монголии за последние 45–60 лет

А. С. Базарова (arunabas@mail.ru), А. В. Базаров (alebazaro@gmail.com),
Е. Б. Атутов (evgeniy_atutov@mail.ru), Ю. Б. Башкуев (buddich@mail.ru)

Институт физического материаловедения СО РАН, г. Улан-Удэ

Аннотация. Метеорологическая обстановка, зависящая от климатических особенностей географического региона, оказывает существенное влияние на распространение ультракоротких радиоволн. Основной радиометеорологической характеристикой УКВ является индекс рефракции атмосферы. В работе рассмотрены региональные особенности поведения индекса рефракции в Бурятии, Якутии и Монголии. Проведено сравнение с исследованиями бурятских радиофизиков, проведенными по метеорологическим данным 1958–1977 гг. Выявлено, что глобальные изменения климата не оказали существенного влияния на радиометеорологическую обстановку в регионе.

Ключевые слова: радиометеорология, индекс рефракции, глобальное потепление.

В течение последних десятилетий глобальные температуры росли со скоростью ~ 0,2 °С за десятилетие [2]. Потепление неоднородно во времени, имели место и перерывы в росте температуры воздуха. Выделяются три интервала: потепление 1910–1945 гг., слабое похолодание 1946–1975 гг. и наиболее интенсивное потепление после 1970-х гг. [4]. В России изменения в сторону повышения температуры воздуха выражены сильнее, чем на планете в целом, а на территории Бурятии – и того более [9]. Так, с 1885 по 2012 г. среднегодовая температура воздуха в Забайкалье повысилась на 2,0 °С [8] (отметим, что за этот период среднегодовая температура на всем Земном шаре увеличилась на 0,85 °С [7]). Форсированное потепление в Забайкалье подчеркивается и другими исследователями [6; 11; 12]. Примечательно, что в последнее десятилетие среднегодовая температура в Забайкалье пересекает нулевой рубеж, становясь положительной, что ранее отмечалось эпизодически [1].

Глобальное потепление подтверждается многолетними данными станций сети Всемирной метеорологической организации и национальных сетей. Согласно данных наземных метеорологических станций [14] среднегодовая температура за последние пять лет по сравнению с периодом 1958–1962 гг. увеличилась в Улан-Удэ на 2,12 °С, в Баргузине – на 1,62 °С, в Усть-Баргузине – на

1,66 °С. На рис. 1 показан годовой ход среднемесячной температуры по этим станциям.

Известно, что на режим изменений индекса рефракции атмосферы в УКВ-диапазоне существенно влияют местная климатическая обстановка [3; 5; 10]. В связи с этим, интересно исследовать влияние глобального потепления на региональные радиометеорологические условия. Индекс рефракции рассчитывается по формуле согласно [13]:

$$N = (n-1) \times 10^6 = \frac{77{,}6}{T} \times \left(P + \frac{4810e}{T}\right)$$

где P – атмосферное давление, мбар; e – упругость водяного пара, мбар; T – абсолютная температура воздуха, К. Необходимая для расчета метеорологическая информация с наземных станций доступна на ресурсе «Погода и климат». На данный момент на сайте представлены исторические сведения о погоде по 31 788 метеостанциям России, стран СНГ, США и мира, начиная с января 1701 г. и заканчивая текущей датой [14]. Данные представляют собой результаты измерений в 00:00, 03:00, 06:00, 09:00, 12:00, 15:00, 18:00, 21:00 часов (UTC), за каждую дату. Для использования этих данных необходимо перевести миллиметры ртутного столба в миллибары, градусы Цельсия в Кельвины, проценты влажности воздуха в миллибары упругости водяного пара.

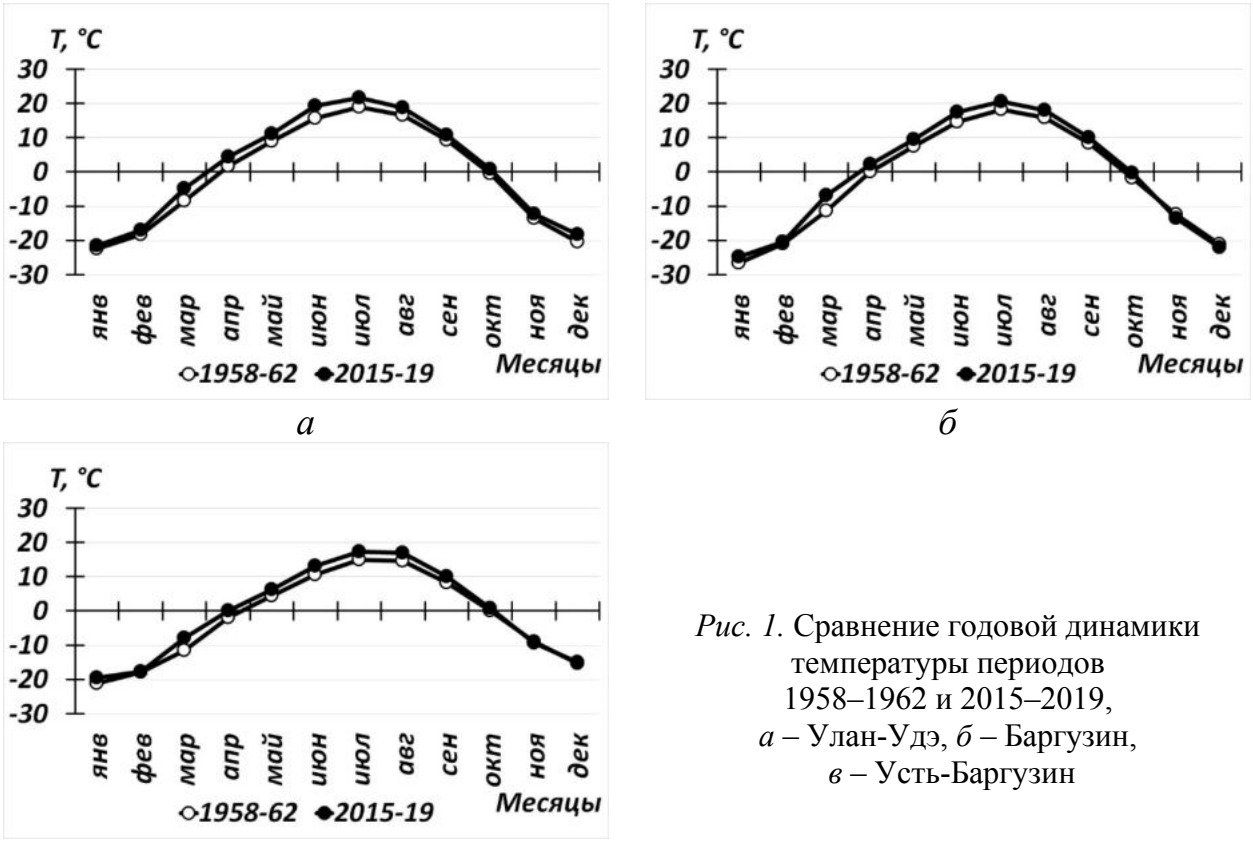


Рис. 1. Сравнение годовой динамики температуры периодов 1958–1962 и 2015–2019, *а* – Улан-Удэ, *б* – Баргузин, *в* – Усть-Баргузин

Детальные исследования N в регионе в свое время провели Н. Ц. Гомбоев и Ч. Ц. Цыдыпов. В монографии [5] для расчета приземных значений N по Бурятии использован материал трех наземных станций за 5 лет (1958–1962). Метеоизмерения на станциях проводились 4 раза в сутки (1, 7, 13, 19 ч). Станции выбирались по возможности, расположенные в разных физико-географических условиях. Станции Улан-Удэ и Баргузин находятся вдали от больших водоемов, причем Баргузин расположен в широкой межгорной долине у подножия горного хребта, а Усть-Баргузин – на берегу оз. Байкал. По Якутии использованы данные четырех станций за 5 лет (1969–1973) по 8 срокам местного времени (3, 6, 9, 12, 15, 18, 21 и 24 ч). Станция Якутск находится в центральной части, Вилюйск – на западе, Алдан – на юге, а станция Оймякон – на северо-востоке Центральной Якутии. Следует отметить, что станция Якутск расположена на берегу широкой Лены, а Оймякон – в плохо вентилируемом понижении рельефа в области «полюса холода». В Монголии выбраны станции, расположенные в степных и полупустынных районах юго-востока страны: станция Даланзадгад – в юго-западной части исследуемого района равнинной местности, Мандалгоби – севернее, Сайншанд – в небольшой котловине примерно в середине исследуемого района, Эрдэнэцаган и Чойбалсан – в равнине Восточной Монголии, причем Чойбалсан на берегу реки Керулен. Расстояния между близлежащими станциями в пределах 250 – 420 км. Для анализа сезонных изменений N использованы среднемесячные данные (1973–1977). Информация о месторасположении метеостанций, данные которых использованы в [5], приведены в таблице.

Таблица

Координаты и высота над уровнем моря местоположения метеостанций

Метеостанция	Широта	Долгота	В. н. у. м (м)
Бурятия			
Улан-Удэ	51°49'48"	107°36'0"	515
Баргузин	53°37'12"	109°36'0"	489
Усть-Баргузин	53°25'12"	109°0'0"	461
Якутия			
Якутск	62°0'0"	129°36'0"	101
Вилюйск	63°46'12"	121°36'0"	123
Алдан	58°36'0"	125°18'0"	679
Оймякон	63°15'0"	143°6'0"	740
Монголия			
Даланзадгад	43°34'48"	104°24'36"	1465
Мандалгоби	45°46'12"	106°16'48"	1393
Сайншанд	44°54'0"	110°6'36"	938
Эрдэнэцаган	45°54'0"	115°21'36	1076
Чойбалсан	48°4'48"	114°33'0"	747

Карта-схема региона исследований представлена на рис. 2.



Рис. 2. Регион исследований

На рис. 3, *а*, *б* представлены годовой ход N в Бурятии по среднемесячным значениям за 5 лет (1958–1962) согласно [5] и по среднемесячным значениям 2019 г. соответственно.

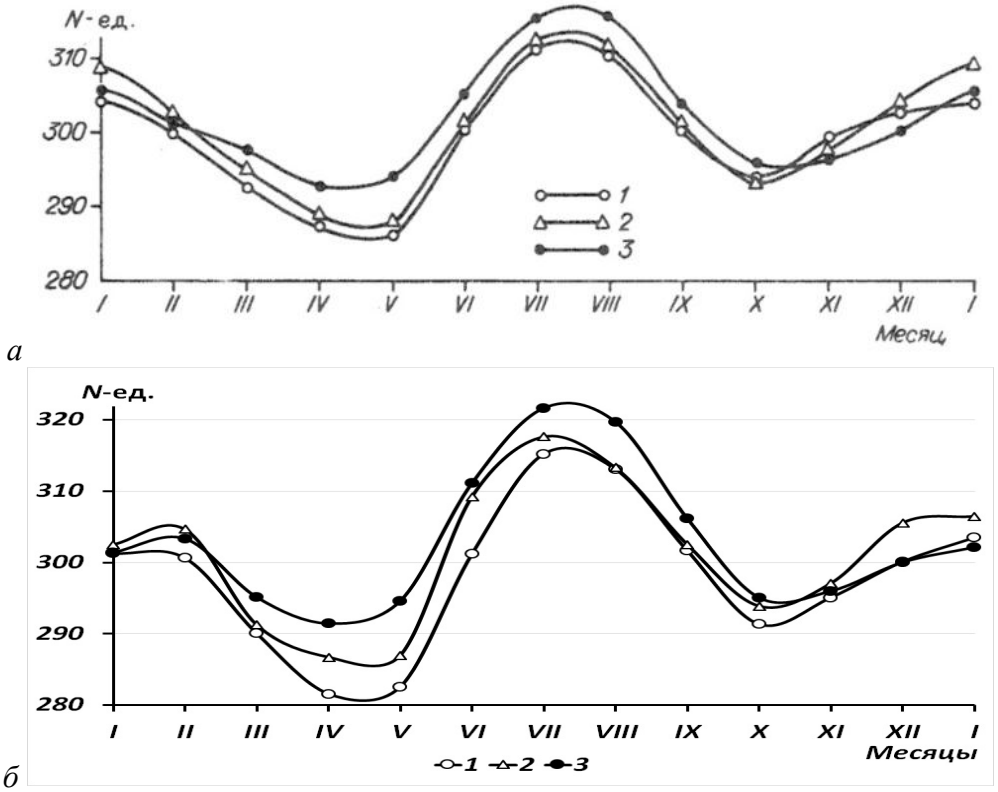
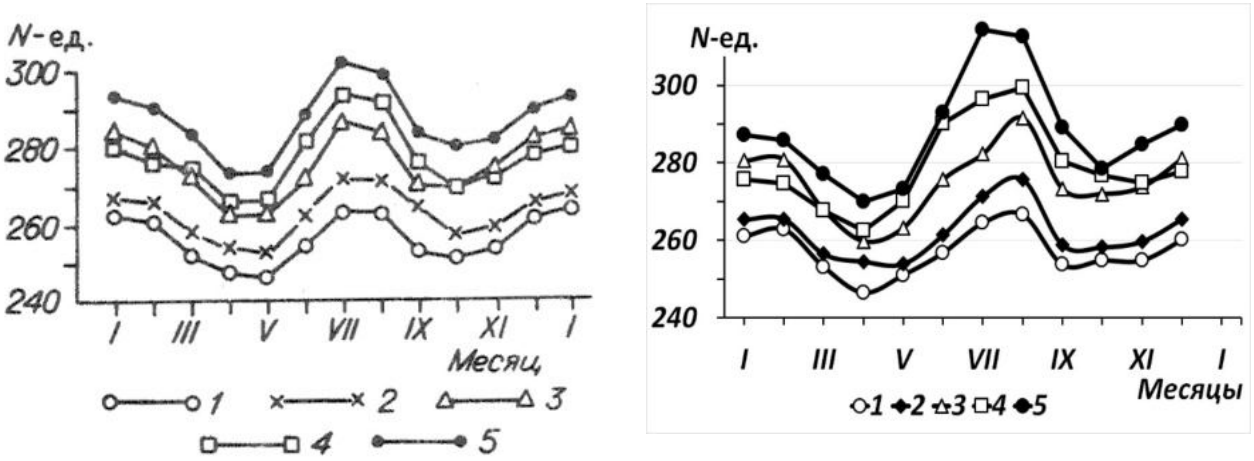


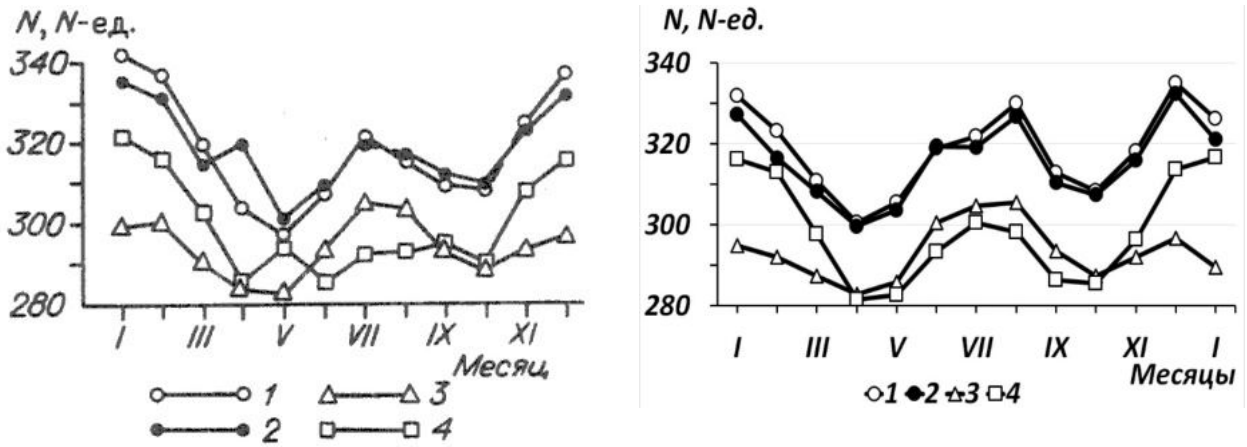
Рис. 3. Годовой ход N в Бурятии: *а* – согласно [5], *б* – в 2019 г.;
1 – Улан-Удэ, *2*– Баргузин, *3* – Усть-Баргузин

Рисунки показывают, что диапазон вариаций N за это время в Бурятии не изменился. На рис. 4 и 5 представлены подобные графики для Якутии и Монголии соответственно.



а *б*

Рис. 4. Годовой ход N в Монголии, *а* – согласно [5], *б* – в 2019 г.,
1 – Даландзадгад, *2*– Мандалгоби, *3* – Сайншанд, 4 – Эрдэнэцаган, *5* – Чойбалсан



а *б*

Рис. 5. Годовой ход N в Якутии, *а* – согласно [5], *б* – в 2019 г.,
1 – Якутск, 2– Вилюйск, 3 – Алдан, 4 – Оймякон

Установлено, что изменения климата не оказали существенного влияния на радиометеорологическую обстановку в регионе. Как видим из рис. 3–5 во всем исследуемом регионе, как и пятьдесят лет назад, сезонный ход среднемесячных значений N имеет вид двугорбой кривой с максимумами зимой и летом, минимумами весной и осенью. При этом в Бурятии и Монголии главный максимум N приходится на июль, а в Якутии – на январь. Основной минимум сезонного хода N наблюдается в апреле – мае, а другой минимум – в октябре.

Работа выполнена в рамках государственного задания № 0336-2020-0006 «Распространение радиоволн в неоднородных импедансных каналах».

Список литературы

1. *Badmaev N. B., Bazarov A. V., Sychev R. S.* Chapter 8. Forest fire danger assessment using meteorological trends: case study // Predicting, Monitoring, and Assessing Forest Fire Dangers and Risks / ed. N. V. Baranovskiy. IGI Global, 2020. P. 183–208. https://doi.org/10.4018/978-1-7998-1867-0.ch008.

2. *Hansen J., Ruedy R., Sato M., Lo K.* Global surface temperature change // Reviews of Geophysics. 2010. 48. P. 1–29. https://doi.org/10.1029/2010RG000345.

3. *Батуева Е. В., Дарижапов Д. Д.* Рефракционные свойства тропосферы дальневосточных районов России. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 1999. 142 с.

4. Уровенный режим озера Байкал: ретроспектива и современное состояние / Е. Ж. Гармаев, Б. З. Цыдыпов, Д. Б. Дабаева, С. Г. Андреев, А. А. Аюржанаев, А. И. Куликов // Водное хозяйство России. 2017. № 2. С. 4–18.

5. *Гомбоев Н. Ц., Цыдыпов Ч. Ц.* Рефракционные свойства атмосферы континентальных районов. Новосибирск : Наука, 1985. 125 с.

6. *Груза Г. В., Ранькова Э. Я.* Обнаружение изменений климата: состояние, изменчивость и экстремальность климата // Метеорология и гидрология. 2004. № 4. С. 50–66.

7. *Кокорин А. О.* Изменение климата: обзор Пятого оценочного доклада МГЭИК. М. : Всемирный фонд дикой природы (WWF), 2014. 80 с.

8. *Обязов В. А.* Тенденции многолетних изменений речного стока в Забайкалье в многоводные и маловодные периоды // Доклады РАН. 2013. Т. 450, № 6. С. 713.

9. *Смирнова И. И., Куликов А. И., Куликов М. А.* Термическое состояние деятельного слоя в криолитозоне Байкальского региона в контексте глобального потепления // Вестник ВСГУТУ. 2012. Т. 39, № 4. С. 227–233.

10. *Цыдыпов Ч. Ц.* Распространение ультракоротких радиоволн в гористой местности. Новосибирск : Наука, 1977. 205 с.

11. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Т. 1 Изменения климата. М., 2008. 228 с.

12. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Т. 2. Последствия изменений климата. М., 2008. 288 с.

13. Рекомендация МСЭ-R P.453-12. Индекс рефракции радиоволн: его формула и данные о рефракции. 2017. 23 с.

14. Погода и климат. URL: http://www.pogodaiklimat.ru/ (дата обращения: 09.09.2020).

УДК 551.506.9

Динамика метеоэлементов в полярных широтах Якутии во время крупных Форбуш-понижений галактических космических лучей

М. С. Васильев (m.s.vasiliev@ikfia. ysn.ru)[1,2], Р. Н. Бороев (boroyev@ikfia.ysn.ru)[1,2], Л. А. Пестрякова (lapest@mail.ru)[2]

[1] Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю. Г. Шафера СО РАН – обособленное подразделение ФГБУН ФИЦ «ЯНЦ СО РАН», г. Якутск
[2]Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова, г. Якутск

Аннотация. Приведены результаты анализа «отклика» метеоэлементов в полярных широтах Якутии во время крупных Форбуш-понижений (ФП) галактических космических лучей (ГКЛ) с амплитудой $A_F > 16$ % (7 событий ФП). Рассматривались данные реанализа ERA-Interim с широтно-долготным разрешением $1^o \times 1^o$ вокруг метеорологических станций: Тикси, Верхоянск, Оленек, Среднеколымск, Саскылах, Депутатский, Чокурдах, Черский. Анализировались такие метеоэлементы как: приземная температура воздуха (ПТВ, ^{o}C), общая облачность (%) и нисходящий поток солнечной радиации (Дж/м^2).

Ключевые слова: ERA-Interim, Форбуш-понижение, галактические космические лучи, облачность, температура воздуха, солнечная радиация.

Введение

ФП – это кратковременные понижения интенсивности ГКЛ, наблюдаемые во время гелиомагнитных возмущений [2; 7; 10; 11]. ФП часто сопровождаются сильными геомагнитными возмущениями [2; 9; 11]. Космические лучи галактического происхождения представляют собой потоки высокоэнергичных заряженных частиц, преимущественно протонов, с энергиями $E \sim 10^3$–10^{19} эВ [8]. Частицы высоких энергий вторгаются в нижнюю атмосферу любых широт, а низкоэнергичная компонента ($E \sim 10^5$–10^9 эВ) отклоняется магнитным полем Земли, однако возможны случаи высыпания в высокоширотных областях, где происходят потери энергии в основном на ионизацию и нагрев термосферы. Также возможны случаи проникновения частиц низких энергий в атмосферу до высоты стратосферы и верхних слоев тропосферы, которые могут оказывать влияние на динамические процессы, происходящие в нижней атмосфере [14; 15].

В работе М. И. Пудовкина было показано влияние ФП ГКЛ на изменение метеорологических величин. Анализ показал, что вторжение энергетических частиц вызывают разрушение озона O_3 и образование двуокиси азота NO_2. Следовательно, это влияет на существенные изменения радиационного баланса нижней атмосферы. Таким образом, не исключено, что сильные потоки ГКЛ могут вызвать заметное похолодание или потепление на поверхности Земли [7]. М. И. Пудовкиным было экспериментально показано, что в авроральной и субавроральной зоне северного полушария отмечается значительное увеличение прозрачности атмосферы во время ФП ГКЛ за счет существенного спада процента облачного покрова (рис. 1), что приводит к увеличению инсоляции примерно на 10–13 % [6; 12].

На рис. 1 приведены данные о вариациях облачности, осредненные по наземным актинометрическим станциям в различных широтных поясах φ ≈ 65–68°N и 60–64°N на территории России, в том числе Якутии, во временном интервале, охватывающим время развития ФП ГКЛ. Из рис. 1 видно, что на первый и второй дни после начала ФП наблюдается достаточно резкое уменьшение облачности: на 5–8 % от общей площади неба. Эффекты ФП в вариациях общего облачного покрова обнаруживались на всех исследуемых станциях. На отдельных станциях повторяемость ясных дней в ходе исследуемых событий увеличивалась примерно в 2 раза.

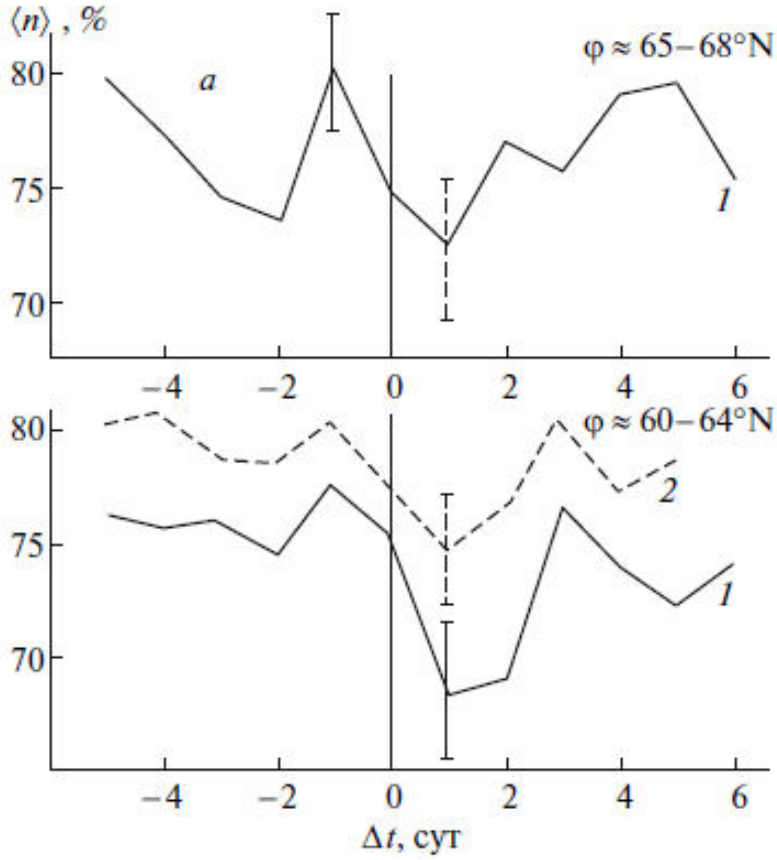


Рис. 1. Изменения общей облачности (в процентах от площади всего небесного свода), осредненные по четырем станциям авроральной зоны (φ ≈ 65–68°N) и шести станциям субавроральной зоны (φ ≈ 60–64°N), во время ФП ГКЛ. Момент Δt = 0 соответствует дню начала ФП. 1 – данные за зимние месяцы (число событий N = 2), 2 – данные за летние месяцы (N = 21). Источник [4]

На рис. 2 показано, что изменения прихода солнечной радиации, обусловленные уменьшением облачности, могут достигать 2 × 105 – 5× 105 Дж/м^2 сут.

Таким образом, эффекты ГКЛ в динамике пространственно-временного изменения облачного покрова были подтверждены на экспериментальном материале, а также были получены и количественные оценки соответствующих изменений поступления солнечной энергии в нижнюю атмосферу [4]. В работе [10] показано, что над территорией Европы после ФП ГКЛ (свыше пороговых

значений амплитуд $A_F > 7$ %) вследствие уменьшения облачного покрова и большего поступления солнечной радиации, наблюдается увеличение среднесуточных значений ПТВ. Авторы [10] предполагают, что данный эффект увеличения ПТВ после ФП ГКЛ может в разной степени иметь зависимость от географической широты.

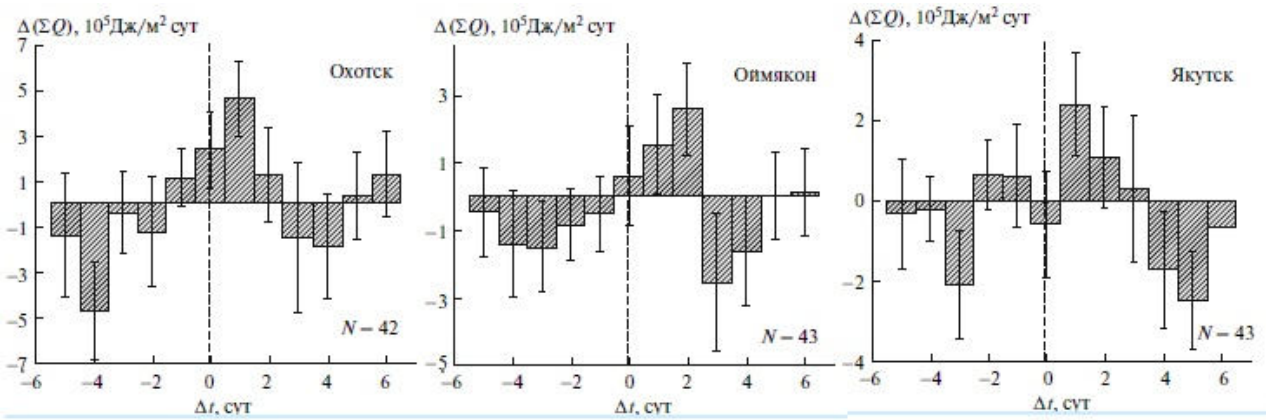


Рис. 2. Вариации суточных сумм суммарной радиации Δ(ΣQ) в ходе Форбуш-понижений ГКЛ на станциях в широтном поясе φ = 60–64°N. Момент Δt = 0 соответствует дню начала ФП ГКЛ. Источник [4].

Цель данной работы – выявить «отклик» метеоэлементов в полярных широтах Якутии во время крупных ФП ГКЛ с амплитудой $A_F > 16$ %.

Исходные данные

Данные наблюдений (метеорологических станций) являются достоверным инструментом для различных исследований. Однако на практике часто приходится сталкиваться с отсутствием или малым количеством экспериментальных данных. В настоящее время широкую известность получили реанализы. Реанализы – это динамически разглаженные и согласованные данные определенного набора архивных наблюдений, при помощи гидродинамической модели с фиксированной конфигурацией. Иными словами, данные реанализа получены с помощью наземной, спутниковой и аэрологической информации. В реанализах применяются следующие методы: метод интерполяции и ассимиляции, примитивные уравнения.

Ввиду отсутствия данных метеорологических станций за интересующий интервал времени во время крупных ФП ГКЛ (табл. 1) для исследования динамики метеоэлементов в полярных широтах Якутии были использованы данные реанализа ERA-interim (табл. 2).

Рассматривались данные реанализа ERA-Interim с широтно-долготным разрешением $1^o \times 1^o$ вокруг метеорологических станций (рис. 3): Тикси, Верхоянск, Оленек, Среднеколымск, Саскылах, Депутатский, Чокурдах, Черский. Анализировались такие метеоэлементы, как ПТВ (^{o}C), общая облачность (%) и нисходящий поток солнечной радиации (Дж/м^2). Для удобства представления анализируемого материала ряд метеоэлементов представлен в виде нормированных значений.

Таблица 1

Даты событий крупных ФП ГКЛ (данные Центра прогнозов космической погоды ИЗМИРАН, http://spaceweather. izmiran.ru/rus/dbs. html), где A_F – амплитуда (максимальное понижение плотности космических лучей в событии ФП)

Дата событий ФП ГКЛ	13.03.1989	28.10.1991	13.07.1982	20.10.1989	12.06.1991	24.03.1991	29.10.2003
Условный период года	Весна	Осень	Лето	Осень	Лето	Весна	Осень
A_F (%)	20,4	17,8	22,8	23,4	20,4	22,3	27,0

Таблица 2

Характеристики реанализа ERA-Interim [13]

Реанализ	Пространственное разрешение	Временной охват и шаг	Схема усвоения данных
ERA-interim – Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды	0,125×0,125°	1979 г. н. в., каждые 3 ч.	4D VAR



Рис. 3. Карта расположения метеорологических станций, вокруг которых рассматривались данные реанализа ERA-Interim с широтно-долготным разрешением 1°×1°

Результаты и обсуждение

Анализ вида «отклика» метеоэлементов во время крупных ФП ГКЛ (±10 дней) показал, что по данным реанализа ERA-Interim с широтно-долготным разрешением $1^{o}\times1^{o}$ вокруг метеорологических станций (рис. 3) в полярных широтах Якутии наблюдаются определенные особенности вариаций ПТВ, общей облачности и солнечной радиации.

Вариации метеоэлементов относящиеся к летнему периоду проявления ФП ГКЛ (13.07.1982 и 12.06.1991) достаточно «сложно» проанализировать ввиду особенности синоптических процессов и погоды в летний период [1].

Для примера, на рис. 4–7 представлены вариации метеоэлементов по данным реанализа ERA-Interim с широтно-долготным разрешением $1^{o}\times1^{o}$ вокруг метеорологических станций Тикси и Верхоянск. Периоды ФП ГКЛ относятся к весеннему (13.03.1989) и осеннему (28.10.1991) сезонам года.

Из рис. 4 и 6 видно, что наблюдается общая тенденция роста солнечной радиации до и после начала ФП ГКЛ. До начала ФП ГКЛ в вариациях облачного покрова наблюдается скачкообразный рост. После ФП ГКЛ также наблюдаются скачкообразные вариации облачного покрова, но с общей тенденцией спада. Вариации ПТВ до начала ФП ГКЛ находятся на уровне фоновых значений. Наблюдается рост ПТВ с максимальными значениями в периоде 8–10 дней после начала ФП ГКЛ. Эффект термической изменчивости во время весеннего периода (рис. 4, 6) может быть дополнительно связан с усилением процессов циклогенеза, обусловленного максимальными контрастами в приземном слое атмосферы [5].

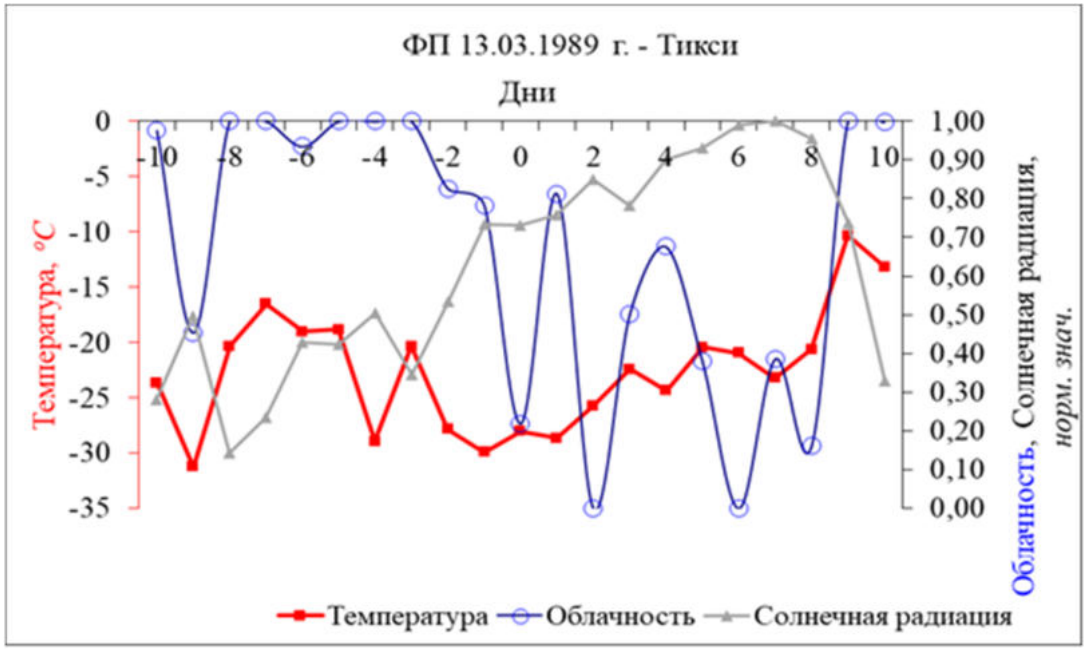


Рис. 4. График метеоэлементов: ПТВ (^{o}C), общей облачности (% – норм. знач.) и нисходящего потока солнечной радиации (Дж/м^2 – норм. знач.) во время ФП 13.03.1989 (нулевой день) ±10 дней по данным ERA-Interim с широтно-долготным разрешением $1^{o}\times1^{o}$ вокруг ст. Тикси

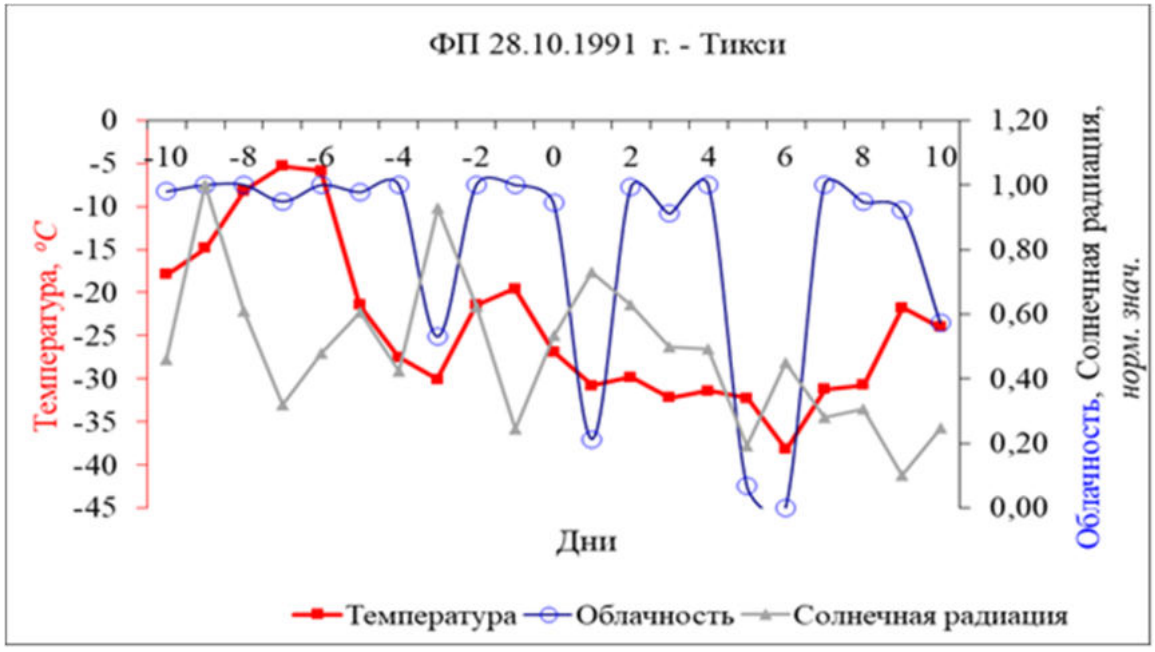


Рис. 5. График метеоэлементов: ПТВ (°С), общей облачности (% – норм. знач.) и нисходящего потока солнечной радиации (Дж/м^2 – норм. знач.) во время ФП 28.10.1991 (нулевой день) ±10 дней по данным ERA-Interim с широтно-долготным разрешением 1°×1° вокруг ст. Тикси

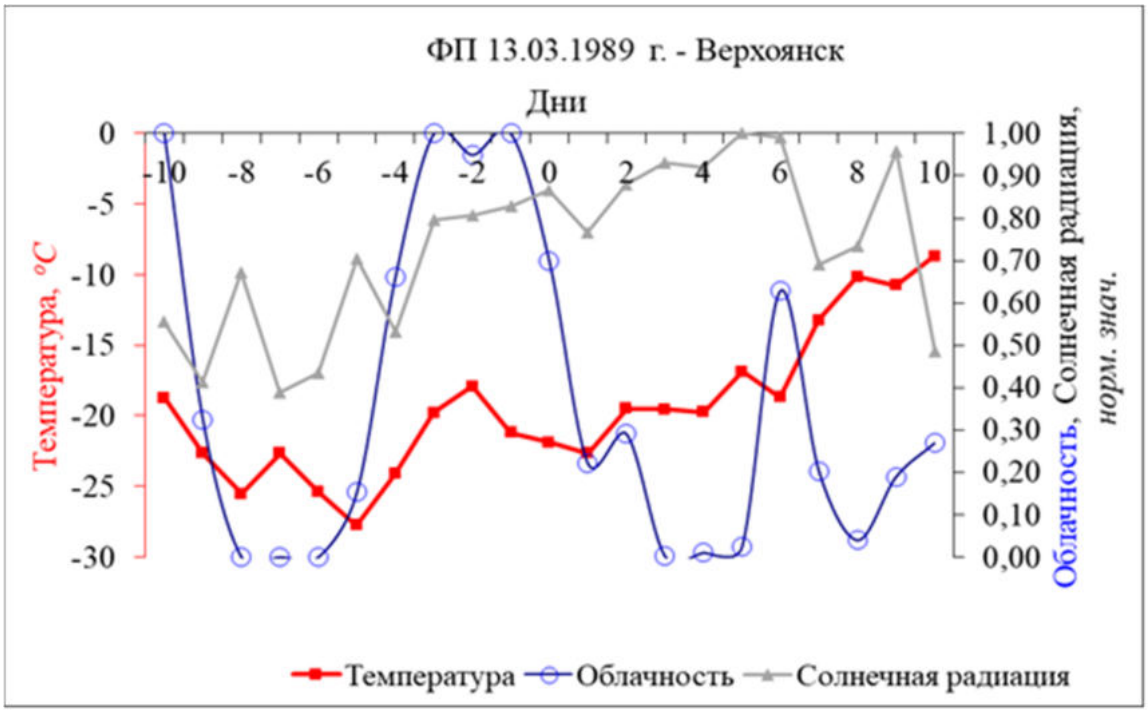


Рис. 6. График метеоэлементов: ПТВ (°С), общей облачности (% – норм. знач.) и нисходящего потока солнечной радиации (Дж/м^2 – норм. знач.) во время ФП 13.03.1989 (нулевой день) ±10 дней по данным ERA-Interim с широтно-долготным разрешением 1°×1° вокруг ст. Верхоянск

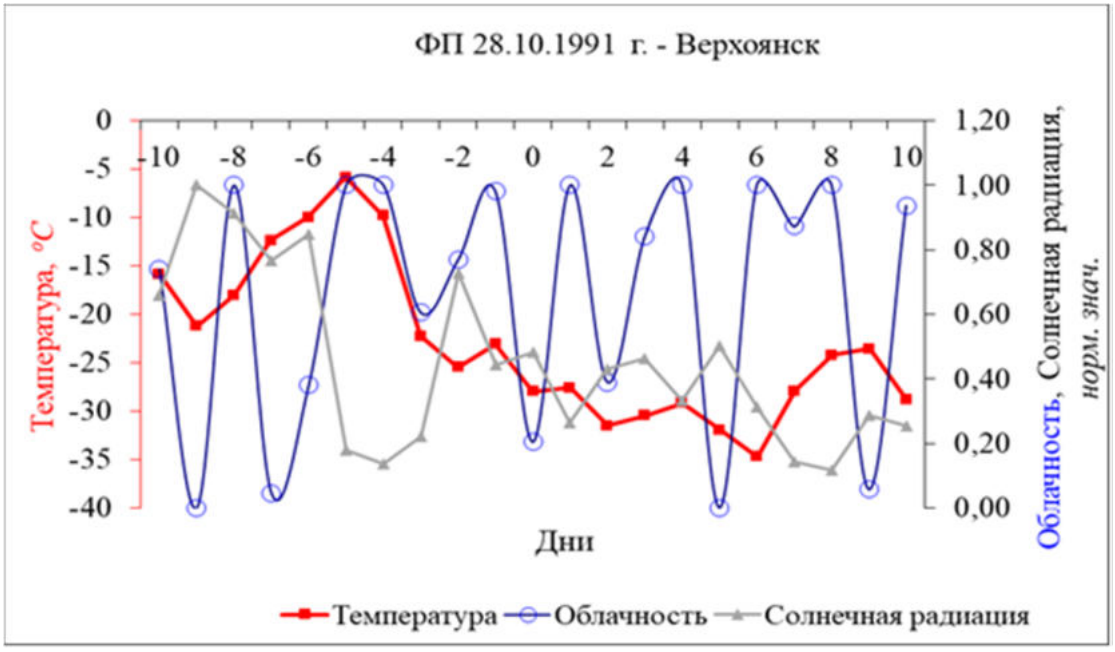


Рис. 7. График метеоэлементов: ПТВ (°С), общей облачности (% – норм. знач.) и нисходящего потока солнечной радиации (Дж/м^2 – норм. знач.) во время ФП 28.10.1991 (нулевой день) ±10 дней по данным ERA-Interim с широтно-долготным разрешением 1°×1° вокруг ст. Верхоянск

Из рис. 5 и 7 видно, что наблюдается общая тенденция спада солнечной радиации до и после начала ФП ГКЛ. В вариациях облачного покрова до и после начала ФП ГКЛ наблюдаются достаточно большие по амплитуде колебания, в целом, находящиеся на уровне фоновых значений. Наблюдается общий спад ПТВ с практическим восстановлением до уровня фоновых значений в периоде 8–10 дней после начала ФП ГКЛ.

Вышеописанная картина пространственно-временной динамики метеоэлементов согласуется с результатами, представленными в работе [3].

Выводы

1. В весенний период в полярных широтах Якутии:

Наблюдается общая тенденция роста солнечной радиации до, и после начала ФП ГКЛ. До начала ФП ГКЛ в вариациях облачного покрова наблюдается скачкообразный рост. После ФП ГКЛ также наблюдаются скачкообразные вариации облачного покрова, но с общей тенденцией спада. Вариации ПТВ до начала ФП ГКЛ находятся на уровне фоновых значений. Наблюдается рост ПТВ с максимальными значениями в периоде 8–10 дней после начала ФП ГКЛ.

2. В осенний период в полярных широтах Якутии:

Наблюдается общая тенденция спада солнечной радиации до, и после начала ФП ГКЛ. В вариациях облачного покрова до и после начала ФП ГКЛ наблюдаются достаточно большие по амплитуде колебания, в целом, находящиеся на уровне фоновых значений. Наблюдается общий спад ПТВ с практическим восстановлением до уровня фоновых значений в периоде 8–10 дней после начала ФП ГКЛ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации бюджетной темы II. 16.1.7.0375-2018-0004 (номер государственной регистрации № АААА-А17-117021450054-8).

Список литературы

1. *Баскаков В. М., Шаронов А. Ю.* Особенности синоптических процессов и погоды в летний период 2007 года в Арктическом бассейне // Эксплуатация морского транспорта. 2008. № 2(52). С. 34–38.

2. Чем обусловлены и с чем связаны Форбуш-эффекты? / А. В. Белов, Е. А. Ерошенко, В. А. Оленева, А. Б. Струминский, В. Г. Янке // Известия РАН. Серия физическая. 2001. Т. 65, № 3. С. 373–376.

3. *Васильев М. С., Николашкин С. В., Каримов Р. Р.* Временная изменчивость приземной температуры воздуха в Якутии во время крупных Форбуш-понижений // Вестник СВФУ. 2014. Т. 11, № 6. С. 19–29.

4. *Веретененко С. В., Распопов О. М.* Солнечная активность и космические лучи: влияние на облачность и процессы в нижней атмосфере (памяти к 75-летию М. И. Пудовкина) // Геомагнетизм и аэрономия, 2009. Т. 49, № 2. С. 147–155.

5. *Матвеев Л. Т., Матвеев Ю. Л.* Облака и вихри – основа колебаний погоды и климата. СПб. : РГГМУ, 2005. 327 с.

6. *Пудовкин М. И., Веретененко С. В.* Влияние геомагнитных возмущений на интенсивность потока прямой солнечной радиации // Геомагнетизм и аэрономия, 1992. Т. 32, № 1. С. 148–150.

7. *Пудовкин М. И.* Влияние солнечной активности на состояние нижней атмосферы и погоды // Соросовский образовательный журнал. 1996. № 10. С. 106–113.

8. *Салаватинский С. А.* Космические лучи и их роль в развитии физики высоких энергий и астрофизики // Соросовский образовательный журнал. 1999. № 10. С. 68–74.

9. *Dorman L. I.* Cosmic ray variation and space research. M. : AN USSR, 1963. P. 1027.

10. *Dragić A.* Forbush decreases – cloud relation in the neutron monitor era // Astrophys. Space Sci. Trans. 7, 2011. P. 315–318. https://doi.org/10.5194/astra-7-315-2011.

11. *Forbush S. E.* On the effect in the cosmic-ray intensity observed during the recent magnetic storm // Phys. Rev. 1937. Vol. 51. P. 1108–1109.

12. *Pudovkin M. I. Veretenenko S. V.* Cloudiness decreases associated with Forbush decreases of galactic cosmic rays // J. Atmos. Sol. Terr. Phys., 1995. Vol. 57, N 11. P. 1349–1355.

13. *Riddaway B.* ECMWF Newsletter N 110 Winter 2006/07. European Center for Medium Range Weather Forecast, 2007. 53 p.

14. *Svensmark H.* Influence of cosmic rays on Earth's climate // Phys. Rev. Let. 1998. Vol. 81, N 22. P. 5027–5029.

15. *Tinsley B. A., Deen G. W.* Apparent tropospheric response to MeV-GeV particle flux variations: A connection via electrofreezing of supercooled water in high-level clouds // J. Geophys. Res. 1991. Vol. 96. P. 22283–22296.

УДК 551.510.42:551.577:504.3.054

Влияние параметров дождей на интенсивность вымывания из атмосферы потенциально токсичных элементов в Москве

Д. В. Власов (vlasgeo@yandex.ru), И. Д. Еремина (meteo@rambler.ru)

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, г. Москва

Аннотация. Впервые для Москвы оценена интенсивность вымывания из атмосферы с жидкими осадками растворенных форм потенциально токсичных элементов (ПТЭ) во время весеннего эксперимента (апрель – май 2018 г.). Концентрации растворенных Al, As, B, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, Rb, S, Sb, Se, Sn, W и Zn в дождевой воде определены методами ICP-MS и ICP-AES. Продолжительность сухого периода до начала дождя, определяющая количество твердых частиц в дождевой воде и величину ее pH, наиболее сильно влияет на интенсивность вымывания из атмосферы W, Zn, Bi, Cd, Sb, Ni, B, S, K и Cu; интенсивность дождя, зависящая от количества и продолжительности выпадения осадков определяет вымывание Se, As, B, Cu, Sb, S, Cd, Ba, Rb и K.

Ключевые слова: влажное осаждение, городские условия, загрязнение осадков, растворенные формы элементов.

Введение

Изучение химического состава атмосферных осадков позволяет оценить интенсивность вымывания и осаждение на земную поверхность потенциально токсичных элементов (ПТЭ) [8; 11], к числу которых обычно относят большое число элементов – канцерогенные As, Cd, Pb, Cr, Be, Ni, Co, а также вызывающие общетоксические поражения организма или отдельных органов и систем Sb, Zn, Cu, Mo, W, Sn, Se, Ba, Mn и др. Атмосферные осадки в виде дождя являются важнейшим фактором самоочищения воздуха в теплый сезон года, когда основная масса аэрозолей вымывается из атмосферы за счет внутриоблачных процессов (сорбция ПТЭ на каплях дождя в облаке), и в подоблачном слое (вымывание твердой фазы аэрозолей в приземном слое атмосферы) [12].

Микроэлементный состав атмосферных осадков исследован достаточно подробно во многих городах мира. В России основное внимание уделяется анализу распределения отдельных химических элементов в дождях, однако такие работы проводятся эпизодически [4; 6; 7]. В Москве – крупнейшем мегаполисе Европы – на территории Метеорологической обсерватории Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова (МО МГУ) с середины 1950-х гг. проводится комплекс метеорологических наблюдений [5], а с 1982 г. также организован мониторинг физико-химического свойств и макрокомпонентного состава атмосферных осадков [3]. Изучено распределение органических соединений в отдельных пробах московских дождей [13]. Однако исследования интенсивности вымывания ПТЭ из атмосферы дождями в пределах города ранее не проводилось. Поэтому поставлена цель: выявить параметры дождей, влияющие на интенсивность вымывания ПТЭ из атмосферы.

Методы и материалы

Изучение химического состава атмосферных осадков проводилось в апреле – мае 2018 г. на территории МО МГУ, расположенной в юго-западной части города на территории Ботанического сада МГУ на удалении от промышленных источников загрязнения и крупных автомагистралей и считающейся фоновой городской станцией. Весенний период выбран, поскольку в это время наблюдается наибольшее разнообразие метеорологических условий и выбросов в атмосферу веществ от различных источников. Пробы осадков (n = 15) отбирались на высоте 2 м от поверхности земли с помощью винипластовой воронки размером 80х80 см и белого пластмассового ведра. Анализировался каждый случай выпадения дождя с начала до его окончания в текущие или смежные сутки: 6–7, 10–11, 17–18, 18–19, 21, 21–22, 25 и 26 апреля, а также 1, 2, 4, 5–6, 17–18, 18–19 и 19–20 мая.

В пробах измерялись pH и удельная электропроводность (EC, мкСм/см) потенциометрическим и кондуктометрическим методами соответственно. Для выделения растворенных форм ПТЭ пробы фильтровались через фильтры Millipore© с диаметром пор 0,45 мкм. По массе взвеси на фильтре оценено содержание твердых частиц в дождевой воде (S, мг/л). В полученном растворе определены концентрации Al, As, B, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, Rb, S, Sb, Se, Sn, W и Zn в лаборатории Института минерального сырья им. Н. М. Федоровского масс-спектральным (ICP-MS) и атомно-эмиссионным методами (ICP-AES) с индуктивно связанной плазмой на масс-спектрометре iCAP Qc (Thermo Scientific, США) и атомно-эмиссионном спектрометре Optima-4300 DV (Perkin Elmer, США).

В данной работе под *интенсивностью вымывания* понимается масса химического элемента, поступающего из атмосферы на единицу площади поверхности вместе с осадками за единицу времени (Dh, мкг/м^2 в час), что показывает насколько эффективно (быстро) вымывается поллютант из атмосферы: $Dh = C \cdot X / t$, где C – содержание ПТЭ в дождевой воде, мкг/л; X – количество выпавших осадков, мм (или л/м^2); t – продолжительность выпадения осадков, ч. Это позволяет сравнивать между собой эпизоды осадков различной продолжительности. Оценена интенсивность выпадения осадков (U, л/м^2 в час): $U = X / t$. По разнице между временем окончания одного эпизода выпадения осадков и начала следующего рассчитывалась продолжительность (в часах) сухого периода R, предшествовавшего исследуемому эпизоду с атмосферными осадками.

Из-за большой разницы в величинах интенсивности вымывания между ПТЭ для комплексной оценки каждого отдельного эпизода выпадения осадков проводилось нормирование данных: $Dh'_i = (Dh_i - Dh_{min}) / (Dh_{max} - Dh_{min})$, где Dh_i, Dh'_i – исходная и нормированная величины интенсивности вымывания ПТЭ в i-й эпизод осадков соответственно, Dh_{max} или Dh_{min} – максимальный и минимальный уровни за весь период наблюдений. Тогда *суммарные нормированные интенсивности вымывания* (NDh) в i-ый эпизод осадков можно определить как $\Sigma Dh'_{ij}$, где j – все учитываемые ПТЭ (в нашем случае j =1, 2, 3, ..., 24, 25, 26).

Статистическая обработка результатов проводилась в пакете Statistica 8. Для оценки связи между параметрами осадков (*X*, *t*, *U*, *R*) и физико-химическими свойствами дождевой воды (pH, EC, *S*) с одной стороны, и интенсивностью вымывания ПТЭ из атмосферы (*Dh*) с другой, рассчитаны непараметрические коэффициенты ранговой корреляции Спирмена r_s, значимость которых проверялась при уровне $p < 0,05$.

Результаты и обсуждение

Параметры дождей и физико-химические свойства дождевой воды. В начале и середине апреля в период выпадения дождей преобладал циклонический тип циркуляции с адвекцией воздуха из западных и северных районов. 25–26 апреля наблюдалось малоградиентное барическое поле также с преобладанием адвекции воздуха из северных регионов. В первой половине мая (с 1 по 6 число) господствовал вынос воздуха с юга и юго-запада, а в период с 17 по 20 мая – наблюдалась адвекция воздуха с запада при циклоническом типе циркуляции. В 2018 г. средние месячные значения температуры воздуха были больше на 2–3 °C соответствующих значений за 60 лет за период с 1954 по 2013 г.: в апреле средняя температура воздуха составила 8,4 °C по сравнению с 6,2 °C, а в мае – 16,7 °C по сравнению с 13,3 °C, что находится в соответствии с общей тенденцией потепления климата [5]. Количество осадков было в пределах нормы: в апреле 38 мм по сравнению с 41 мм, в мае – 50 мм по сравнению с 55 мм по данным многолетних измерений.

Большинство эпизодов по количеству выпавших осадков относятся к слабым дождям с объемом < 5 мм (рис. 1). Дожди с объемом > 5 мм выпадали 18–19 и 26 апреля, а также 5–6, 17–18, 18–19 и 19–20 мая. Длительность осадков варьировала от краткосрочных (< 4 ч) дождей 6–7 и 21 апреля, 2, 4 и 5–6 мая до 17 ч 18–19 мая и даже 25 ч 17–18 апреля, поэтому интенсивность дождей отличалась в зависимости от эпизода: от 0,2 до 2,9 л/м^2 в час (рис. 1). При росте продолжительности эпизодов осадков увеличивается количество выпавшей влаги ($r_s = 0,60$) и уменьшается содержание нерастворенных частиц в дождевой воде ($r_s = 0,60$) за счет их более активного вымывания из атмосферы в начале выпадения осадков.

Выявлено превышение доли кислотных осадков (с pH < 5,0) в апреле по сравнению со средними за 35 лет значениями на МО МГУ (соответственно 66 % и 17 %), но меньшую повторяемость в мае (28 % и 35 %). Все дожди характеризуются от слабокислой до почти нейтральной реакцией среды с варьированием pH от 4,0 в дожде 6–7 апреля до 6,3 в осадках 21 апреля (рис. 1). Среднее значение pH осадков и в апреле, и в мае 2018 г. составило 4,7 (при многолетних 5,0 и 4,8 соответственно). Наибольшая электропроводность (572 мкСм/см) установлена также 6–7 апреля, в остальных пробах EC изменяется от 21 до 217 мкСм/см. В период эксперимента, как и в последние 13 лет, преобладающим катионом в пробах являлся Ca^{2+}, анионом – Cl^- [3]. Повышение EC в дождевых осадках связано, вероятно, с частичным растворением вымытых из атмосферы твердых частиц, на что указывает тесная связь между EC и *S* с $r_s = 0,85$.

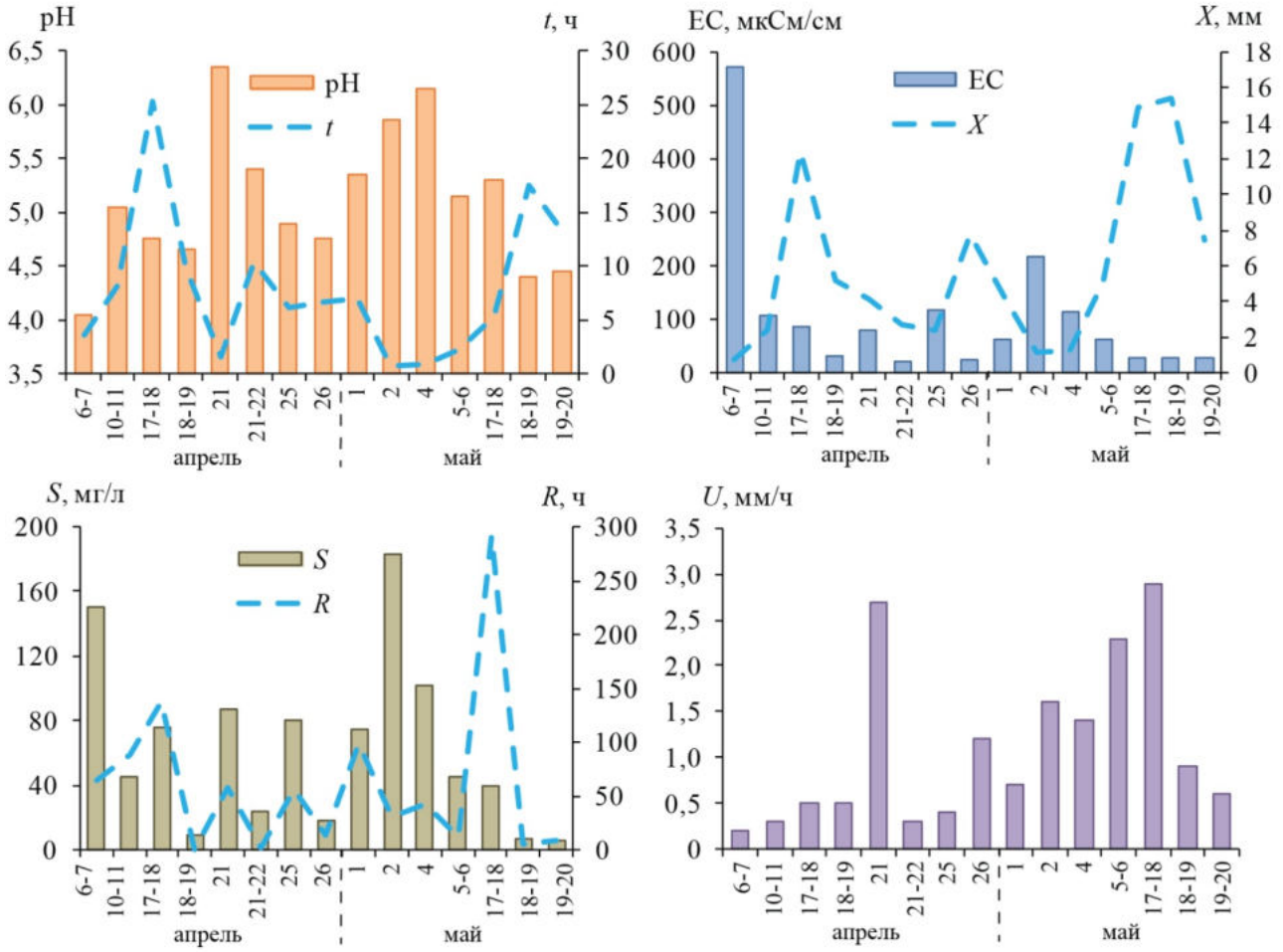


Рис. 1. Физико-химические свойства дождевой воды и параметры дождей в период проведения эксперимента. Здесь и далее свойства дождевой воды и параметры дождей: X – количество осадков (мм), t – продолжительность выпадения осадков (ч), R – продолжительность сухого периода (ч), S – содержание твердых частиц в дождевой воде (мг/л), U – интенсивность выпадения осадков (мм/ч), EC – удельная электропроводность (мкСм/см)

Среднее значение содержания твердых частиц в дождевой воде за период эксперимента составило 63 мг/л, изменяясь от 6,1 мг/л в последний эпизод продолжительных осадков в конце мая до 183 мг/л 2 мая во время длительных майских праздников в России (рис. 1). Количество выпадающих с дождями твердых частиц зависит от длительности засушливого периода перед осадками (r_s = 0,53), что связано с накоплением грубодисперсной фракции аэрозолей в воздухе при длительном засушливом периоде и их вымыванием с осадками. Установлена существенная связь содержания нерастворенных частиц с количеством выпавшей влаги (r_s = –0,75). Это, вероятно, связано с разбавлением, когда минерализация и содержание твердых частиц в дождевой воде уменьшаются при увеличении количества осадков [12]. С этим же явлением связано уменьшение EC (r_s = –0,72) при росте объема выпавших осадков. На уменьшение содержания частиц в дождевой воде влияет увеличение продолжительности выпадения осадков (r_s = –0,70), вероятно, из-за более активного вымывания твердых частиц в первые минуты и часы после начала выпадения дождей.

Интенсивность вымывания ПТЭ из атмосферы. Интенсивность вымывания ПТЭ с дождями весной изменяется в широких пределах – в среднем от 6881 мкг/м^2 в час у Ca до 0,018 мкг/м^2 в час у Be (табл.). Наибольшие уровни интенсивности вымывания из атмосферы (> 50 мкг/м^2 в час) характерны для Ca > S > K > Na > Fe > Al > Pb > Zn. Для остальных ПТЭ уровни осаждения ниже. Ca, S, Na и K являются макроэлементами атмосферных осадков и природных вод, нахождение макроэлементов земной коры Al и Fe в высоких концентрациях относительно других ПТЭ в дождевой воде связано с поступлением от терригенных источников, а интенсивное вымывание Zn, Pb, P, Mn, Ba, Cu – с воздействием транспорта и промышленных объектов, что типично для городов [6; 8; 11]. Важным источником Zn, Cu, Sb, Cd, W, Bi, Sn в дождях является постепенное растворение твердых частиц дорожной пыли и почв, выдуваемых в атмосферу с поверхности дорожного полотна и почв [1; 2].

Таблица

Интенсивность вымывания ПТЭ из атмосферы на земную поверхность на территории МО МГУ с дождями, мкг/м^2 в час

ПТЭ	Среднее	Минимальное – максимальное	ПТЭ	Среднее	Минимальное–максимальное
Ca	6881	344–31420	Sb	5,4	0,30–23
S	991	64–3496	Rb	1,0	0,061–7,4
K	546	10–3828	Ni	0,78	0,050–4,1
Na	497	35–1608	Cr	0,43	0,042–2,1
Fe	111	10–238	Co	0,35	0,020–1,6
Al	96	3,8–300	Se	0,17	0,039–0,43
Pb	79	6,0–190	As	0,17	0,029–0,74
Zn	58	4,0–247	Cd	0,14	0,012–0,45
P	42	0,92–278	Mo	0,11	0,020–0,29
Mn	28	1,1–165	Sn	0,057	0,003–0,23
Ba	24	1,6–82	W	0,048	0,004–0,18
Cu	10	0,98–35	Bi	0,034	0,002–0,11
B	7,6	0,31–34	Be	0,018	0,001–0,058

Очень высокая нормированная интенсивность вымывания ПТЭ (*NDh*) выявлена для 1–6 мая (рис. 2), когда преобладала адвекция воздуха с юга и юго-запада. Начало этого периода (1 мая) характеризуется достаточно низкой интенсивностью вымывания ПТЭ, однако уже 2 мая она резко возрастает из-за антропогенной поставки ПТЭ в атмосферу при сжигании органических остатков на дачных участках и территории Ботанического сада МГУ, древесного угля во время пикников рядом с МГУ и интенсивным воздействием транспорта из-за большого количества дорожных заторов, образующихся при выезде жителей за пределы города. Это подтверждается ростом в эти дни уровней вымывания K, Rb, Mn, Sn, Sb, As, которые часто используются в качестве индикаторов регулируемого сжигания биомассы и угля или лесных пожаров. В этот же период на территории МО МГУ наблюдались высокие отношения содержания в атмосферном воздухе черного углерода к содержанию частиц PM_{10} [14]. С 30 апреля по 5 мая наблюдалась повышенная концентрация PM_{10} в воздухе – около

34 мкг/м^3, резко снизившаяся до 23 мкг/м^3 в период с 6 по 12 мая, вероятно, из-за прохождения 2, 4 и 5–6 мая коротких, но интенсивных дождей, что послужило причиной высоких нормированных величин интенсивности вымывания ПТЭ [9]. В последующие дни из-за непродолжительных (1–2 ч), но достаточно сильных (1,4–2,2 л/ч) осадков вымывание ПТЭ снижается за счет постепенного удаления ПТЭ из атмосферного воздуха с осадками. 17–18 мая вымывание ПТЭ достаточно интенсивно из-за предыдущего длительного сухого периода (11 дней), когда, в воздухе аккумулировалось большое количество аэрозоля и наблюдались повышенные концентрации PM_{10} – в среднем 40 мкг/м^3 [9].

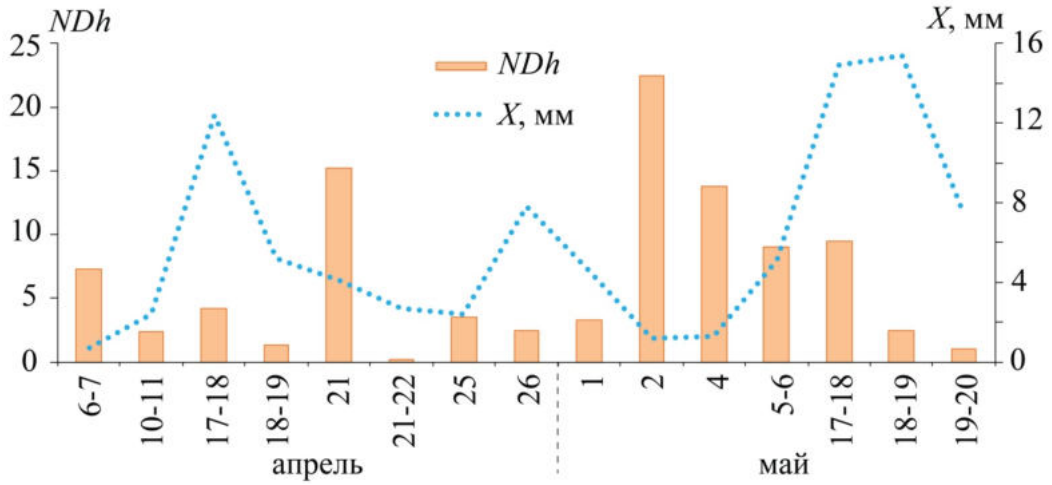


Рис. 2. Суммарные нормированные выпадения ПТЭ (ND, левая ось), интенсивности вымывания ПТЭ из атмосферы (NDh, левая ось) и количество осадков (X, мм, правая ось) на территории МО МГУ в апреле–мае 2018 г.

Во время затяжных дождей, длившихся с небольшими перерывами несколько суток, интенсивность вымывания ПТЭ из атмосферы снижается, что характерно для 18–19 и 19–20 мая и 26 апреля, но особенно заметно для 18–19 и 21–22 апреля (рис. 2). Эти данные подтверждают гипотезу об осаждении основных масс поллютантов в первые часы после начала дождей за счет активного вымывания аэрозолей [8].

Влияние параметров дождей на вымывание ПТЭ из атмосферы. *Количество осадков* определяет интенсивность вымывания из атмосферы антропогенно-терригенных Na и P (r_s –0,53 для обоих ПТЭ), для остальных элементов кроме Se, Mo и Pb такие связи также отрицательны. Уменьшение интенсивности вымывания ПТЭ связано с эффектом разбавления, снижающим концентрации ПТЭ и, как следствие, массы вымываемых в единицу времени поллютантов [12]. *Продолжительность осадков* отрицательно влияет на интенсивность вымывания из атмосферы всех ПТЭ (рис. 3), что значимо для всех ПТЭ, кроме Be и Pb, с r_s от –0,52 для Mo и до –0,90 для Mn, так как во время продолжительных дождей наибольшие уровни ПТЭ характерны для начала выпадения осадков, затем они резко снижаются к концу эпизода из-за удаления поллютантов из атмосферы [11]. Очевидно, что интенсивность вымывания ПТЭ положительно зависит от *интенсивности дождя*, высокие значимые r_s установлены для боль-

шинства ПТЭ: Ca, Mn, Zn, Be, K, Cd, S, Sb и Rb (0,51–0,59), Cu (0,61), Ba, B, As (0,76–0,78), Se (0,90). Для остальных ПТЭ кроме Pb r_s тоже положительны и составляют более 0,37.

Длительность сухого периода является одним из важнейших факторов, способствующих увеличению интенсивности вымывания ПТЭ из атмосферы из-за предшествующей аккумуляции аэрозоля в воздухе в условиях антициклональной погоды (рис. 3). Для интенсивности вымывания коэффициенты корреляции положительны для всех ПТЭ и значимы для W, Ni, B, Be, Rb и Cu (0,65–0,51). Первые после длительного сухого периода дожди обогащены ПТЭ за счет внутриоблачных процессов сорбции и подоблачного вымывания, а при коротком сухом периоде из-за частых осадков процессы подоблачного вымывания ослабевают при постепенном удалении твердых частиц из атмосферы [8]. С увеличением *содержания твердых частиц* в осадках процесс их постепенного растворения усиливается, что способствует росту концентраций растворенных форм ПТЭ и, как следствие, увеличению интенсивности вымывания ПТЭ из атмосферы (рис. 3). Продолжительные сухие периоды до начала осадков приводят к увеличению массы твердых частиц в выпадающих после этих периодов осадках, что в свою очередь способствует увеличению pH дождевой воды [15]. Частичное растворение частиц дорожной пыли может способствовать повышению pH осадков, поскольку pH водной вытяжки дорожной пыли в Москве составляет 6,4–8,1 [10]. Поэтому с увеличением продолжительности сухого периода, количества твердых частиц в дождевой воде и величины pH интенсивность вымывания ПТЭ дождями также увеличивается (рис. 3). Наибольшие r_s при этом характерны для B, K, Mn и Rb (r_s 0,66–0,63), Co, Ba, Bi, Cd, Sb, S, Zn (0,58–0,51).

Удельная электропроводность косвенно показывает сумму ионов в растворе (дождевой воде). Поэтому EC положительно связана с уровнем интенсивности вымывания многих ПТЭ и особенно – Na, Al, P, S, K, Ca, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Rb, Cd, Sn, Sb, W и Bi (r_s 0,52–0,76), что является индикаторов ускоренного удаление ПТЭ из атмосферы, увеличения концентраций ПТЭ в дождевой воде и, как следствие, роста EC. То есть рост EC дождевой воды является не причиной увеличения интенсивности вымывания ПТЭ из атмосферы, а следствием этого процесса.

Выводы

В городских условиях дожди являются важным фактором очищения атмосферы от ПТЭ. Высокие уровни интенсивности вымывания ПТЭ выявлены для майских праздников (1–6 мая), что обусловлено антропогенной поставкой ПТЭ в атмосферу при сжигании органических остатков и угля и интенсивным воздействием транспорта. Во время затяжных дождей вымывание ПТЭ снижается во вторые и последующие сутки из-за активного подоблачного удаления аэрозолей в начальные эпизоды выпадения осадков.

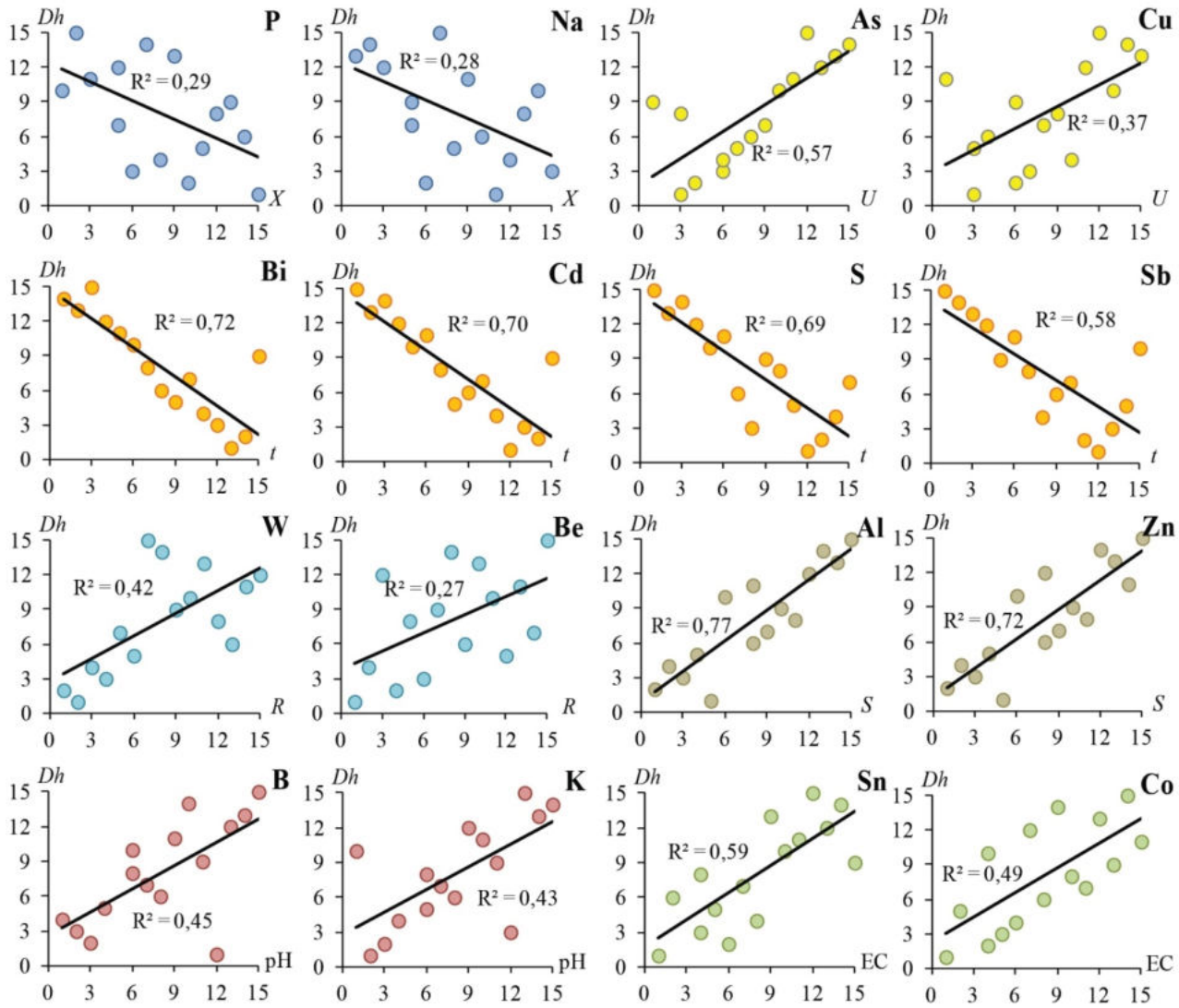


Рис. 3. Зависимость рангов величины интенсивности вымывания некоторых ПТЭ (вертикальная ось) от физико-химических свойств дождевой воды или параметров дождей (горизонтальная ось). Каждому эпизоду осадков присвоен ранг в порядке увеличения свойств дождевой воды, параметров осадков и интенсивности вымывания ПТЭ (высоким рангам соответствуют высокие значения показателей). Цветом показаны зависимости от одинаковых параметров дождей или свойств дождевой воды (ось абсцисс)

В Москве важнейшими параметрами дождей, определяющими интенсивность вымывания ПТЭ из атмосферы, являются не только количество влаги, но и продолжительность и интенсивность выпадения осадков, длительность засушливого периода, влияющие на величину pH, EC и содержание твердых частиц в дождевой воде. Одним из наиболее значимых параметров при этом является продолжительность сухого периода до начала осадков, когда происходит накопление аэрозольных частиц в облачных элементах, что приводит к росту pH дождевой воды. Особенно сильно это влияет на вымывание ПТЭ преимущественно антропогенного происхождения – Zn, Bi, Cd, Sb, B, S, Cu, а также антропогенно-терригенного – W, Ni, K и др. С ростом интенсивности дождя, зависящей от количества и продолжительности выпадения осадков, также происходит увеличение интенсивности вымывания большинства ПТЭ.

Полученные первые данные о факторах дождей, влияющих на интенсивность вымывания ПТЭ из атмосферы в апреле-мае, носят предварительный характер, но в методическом плане полезны при эколого-геохимическом мониторинге состояния окружающей среды Москвы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 18-17-00149). Авторы благодарны Е. В. Вольперт за подготовку данных о начале и конце периодов атмосферных осадков.

Список литературы

1. *Власов Д. В., Касимов Н. С., Кошелева Н. Е.* Геохимия дорожной пыли (Восточный округ г. Москвы) // Вестник Московского университета. Серия 5, географическая. 2015. № 1. С. 23–33.

2. *Власов Д. В.* Металлы и металлоиды в частицах PM_{10} дорожной пыли Восточной Москвы // Вестник РУДН. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2017. Т. 25, № 4. С. 529–539.

3. *Еремина И. Д.* Химический состав атмосферных осадков в Москве и тенденции его многолетних изменений // Вестник Московского университета. Сер. 5, географическая. 2019. № 3. С. 3–10.

4. *Семенец Е. С., Свистов П. Ф., Талаш А. С.* Химический состав атмосферных осадков Российского Заполярья // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. Томский политехнический университет, 2017. Т. 328, № 3. С. 27–36.

5. Климатические и экологические характеристики московского мегаполиса за 60 лет по данным Метеорологической обсерватории МГУ / Н. Е. Чубарова, Е. И. Незваль, И. Б. Беликов, Е. В. Горбаренко, И. Д. Еремина, Е. Ю. Жданова, И. А. Корнева, П. И. Константинов, М. А. Локощенко, А. И. Скороход, О. А. Шиловцева // Метеорология и гидрология. 2014. № 9. С. 49–64.

6. *Чудаева В. А., Чудаев О. В., Юрченко С. Г.* Особенности химического состава атмосферных осадков на юге Дальнего Востока // Водные ресурсы. 2008. Т. 35, № 1. С. 60–71.

7. *Янченко Н. И., Яскина О. Л.* Особенности химического состава снежного покрова и атмосферных осадков в городе Братске // Известия Томского политехнического университета. 2014. Т. 324, № 3. С. 27–35.

8. *Bayramoğlu Karşi M. B., Yenisoy-Karakaş S., Karakaş D.* Investigation of washout and rainout processes in sequential rain samples // Atmospheric Environment. 2018. Vol. 190. P. 53–64.

9. Aerosol and its radiative effects during the AERORADCITY 2018 Moscow experiment / N. E. Chubarova, E. E. Androsova, A. A. Kirsanov, B. Vogel, H. Vogel, O. B. Popovicheva, G. S. Rivin // Geography, Environment, Sustainability. 2019. Vol. 12, N 4. P. 114–131.

10. Physicochemical properties of road dust in Moscow / N. S. Kasimov, N. E. Kosheleva, D. V. Vlasov, K. S. Nabelkina, A. V. Ryzhov // Geography, Environment, Sustainability. 2019. Vol. 12, N 4. P. 96–113.

11. The washing effect of precipitation on particulate matter and the pollution dynamics of rainwater in downtown Beijing / W. Ouyang, B. B. Guo, G. Q. Cai, Q. Li, S. S. Han, B. Liu, X. G. Liu // Science of the Total Environment. 2015. Vol. 505. P. 306–314.

12. Chemical composition of water soluble inorganic species in precipitation at Shihwa Basin, Korea / S. -M. Park, B. -K. Seo, G. Lee, S.-H. Kahng, Y. W. Jang // Atmosphere. 2015. Vol. 6. P. 732–750.

13. *Polyakova O. V., Artaev V. B., Lebedev A. T.* Priority and emerging pollutants in the Moscow rain // Science of the Total Environment. 2018. Vol. 645. P. 1126–1134.

14. Black carbon in spring aerosols of Moscow urban background / O. B. Popovicheva, E. Volpert, N. M. Sitnikov, M. A. Chichaeva, S. Padoan// Geography, Environment, Sustainability. 2020. Vol. 11, N 1. P. 233–243.

15. *Singh S., Elumalai S. P., Pal A. K.* Rain pH estimation based on the particulate matter pollutants and wet deposition study // Science of the Total Environment. 2016. Vol. 563–564. P. 293–301.

УДК 551.5

Облачность на юге Восточной Сибири по данным ECMWF ERA-Interim и NCEP/NCAR Reanalysis 1

Е. В. Девятова (devyatova@iszf.irk.ru) [1,2]

[1] Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск;
[2] Иркутский государственный университет, г. Иркутск

Аннотация. На основе данных проектов реанализа NCEP/NCAR Reanalysis 1 и ECMWF ERA-Interim мы исследовали климатическое состояние и долговременную динамику общей облачности (Total cloud cover – TCC), являющейся продуктом прогностических моделей, задействованных в этих проектах. Оказалось, что TCC по данным ERA-Interim имеют более высокие значения, чем по данным NCEP. В многолетней динамике среднегодовых значений TCC оба набора данных показывают тенденцию к снижению TCC в районе базирования обсерваторий.

Ключевые слова: атмосфера, облачность.

Введение

В середине 60-х гг. XX в. СибИЗМИР (в настоящее время ИСЗФ СО РАН) начал строительство солнечных оптических обсерваторий на юге Восточной Сибири. Были основаны две оснащенные различными инструментами обсерватории: Байкальская астрофизическая на юго-западном берегу Байкала (пос. Листвянка, Иркутская область, 51,86° с. ш., 104,86° в. д.) и Саянская солнечная в Восточном Саяне недалеко от пос. Монды (Республика Бурятия, 51,67° с. ш., 100,99° в. д.) на высоте 2000 м над у. м. В настоящее время ИСЗФ СО РАН ведет строительство оптической обсерватории в пос. Торы (Республика Бурятия, 51,78° с. ш., 103,00° в. д.).

При наблюдениях в оптическом диапазоне большое значение имеет состояние атмосферы, сквозь толщу которой проходит солнечный свет. Выбор мест для двух первых обсерваторий был обоснован особыми местными условиями: стабилизирующим влиянием на атмосферу холодной поверхности озера Байкал и высотой базирования инструментов в горах, позволяющей избежать искажения данных турбулентными движениями в самых плотных нижних слоях атмосферы. В целом юг Восточной Сибири был в свое время выбран для установки инструментов как регион с благоприятными астроклиматическими условиями [1]. Выводы в работе [1] основаны на данных справочников Гидрометеоцентра СССР, по которым для территории СССР были рассчитаны таблицы повторяемость ясного неба, одного из основных метеорологических факторов, влияющих на эффективность работы телескопов. Помимо повторяемости ясного неба важными астроклиматическими характеристиками, влияющими на эффективность работы оптических инструментов, являются прозрачность атмосферы и турбулентность.

Для нас представляют интерес: исследование астроклиматически значимых метеорологических характеристик облачности в регионе базирования оптических обсерваторий ИСЗФ СО РАН с привлечением современных баз данных. Нам важно изучить вопрос применимости этих данных для исследований в

интересующем нас регионе. Нам так же интересно узнать, как изменились астроклиматически значимые характеристики за несколько десятилетий, прошедших с момента установки первых инструментов.

В данной работе на основе данных реанализов мы изучаем динамику одной из самых общих характеристик, имеющих отношение к понятию повторяемости ясного неба – общую облачность (Total Cloud Cover – TCC).

Данные и метод

Среднемесячные данные о TCC архива ECMWF ERA-Interim 1979–2018 [2], разрешение по пространству 1º×1º. На широте 50º с. ш. в интересующий нас диапазон долгот (101º–105º в. д.) попадает пять узлов сетки. За каждый месяц было произведено осреднение значений TCC в этих узлах.

Среднемесячные данные о TCC архива NCEP/NCAR Reanalysis Gaussian Grid 1948–2019 [3]. На широте 50,475º с. ш. в диапазон долгот 101º–105º в. д. попадает три узла сетки, по которым производилось осреднение.

Далее были рассчитаны среднегодовые значения TCC и отклонения среднегодовых TCC от среднемноголетнего значения (1981–2010 гг.).

Карты были получены с привлечением визуализатора https://climatereanalyzer.org/

Результаты

На рис. 1 и 2 представлены карты среднемноголетних значений TCC, построенные по данным архивов NCEP/NCAR Reanalysis и ERA-Interim. Карты демонстрируют климатическую картину в распределении облачности Оптические обсерватории ИСЗФ СО РАН расположены в области с климатическими значениями TCC в интервале 50–60 % по данным NCEP, что неплохо, на наш взгляд, согласуется с результатами оценки астроклиматических условий, выполненными в свое время в работе [1]. Данные ERA-Interim показывают более высокие значения TCC в интересующей нас области: 60–70 %.

На рис. 3 показана долговременная динамика TCC подряд от месяца к месяцу за весь доступный для каждого архива период. На этом рисунке хорошо видно, что данные ERA-Interim имеют боле высокие значения, чем данные NCEP. Какие из них ближе к истине, можно узнать лишь с привлечением других наборов данных, например, станционных. Это вопрос, на который нужно будет найти ответ в дальнейшем.

Рисунок 4, *a* показывает динамику среднегодовых значений TCC в области базирования оптических обсерваторий ИСЗФ СО РАН. Оба архива данных имеют отличия в характере межгодовых флуктуаций, но показывают схожие многолетние тенденции. А именно постепенное снижение общей облачности. Различия появляются после 2010 г. В данных NCEP тенденция снижения значений TCC от года к году сохраняется, а данных ERA-Interim – нет. На рисунке 4b мы показываем графики аномалий среднегодовых значений TCC, рассчитанных относительно среднемноголетнего значения (период осреднения 1981–2010). Видим, что в 1960–1980-е, т. е. в период строительства обсерваторий и первых наблюдений на них, аномалии TCC имели положительные значения. Начиная с 1990 г., аномалии TCC преимущественно отрицательные.

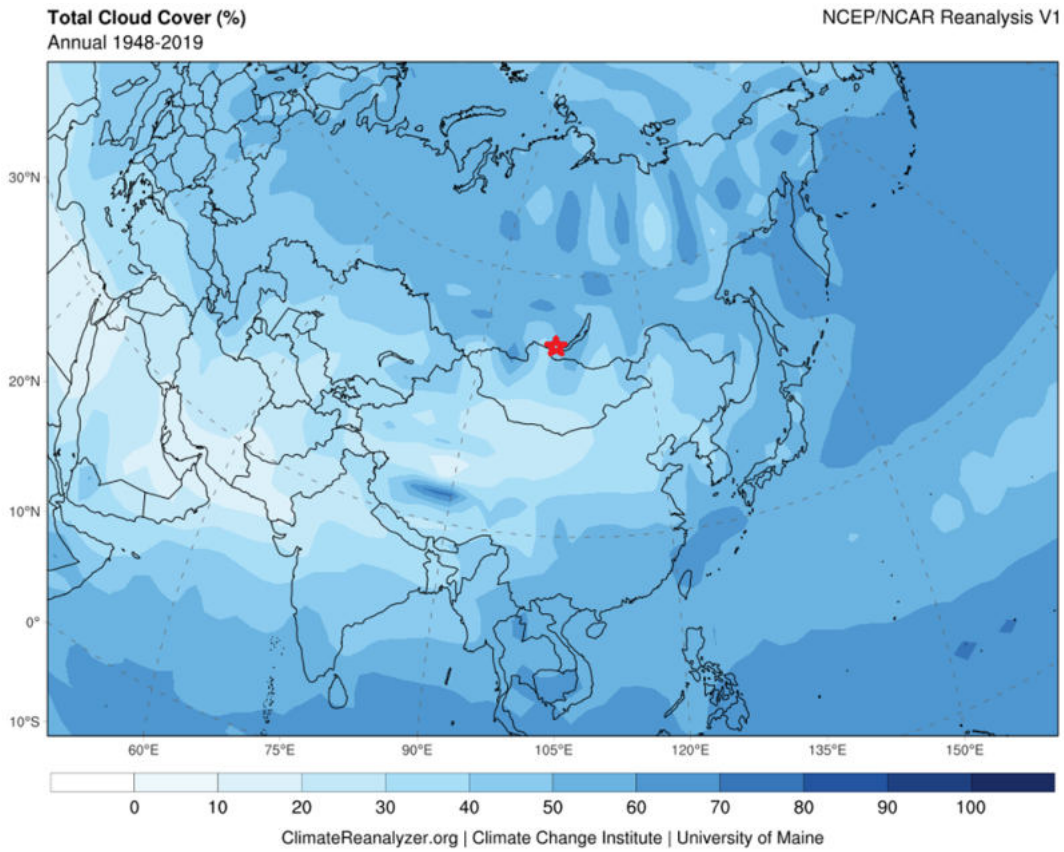


Рис. 1. Карта среднемноголетних значений ТСС. Данные NCEP/NCAR Reanalysis 1. 1948–2019.

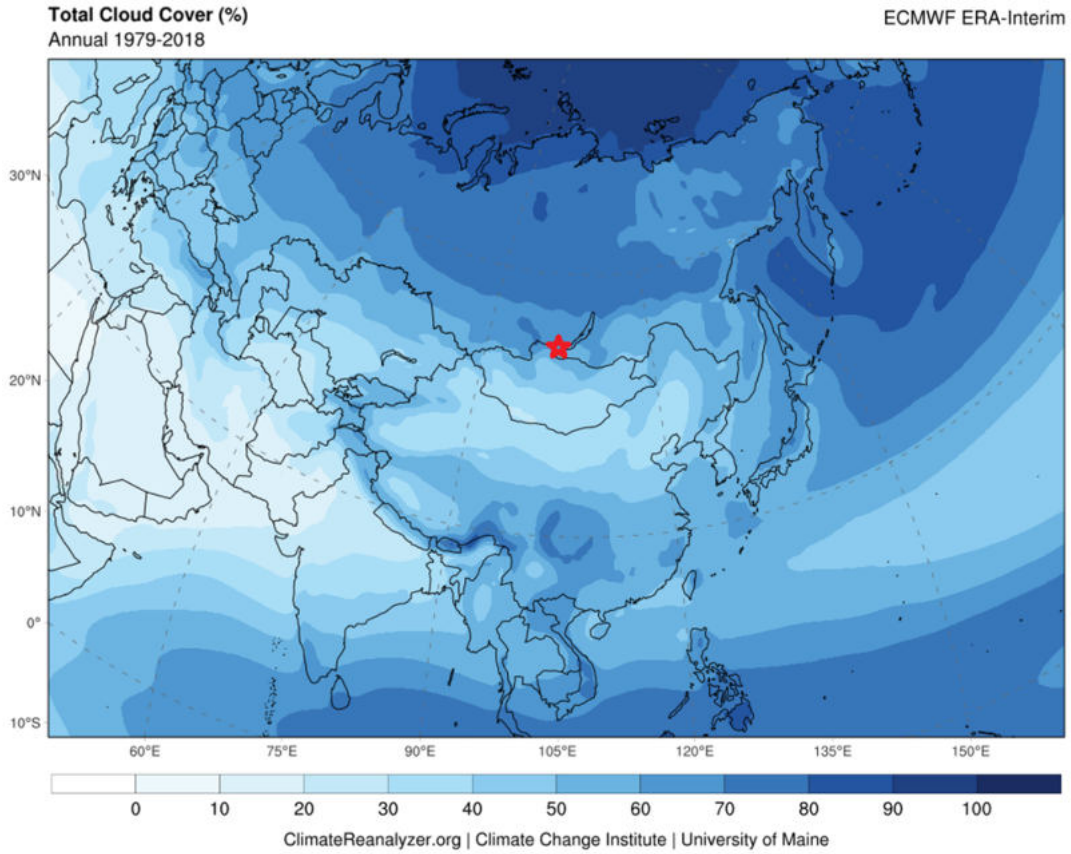


Рис. 2. Карта среднемноголетних значений ТСС. Данные ECMWF ERA-Interim. 1979–2018

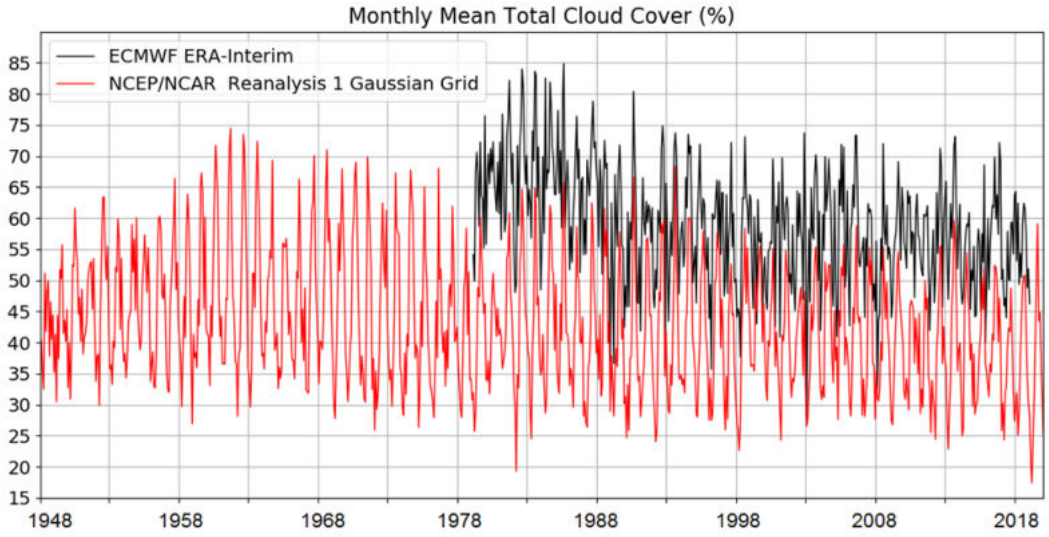


Рис. 3. Долговременная динамика TCC от месяца к месяцу по данным NCEP/NCAR Reanalysis 1 и ECMWF ERA-Interim

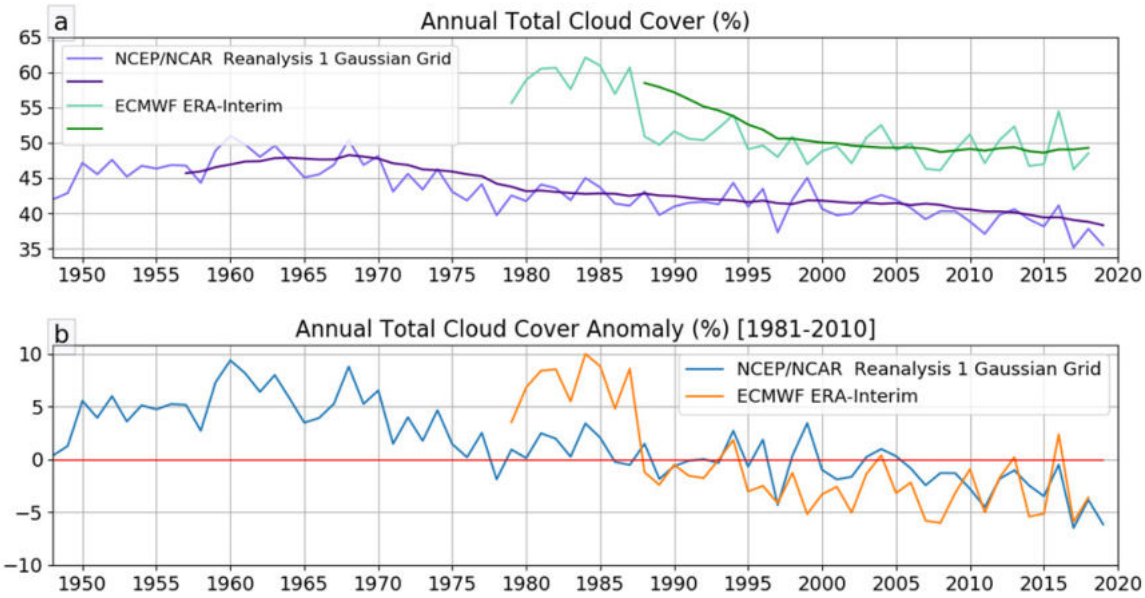


Рис. 4. a) Графики среднегодовых значений TCC за период 1948–2019 (NCEP/NCAR Reanalysis 1) и 1979–2018 (ECMWF ERA-Interim). b) Графики аномалий среднегодовых значений TCC относительно среднемноголетнего значения TCC, рассчитанного за период 1981–2010

Выводы

В данной работе на основе данных проектов реанализа NCEP/NCAR Reanalysis 1 и ECMWF ERA-Interim мы исследовали климатическое состояние и долговременную динамику общей облачности (Total cloud cover – TCC), являющейся продуктом прогностических моделей, задействованных в этих проектах.

Мы получили следующие результаты:

- TCC по данным ERA-Interim имеет более высокие значения, чем по данным NCEP. Для выяснения вопроса, какие из них более точно отражают реальность, требуется привлечение дополнительных данных в дальнейшем.

• В многолетней динамике среднегодовых значений ТСС оба набора данных показывают многолетнюю тенденцию к снижению ТСС в районе базирования обсерваторий. На основании этого факта мы могли бы говорить об улучшении астроклиматических условий в современный период по сравнению с периодом первых наблюдений. Однако не стоит забывать о других, не менее важных, чем облачность, характеристиках, влияющих на эффективность работы телескопов – прозрачности атмосферы и турбулентности. Исследование их долговременной динамики является необходимым шагом для получения комплексной картины изменений условий наблюдения, происходящих в регионе базирования обсерваторий.

Работа выполнена в рамках базового финансирования программы ФНИ II.16.

Список литературы

1. *Дарчия Ш. П.* Об астрономическом климате СССР. М. : Наука, 1985. 175 с.

2. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system / D. P. Dee [et al.] // Q. J. R. Met. Soc. 2011. Vol. 37. P. 553–597. https://doi.org/10.1002/qj.828

3. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project / E. Kalnay [et. al.] // Bull. Amer. Meteor. Soc. 1996. Vol. 77, N 3. P. 437–471. https://doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2

УДК 551.582+681.518

Пространственно-временные тенденции изменения средних показателей температуры воздуха и количества осадков в бассейне Среднего Енисея (зона тайги) на основе данных Climatic Research Unit (CRU TS V.3.22)

М. А. Корец (mik@ksc.krasn.ru), А. С. Прокушкин (prokushkin@ksc.krasn.ru), Т. А. Буренина (burenina@ksc.krasn.ru)

Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН (ИЛ СО РАН), г. Красноярск

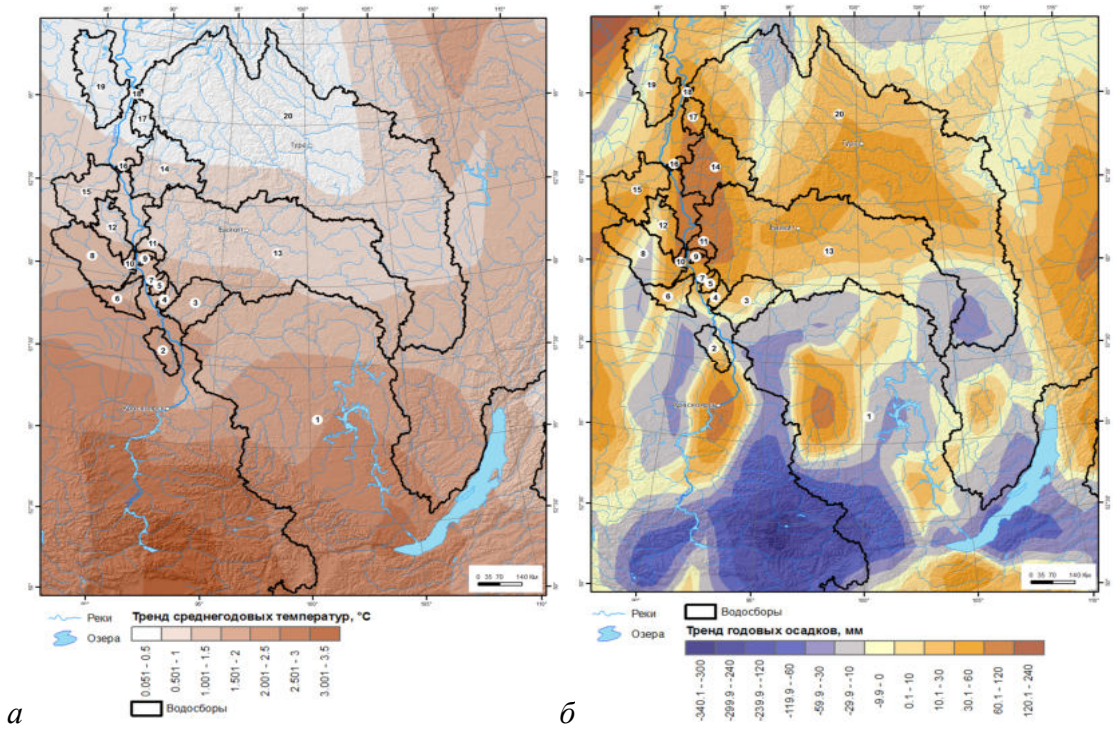
Аннотация. На основе базы данных CRU TS v.3.22 выполнен анализ пространственно-временной изменчивости температуры воздуха и осадков за период 1931–2010 гг. с привязкой к водосборам притоков реки Енисей в зоне тайги. Показана значительная широтно-зональная и сезонная вариабельность трендов температур и осадков.

Ключевые слова: температура воздуха, количество осадков, бассейн Среднего Енисея, данные Climatic Research Unit.

В рамках ряда НИР ИЛ СО РАН в 2015–2019 гг. ставилась задача оценки пространственно-временной изменчивости климатических условий в границах бассейна среднего течения р. Енисей. На основе базы данных климатических показателей Climatic Research Unit Datasets»(CRU TS v. 3. 22) [1; 2] были рассчитаны растровые карты линейных трендов среднемесячных и среднегодовых температур, а также месячных и годовых осадков за период с 1931 по 2010 г. Геостатистический анализ данных в ГИС (ESRI ArcGIS 10.1) позволил оценить пространственно-временную вариабельность указанных климатических параметров для 20 ключевых водосборов притоков р. Енисей (рис. 1–3). Притоки упорядочены с юга (*1* – Ангара) на север (*20* – Нижняя Тунгуска).

Широтное распределение водосборов обусловливает диапазон среднегодовых температур от –1 до –9 °С (рис. 2, *а*) при относительно равномерном распределении годовых осадков в интервале 500–600 мм (рис. 2, *б*). Исключениям являются притоки Ангара (*1*), Подкаменная Тунгуска (*13*) и Нижняя Тунгуска (*20*), отмеченные более низкими средними по водосбору значениями годовых осадков (до 400 мм) и значительным разбросом минимальных и максимальных значений (рис. 1, 2). Это обусловливается значительной площадью и протяжностью этих водосборов в юго-восточном направлении в различных физико-географических условиях.

Рассчитанные за период с 1931 по 2010 г. (80 лет) статистические показатели абсолютных линейных трендов среднегодовых температур воздуха (рис. 2, *в*) и суммы годовых осадков (рис. 2, *г*) показывают устойчивый годовой прирост для всех водосборов по температуре (от 0,2 до 2 °С) и преобладающий прирост по осадкам (от 0 до 85 мм) за исключением Ангары (-17 мм). Разброс годовых трендов для бассейнов рек Подкаменная и нижняя Тунгуска также велик, а для бассейна Ангары в южной его части максимум прироста температур достигает 2,8 °С, а минимум снижения осадков –228 мм.



а *б*

Рис. 1. Карты трендов среднегодовой температуры воздуха (а) и суммы годовых осадков (б) за период 1931–2010 гг. на основе данных CRU

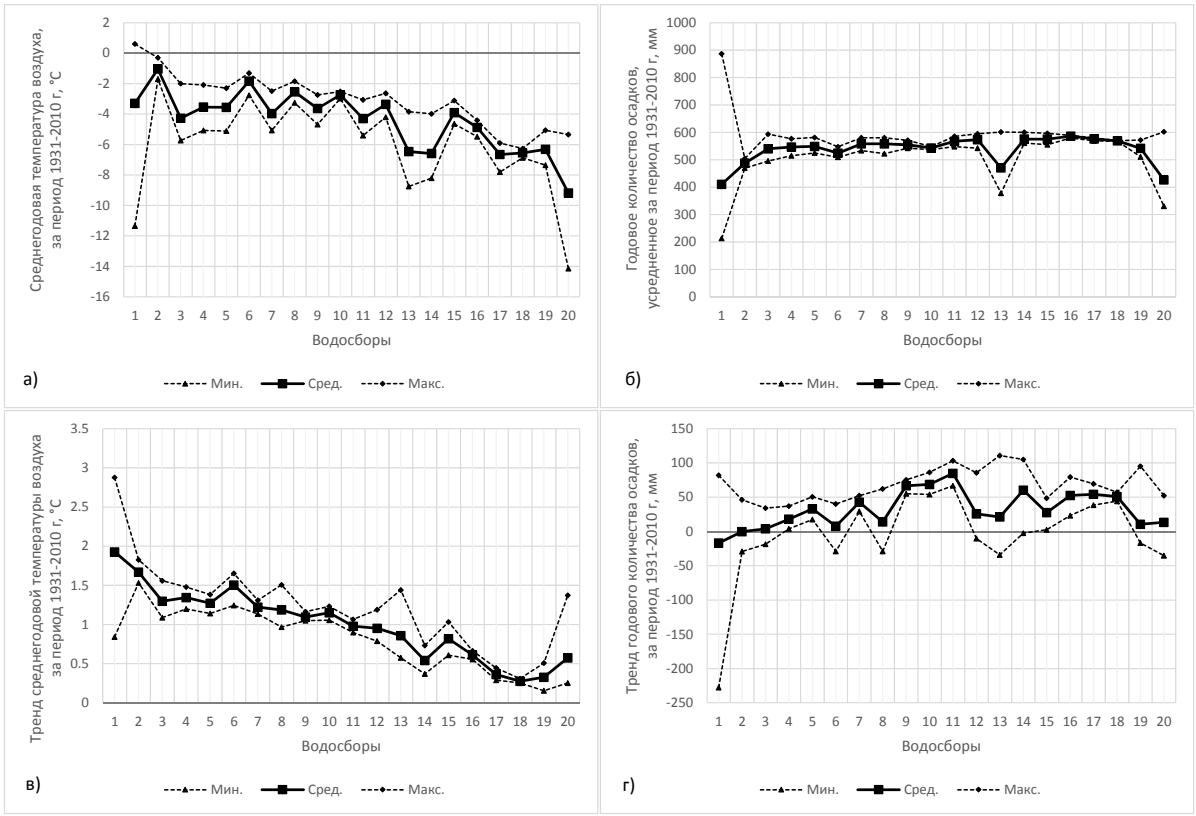


Рис. 2. Пространственно-временная вариация за период 1931–2010 гг. среднегодовых температур воздуха и годовых осадков для 20 ключевых водосборов притоков р. Енисей (названия водосборов приведены на рис. 3.): среднегодовая температура воздуха (а); среднемноголетнее годовое количество осадков (б); тренд среднегодовой температуры воздуха (в); тренд годового количества осадков (г)

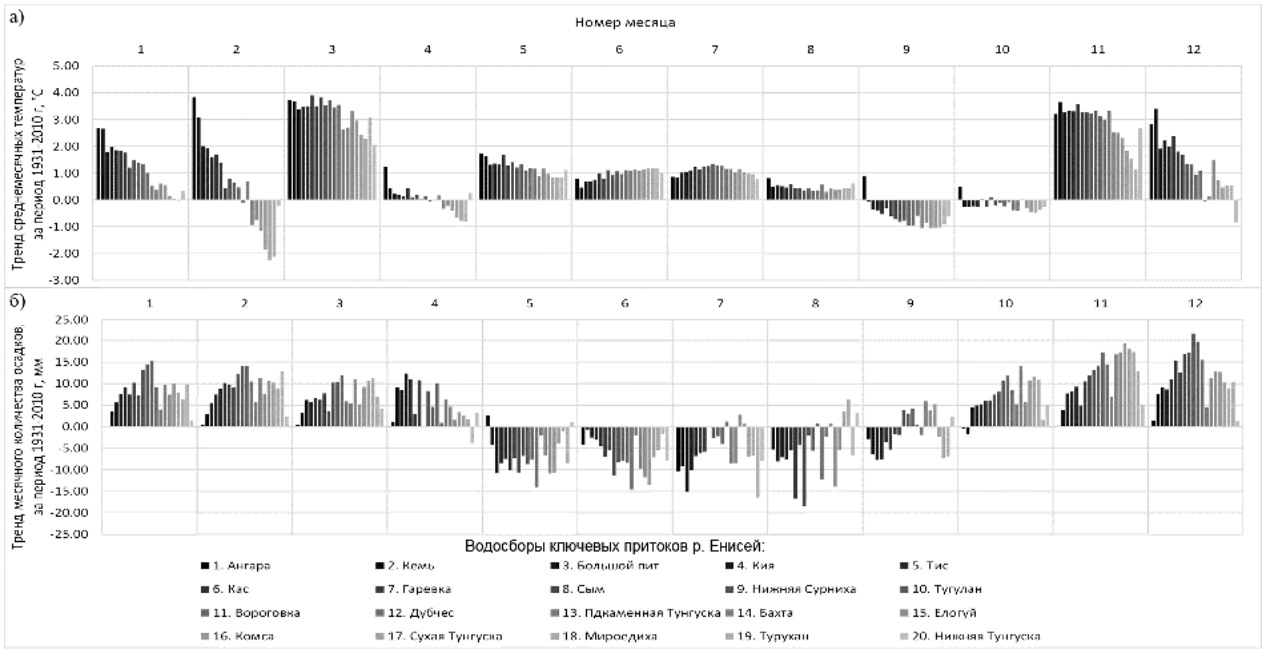


Рис. 3. Распределение трендов среднемесячных температур воздуха (а) и количества месячных осадков (б) для 20 ключевых водосборов притоков р. Енисей за период 1931–2010 гг.

Представленные на рис. 3 тренды среднемесячных температур воздуха и суммы месячных осадков показывают значительную сезонную и пространственную вариации по водосборам. Анализ распределения трендов среднемесячных температур показывает преимущественно высокий положительный (до 3,8 °С) тренд температур зимних месяцев и марта, который наряду с ноябрем выделяется значительным положительным температурным трендом по всем водосборам. Преобладающий отрицательный температурный тренд (до –1 °С) проявляется в межсезонья (апрель, сентябрь и октябрь). В апреле и, в особенности, в феврале наблюдается смена знака температурного тренда с положительного на отрицательный в районе водосбора *13* – Подкаменная Тунгуска (рис. 3, *а*).

Еще более четко выделяются сезонные изменения на графике распределения трендов месячных осадков (рис. 3, *б*). Наблюдается четкое снижение (до 17 мм) осадков вегетационного периода (май – август) на фоне преобладающего роста в остальные месяцы.

Следует отметить, что амплитуда месячных и годовых трендов осадков достигает максимума в водосборах, расположенных в зоне средней тайги, снижаясь к северу и югу. Иная картина у широтного распределения трендов среднемесячных температур. Величина тренда среднегодовых температур и большинства среднемесячных составляющих (ноябрь – апрель) уменьшается с юга на север. Обусловлено это, скорее всего, буферным эффектом северных океанических воздушных масс влияние, которых снижается с севера на юг из-за удаления от побережья и горных барьеров Среднесибирского плоскогорья. Последнее подтверждается достоверной обратной зависимостью (рис. 4) между величиной тренда среднегодовых и большинства среднемесячных температур с показателем степени доступности территории воздушным массам северного побережья (экспонированность, %), рассчитанного по цифровой модели рельефа местности [3].

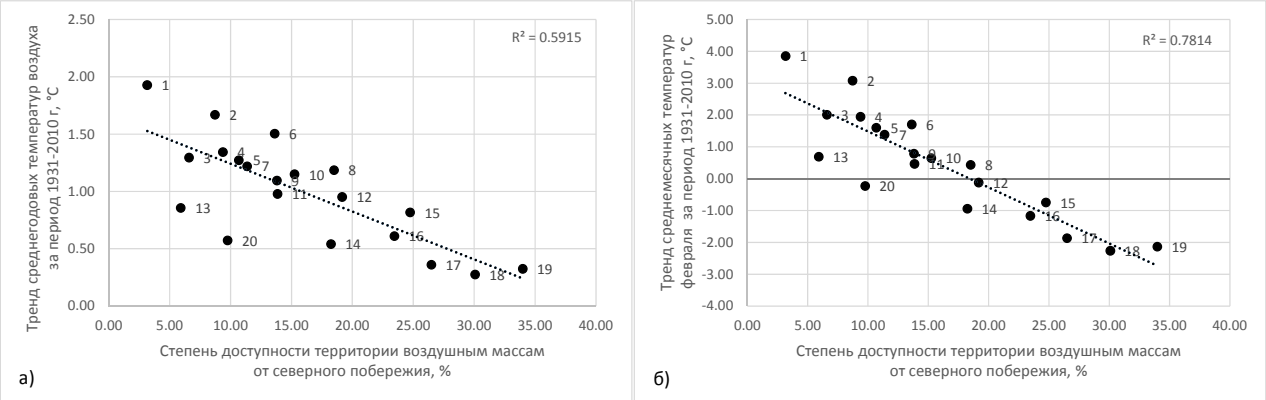


Рис. 4. Связь степени доступности территории воздушным массам от северного побережья (экспонированность территории, Onuchin, 2014) с трендом среднегодовых температур воздуха (а) и среднемесячных температур февраля (б) за период 1931–2010 гг. для 20-ти ключевых водосборов притоков р. Енисей (номер водосбора указан для каждой точки, названия – на рис. 3)

Сформированные слои разносезонных климатических характеристик (средние значения, разбросы и тренды), привязанные к водосборам притоков р. Енисей вошли в климатический блок разрабатываемой ГИС «Бассейн нижнего Енисея», который используется в задачах анализа и моделирования процессов в биогеоценозах Приенисейской Сибири.

Работа выполнена при поддержке РНФ 14-24-00113, РФФИ 18-05-60203 и РФФИ 20-05-00095.

Список литературы

1. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations – the CRU TS3.10 Dataset / I. Harris, P. D. Jones, T. J. Osborn, D. H. Lister // Int. J. Climatol. 34, 2014. P. 623–642. https://doi.org/10.1002/joc. 3711

2. *Mitchell T. D., Jones P. D.* An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids // Int. J. Climatol. 2005. Vol. 25. P. 693–712. https://doi.org/10.1002/joc.1181

3. Modeling air temperature changes in Northern Asia / A. Onuchin, M. Korets, A. Shvidenko, T. Burenina, A.Musokhranova // Global and Planetary Change. 2014. Vol. 122. P. 14–22. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2014.07.011

УДК 551.583

Исследование динамики снежного покрова на территории Иркутской области во взаимосвязи с крупномасштабными циркуляционными факторами

К. А. Лощенко (loshchenko@bk.ru)

Иркутский государственный университет», г. Иркутск

Аннотация. Статья посвящена исследованию статистических характеристик высоты снежного покрова на территории Иркутской области за период 1980–2018 гг. Проанализировано влияние циркуляционных и синоптических условий на разных высотах тропосферы в зимние месяцы в годы с экстремальными значениями высоты снежного покрова в исследуемом регионе. Оценивался уровень статистической связи между вариациями высоты снежного покрова с климатическими индексами Северного полушария.

Ключевые слова: Иркутская область, снежный покров, климатические индексы, циркуляция.

Введение

Снежный покров имеет важное климатическое значение, влияет на составляющие радиационного и теплового баланса, характеристики освещенности, условия произрастания озимых культур, работу различных видов транспорта и т. д. Исследования характеристик снежного покрова носят чаще эпизодический, чем регулярный характер. Во многом, это связано со сложностями получения оперативной информации и отчасти с большой пространственно-временной изменчивостью характеристик снежного покрова даже в пределах отдельно взятого региона [4].

Не является исключением и объект нашего исследования – территория Иркутской области, где условия формирования снежного покрова находятся в тесной взаимосвязи с климатическими, орографическими и циркуляционными факторами. Вариации статистических характеристик снежного покрова представляют интерес в первую очередь для сельского хозяйства, строительства, бесперебойной работы транспорта, коммунального хозяйства и других потребителей данного вида информации.

Методы исследований

В работе исследован многолетний режим высоты снежного покрова по данным десяти метеорологических станций (Наканно, Ербогачен, Ика, Киренск, Мамакан, Ершово, Братск, Казачинское, Орлинга, Иркутск), расположенных в разных физико-географических районах Иркутской области в период с ноября по март 1980–2018 гг. [5]. Так как формирование снежного покрова связано с выпадением атмосферных осадков, проводилось исследование атмосферных осадков с подразделением выпавших в дневные и ночные часы суток. Предполагалось, что, снег, выпавший в дневные часы, более подвержен таянию, чем в ночные часы суток, что необходимо учитывать как в периоды формирования и разрушения устойчивого снежного покрова, так и в зимние месяцы, особенно в крупных городах, где альбедо выпавшего снега значительно уменьшается вследствие влияния антропогенных факторов.

Для статистической оценки связей межгодовых вариаций высоты снежного покрова, температуры воздуха и сумм выпавших атмосферных осадков, были рассчитаны коэффициенты парной корреляции. Были выбраны станция Наканно, которая по синоптико-климатическому районированию относится к Северному району Иркутской области и в наибольшей степени подвержена влиянию ныряющих циклонов. Станция Иркутск (Южный район) в холодный период года в наибольшей степени подвержена влиянию центров и гребней Азиатского антициклона и станция Братск, которая расположена в Центральном синоптико-климатическом районе и подвержена влиянию, как Азиатского антициклона, так и ложбин смещающихся севернее центров ныряющих циклонов.

Для определения вклада циркуляционных факторов в изменениях высоты снежного покрова на территории Иркутской области была использована типизация Б. Л. Дзердзеевского, продолжаемая Н. К. Кононовой [3]. Важной особенностью данной типизации является то, что она характеризует циркуляционные условия над внетропической зоной Северного полушария (т. е. включает район исследования – Иркутскую область), а через траектории смещения подвижных барических образований отражает основные пути переноса тепла и влаги, поэтому широко используется для анализа глобальных и региональных изменений климата. Согласно типизации в период с 1899 г. по настоящее время на территории Северного полушария сменилось три циркуляционные эпохи: две меридиональные (с 1899 по 1915 г. и с 1957 г. по настоящее время) и одна зональная (1916–1956 гг.) (табл.).

Таблица

Календарь смены циркуляционных эпох по Б. Л. Дзердзеевскому

Циркуляционная эпоха	Периоды внутри эпох	Годы
Меридиональная северная	-	1899–1915
Зональная	-	1916–1956
Меридиональная южная	I. Одновременное увеличение продолжительности меридиональных северных и южных процессов	1957–1969
	II. Повышенная продолжительность зональных процессов	1970–1980
	III. Быстрый рост продолжительности меридиональных южных процессов	1981–1998
	IV. Уменьшение продолжительности меридиональных южных процессов и рост меридиональных северных	1999-по настоящее время

Также в работе были проанализированы метеорологические и синоптические условия для периодов максимальных и минимальных значений высоты снежного покрова на территории Иркутской области и статистическая связь между характеристиками высоты снежного покрова на метеорологических станциях Иркутской области и климатическими индексами Северного полушария [1]. Рассматривался индекс северо-атлантического колебания (САК или NAO), который характеризует циркуляцию в умеренных широтах Северного полушария. Наибольшее влияние данный индекс оказывает на погодные и климатические условия Северного полушария в зимние месяцы, когда усилена

циклоническая деятельность в Атлантике. Считается, что данный индекс характеризует траектории смещения циклонов и связанные с ними адвективные потоки тепла вглубь материка.

Климатические индекс – Восточно-атлантическое колебание (East Atlantic, EA или ВАК) проявляется также в полях давления на территории Атлантико-Европейского региона, но центры ВАК, как правило, смещены на юго-восток по отношению к центрам САК. В результате часто ВАК определяется как «смещенный к югу» режим САК. EA/WR – колебание Восточная Атлантика – Западная Россия впервые открыли Barnston A. G. и Livezey R. E в 1987 г. во время анализа ЭОФ среднемесячных полей геопотенциала на уровне 700 гПа (3 км). Выделяют два основных центра этого колебания: в Западной Европе и на севере Каспийского моря и менее выраженный центр у побережья Португалии, который может смещаться в сторону Ньюфаундленда. Аналогично предыдущим индексам данный индекс хорошо выражен в зимний период [2].

В районе Скандинавского п-ова часто происходит образование в арктическом воздухе холодного антициклона или так называемого Скандинавского колебания (Сканд-Scand) [7]. WP – Западно-тихоокеанское колебание имеет два центра: (60° с. ш., 155° в. д.), (30° с. ш., 155° в. д.) и представляет собой ориентированный в меридиональном направлении диполь давления на западе Тихого океана. Установлено, что при положительной (отрицательной) фазе данного колебания проявляются соответственно положительные (отрицательные) аномалии на территории Чукотки, Магаданской области и на Камчатке. Аналогично аномалиям температур при положительной (отрицательной) фазе данного колебания в указанных выше регионах отмечается увеличение осадков (дефицит осадков).

Индекс PNA – Тихоокеанское-северо-американское колебание имеет следующие центры: (20° с. ш., 160° з. д.), (45° с. ш., 165° з. д.), (55° с. ш., 115° з. д.), (30° с. ш., 85° з. д.), которые расположены в районе Гавайских островов, севере Тихого океана, в Канаде и вблизи Мексиканского залива. Данное колебание оказывает существенное влияние на температурный режим и выпадение атмосферных осадков на территории Северной Америки. В Евразии влияние данного колебания проявляется преимущественно в аномалиях зимних и весенних температур на Чукотке [6].

Результаты исследований

Проанализируем пространственно-временные закономерности в распределении высоты снежного покрова на территории Иркутской области в современный период. Выявлено, что для большинства рассматриваемых в работе метеорологических станций максимум высоты снежного покрова наблюдается в марте (рис. 1). В пространственном отношении наибольшая высота наблюдается на северной станции Ербогачен и составляет в среднем 54 см, что в два раза больше значений на самой южной станции (Иркутск). В г. Иркутске высота снежного покрова в период с ноября по февраль в среднем возрастает в пять раз.

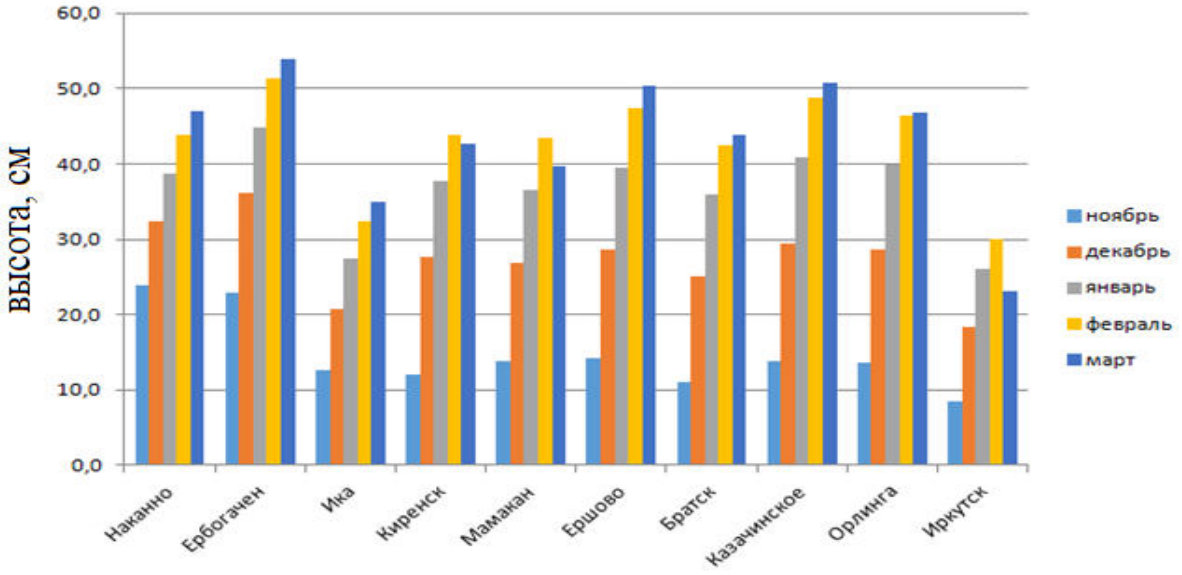


Рис. 1. Средние значения высоты снежного покрова (см) на метеорологических станциях Иркутской области в 1980–2018 гг.

Анализ многолетних данных высоты снежного покрова показал, что уже в сентябре в аномально холодные годы при крупномасштабном вторжении арктического холода на территории Иркутской области повсеместно возможно образование временного снежного покрова. В октябре на высокогорной станции Хамар-Дабан, где осадки выпадают преимущественно в виде снега, формируется устойчивый снежный покров. Его высота к концу месяца в среднем достигает 9 см. В конце октября над большей частью территории области устанавливается снежный покров. Его высота в среднем не превышает 5 см, но в северных районах может достигать 10 см и более. В ноябре по сравнению с октябрем на юге области она увеличивается в среднем в 2 раза, в северных районах в 2–3 раза, а на станции Хамар-Дабан составляет порядка 50–60 см, но в отдельные годы, может достигать больших отметок. В декабре высота снежного покрова над большей частью территории Иркутской области составляет в среднем около 30 см. В степной зоне она обычно не превышает 10–15 см, а на высокогорьях Байкальского хребта достигает ~2,5 м. В январе высота снежного покрова повсеместно возрастает, в среднем до 30–40 см, а в феврале увеличивается уже незначительно. Март характеризуется тем, что если по северу области и в высокогорных районах высота снега еще возрастает, достигая максимума, то на остальной территории области она уменьшается примерно в 2 раза и постепенно происходит его разрушение.

Как станции с тенденцией уменьшения высоты снежного покрова в исследуемый период выделяются Ика, Мамакан, Братск и Орлинга. Увеличение высоты снега отмечалось на станциях Киренск, Ершово и Казачинское. Значения коэффициентов парной корреляции между изменениями высоты снежного покрова и определяющими его формирование факторами – атмосферными осадками варьировали на исследуемых станциях от 0,01 до 0,60, с температурой воздуха от -0,01 до -0,53, т. е. уровень статистической связи по коэффициенту детерминации не превышал 36 % в общей дисперсии временного ряда. Инте-

ресно, что значения коэффициентов парной корреляции уменьшались в середине зимы в период максимального развития Азиатского антициклона.

Небольшие значения коэффициентов линейной корреляции указывают на то, что высота снежного покрова зависит от совокупного влияния многих факторов – местоположения метеорологической станции (горная или равнинная), ориентации горных хребтов (наветренные или подветренные склоны), близости крупных рек, водоемов и лесных массивов, синоптических и циркуляционных условий и т. д.

Анализ средних значений высоты снежного покрова в различные циркуляционные эпохи показал, что увеличение высоты снежного покрова отмечалось в эпоху быстрого роста меридиональных южных процессов, когда чаще смещались южные циклоны с меридиональными потоками теплого влажного воздуха в передних частях высотных макроложбин. Наименьшая высота снежного покрова в различные месяцы холодного периода отмечалась при усилении зонального переноса в 1970–1980 гг. (рис. 2).

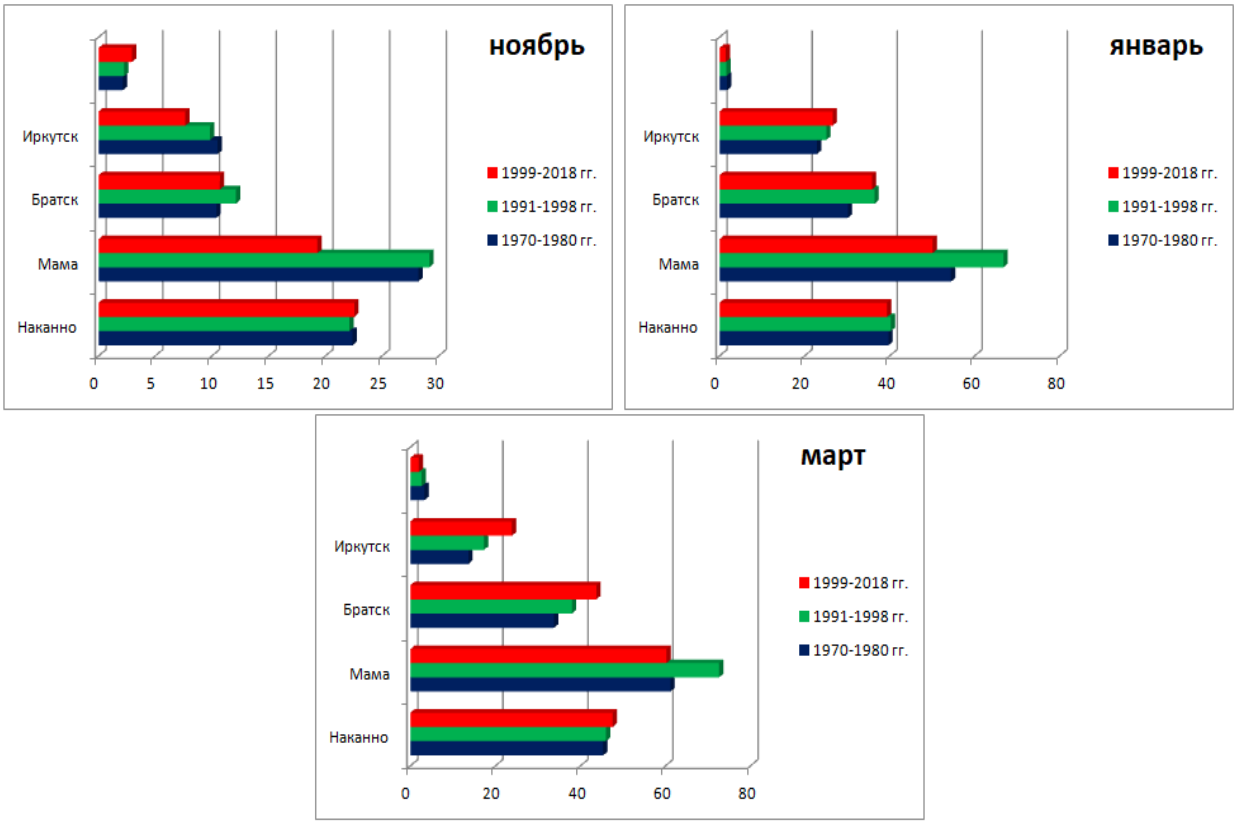


Рис. 2. Средние значения высоты снежного покрова (см)
в различные периоды современной циркуляционной эпохи
на метеорологических станциях Иркутской области в 1970–2018 гг.

На рис. 3 показаны карты средних значений и аномалий метеорологических величин для «снежной» зимы 1999 г., когда на территории Иркутской области отмечались положительные аномалии высоты снежного покрова. В качестве примера «малоснежной» зимы была рассмотрена зима 1990 г., когда преобладали отрицательные аномалии высоты снежного покрова. Хорошо видны

различия в интенсивности и площади Азиатского антициклона, увеличение высоты снежного покрова сопровождалось развитием гребня тепла с юга и, как следствие, увеличением термических и барических градиентов, что также было выражено в усилении ветров южной составляющей, с которыми связано увеличение тепло- и влагосодержания воздушных масс.

Анализ коэффициентов парной корреляции между высотой снежного покрова и климатическими индексами показал, что наибольших значений они достигают с показателями восточно-атлантического колебания, полярным и скандинавским индексом и индексом тихоокеанско-северо-американское колебание.

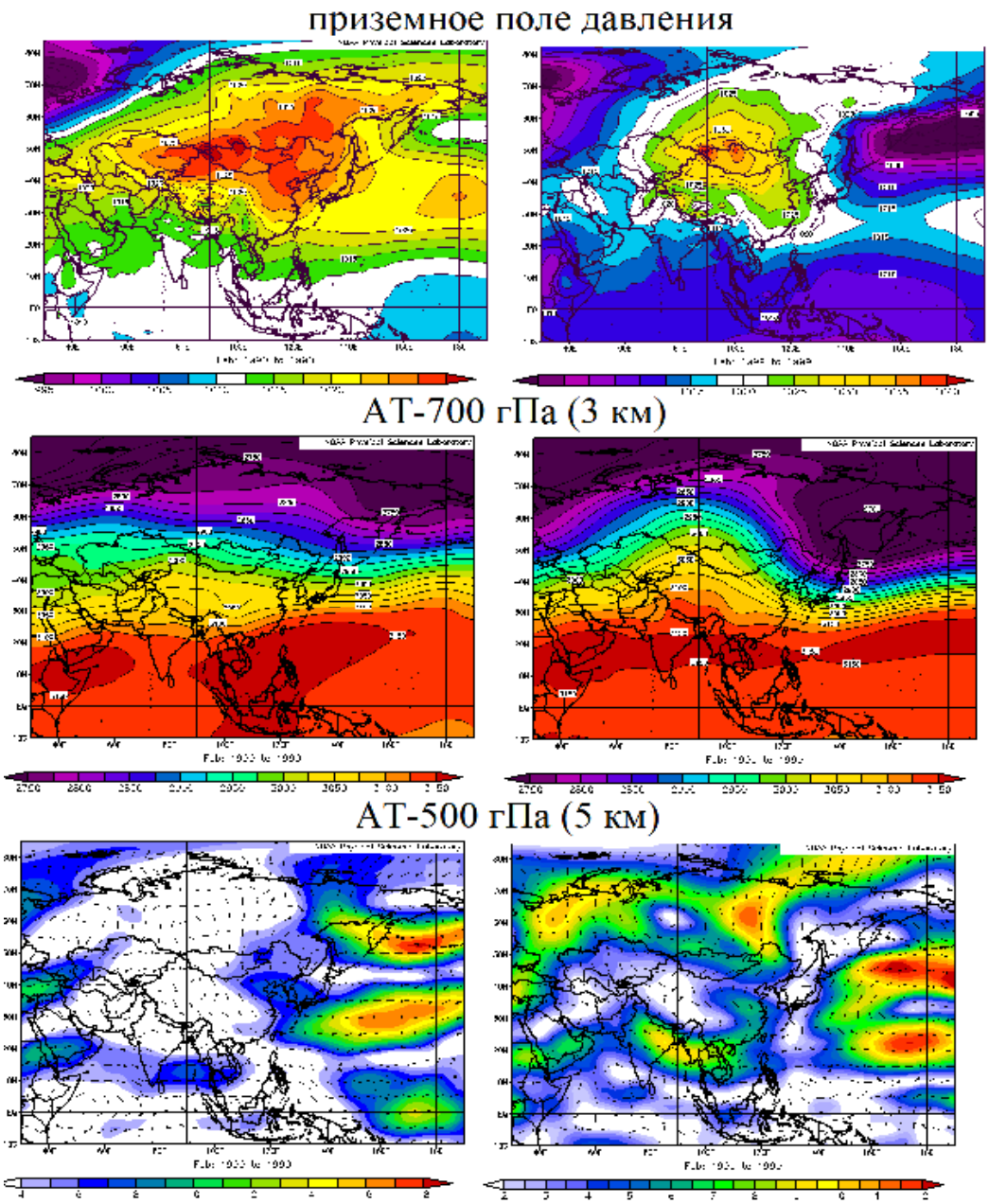


Рис. 3. Карты средних значений приземного давления, геопотенциала АТ-700 гПа (3 км) и аномалий вектора ветра на уровне АТ-500 гПа (5 км) для периодов максимальных (февраль 1999 г.) и минимальных (февраль 1990 г.) значений высоты снежного покрова в Иркутской области

Выводы

Получены климатические характеристики снежного покрова. Установлено, что над значительной частью территории Иркутской области он устанавливается в конце октября, разрушается в апреле, максимальной высоты (в среднем 30–40 см) достигает в феврале, по северу области и в высокогорных районах – в марте. На севере высота снежного покрова в среднем в два раза больше, чем по югу области.

В период формирования и устойчивого снежного покрова на территории Иркутской области превалирует вклад осадков, выпавших в ночные часы суток, а весной – выпавших в дневные часы, что определяет благоприятные условия для более быстрого становления и разрушения снежного покрова.

Отсутствие статистически значимых связей между высотой снежного покрова и месячными суммами атмосферных осадков на территории Иркутской области указывает на то, что в формировании снежного покрова наряду с выпавшими осадками большой вклад вносят орография местности и циркуляционные условия.

Исследования вклада циркуляционных факторов выявило увеличение высоты снежного покрова в эпоху быстрого роста меридиональных южных процессов (1981–1998 гг.) при активизации циклонической деятельности и усилении меридиональных потоков с юга, а уменьшение высоты снежного покрова при усилении зонального переноса в 1970–1980 гг.

Установлены различия в характеристиках Азиатского антициклона, структуре высотных барических полей и ветровых потоков на высотах в периоды максимальных и минимальных значений высоты снежного покрова на метеорологических станциях Иркутской области.

Среди климатических индексов в межгодовых вариациях высоты снежного покрова на территории Иркутской области выделяются восточно-атлантическое колебание, полярный индекс и тихоокеанско-северо-американское колебание, но уровень статистических связей, оцениваемых по коэффициенту детерминации, в большинстве случаев не превышал 10–15 %.

Список литературы

1. Климатическая изменчивость индекса северо-атлантического колебания (САК) и связанные с ней флуктуации температуры / В. Н. Еремеев, А. Н. Жуков, М. А. Крашенинникова, А. А. Сизов, А. Е. Чехлан // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2014. № 2. С. 53–60.

2. *Киктев Д. Б., Круглова Е. Н., Куликова И. А.* Влияние крупномасштабных мод атмосферной циркуляции на режим температуры и осадков в Арктике // Метеорология и гидрология. 2018. № 1. С. 5–20.

3. *Кононова Н. К.* Изменения циркуляции атмосферы Северного полушария в XX–XXI столетиях и их последствия для климата // Фундаментальная и прикладная климатология. 2015. Т. 1. С. 133–162.

4. *Кононова Н. К.* Влияние циркуляции атмосферы на формирование снежного покрова на северо-востоке Сибири // Лед и снег. 2012. Т. 52, № 1. С. 38–53.

5. Опасные явления погоды на территории Сибири и Урала / под ред. С. Д. Кошинского и А. Д. Дробышева. Л. : Гидрометеоиздат, 1986. Ч. 2 : Иркутская область, юго-западная часть Бурятской АССР. 243 с.

6. *Хен Г. В., Устинова Е. И., Сорокин Ю. Д.* Основные климатические индексы для северной части Тихого океана: природа и история (литературный обзор) // Известия ТИНРО (Тихоокеанского научно-исследовательского рыбохозяйственного центра). 2019. Т. 197. С. 166–181.

7. Cholaw Bueh, Hisashi Nakamura Scandinavian pattern and its climatic impact // Q. J. R. Meteorol. Soc. 2007. Vol. 133. P. 2117–2131.

УДК 504.064.36(571.53)(-21)

Оценка уровня загрязнения атмосферного воздуха г. Усолья-Сибирского

С. А. Новикова (novikovasveta41@mail.ru)

Иркутский государственный университет, г. Иркутск

Аннотация. Исследование посвящено анализу состояния воздушного бассейна по данным о выбросах вредных веществ и метеорологических параметрах, зафиксированным на автоматической станции контроля загрязнения атмосферы, расположенной в г. Усолье-Сибирском. Проведена оценка уровня загрязнения атмосферы г. Усолья-Сибирского, создаваемого источниками антропогенного происхождения.

Ключевые слова: промышленные предприятия, автотранспортные средства, автоматическая станция контроля загрязнения атмосферы, метеорологические параметры, концентрации вредных веществ, санитарно-гигиенические нормативы

Введение

Усолье-Сибирское – город в Иркутской области, расположенный в 70 км к северо-западу от г. Иркутска, на левом берегу р. Ангары [3]. Численность населения составляет 76 047 чел. (на 1 января 2020 г.) [15], площадь города – 7,4 тыс. га. Распоряжением Правительства РФ от 29.07.2014 № 1398-р «Об утверждении перечня моногородов», г. Усолье-Сибирское включен в список моногородов Российской Федерации с наиболее сложным социально-экономическим положением [9]. Климат города резко континентальный с суровой и продолжительной зимой, коротким жарким летом. На климат города оказывают существенное влияние водные массы оз. Байкал и Братского водохранилища.

В соответствии с докладом Минприроды г. Усолье-Сибирское входит в список 20 городов России с самым загрязненным воздухом [6]. Источниками загрязнения атмосферы являются автомобильный транспорт и промышленные предприятия: ООО «Руссоль», машиностроительный завод ОАО «УЗГО» (производство оборудования для горных работ, ныне – ОАО ПО «Усольмаш»), завод «Усольехимфарм» – производитель фармацевтического сырья, фанерно-спичечный комбинат «Байкал», ОАО «Кристалл» (производство монокристаллов и сцинтилляционных детекторов). Ранее в городе функционировали компании ООО «Усольехимпром», ООО «Усолье-Сибирский силикон» и ООО «Химстроймонтаж». В настоящий момент предприятия фактически прекратили свою деятельность: производственные процессы остановлены, оборудование демонтируется, происходит ликвидация, обеззараживание и нейтрализация химически опасных веществ, находящихся в больших количествах на промплощадке [12–14].

Усолье-Сибирское связано автобусными маршрутами с поселками и селами Усольского района, а также с г. Ангарском и Иркутском. Внутригородской транспорт представлен трамваями, автобусами и маршрутными такси. Через город проходит федеральная магистраль Р255 «Сибирь» (участок ранее существовавшего московского тракта), в результате чего выхлопные газы более

15 тыс. транзитных автомобилей каждые сутки поступают в атмосферу. В часы пик участок дороги через населенный пункт преодолевается более чем за час. Таким образом, проблема загрязнения атмосферного воздуха антропогенными примесями является актуальной для г. Усолья-Сибирского.

Методы исследования и материалы

Контроль выбросов загрязняющих веществ в атмосферу – одна из важнейших задач специалистов в области охраны окружающей среды. В г. Усолье-Сибирском работают автоматические станции контроля загрязнения атмосферного воздуха – АСК-А. Кроме того, на АСК-А осуществляется контроль основных метеорологических параметров и передача по радиоканалу полученных оперативных данных в центр сбора и обработки информации. Данные, фиксируемые на АСК-А, характеризуют выбросы от промышленных предприятий, автотранспортных средств, а также дальний перенос загрязняющих веществ. В настоящей работе проведена оценка уровня загрязнения атмосферного воздуха г. Усолья-Сибирского. С помощью методов математической статистики были обработаны данные о выбросах вредных веществ и метеорологических параметрах за период 2002–2018 гг., зафиксированных на АСК-А на ул. Ватутина. Кроме того, были рассчитаны коэффициенты корреляции между концентрациями загрязняющих веществ: оксид углерода (CO), диоксид азота (NO_2), диоксид серы (SO_2), взвешенные вещества, бенз(а)пирен, хлорида водорода и метеорологическими параметрами (температура, влажность, давление, скорость и направление ветра) в 2007 г., как наиболее показательном за рассматриваемый период (табл.).

Таблица

Коэффициенты корреляции между выбросами загрязняющих веществ и метеорологическими параметрами, зафиксированными на АСК-А г. Усолье-Сибирского (ул. Ватутина) в 2007 г.

Концентрации загрязняющих веществ, мг/м^3	Метеорологические параметры				
	T, °C	*H*, %	*P*, Гпа	*V*, м/с	*N*, градусы
Взвешенные вещества	–0,398	0,337	0,678	–0,988	0,853
Диоксид серы	–0,326	0,174	0,397	–	–
Оксид углерода	–0,745	0,151	0,791	–0,906	0,999
Диоксид азота	–0,865	0,479	0,796	–0,970	0,989
Бенз(а)пирен	–0,848	0,526	0,612	–0,693	0,916
Хлорид водорода	–0,412	-0,164	0,465	0,573	0,843

Примечание: T – температура окружающей среды; *H* – влажность воздуха; *P* – атмосферное давление; *V* – скорость ветра; *N* – направление ветра; «–» – нет линейной зависимости.

Коэффициенты корреляции между концентрациями всех вредных веществ и атмосферным давлением – положительные, следовательно, между этими показателями прослеживается прямая линейная связь. Коэффициенты корреляции между концентрациями исследуемых загрязняющих веществ и температурой, а также скоростью ветра – отрицательные (кроме хлорида водорода), следовательно, между этими показателями прослеживается обратная линейная связь. Коэффициенты корреляции между концентрациями хлорида водорода и

влажностью – отрицательные, между концентрациями остальных веществ и влажностью, а также направлением ветра – положительные (см. табл. 1).

По данным, зарегистрированным на АСК-А г. ул. Ватутина, построены диаграммы средних концентраций вредных веществ за период 2002–2018 гг. (рис. 1–3). На основе данных средних концентраций взвешенных веществ, диоксида азота (NO_2), бенз(а)пирена и метеорологических параметров (температуры, давления, влажности), зафиксированных на АСК-А за 2002–2013 гг., были построены графики зависимостей, представленные на рис. 4–6.

Результаты и их обсуждение

По результатам проведенных расчетов (см. табл. 1) наибольшими коэффициентами корреляции, свидетельствующими о *«весьма высоких»* прямых и обратных связях соответственно, характеризуются показатели концентраций: взвешенных веществ и скорости ветра (–0,988); оксида углерода и скорости ветра (–0,906); диоксида азота, скорости и направления ветра, соответственно (–0,970; 0,989); бенз(а)пирена и направления ветра (0,916).

«Высокими» прямыми и обратными связями характеризуются коэффициенты корреляции между такими показателями, как: взвешенные вещества и направление ветра (0,853); оксид углерода и температура, атмосферное давление, соответственно (–0,745; 0,791); диоксид азота и температура, атмосферное давление (–0,865; 0,796); бенз(а)пирен и температура (-0,848); хлорид водорода и направление ветра (0,843).

«Заметными» прямыми и обратными связями характеризуются коэффициенты корреляции между такими показателями, как: взвешенные вещества и атмосферное давление (0,678); бенз(а)пирен и влажность, давление, скорость ветра (0,526; 0,612; –0,693), соответственно; хлорид водорода и скорость ветра (0,573).

«Умеренными» прямыми и обратными связями характеризуются показатели концентраций взвешенных веществ и температуры, влажности (-0,398; 0,337); диоксида серы и температуры, атмосферного давления, соответственно (-0,326; 0,397); диоксида азота и влажности (0,479); хлорида водорода и температуры, атмосферного давления (–0,412; 0,465).

«Слабыми» прямыми и обратными связями характеризуются коэффициенты корреляции между такими показателями, как: хлорид водорода, оксид углерода, диоксид серы и влажность (–0,164; 0,151; 0,174), соответственно.

Наибольшие значения средних концентраций взвешенных веществ были отмечены в 2003, 2004, 2005 гг., наименьшие – в 2012, 2013, 2015 гг. Превышения среднесуточной предельно-допустимой концентрации – $ПДК_{сс}$ (0,15 мг/м^3) наблюдались в 2002–2005, 2007–2009, 2016–2017 гг. (см. рис. 1). Превышений максимально разовых предельно-допустимых концентраций ($ПДК_{мр}$) (0,5 мг/м^3) за весь период наблюдения не установлено (см. рис. 1).

Максимальные значения средних концентраций диоксида азота (NO_2) зафиксированы в 2002–2005 гг. и 2009 г., минимальные – в 2016–2018 гг. Превышения $ПДК_{сс}$ (0,004 мг/м^3) прослеживались в течение всего периода наблюдения. Превышений $ПДК_{мр}$ (0,2 мг/м^3) для данного вещества за весь период наблюдения не выявлено (см. рис. 2).



Рис. 1. Динамика средних концентраций взвешенных веществ, зарегистрированных на АСК-А г. Усолья-Сибирского (ул. Ватутина) в 2002–2018 гг.



Рис. 2. Динамика средних концентраций диоксида азота (NO_2), зарегистрированных на АСК-А г. Усолья-Сибирского (ул. Ватутина) в 2002–2018 гг.

Наибольшие значения средних концентраций бенз(а)пирена ($C_{20}H_{12}$) зарегистрированы в 2017–2018 гг., наименьшие – в 2010 г. Превышения $ПДК_{сс}$ (0,000001 мг/м^3) выявлены для всего периода наблюдения. Значение $ПДК_{мр}$ для данного вещества не установлено (см. рис. 3).

На рис. 4 прослеживается динамика изменений концентрации взвешенных веществ и температуры воздуха. На графике видно, что при повышении температуры, концентрация взвешенных веществ в большинстве случаев пада-

ет, а при понижении температуры – возрастает. Такая закономерность прослеживается до 2010 г., затем концентрация постепенно уменьшается. Таким образом, чем ниже температура окружающей среды, тем создаются наиболее неблагоприятные условия для рассеивания концентраций загрязняющих веществ.



Рис. 3. Динамика средних концентраций бенз(а)пирена ($C_{20}H_{12}$), зарегистрированных на АСК-А г. Усолья-Сибирского (ул. Ватутина) в 2003–2018 гг.

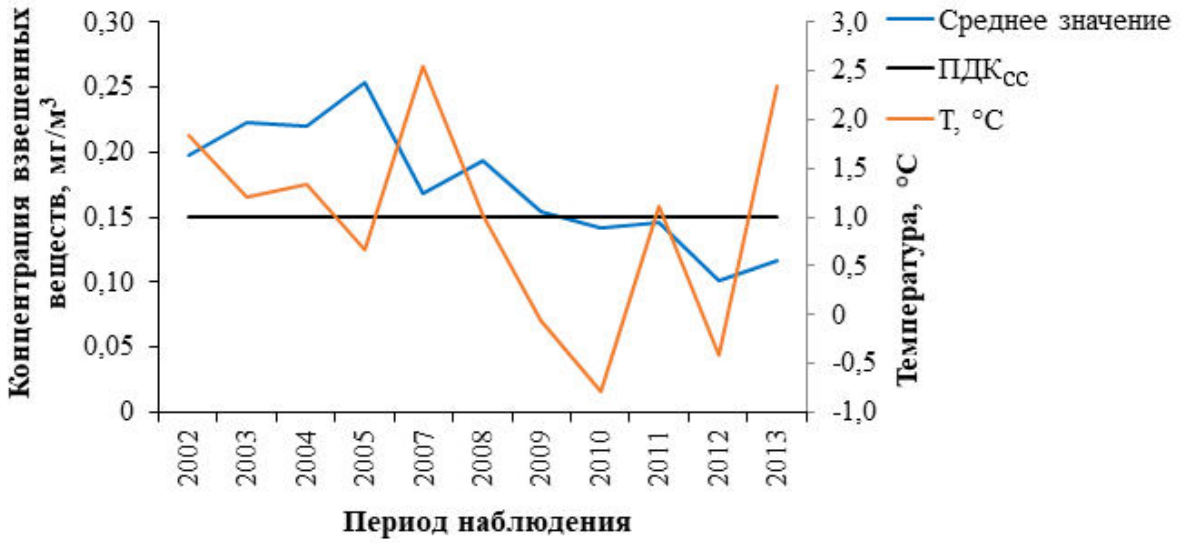


Рис. 4. Динамика средних концентраций взвешенных веществ и температуры, зафиксированных на АСК-А г. Усолья-Сибирского (ул. Ватутина) в 2002–2013 гг.

На рис. 5 прослеживается зависимость концентрации диоксида азота (NO_2) от давления. На графиках видно, что при увеличении давления, концентрация диоксида азота повышается, а при понижении давления – падает. Следовательно, чем больше атмосферное давление, тем создаются наиболее неблагоприятные условия для рассеивания концентраций загрязняющих веществ.

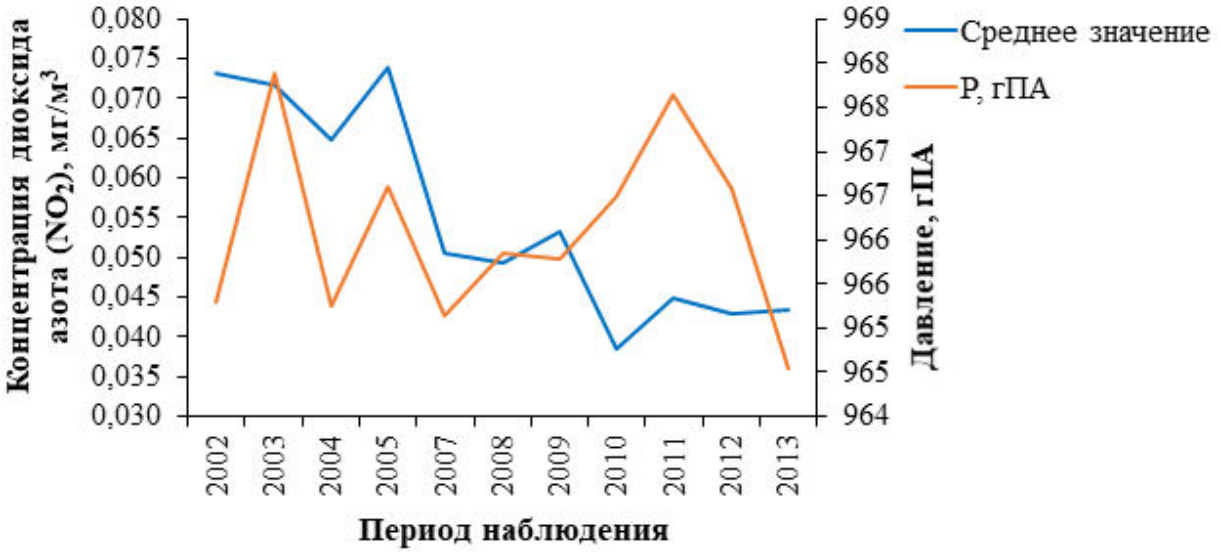


Рис. 5. Динамика средних концентраций диоксида азота (NO_2) и давления, зафиксированных на АСК-А г. Усолья-Сибирского (ул. Ватутина) в 2002–2013 гг.

На рис. 6 прослеживается динамика изменений концентрации бенз(а)пирена ($C_{20}H_{12}$) и влажности. На графике можно заметить, что с повышением влажности воздуха концентрация бенз(а)пирена увеличивается, с понижением влажности – концентрация уменьшается. Можно сделать аналогичный вывод: чем выше влажность воздуха, тем создаются наиболее неблагоприятные условия для рассеивания концентраций загрязняющего вещества.

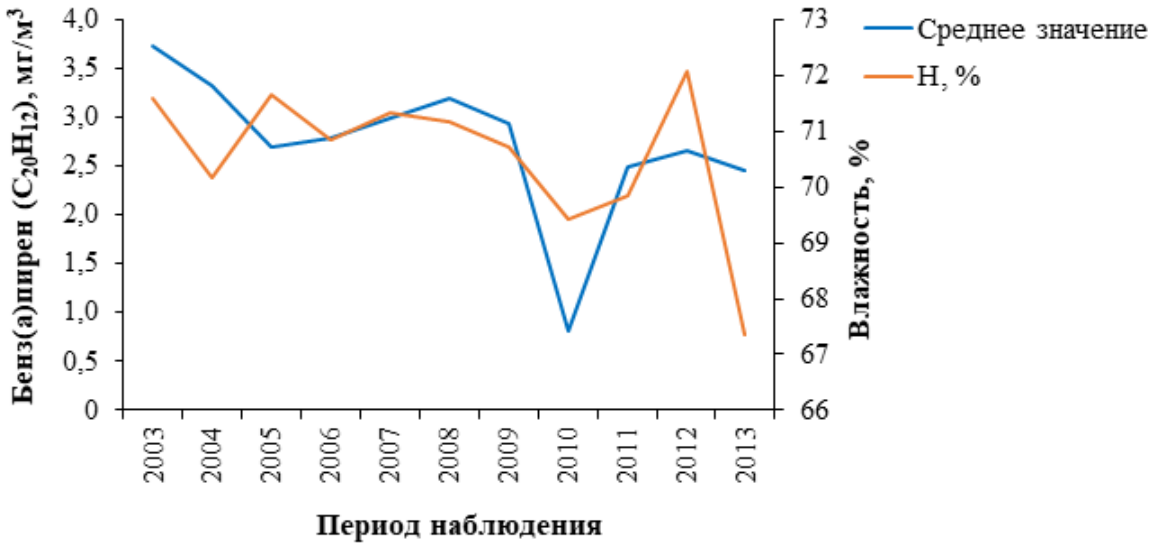


Рис. 6. Динамика средних концентраций бенз(а)пирена ($C_{20}H_{12}$) и влажности, зафиксированных на АСК-А г. Усолья-Сибирского (ул. Ватутина) в 2003–2013 гг.

Выводы

Усолье-Сибирское – один из старейших промышленно-транспортных городов в Приангарье, входящий в состав Иркутской агломерации. В настоящее время уровень загрязнения атмосферы города высок. По ряду загрязняющих веществ таких, как взвешенные вещества, диоксид азота, бенз(а)пирен наблю-

даются превышения самых жестких санитарно-гигиенических нормативов – $ПДК_{сс}$, что создает потенциальную угрозу для здоровья населения города. Более того, в результате проведенного исследования установлено, что при низких скоростях ветра (штиле) и температурах воздуха, а также повышенных значений влажности воздуха и атмосферного давления создаются неблагоприятные условия для рассеивания примесей в атмосферном воздухе.

Необходимо отметить, что экологическую обстановку г. Усолья-Сибирского усугубляет напряженная ситуация с ранее функционирующим «Усольехимпром», которое длительное время являлось основным градообразующим предприятием, производственная площадка которого занимала 610 га [7]. После ликвидации производства в 2017 г. из-за банкротства без надлежащего контроля оказались накопители химических отходов, трубопроводы, специализированная железнодорожная станция, а также емкости с остатками продуктов химического производства. В период 1970–1998 гг. на «Усольехимпром» работал цех ртутного электролиза, который сбросил в окружающую среду около 1461 т тяжелого металла, из которых 60 т попали в Ангару [10]. В результате прекращения деятельности цеха его территория не была должным образом демеркуризирована. Под зданием цеха продолжает находиться ртуть. В шламонакопитель было сброшено около 725 т ртути [11, 1]. Полномочия по ликвидации накопленного вреда окружающей среде были переданы Правительству Иркутской области, но несмотря на это более 1,7 млн т химических отходов в шламонакопителях, а также объекты химического производства находятся в ненадлежащем состоянии [8]. Периодически на промышленной площадке возникают утечки высокотоксичных химических соединений и регулярно регистрируются превышение норм предельно-допустимых концентраций (ПДК) опасных веществ [4].

С октября 2018 г. в городе действует режим ЧС из-за опасности утечек ядовитых веществ с предприятия «Усольехимпром» [5]. На 1 августа 2020 г. ПДК ртути на предприятии превышена почти в 34 тыс. раз в сточных водах, и в 367 раз – в атмосферном воздухе [5]. По распоряжению президента России В. В. Путина от 30 июля 2020 г. для решения экологических проблем по очистке территории выделено более 400 млн руб. [2]. 3 августа 2020 г. Минобороны РФ отправило специалистов войск радиационной, химической и биологической защиты (РХБЗ) для помощи в ликвидации угрозы загрязнения окружающей среды г. Усолья-Сибирского. К 2021 г. намечена реализация проекта по рекультивации загрязненной территории [5].

Таким образом, необходимо разработать целый комплекс природоохранных мероприятий, направленных на снижение выбросов загрязняющих веществ в атмосферу и улучшение экологической ситуации г. Усолья-Сибирского и региона в целом.

Список литературы

1. Более 700 тонн ртути сбросили в сточные воды в Иркутской области. URL: https://360tv.ru/news/chp/bolee-700-tonn-rtuti-sbrosili-v-stochnye-vody-v-irkutskoj-oblasti/ (дата обращения: 05.09.2020).

2. Во исполнение поручения Президента образована межведомственная рабочая группа по обеспечению предупреждения и устранения загрязнения окружающей среды на территории города

Усолье-Сибирское в Иркутской области. URL: http://government.ru/news/40151/ (дата обращения: 05.09.2020).

3. Закон Иркутской области от 16 декабря 2004 года № 91-оз «О статусе и границах муниципального образования «Город Усолье-Сибирское» Иркутской области». URL: http://docs.cntd.ru/document/802020866 (дата обращения: 05.09.2020).

4. Иркутский «Чернобыль» дал о себе знать – утечка эпихлоргидрина. URL: https://regnum.ru/news/2759713.html (дата обращения: 08.09.2020).

5. Минобороны отправило специалистов РХБЗ в Усолье-Сибирское, где выявили загрязнение ртутью. URL: https://tass.ru/proisshestviya/9108529 (дата обращения: 08.09.2020).

6. Минприроды назвало российские города с самым грязным воздухом. РИА Новости. URL: https://ria.ru/20190904/1558267405.html (дата обращения: 08.09.2020).

7. Наследство «Усольехимпрома» уйдет в прошлое // Областная газета. 2019. 26 июня. URL: http://www.ogirk.ru/2019/06/26/nasledstvo-usolehimproma-ujdet-v-proshloe/ (дата обращения: 08.09.2020).

8. В г. Усолье-Сибирское осуждены работники химического предприятия, обвиняемые в попытке продажи отходов, содержащих ртуть. URL: https://www.irkproc.ru/ (дата обращения: 08.09.2020).

9. Распоряжение Правительства РФ от 29.07.2014 № 1398-р «Об утверждении перечня моногородов». URL: http://static.government.ru/media/files/41d4f68fb74d798eae71.pdf (дата обращения: 10.09.2020).

10. Ртуть вместо радиации. Почему глава Росприроднадзора сравнила «Усольехимпром» с Чернобылем. URL: http://www.vsp.ru/2019/07/30/rtut-vmesto-radiatsii/ (дата обращения: 10.09.2020).

11. Сотни тонн ртути скопились под предприятием в Иркутской области. URL: https://www.ntv.ru/novosti/1953720/?fb (дата обращения: 10.09.2020).

12. Уголовное дело возбудили по факту выброса в атмосферу химических веществ на промплощадке Усольехимпрома. URL: https://snews.ru/news/ugolovnoe-delo-vozbudili-po-faktu-vybrosa-v-atmosferu-himicheskih-veshchestv-na-promploshchadke (дата обращения: 10.09.2020).

13. Усольехимпром, где была утечка химикатов, возьмут под военизированную охрану. URL: https://tass.ru/sibir-news/5401314 (дата обращения: 10.09.2020).

14. «Фармасинтез» спасет Усолье-Сибирское. URL: https://ircity.ru/articles/30106/ (дата обращения: 10.09.2020).

15. Численность постоянного населения Российской Федерации по муниципальным образованиям на 1 января 2020 года. URL: http://web.archive.org/web/ 20200424113056/ https://www.gks.ru/storage/mediabank/Численность%20по%20MO_Site.xlsx (дата обращения: 10.09.2020).

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

УДК 551.501.7

Качество радиозондовых данных

А. М. Балагуров (a.balagurov@mail.ru)

Центральная аэрологическая обсерватория Росгидромета, г. Долгопрудный, Московская область

Аннотация. Ожидаемым результатом одного из главных направлений национального плана мероприятий адаптации к изменениям климата является развитие сети климатического мониторинга. В рамках данного направления в соответствии с одним из основных принципов организации планирования необходим мониторинг эффективности реализуемых мер, в том числе с установлением количественных показателей. В работе приведены сведения об оценке некоторых количественных показателей качества радиозондовых данных, обсуждаются варианты повышения точности и объема данных сети радиозондирования Росгидромета.

Ключевые слова: климат, аэрологическая сеть, качество данных, высота зондирования.

1. Обеспечение аэрологическими данными

В соответствии со Стратегией национальной безопасности Российской Федерации, утвержденной Указом Президента Российской Федерации от 31.12.2015 № 683, гидрометеорологическая безопасность, предусмотренная законодательством о гидрометеорологической службе, включена в содержание понятия национальной безопасности. В этой связи совокупность природных условий и факторов, создающих прямую или косвенную возможность нанесения ущерба объективно значимым потребностям личности, общества и государства в обеспечении их защищенности и устойчивого развития рассматривается в качестве одной из угроз национальной безопасности.

Аэрологическая информация о состоянии атмосферы является основой для анализа и прогноза погоды, метеорологического обеспечения авиации и вооруженных сил, других форм оперативного обслуживания населения и народного хозяйства. Наблюдательная сеть радиозондирования (114 станций на территории России, в том числе – 12 станций в Арктике) является основным средством получения данной информации. Результаты аэрологических измерений поступают в государственный фонд и международный обмен данными о состоянии природной среды. Точность, необходимый объем и своевременность получения этих данных определяет высокое качество прогнозов погоды, что позволяет снизить риски угрозы жизни населения, ущерба экономике страны от опасных гидрометеорологических явлений.

Радиозонд является средством измерения разового действия и в лабораторных условиях невозможно воспроизвести весь комплекс величин, влияющих на результаты измерений, измерения являются косвенными, динамическими и однократными, отсутствуют эталонные средства измерения, имеющие необходимые диапазоны измерений, динамику и возможность учета влияющих факторов. Сопоставимость радиозондовых наблюдений обеспечивается соответствием средств измерения установленным техническим и метрологическим требованиям, соблюдением методики проведения измерений, обработки и представления результатов [1].

Согласно международным нормам, все страны – члены Всемирной Метеорологической организации (ВМО) ответственны за поддержание систематических и надежных метеорологических измерений. Для этой цели каждая страна имеет Национальную Метеорологическую Службу (НМС). Измерения должны выполняться одновременно и регулярно и незамедлительно передаваться по международной сети телесвязи. Направление и скорость ветра, видимость, температура воздуха и почвы, влажность, солнечная радиация, облачность, высота облаков, атмосферное давление и осадки, аэрологические параметры – профили температуры, влажности, давления, скорости и направления ветра в тропосфере и нижней стратосфере – наиболее важные параметры, которые должны измеряться. Каждая страна обязана произвести в реальном времени необходимые измерения и получить данные для международного использования, и имеет также возможность использовать информацию, произведенную в других странах.

На Земле около 1000 аэрологических станций (АЭ) составляют основу Глобальной системы наблюдений, примерно 850 из них обеспечивают получение и передачу один или два раза в сутки данные радиозондовых наблюдений для глобального обмена в реальном времени. Национальные метеорологические службы обеспечивают мониторинг погоды и климата для их собственных стран и Всемирной службой Погоды (ВСП) ВМО. Центры прогнозирования погоды проводят оперативный мониторинг состояния ВСП ВМО в реальном времени на национальном, региональном и глобальном уровнях. ВМО с помощью Государств – членов оценивает потребности в поддержке и координирует разработку программ сотрудничества на основании результатов мониторинга ВСП.

2. Показатели качества аэрологических данных

Точность полей объективного анализа и, следовательно, успешность численных гидродинамических прогнозов погоды напрямую зависят от качества и полноты оперативной информации, полученной с помощью автоматизированных систем обработки данных наблюдений о состоянии атмосферы [2]. Сложность обработки этих данных состоит в том, что они нерегулярно распределены в пространстве и во времени, могут иметь большие ошибки, отличающиеся для каждого вида наблюдательных систем, и их количество в любой фиксированный момент времени явно недостаточно для построения трехмерных метеорологических полей, адекватных реальному состоянию атмосферы.

Определение крупномасштабных особенностей общей циркуляции атмосферы в значительной степени зависит от данных высотного зондирования атмосферы. Большой вклад данных этих наблюдательных систем отмечен в очень многих исследованиях, хотя возможны заметные вариации их весовых функций в различных синоптических ситуациях. В Северном полушарии оценки численного прогноза погоды (ЧПП) деградируют в среднем на один день при отключении аэрологической сети. Если бы станции радиозондирования были распределены равномерно по поверхности Северного полушария, без «белых пятен» над Арктикой, Северной Атлантикой и Северной частью Тихого океана, то их вклад в точность ЧПП был бы гораздо больше.

Минимально необходимый для использования в ЧПП уровень (500 гПа) является обязательным уровнем, который должен быть достигнут радиозондом в любом выпуске. При этом прогностическая значимость отдельного выпуска возрастает с ростом высоты уровня окончания зондирования. На этот показатель влияют два фактора – надежность радиозондов и наземной системы, и качество радиозондовых оболочек, высота разрыва которых определяет объем получаемых радиозондовых данных.

Качество аэрологических данных оценивается путем сравнения данных наблюдений с данными краткосрочного прогноза на срок наблюдений, получаемого с помощью современной численной модели, основанной на непрерывном усвоении данных. Статистика этих отклонений «наблюдения – поле первого приближения» (OB-FG) стала основой для долгосрочного мониторинга качества данных [2]. Получаемые Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды (ЕЦСПП) статистики отклонений OB-FG используются ВМО в мониторинге сопоставимости аэрологических данных, как основной источник для анализа качества всемирной сети радиозондирования.

Обычно, такая статистика вычисляется для температуры, геопотенциала и ветра (как для направления и скорости, так и для декартовых компонент). Чаще всего используется статистика геопотенциала, так как, полученная по данным на стандартных изобарических поверхностях, она представляет собой интегральный показатель качества радиозонда и наземной станции для измерений температуры, давления и высоты. При рассмотрении статистик OB-FG для геопотенциала необходимо принимать во внимание, что, чем ниже рассматриваемый уровень, тем строже требования к качеству данных. Как ориентир для оценки абсолютных значений статистик могут служить рекомендации Комиссии по основным системам (КОС) ВМО по выбору «сомнительных» (т. е. поставляющих «бесполезные» данные) станций в соответствии со среднеквадратичным значением отклонений OB-FG: 45, 100 и 125 м для 500, 100 и 50 гПа соответственно. Для оценки отдельной станции систематическое и среднеквадратичное отклонение OB-FG равно важны, так как они отражают средние значения ошибок наблюдений и их изменчивость от срока к сроку. Описание процедур расчета статистических характеристик отклонений OB-FG размещены на сайте ФГБУ «ЦАО» (http://cao-ntcr.mipt.ru/monitor/doc/procs.htm). Там же размещаются результаты расчета показателей функционирования аэрологической

сети Росгидромета. В январе 2020 г. количество аэрологических станций Росгидромета по взвешенному среднеквадратичному значению 'наблюдение-прогноз' для геопотенциала в слое 1000–100 гПа, на которых был превышен критический уровень – 48 гпм (геопотенциальных метров), составило 23, а в целом в первом квартале 2020 г. этот показатель составил 16 станций (см. табл. 1, выборочный список). В таблицу также внесены данные по средней высоте зондирования (Н) по конкретной станции и в целом по России в январе и 1-м квартале 2020 г.

Таблица 1

Наименование станции	УГМС	OB-FG янв. 2020г., гпм	Н, янв. 2020г., км	OB-FG 1-й кв. 2020г., гпм	Н, 1-й кв. 2020г., км
Воейково	Северо-Западное	53	29. 1	68	29. 8
Тура	Среднесибирское	48	14. 0	51	19. 8
Омолон	Чукотское	50	26. 6	54	26. 0
Чокурдах	Якутское	61	17. 2	56	18. 0
Оленек	Якутское	78	19. 5	57	20. 7
Верхоянск	Якутское	104	23. 1	83	22. 8
Мирный	Якутское	51	22. 2	56	23. 0
Олекминск	Якутское	64	25. 9	57	25. 2
Средн. по РФ	Всего 114 АЭ	38	24. 5	37	24. 9

При этом значительную часть «сомнительных» (т. е. поставляющих «бесполезные» данные) станций составляют северные и арктические станции России.

Вторым важнейшим показателем качества работы аэрологической сети, в части получаемого объема данных, является высота радиозондирования, которая в значительной степени определяется качеством радиозондовых оболочек. Общая эффективность использования оболочек должна учитывать полные эксплуатационные расходы покупателя (повторные выпуски при раннем разрыве оболочки, отбраковка и замена оболочек на качественные при проверке перед выпуском, низкие высоты зондирования и соответствующая потеря аэрологических данных). По результатам зондирования, приведенным в табл. 1, видно, что, например, в январе 2020 г., три АЭ – Тура, Чокурдах и Оленек не превысили среднюю высоту зондирования 20 км.

В последние годы, в связи с существенным снижением высот радиозондирования при использовании радиозондовых оболочек, не проходивших предварительных испытаний в ФГБУ «Центральная аэрологическая обсерватория» (ЦАО) и эксплуатационных испытаний в условиях аэрологической сети Росгидромета, были проведены анализ и испытания оболочек различных производителей. По результатам был установлен ряд нарушений со стороны поставщиков, поставке оболочек ненадлежащего качества, что в результате приводило к снижению высоты зондирования, отмене закупки оболочек, расторжении контракта и другим проблемам в работе сетевых организаций. В частности, поставлялись оболочки ненадлежащего качества, иногда – неизвестного производителя, которые не соответствовали техническому заданию (ТЗ) по закупке, что в результате приводило к существенному снижению высот зондирования, а,

следовательно, к потере аэрологических данных, что, как было отмечено выше, может приводить к снижению оправдываемости прогнозов погоды и нарушению одного из основных принципов деятельности гидрометеорологической службы – соответствие задачам охраны здоровья населения, защиты окружающей среды и обеспечения экологической и гидрометеорологической безопасности. Кроме того, это фактически влечет за собой существенные финансовые потери. Если, например, высоты зондирования становятся меньше на 5 км (около 20 % от средних высот), то организации Росгидромета недополучают 20 % данных. При общей стоимости расходов на радиозондирование около 300 млн руб. это соответствует бесполезным затратам примерно 60 млн руб.

При закупке расходных материалов для радиозондирования (в частности – оболочек) необходимо учитывать, что эти материалы являются для деятельности гидрометслужбы стратегическими, их наличие и качество является обязательным условием получения аэрологической информации, а, следовательно, снижения рисков угрозы жизни населения, ущерба экономике страны от опасных гидрометеорологических явлений. Использование оболочек при радиозондировании атмосферы отличается рядом специфических особенностей, в частности:

– в лабораторных условиях невозможно воспроизвести весь комплекс величин, влияющих на радиозондовые оболочки;

– выпуск радиозонда – это разовое действие, оболочка разрывается и не может быть проверена;

– сроки поставки в территориальные органы, доставки к месту зондирования, в частности, на труднодоступные станции, конкретные сроки использования разнесены во времени и с момента поставки до использования составляют от нескольких месяцев до 2 лет;

– эффект анализа качества оболочек и получаемых с их помощью высот зондирования также ограничен временной задержкой и тем, что даже в случае выявления нарушений, возврат и замена оболочек зачастую невозможны и связаны со срывом сроков зондирования и отсутствием необходимой гидрометеорологической информации.

На АЭ арктических УГМС в зимние периоды 2015–17 гг. наблюдалось существенное снижение средней высоты зондирования. Более 90 % оболочек разрывалось, не достигая высоты 26 км, которую они должны обеспечивать по ТЗ для аукционов закупки. Для ряда станций средняя высота зондирования в зимние месяцы не превышала 20 км. В результате, в декабре 2017 г. среднемесячные значения высот зондирования в целом (по всем АЭ) по Северному УГМС и Среднесибирскому УГМС составили соответственно 19. 9 и 19. 2 км

В табл. 2 приведены средние высоты зондирования (км) – в целом по всем АЭ конкретного УГМС (данные взяты с сайта http://cao-ntcr.mipt.ru/monitor/monitorres.htm).

Таблица 2

УГМС Арктического региона	3-й кв. 2017	Октябрь 2017	Ноябрь 2017	Декабрь 2017	Январь 2018
Мурманское	30. 0	29. 0	27. 0	23. 9	23. 7
Северное	28. 6	27. 0	23. 9	19. 9	19. 7
Среднесибирское	28. 8	25. 8	23. 8	19. 2	19. 0
Якутское	25. 5	24. 6	23. 9	20. 5	20. 7
Чукотское	31. 3	30. 0	28. 2	27. 4	26. 7

В Арктическом регионе чаще наблюдаются низкие температуры в стратосфере – ниже –70 ºС, при которых китайские оболочки, в основном применяемые в настоящее время на аэрологической сети, затвердевают и разрываются. В январе 2016 г. на 46 станциях среднемесячная высота радиозондирования не превысила 22 км. В январе – феврале 2016 г. для более 50 % станций всей аэрологической сети Росгидромета среднемесячная высота не достигла 24 км. В декабре 2017 г. – январе 2018 г. наблюдалось критическое снижение высот зондирования на ряде станций, включенных в глобальную опорную сеть радиозондирования ВМО – станций ГУАН. Пример – аэрологическая станция (АЭ) о. Диксон, станция ГУАН, январь 2018 г. средняя высота – 18,8 км. При этом большинство радиозондов не долетели до высоты 20 км. То есть недополучены все данные радиозондирования выше этого уровня. В декабре 2018 г. из 11 станций Северного УГМС на 9 станциях средняя высота была меньше 26 км. Зимой на арктических станциях высота зондирования может снижаться до 15–20 км. Для 3 станций Северного УГМС в декабре 2018 г. средняя высота зондирования не превышала 20 км.

Производство радиозондовых оболочек в России было прекращено в середине 2000-х гг., и на аэрологической сети Росгидромета используются китайские и японские оболочки. По результатам эксплуатационных испытаний в условиях аэрологической сети Росгидромета они прошли испытания и подтвердили свое высокое качество.

В частности, это оболочки 500 грамм тип HY-500 производства китайской фирмы Zhuzhou Rubber Research & Design Institute Co., Ltd. (HWOYEE). Данные оболочки принимали участие в испытаниях и опытной эксплуатации пластифицированных оболочек различных фирм-изготовителей, проведенных в условиях эксплуатации в период 2003–2005 гг. на аэрологической сети Росгидромета и подтвердили свое качество и надежность. Производство оболочек HWOYEE имеет сертификат Национального Центра Аккредитации КНР, фирма Zhuzhou Rubber Research назначена официальным поставщиком Китайской Метеорологической Администрации и Метеорологической службы Китайской армии, оболочки HWOYEE экспортируются более чем в 30 стран. По техническим характеристикам средняя высота разрыва оболочек HY-500 при выпуске радиозонда – 26000 м.

Также это – оболочки 500 грамм TX500 производства японской фирмы TOTEX Corporation. Фирма TOTEX производит оболочки для радиозондирования с 1940 г. Является ведущим в мире производителем оболочек для радио-

зондирования и поставляет их в более, чем 70 стран. Оболочки TX500 принимали участие в испытаниях в ФГБУ «ЦАО» в период 2013–2015 гг. и опытной эксплуатации на сети Росгидромета в зимний период 2016–17 гг. По результатам испытаний в ЦАО было установлено, что оболочки TX500 удовлетворяют требованиям по средней высоте подъема и могут быть применены для оперативного радиозондирования. По результатам эксплуатационных испытаний в зимний период 2016–2017 гг. оболочки TX500, изготовленные из специального латекса, предназначенного для использования в условиях низких температур (ниже минус 75 °С в районе тропопаузы), показали преимущества использования в зимних условиях по сравнению с китайскими оболочками HY-500. По техническим характеристикам средняя высота разрыва оболочек TX500 при выпуске радиозонда – 27 500 м. Оболочки TX500 целесообразно использовать в зимних условиях на станциях, на которых необходимо обеспечить максимальную высоту зондирования, например, станциях ГУАН, или на самых северных станциях.

Оболочки 350 грамм TX350 производства японской фирмы TOTEX Corp. По результатам испытаний в ЦАО и на аэрологической сети было установлено, что оболочки TX350 удовлетворяют требованиям по средней высоте подъема и могут быть применены для оперативного радиозондирования. По техническим характеристикам средняя высота разрыва при выпуске радиозонда – 25 500 м. Оболочки TX350 обеспечивают более стабильные высоты зондирования, чем китайские, для них отмечается удобство использования за счет меньшего диаметра при выпуске в условиях сильного ветра.

По результатам анализа и испытаний оболочки HY-500 целесообразно использовать на всей территории России, кроме Арктического региона в зимнее время. Оболочки TX350 целесообразно использовать на аэрологических станциях, где желательна экономия химикатов, например, на труднодоступных станциях (требуется на 15 % меньше необходимого объема водорода). Оболочки TX500 необходимо использовать на станциях, на которых требуется обеспечить максимальную высоту зондирования, например, станциях ГУАН, особенно в Арктическом регионе в зимних условиях.

3. Развитие опорной сети радиозондирования

Ожидаемым результатом одного из главных направлений национального плана мероприятий адаптации к изменениям климата Российской Федерации является развитие сети климатического мониторинга для обеспечения заинтересованных сторон сведениями о состоянии и прогнозе состояния окружающей среды в результате изменения климата. В рамках данного направления, в соответствии с одним из основных принципов организации планирования, чрезвычайно важно решить вопрос мониторинга эффективности реализуемых мер, в том числе с установлением количественных показателей. Совокупность выборочных АЭ, имеющих существенное значение как для синоптических, так и климатологических целей, образует базовую сеть [3], именуемую аэрологической сетью ГСНК (Глобальная сеть наблюдений за климатом – ГУАН). Станции ГУАН (173 в настоящее время, в России действует 12 станций ГУАН) ис-

пользуются также для валидации спутниковых данных. В рамках основных мероприятий ВМО в ответ на претензии климатического сообщества к однородности временных рядов данных радиозондирования для получения референсных аэрологических данных (в первую очередь – температуры и влажности), пригодных для мониторинга решения вопросов адаптации к изменениям климата на долгосрочную перспективу, создается опорная аэрологическая сеть (ГРУАН), которая будет обеспечивать долгосрочные, высокоточные измерения атмосферных профилей, и будет дополнена самыми современными наземными приборами для полноценного описания характеристик атмосферного столба и их изменений. ГРУАН рассматривается в качестве мировой сети, состоящей из 30–40 станций. В настоящее время в мире действует 12 станций ГРУАН, сертифицированных Центром ГРУАН (Линденберг, Германия) и около 15 станций – кандидатов на включение в эту опорную сеть.

В настоящее время ведущий центр ГРУАН (Метеорологическая обсерватория Линденберг) включил АЭ Долгопрудный (ЦАО) в число станций-кандидатов на включение в сеть ГРУАН [4]. Включение станций в сеть ГРУАН производится по результатам процедуры сертификации, предусмотренной Наставлением (ГСНК №170) и Руководством (ГСНК №171) по ГРУАН. Создание эталонного полигона для проведения испытаний аэрологических средств измерений (СИ) на основе российской станции ГРУАН позволит обеспечить весомый вклад Российской Федерации в исследования климата свободной атмосферы. В результате проведения работ будут обеспечены сбор и представление в Государственный фонд климатических рядов высокоточных данных, получаемых с российских и зарубежных станций ГРУАН, проведение сравнительных выпусков эталонных радиозондов и новых радиозондов российских производителей, претендующих на получение свидетельства на тип средства измерений.

Учреждение на длительный период реперных аэрологических станций с расширенной программой, обеспечивающих получение непрерывных многолетних однородных наблюдений высокого качества, сопоставимых по качеству с наблюдениями зарубежных станций ГРУАН, необходимых для своевременных оценки и прогноза тенденций изменения климата в Российской Федерации и на планете Земля для обеспечения безопасного и устойчивого развития Российской Федерации в условиях изменения климата позволит обеспечить мониторинг эффективности реализуемых мер, в том числе с установлением количественных показателей.

4. Применение опорных радиозондов

Переоснащение аэрологической сети новыми комплексами радиозондирования в последние 15 лет повысило надежность работы системы радиозондирования Росгидромета, однако, оно не обеспечило существенного роста качества аэрологических наблюдений, что в основном обусловлено применением в радиозондах датчиков, не отвечающих требованиям ВМО и мировому уровню. Особенно это относится к погрешности измерения влажности.

В последние годы существенно повысились чувствительность общества и народного хозяйства к изменениям в погоде и запросы потребителей к составу,

точности и оперативности аэрологической информации, что обусловливает необходимость дальнейшего развития, повышения точности измерений и достоверности получаемых результатов, предоставления аэрологической информации с высоким разрешением.

Датчики температуры и влажности оперативных российских радиозондов не позволяют получать данные с необходимым разрешением по времени (из-за повышенной инерции), не покрывают необходимый диапазон измерений, имеют недостаточную точность и стабильность градуировки, значительные дополнительные погрешности (радиационные погрешности измерения температуры и влажности, динамические погрешности, влияние осадков на измерения температуры и влажности, влияние температуры на измерения влажности и т. д.). Дополнительные погрешности имеют значительную изменчивость в зависимости от условий измерения, что существенно увеличивает неопределенность результатов радиозондирования.

Применяемые поправки к показаниям датчиков температуры неточны (велика неопределенность неисключенных погрешностей) и неполны, используются только усредненные поправка на рефракцию и радиационная поправка для коротковолновой составляющей радиационной погрешности датчика температуры, определенная методом день-ночь, которая не учитывает ночное выхолаживание и имеет среднеквадратичное отклонение более 30 % от величины самой поправки. Высокая динамическая и температурная погрешность датчиков влажности обычных радиозондов приводит к ошибкам в измерениях относительной влажности до 30–40 % особенно при прохождении радиозондом облачных слоев, в то время как рекомендованная величина предельной погрешности для радиозондовых измерений влажности составляет 15 %.

Результаты международных сравнений радиозондов в Китае в 2010 г. показали, что датчики температуры всех радиозондов, участвовавших в сравнениях, по техническому уровню существенно превосходят датчики температуры отечественных радиозондов. Антирадиационная эмаль ВЛ-548, для которой были определены радиационные поправки, снята с производства. Датчики такого типа уже не используются в мировой практике, все основные типы радиозондов используют миниатюрные, «бусинковые» или тонкопроволочные датчики температуры с алюминизированным покрытием, которое имеет значительное преимущество перед белым антирадиационным покрытием. Максимальная радиационная поправка таких радиозондов не превышает 2 °С, в то время как для российских радиозондов максимальная поправка, согласно действующей схеме, достигает 15,5 °С, и то – при условии применения эмали ВЛ-548. Использование радиозондов без датчиков давления для определения вертикального распределения давления принципиально не дает возможности обнаружения отклонений в вертикальном распределении давления, поскольку при этом используется интегрирование уравнения гидростатики.

Для повышения точности измерений на российской сети радиозондирования необходимо возобновить производство российских радиозондов повышенной точности с использованием современных датчиков фирмы Вайсала,

признанных лучшими в мире на сравнениях радиозондов в Китае в 2010 г. Такой опыт уже имел место в конце 90-х – начале 2000-х гг., когда аналогичные радиозонды в течение 10 лет выпускались на 20 аэрологических станциях Росгидромета. В период 1997–2007 гг. на 20 аэрологических станциях Росгидромета применялся радиозонд повышенного качества РФ95 с блоком датчиков радиозондов Вайсала (Финляндия) RSS80TU (всего выпущено более 25000 радиозондов), что оказало, согласно статистике мониторинга ЕЦСПП, положительное влияние на показатели качества радиозондовых данных. В отчете ВМО за 2001 г. показано, что российские станции, использующие радиозонды повышенного качества в 1,5 раза превосходили средние показатели станций, использующих обычные радиозонды. Данные последующих лет подтвердили эти выводы. На аэрологических станциях Росгидромета, которые переходили на зондирование радиозондами повышенного качества, наблюдалось улучшение качества данных. Обратный переход модернизированных станций на зондирование обычными радиозондами приводил к ухудшению качества данных. Результаты введения радиозондов РФ95 в Северо-Западном регионе России показали, что по мере перехода на зондирование с использованием РФ95 статистические характеристики отклонений OB-FG наглядно показали стабильное повышение сопоставимости данных зондирования аэрологических станций в 1,5–2 раза.

Производство опорных радиозондов повышенной точности необходимо возобновить с использованием блока датчиков лучшего в мире радиозонда RS41 (Вайсала). Главным фактором является то, что применение опорного радиозонда при тех же сочетаниях и скорости изменения атмосферных параметров позволяет существенно уменьшить погрешности измерений по сравнению с применением обычного радиозонда. Применение опорных радиозондов по сравнению с выпуском обычного радиозонда позволит уменьшить погрешность по температуре на 1,5–2 градуса и по относительной влажности – на 25–35 %, уменьшить число нерезультативных выпусков радиозондов. В связи с этим, одним из факторов повышения качества данных аэрологической сети является использование комбинированного зондирования обычными зондами и опорными зондами, т. е. частичный (временный) переход на использование опорных радиозондов. Для эффективного применения опорных радиозондов целесообразно организовать комбинированное зондирование с частичным использованием зондов повышенной точности. При комбинированном зондировании число опорных зондов должно составить до 40 % на станциях ГУАН и до 15 % – на остальных станциях.

Исходя из анализа технических характеристик обычных и опорных радиозондов, сформулированы основные показатели для перехода на комбинированное зондирование обычными зондами и зондами повышенного качества:

1. Временный переход на зондирование опорными радиозондами при появлении тенденций в изменениях атмосферных параметров, которые могут приводить к значительным погрешностям данных радиозондирования при использовании обычных радиозондов.

2. Периодическое использование опорных радиозондов для обеспечения возможности введения коррекции в климатические ряды данных.

3. Переход на зондирование опорными радиозондами при появлении значительного количества сбоев в получении данных радиозондирования за счет отказов обычных радиозондов, а также при появлении обоснованных (по результатам мониторинга) данных о метрологических отказах (в том числе – радиолокатора – при использовании радиозонда повышенного качества с датчиком давления).

4. Переход на зондирование опорными радиозондами при необходимости получения более точных и достоверных данных, а также для обеспечения получения данных с высоким вертикальным разрешением, при проведении ответственных наблюдений.

5. Использование опорных радиозондов при решении задач проверки качества работы аэрологической станции (периодически, например, раз в год, при профилактических работах, при проверке станции после проведения ремонтных работ и т. п.).

Перечень этих показателей может дорабатываться по мере изменений характеристик радиозондов, или появления новых задач повышения качества аэрологических данных. Оценки необходимого количества опорных радиозондов показывают, что оно может составлять около 6 тыс. штук в год и должно ежегодно уточняться в соответствии с изменениями в составе наземного оборудования и возникающими задачами.

Периодическое использование опорных радиозондов может дать существенный эффект для обеспечения возможности введения коррекции в климатические ряды данных и приближении их к рядам данных всемирной аэрологической сети над Северным полушарием. Применение опорных радиозондов имеет особенно важное значение для 12 российских аэрологических станций сети ГУАН, на которых требуются улучшенные климатические наблюдения, в особенности по влажности.

Выполнение предложенных вариантов повышения качества аэрологических данных в части точности и объема данных сети радиозондирования Росгидромета обеспечит повышение качества прогнозов погоды, обеспечение защищенности населения, экономики страны от опасных гидрометеорологических явлений.

Список литературы

1. *Балагуров А. М.* Единство аэрологических измерений // Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России : материалы II Всерос. науч.-практ. конф. Иркутск, 5–7 июня 2019 г. Иркутск, 2019.

2. *Алдухов О. А., Багров А. Н., Гордин В. А.* Статистические характеристики прогностических метеорологических полей и их использование для объективного анализа // Метеорология и гидрология. 2002. № 10. С. 18–33.

3. Наставление по Интегрированной глобальной системе наблюдений ВМО. Дополнение VII к Техническому регламенту ВМО. ВМО № 1160. Издание 2015 г.

4. *Крестьяникова Н. Н.* Опорная сеть радиозондирования // Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России : материалы II Всерос. науч.-практ. конф. Иркутск, 5–7 июня 2019 г. Иркутск, 2019.

УДК 551.510.4

Вертикальные потоки озона в приводном слое атмосферы вблизи береговой зоны оз. Байкал

В. П. Бутуханов (vbut1951@gmail.com)

Институт физического материаловедения СО РАН, г. Улан-Удэ

Аннотация. Измерения пульсаций основных метеорологических параметров и измерения концентраций газовых примесей в слое трения на двух различных высотах над водной поверхностью береговой зоны Байкала позволили оценить величину скорости сухого осаждения озона.

Ключевые слова: приводный слой, скорость ветра, концентрация озона, турбулентный поток озона, осаждение озона.

Экспериментальное определение вертикальных потоков озона в приземном и приводном слоях атмосферы является важным элементом моделирования для параметризации стока и сухого осаждения озона на земную поверхность [1; 2].

Принято считать, что процесс сухого осаждения включает перенос озона к поверхности турбулентными вихрями, молекулярную диффузию через квазиламинарный слой непосредственно у поверхности толщиной около 1 см и адсорбцию или абсорбцию на земной поверхности (почва, вода). В свою очередь определение стока озона и оксидов азота на поверхность водоемов важно с точки зрения возможного влияния этих газов, как сильных окислителей на химию поверхностного микрослоя.

В настоящей работе по результатам синхронных измерений концентрации озона [O_3] и метеопараметров получены данные о вертикальных потоках озона в приводном слое атмосферы юго-восточного побережья оз. Байкал, летом 2004 г. В условиях волнообразования оценена скорость сухого осаждения O_3.

Условия и методика измерений

Измерительный пункт располагался на юго-восточном побережье оз. Байкал, в п. Боярский с координатами 51°50" с. ш., 106°05" в. д., на открытой галисто-песчаной поверхности в 2 м от уреза воды.

Метеорологические датчики и устройство пробоотбора, установленные на мачте на высотах 4 и 1 м от поверхности воды, были удалены от берега в сторону озера на расстояние 10 м (рис. 1, *а*).

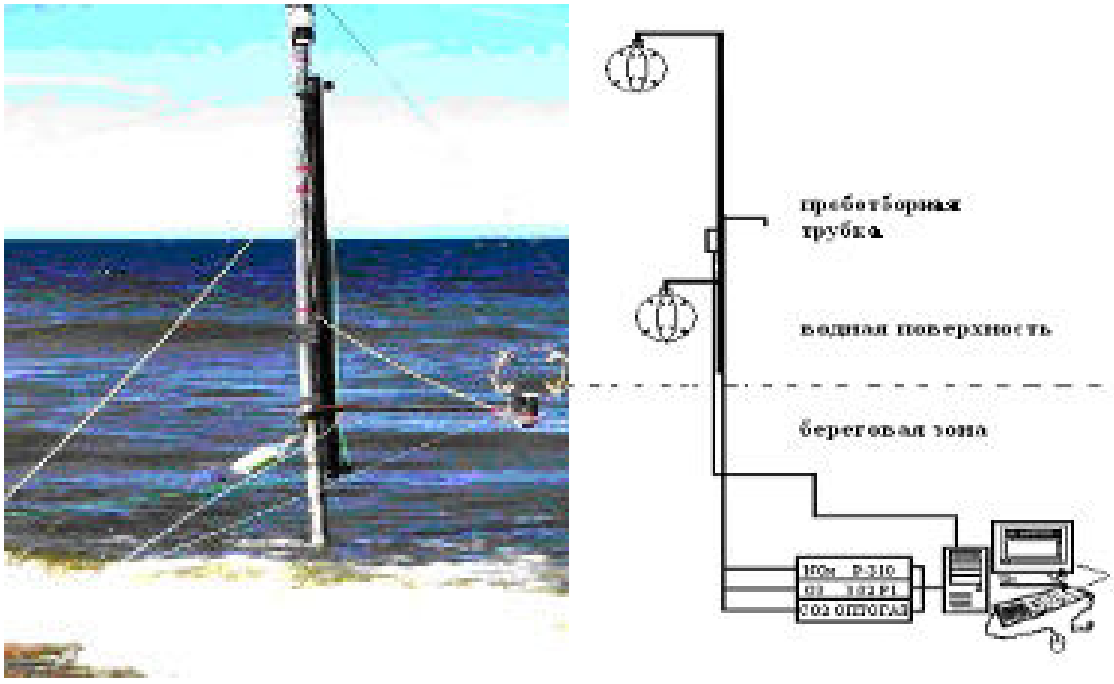
Вертикальное перемещение и позиционирование пробоотборного устройства на высотах от 1 до 4 м осуществлялось с берега при помощи подъемного механизма.

Измерения метеопараметров и концентрации озона проводились при помощи измерительной системы, включающей в себя ультразвуковую метеостанцию АМК-02Б и многоканальный измерительный комплекс характеристик газовых примесей, в которую входит хемилюминесцентный газоанализатор озона (рис. 1, *б*).

Технические характеристики газоанализатора озона 3-02.П1: диапазон измеряемых концентраций – 0–1000 мкг/м^3; относительная погрешность измерения – 15 %; предел обнаружения не более 1 мкг/м^3.

Калибровка в газоанализаторе озона осуществляется при помощи встроенной ртутной лампы. Это устройство программно производит автоматическую калибровку прибора, обеспечивая тем самым высокую точность.

Для контроля калибровки газоанализаторов 1 раз в неделю применялся генератор озона и окислов азота модели 8500 фирмы Монитор Лэбс.



а *б*

Рис. 1. Общий вид метеорологической мачты (а), автоматизированный измерительный комплекс метеорологических и газовых характеристик приводного слоя атмосферы (б)

При длине и диаметре пробоотборной трубки равными l = 12 м, d = 6 мм, соответственно, и интенсивности прокачки воздуха 2 л/мин скорость движения воздуха в системе пробоотбора оценивается величиной около 30 см/с. Тогда за оценку верхней границы частоты пульсации концентрации озона следует принять величину ≈ 0,024 Гц. Из этой оценки следует, что высокочастотные колебания с периодом 40 с ограничены длиной трубки. Нижняя граница при прочих равных условиях будет определяться периодом осреднения данных измерения. Для исследования мелкомасштабной турбулентности в приземном и приводном слое с периодом колебания близкими к 10 мин обоснованным является выбор времени осреднения с данным периодом.

Тогда, при времени осреднения порядка 10 мин, при относительно долгопериодных измерениях концентрации озона (от суток и более) на разных высотах, в пределах приземного слоя, можно оценивать их потоки со случайной погрешностью не более 25 %.

Параметры ветровой и температурной турбулентности вычислялись по данным измерений компонент скорости ветра и температуры воздуха в приводном слое атмосферы по алгоритмам программы АМК-02Б [4]. Погрешности измерения пульсаций скорости горизонтальной и вертикальной составляющей ветра равны ±(0,1+0,02v) и ±(0,1+0,02w). Погрешность измерения абсолютной температуры составила ±0,4 ºС.

Для оценки вертикального потока озона вблизи поверхности применялись известные методы измерения.

1. Корреляционный метод, основанный на вариациях вертикальной компоненты скорости ветра и концентрации озона. При использовании этого метода средний поток примеси определяется равенством

$$<wO_3> = <w'\ O_3'> = <w><O_3>, \quad (1)$$

где $<w'\ O_3'>$ – турбулентный поток озона, м^2/с, w, м/с – вертикальная компонента скорости ветра, O_3 – концентрация озона, штрихом обозначены вариации, $< >$ – символ осреднения.

2. Метод определения турбулентного потока озона, основанный на измерениях разности концентрации озона на 2 уровнях высот от поверхности z_1 и z_2 [3]. В этом случае турбулентный поток озона оценивается выражением $k\frac{\Delta O_3}{\Delta z}$, где k, м^2/с – коэффициент турбулентности в слое между z_1 и z_2, ΔO_3 разность концентраций озона на z_2 и z_1, $\Delta z = z_2 - z_1$. Коэффициент турбулентности на высотах z_1 и z_2 оценивается из теории подобия Монина-Обухова.

Для оценки турбулентного потока озона по второму методу в приводном слое атмосферы оз. Байкал вблизи береговой линии проводились круглосуточные измерения $[O_3]$ (символ [ ] означает концентрацию газовых примесей), поочередно, на высотах z = 1 м и 4 м с экспозицией на каждых высотах по 10 мин в течение 1 ч. Измерения и запись $[O_3]$ осуществлялись синхронно с метеопараметрами и непрерывно по командам IBM PC с периодом квантования 1 с, с последующим осреднением за 10 мин.

Сравнение турбулентных потоков, определенных по методу 1 и 2, выявило существенные различия их значений. Необходимость учета коэффициентов турбулентности при оценке потока по методу 2 иногда приводит к занижению потока до 30 % по сравнению с первым методом. Вероятной причиной приведенных различий является большой разброс и неопределенность значений k_1 за счет усиления флуктуаций плотности воздуха, вызванной неоднородностью подстилающей поверхности при волнообразовании. В отсутствии волн различия потоков незначительны.

Условия измерения в период наблюдения с 25 июля по 3 августа 2004 г. отличались неоднородностью атмосферных процессов. Смена барического поля с 713 до 721 мм рт. ст. сопровождалась прохождением атмосферных фронтов с северо-западного направления. При этом наблюдалось похолодание до 8–9 ºС в дневные часы, усиление скорости горизонтального ветра до 15 м/с и выпадение осадков.

В малооблачные, солнечные дни при скорости ветра V = 2–3 м/с воздух прогревался до 20–22 ºС. Устойчивость атмосферы изменялась в среднем, за указанные выше сроки наблюдения, от умеренно неустойчивой в дневные часы до сильно устойчивой ночью и в предутренние часы (градиентное число Ричардсона Ri = –0,1 ─ 0,3).

Оценка скорости сухого осаждения озона на водную поверхность

Для количественной оценки стока озона на подстилающую поверхность используется скорость его осаждения, которую можно непосредственно определить из граничного условия баланса потоков озона на подстилающую поверхность $-\langle w' O_3' \rangle = V_{оэ}[O_3]$, где $\langle w' O_3' \rangle$, мкг/м^{2}с – турбулентный поток в слое h = 3 м, $V_{оэ}$, м/с – скорость сухого осаждения, $[O_3]$, мкг/м^3 – концентрация озона осредненная по 10-минутным измерениям на высоте z_1 = 1 м.

Тогда скорость осаждения озона на водную поверхность из условия баланса потоков будет равна

$$V_{оэ} = -\langle w' O_3' \rangle / [O_3]. \quad (2)$$

Оценка и анализ скорости осаждения проводились на основе измеренных экспериментальных данных потока и концентрации озона, характеристик турбулентности, осредненных за 10-минутный интервал времени в слое трения h = 3 м.

В условиях волнообразования и развитии поверхностных волн на Байкале, которые происходят ежедневно, была обнаружена значительная изменчивость величины скорости горизонтального ветра на z = 4 м и z = 1 м от уровня поверхности воды. В отдельные периоды волнения при высоких значениях ΔV установлено, что указанные процессы задерживают сток озона на водную поверхность, с уменьшением ΔV и с увеличением скорости ветра в слое h = 3 м в условиях развитого волнения происходит уменьшение концентрации озона до своего минимального значения за время измерения (рис. 3).

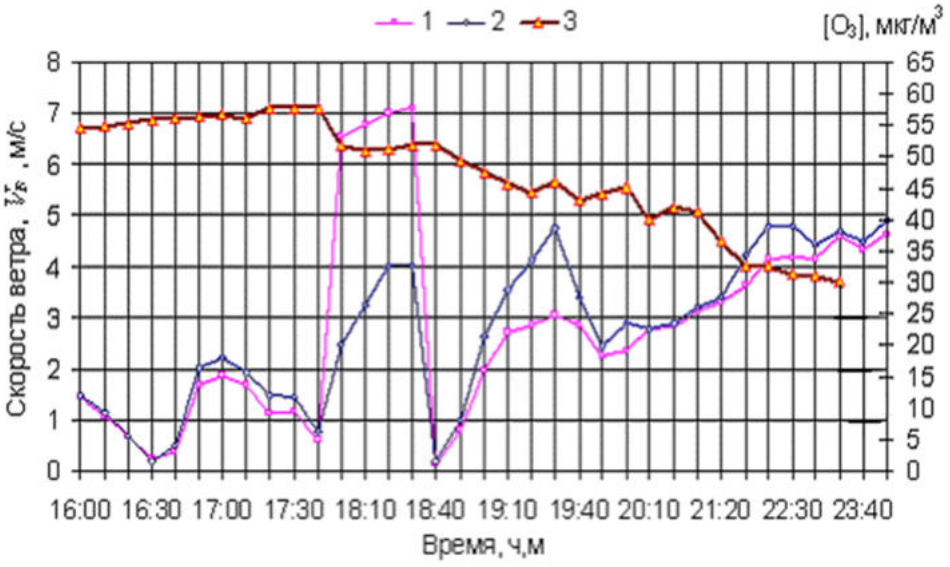


Рис. 3. Вариации осредненных 10-минутных значений скорости горизонтального ветра Vв и концентрации озона $[O_3]$ в приводном слое атмосферы на высотах z_1 = 1 м и z_2 = 4 м: *1* – скорость ветра Vв на z = 1 м; *2* – Vв на z_2 = 4 м; *3* – $[O_3]$ на z_2 = 4 м

Корреляционный анализ показал, что наиболее заметное влияние на изменчивость концентрации озона и его скорости осаждения в условиях волнообразования, кроме ветровых характеристик, оказывают скорость трения u_*, поток импульса τ и параметры волн. Поэтому для учета влияния этих параметров на сухое осаждение озона в слое h = 3 м была получена приближенная зависимость скорости осаждения Vо от параметров приводного слоя при граничном условии, описываемого выражением $\left(\frac{\partial U}{\partial z}\right)_{z=h} = \frac{u_*}{kh}$ [6], где u_* – скорость трения, k = 0,4 – постоянная Кармана.

Скорость осаждения любой газовой примеси можно представить в виде Vо = 1/R, где R – сопротивление потоку примеси. Сопротивление R при взволнованной водной поверхности рассматривается, как сопротивление элементов шероховатости с учетом параметров приводного слоя атмосферы. Выражение для сопротивления можно представить в виде

$$\mathrm{R} \approx \frac{z_0 / \langle h \rangle}{k u_*}, \qquad (3)$$

где z_0 = z/exp[k/C_d1/2(z)] – параметр шероховатости, C_d – коэффициент сопротивления потоку, <h> – среднеквадратическая высота волн, u_* – скорость трения, k – постоянная Кармана. Параметры C_d и u_* вычисляются по формулам атмосферной турбулентности программно по измеренным первичным данным ветровых характеристик.

На практике наиболее распространено характеризовать приводный слой таким параметром, как нормированная шероховатость взволнованной поверхности $z_0' \equiv z_0/\langle h \rangle$ [7].

Сложность интерпретации параметров шероховатости, заключающаяся в большой изменчивости и разбросе их величин в пределах нескольких порядков в зависимости от скорости ветра и скорости трения u_* даже в узком диапазоне изменения их значений [5], заставляет оценивать эти параметры через возраст волн (степень развития ветрового волнения) $A = c_p^* / u_*$ [8], где c_p^* – скорость распространения ветровых волн. При $z_0/\langle h \rangle \sim c_p^* / u_*$ [7] выражение для скорости сухого осаждения в первом приближении можно записать в виде

$$V_0 м \approx \frac{k u_*}{c^*_p / u_*}. \qquad (4)$$

Скорость распространения волн, возникающих на поверхностях раздела сред с различной температурой и скоростью движения воздушных потоков, можно рассчитать по формуле Гельмгольца из условия устойчивости волн [9].

$$c_p^* / u_* = \frac{T_2 V_1 + T_1 V_2}{T_1 + T_2} \approx \frac{V_1 + V_2}{2}, \qquad (5)$$

где T_2 и T_1 – температура воздуха вблизи поверхности раздела соответственно верхнего и нижнего потоков, V_2 и V_1 – скорости воздушных потоков на z = 4 м и 1 м, соответственно. Под устойчивостью волн здесь понимается безотрывное

обтекание воздушным потоком неоднородностей подстилающей поверхности. Увеличение разности $|\Delta V|$ способствует росту неустойчивости волн, за счет возникновения условий срыва потока с ростом неоднородностей подстилающей поверхности.

Анализ волнообразования и его развития в пункте наблюдения, связи параметров волн со скоростью сухого осаждения озона позволил интерпретировать некоторые особенности их зависимостей.

Вариации скорости ветра в слое h = 3 м в начальные моменты времени прихода поверхностных волн усиливают перемешивание воздушных масс и приводят к некоторому росту содержания озона на z_2 = 4 м (рис. 3). При этом максимальный турбулентный поток озона направлен вниз к поверхности волн (рис. 4).

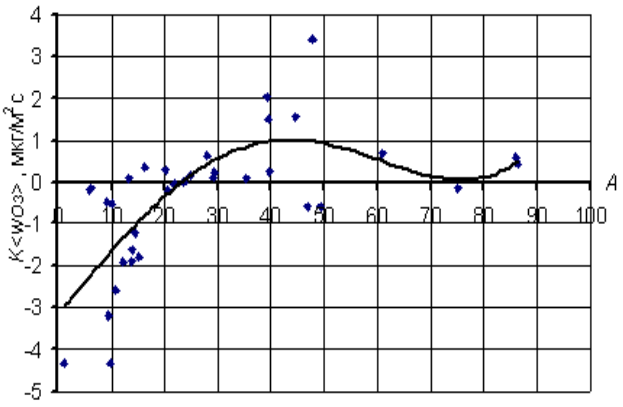


Рис. 4. Зависимость турбулентного потока озона от степени развития волн А

В дальнейшем рост высоты волн и их взаимодействие с ветром резко увеличивает скорость воздушного потока над гребнем волн за счет разности сил нормального давления с наветренной и подветренной стороны препятствия.

Возникшие силы трения при отрицательном ΔV создают поток импульса от волн в атмосферу, препятствующий стоку воздушных масс на водную поверхность. В результате этих процессов, с уменьшением турбулентного потока озона в слое h = 3 м, также происходит задержка стока озона и некоторое накопление на z_2 = 4 м за счет его притока с верхних слоев атмосферы.

Резкое уменьшение ΔV и скорости ветра практически до нулевого значения в слое h = 3 м, обусловленное процессами вихреобразования на поверхности гребней волн и переноса вихрей в вышележащие слои, приводит к резкому увеличению скорости осаждения озона на водную поверхность за счет инерционных сил. Ее максимальное значение $V_{оэ}$ = 4,1 см/с полученное из (2) свидетельствует о значительном превышении ее средней величины равной 0,75 см/с за указанный период наблюдения (рис. 5).

Наблюдаемое заметное уменьшение содержания озона на z = 4 м связано с процессом стока озона на водную поверхность при максимальной скорости осаждения. При этом поток озона на водную поверхность в 1 м^2 при изменении скорости осаждения V_o, рассчитанной по модели (4), от 0,7 до 7 см/с изменяется от 0,184 до 3 мкг/м^2 в секунду.

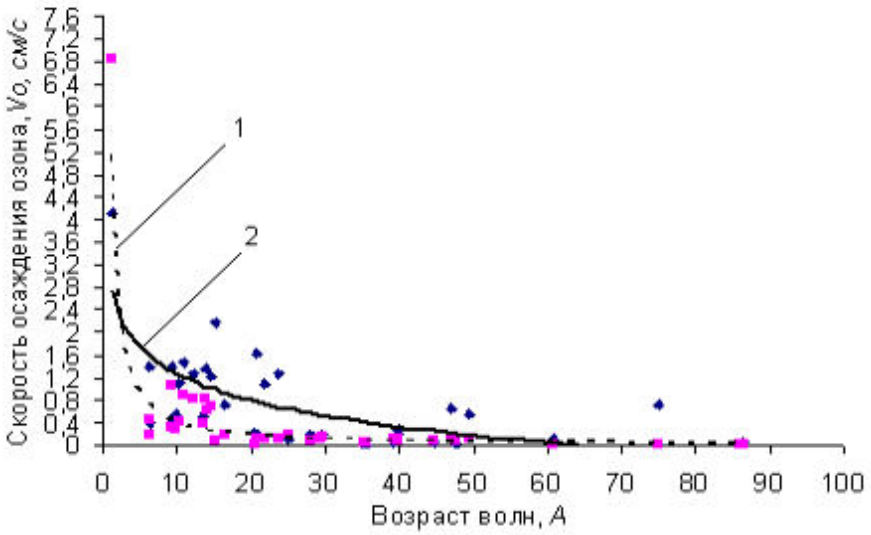


Рис. 5. Зависимость скорости осаждения озона от степени развития волн A в приводном слое атмосферы Байкала. 1 – кривая значений V_o, вычисленная по приближенной эмпирической модели (4), 2 – скорость осаждения Voэ, полученная из (2)

Сравнение рядов $V_{оэ}$ и V_o, полученных из (2) и (4) в условиях волнообразования показало тесную связь между вариациями $<V_{оэ}>$ и $<V_o>$. Значимый коэффициент корреляции между ними равен 0,785 со среднеквадратической ошибкой 0,214 при доверительной вероятности, равной 0,95. При этом существующее различие их средних значений $<V_{оэ}>$ = 0,753 см/с и $<V_o>$ = 0,576 см/с говорит о допустимом пределе случайной погрешности измерения.

С ростом возраста волн, развитие ветрового волнения при $c_p > V_{в1}$ (скорость ветра на z = 1 м) значительно снижает поток импульса из атмосферы к волнам и приводит к выравниванию профиля скорости ветра в слое h = 3 м при $\Delta V \to 0$ (рис. 3). В результате происходит уменьшение амплитуды вариаций турбулентного потока озона и ее затухание при $<w' O'_3> \to 0$ (рис. 4). Необходимо отметить, что эти процессы происходят при одновременном уменьшении u_*, способствующая уменьшению скорости осаждения озона с ростом возраста волн (рис. 5). Минимальная скорость осаждения, равная 0,12 см/с согласуется с оценками, сделанными по наблюдениям над озерной и морской поверхностью в условиях устойчивой стратификации в работах [1; 10]. Корреляционный анализ результатов наблюдения показал, что коэффициенты корреляции между скоростью осаждения озона и параметрами приводного слоя u_*, τ (поток импульса) значимы и равны, соответственно 0,394, 0,398. При этом также установлен значимый отрицательный коэффициент корреляции между возрастом волн и скоростью осаждения озона R = -0,524.

Таким образом, скорость осаждения озона на водную поверхность Байкала в условиях волнообразования определяется взаимодействием ветра и волн. В области значительных градиентов скорости ветра вблизи подстилающей водной поверхности поток импульса является основным механизмом стока озона на водную поверхность Байкала.

Заключение

Прямой метод измерения пульсаций основных метеорологических параметров и измерения концентраций газовых примесей на высотах z_1 и z_2 позволили оценить величину скорости сухого осаждения озона на водную поверхность Байкала.

В условиях волнообразования, в период его активного развития установлена высокая скорость сухого осаждения озона. Наиболее вероятной причиной являются процессы вихреобразования и срыв вихрей с поверхности гребней волн при обтекании их воздушным потоком. В результате вертикального переноса вихрей происходит резкое торможение потоков в слое измерения и увеличение скорости осаждения за счет инерционных сил. Это – важный результат, так как он обосновывает возможность учета динамического приводного слоя в региональных моделях вертикального распределения озона, где используются осредненные характеристики сухого осаждения.

Список литературы

1. *Aldaz F.* Flux measurements of atmospheric ozone over land and water // J. Geophys. Res. 1985. Vol. D3, N 90. P. 5547–5566.

2. Турбулентный поток озона над степью / Н. Ф. Еланский, Б. М. Копров, Д. Ю. Соколов, Н. С. Тиме // Физика атмосферы и океана. 1995. Т. 31, № 1. С. 109–114.

3. *Ровинский Ф. Я., Егоров В. И.* Озон, окислы азота и серы в нижней атмосфере. Л. : Гидрометеоиздат, 1986. 184 с.

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

5. *Китайгородский С. А.* Физика взаимодействия атмосферы и океана. Л. : Гидрометеоиздат, 1970. 283 с.

6. *Заславский М. М.* О параметрическом описании приводного слоя атмосферы // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 1995. Т. 31, № 5. С. 607–615.

7. *Полников В.* Г., *Волков Ю. В., Погарский Ф. А.* Интерпретация изменчивости характеристик приводного слоя атмосферы с помощью численной модели // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2003. Т. 39, № 3. С. 410–421.

8. *Janssen P. E. A. M.* Quazi-liner theory of wind wave generation applied to wind wave forecasting / J. Phys. Oceanogr. 1991. V. 21. P. 1389–1405.

9. *Матвеев Л. Т.* Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. Л. : Гидрометеоиздат, 1987. 303 с.

10. *Wesely M. L.*, *Cook D. R., Williams R. M.* Field measurement of small ozone fluxes to snow, wet bare soil and the water // Boundary-Layer Meteorology. 1981. Vol. 20. P. 459–471.

УДК 551.46(265.54)

Мониторинг проекта АРГО

М. А. Данченков (danchenkov4@gmail.com), Ю. Н. Волков

Дальневосточный региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт, г. Владивосток

Аннотация. Приведены основные сведения о сопровождении в РФ самого дорогого международного проекта в океанографии.

Ключевые слова: проект АРГО, Японское море

Введение

Проект АРГО (создание глобальной системы буев-измерителей) – основа новой отрасли науки – оперативной океанографии. Проект, запланированный первоначально на 5 лет, непрерывно развивается уже 20 лет. Этот проект также – пример глобализации (господства США) в океанографии. В проекте заняты все развитые и большинство развивающихся стран.

Основная цель проекта – непрерывный поток высококачественных данных температуры, солености, кислороде и глубинных течений.

Проект нужен для мониторинга состояния Мирового океана и его прогноза. Проект тесно связан с другими глобальными программами и с глобальными базами данных. Особенная связь у проекта с программами CLIVAR (изучение изменения климата) и GODAE (моделирование с усвоением данных).

Данные с буев ежедневно используются как начальные при использовании моделей глобального прогноза погоды. Число буев, составляющих сеть АРГО, увеличивалась непрерывно (табл. 1).

Таблица

Рост числа буев-измерителей (NN) в сети АРГО

Дата	NN	Дата	NN
3.3002	358		
3.2003	720		
2.2007	2804		
2.2009	3325		
2.2012	3500		
1.2013	3606		
1.2014	3739	8.2014	3603
1.2015	3854		
3.2016	3918	9.2016	3804
		10.2018	4000
2.2019	3909		
		6.2020	3964

Судя по темпам роста числа буев последние годы, проект будет продолжен и в ближайшее десятилетие. Стоимость буя обычной комплектации – примерно 20 тыс. долл., а все страны-участницы ежегодно выставляют около 300 буев. По объему вложенных средств проект – самый дорогой в океаногра-

фии. Но стоимость производимых по проекту буев – на порядок меньше, чем при производстве и исследовательских судов. Проект резко поднял требования к качеству данных, к емкости элементов питания, к технологии хранения данных. Все страны-участницы проекта выигрывают от объединения усилий- необычно большой поток качественных данных во всем Мировом океане (кроме Охотского и Баренцева морей) стал доступен тысячам пользователей.

ДВНИГМИ участвовал в проекте с 2000 г. [1; 2]. Всего с судов ДВНИГМИ было выставлено около 50 буев. Два буя были закуплены Гидрометкомитетом. Каждый из буев проработал более 4 лет (с 2002 г. до 2008 и 2009 г. соответственно).

В 2006–2012 гг. сопровождение проекта АРГО в ДВНИГМИ не было. В этот период незамеченным остались постановки буев в российской ИЭЗ в Японском море патрульными американскими самолетами и китайскими рыболовными судами. После 2012 г. исчезли уже и следы пребывания России в проекте (рис. 1).

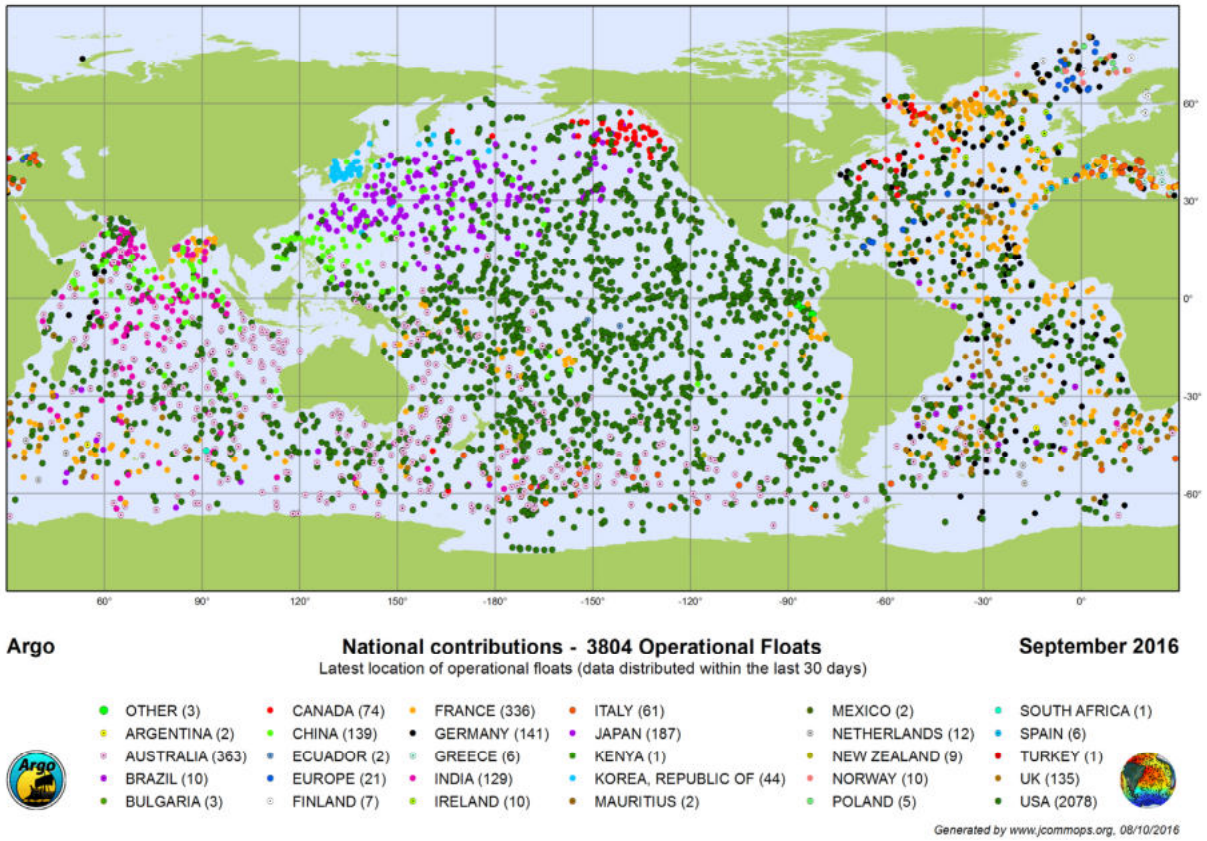


Рис. 1. Распределение станций и состав государств-участников проекта в 2016 г.

В 2013 г. работа в ДВНИГМИ по проекту возобновилась, но уже в 2015 г. ее финансирование прекратилось. После этого ограниченный мониторинг продолжался в ограниченном объеме (для сохранения полученного знания и опыта).

В 2015–2019 гг. (в 2019 г. полгода) мониторинг проекта велся по нескольким направлениям:

– пополнение Каталога данных буев АРГО в Японском море; восточнее Камчатки; в Арктике и в Черном море (всего около 400 буев);

– составление схем глубинного дрейфа буев в Японском море (около 60 буев);

– скачивание, контроль и анализ данных станций (более 80 буев);

– анализ материалов ежегодного совещания Научного Комитета АРГО (20 папок);

– отслеживание проникновения иностранных буев-измерителей в восточной части экономической зоны России (около 70 случаев).

Кроме схем дрейфа строились и специальные графики (пространственного и временного распределения параметров).

Каталоги буев АРГО

Каталоги содержат сведения о буях-измерителях во всех бассейнах, примыкающих к РФ: в дальневосточных морях (Японское и Охотское), прилегающей к Камчатке части Тихого океана, в Арктике и в Черном море. В 2018–2019гг. особое внимание, как и ранее, уделялось Японскому морю.

Сведения о некоторых буях заносятся из публикаций, иногда – из ведомственных сайтов.

Наиболее трудно искать сведения о буях в российской Арктике. На сайтах АРГО нет особого раздела Арктики. На всех иностранных сайтах буи в российской Арктике не отражены. Их как бы не существует. А, если случайно их дрейф и появляется в публикациях, то никогда не приводится номера буя и сопутствующие сведения. Так до сих пор мы не нашли номер буя, застрявшего у северного острова Новой Земли (рис. 1).

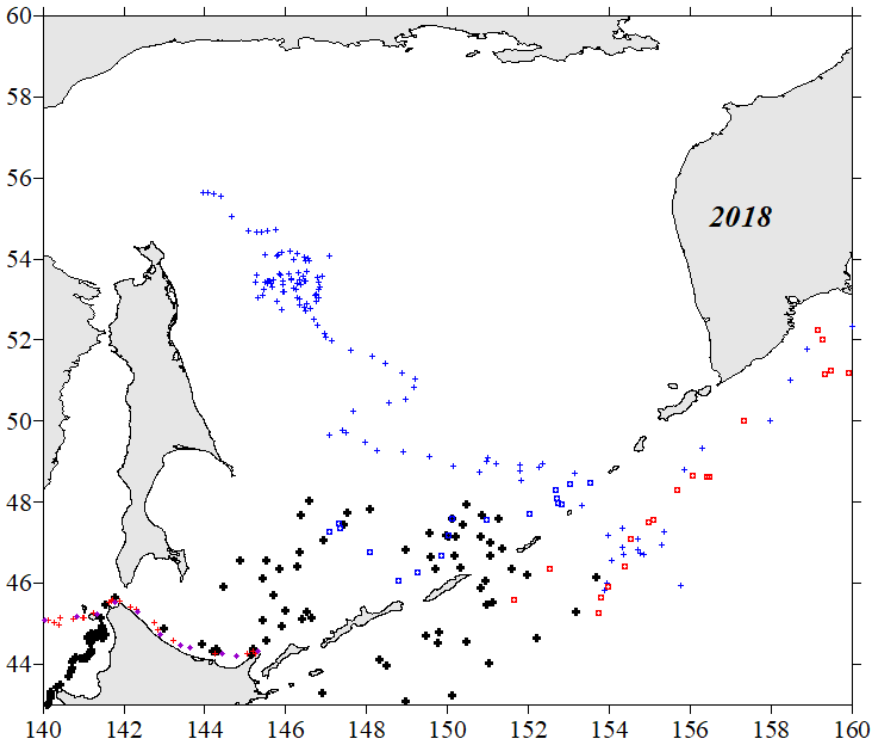


Рис. 2. Океанографические станции 4 буев АРГО в Охотском море в 2018 г.

Из известных нам 36 буев-измерителей в Охотском море на французском сайте АРГО отражены лишь несколько (рис. 2).

Из анализа документов совещаний Научного комитета АРГО нельзя выяснить, сколько и когда Япония выставила буев-измерителей в Охотском море. Сведения о них не отражались на информационном сайте АРГО.

В 2018 г. число ежегодно выставляемых в Японском море буев было таким же, как и в предыдущие годы (10–15). Но число буев, показываемых на сайтах АРГО, было (рис. 3) ниже, чем было в предыдущие годы. А уже в 2019 г. число выставляемых в Японском море буев резко уменьшилось.

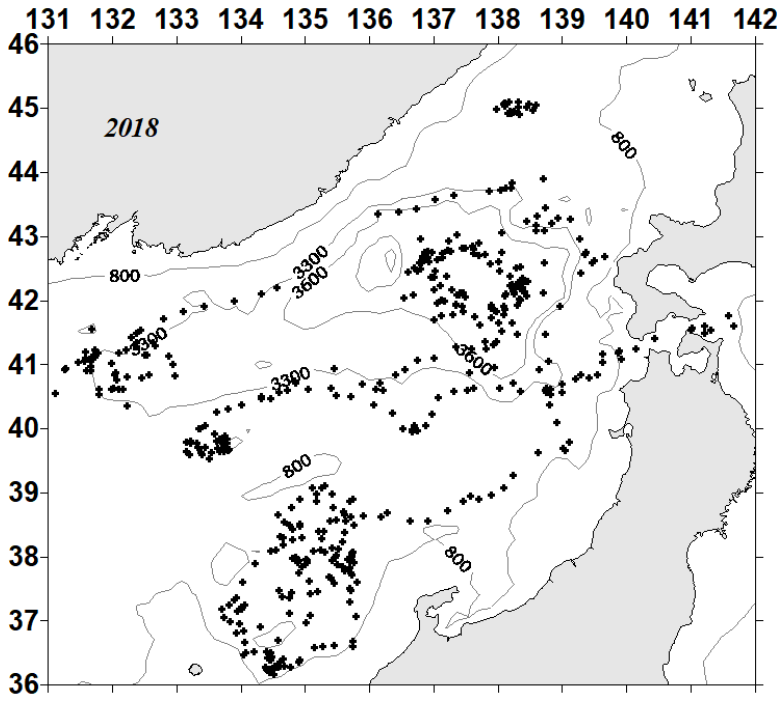


Рис. 3. Океанографические станции буев АРГО в Японском море в 2018 г.

По состоянию на 2018 г. общее число обработанных буев в Японском море – 63. Обработка включала, кроме контроля и корректировки данных, построение траекторий дрейфа глубинных течений (все), построение траекторий поверхностного дрейфа (выборочно), вычисление скорости дрейфа (выборочно), построение временной изменчивости характеристик на горизонтах.

Течения Японского моря по данным дрейфа буев АРГО

По данным АРГО подготовлены осредненные сезонные схемы глубинных течений Японского моря, построены схемы движения вихрей, составлен атлас глубинных течений.

Работа каждого буя АРГО описывается четырьмя файлами (схема дрейфа, информация о постановке, данные связи на поверхности, данные измерений температуры и солености). Чтобы построить по этим данным пространственную схему течений нельзя использовать только траектории. Параметры дрейфа пересчитывались в составляющие скорости и осреднялись. Так были построены схемы глубинных течений для 4 основных сезонов. Обобщенная схема глубин-

ных (в основном, 800 м, но в диапазоне 500–1000 м) течений представлена на рис. 4. Широкий диапазон глубины дрейфа отражает не только разные установочные значения, но и разные значения плотности морской воды в разных частях моря.

Полученные схемы принципиально меняют представление о глубинных течениях в некоторых районах дальневосточных морей. В Японском море траектории дрейфа буев подтвердили схему течений, построенную по первым масштабным измерениям глубинными дрифтерами. Главной особенностью циркуляции вод Японского моря являются крупномасштабные вихри. Наиболее интересный из них Восточный, расположен между возвышенностью Богорова и островом Хоккайдо. Он ответственен за перераспределение струй теплого течения во внутренней области круговорота и за резкое ускорение Цусимского течения в этой части моря.

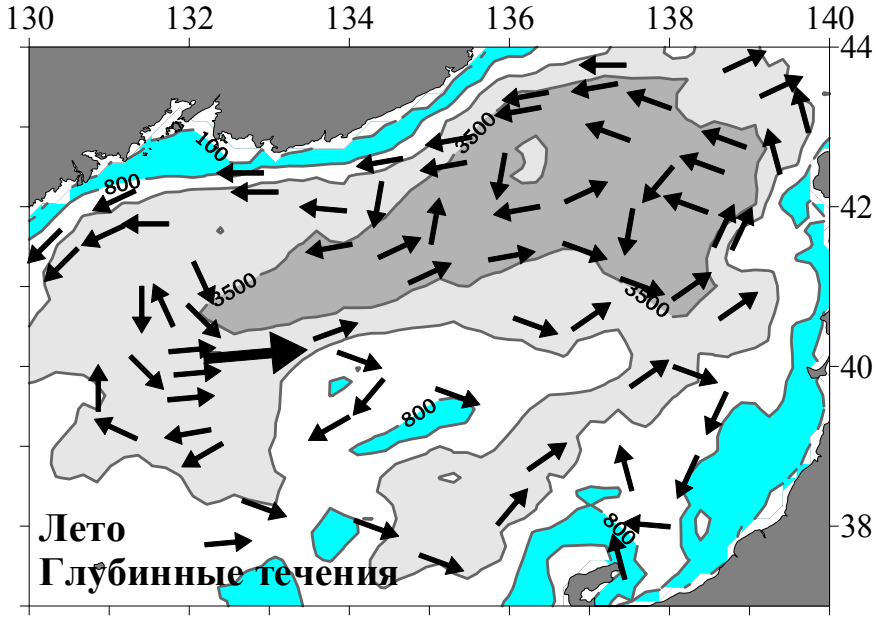


Рис. 4. Глубинные (500–1000 м) течения Японского моря по данным буев АРГО

ИЭЗ

Мониторинг захождения буев и производства океанографических станций в российской ИЭЗ ведется непрерывно с 2000 г.

Захождение буев в экономические зоны и производство измерений было предусмотрено резолюцией МОК ЮНЕСКО XX-6: *Concerned coastal states must be informed in advance, through appropriate channels, of all deployments of profiling floats which might drift into waters under their jurisdiction, indicating the exact location of such deployments*. Или в переводе: «Страны, в которые заходят буи, должны быть заранее информированы по соответствующим каналам о местах постановки буев». Логичнее было бы написать, что «страны будут информированы о захождении буев-измерителей в ИЭЗ государства», так как места постановки и места захождения буев сильно отличаются.

В 2014 г. РФ направил в МОК ЮНЕСКО требование странам- участникам проекта сообщать в РФ о постановке буев, могущих достичь российской ИЭЗ. Это требование привело к резкому сокращению доступной информации.

По сведениям информационного центра АРГО количество буев, зашедших в российскую ИЭЗ после этого, непрерывно уменьшалось. Пример кратно уменьшенного количества станций буев в дальневосточных морях (в 2020 г.) приведен на рис. 5.

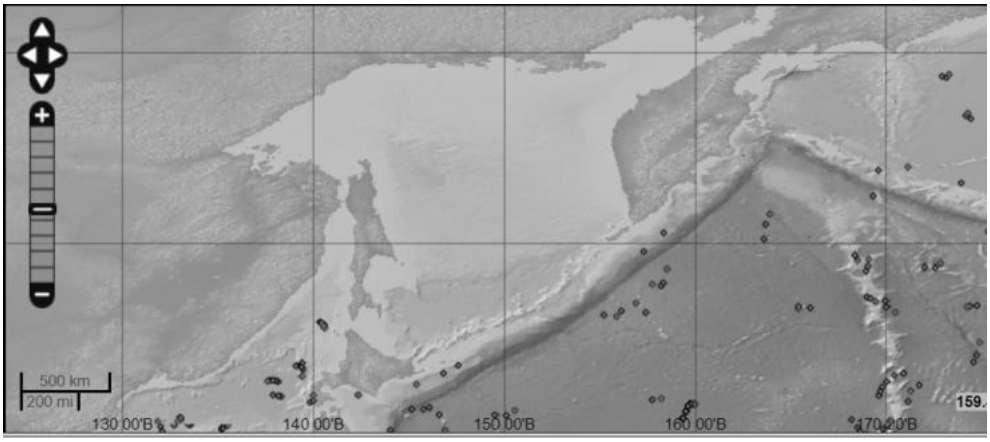


Рис. 5. Пример отображения положения буев в дальневосточных морях

Обычные места захождения буев-измерителей в восточной части российской ИЭЗ – район восточнее Камчатки, Баренцево, Охотское, Чукотское и Японское моря. В западной части страны иностранные буи-измерители обычны в Черном и Баренцевом морях

Среди отмеченных особенностей последнего времени – уменьшение числа буев в Японском море и их рост в Черном море. Интересно, что в Черном море буи стали ставиться не прилегающими Турцией и Болгарией, а неблизкой Италией.

По нашему мнению, требование о заблаговременном информировании о постановке буев может привести к ограничению доступа к данным АРГО. Гораздо полезнее непрерывный мониторинг буев. В настоящее время оповещение о захождении буев строго исполняется только со стороны США. Но оповещения о более многочисленных постановках буев Канады, Японии, Южной Кореи и Китая нам не было никогда.

Сопровождение проекта АРГО отвечает интересам национальной безопасности РФ и исключительно полезен в условиях сокращения собственного исследовательского флота.

Список литература

1. *Данченков М.* Проекту АРГО – пятнадцать лет. Дальневосточный Ученый. 2015, № 6, с. 3.
2. *Danchenkov M. A.* ARGO project in Russia. Pacific oceanography, 2003. V. 1, N 1. P. 74–75.

УДК 551.467

Автономная ледовая океанологическая станция

А. Г. Островский (osasha@ocean.ru), С. В. Волков, А. Г. Зацепин,
О. Ю. Кочетов, Д. А. Швоев

Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, г. Москва

Аннотация. Доклад посвящен современным автономным океанологическим профилографам, которые предназначены для измерений вертикальных профилей характеристик морской среды в целях оперативной океанографии и для климатических исследований в Арктике и в акватоиях покрытых льдом. К таким аппаратам относятся зонды, периодически вытравливаемые с помощью поверхностных лебедок, а также зонды, перемещающиеся по вертикально натянутому тросу на буйковых станциях. В Институт океанологии РАН разрабатывается автоматизированная система подледных зондирований в составе автономной ледовой дрейфующей станции. В отличие от зарубежных аналогов система позволит измерять вертикальный профиль скорости течения и осадку льда.

Ключевые слова: Арктика, автономный зондирующий аппарат, носитель переменной плавучести, акустический доплеровский профилограф течений, CTD-зонд, осадка льда.

Автоматизированный мониторинг среды в арктическом секторе Российской Федерации остро нуждается в новых эффективных технических средствах. В этой области фундаментально-ориентированных и прикладных исследований российской океанологии еще предстоит выйти на мировой уровень. США, Канада, ЕС и Япония развернули целую сеть автономных дрейфующих гидрологических станций, в основном с использованием вертикально-профилирующего профилографа Ice Tethered Profiler (ITP) [1]. Начиная с 2004 г. один только Вудсхольский океанографический институт (США) запустил 108 зондов ITP на дрейфующих льдинах для долговременного круглогодичного мониторинга.

Автоматизированные океанологические зондирующие системы, предназначенные для Арктического бассейна, в России пока не производятся. Вмораживаемые в лед термопрофилирующие дрифтеры со спутниковым каналом связи, датчиками температуры воздуха и атмосферного давления, оснащенные термокосами [2], не могут рассматриваться как альтернатива океанологической зондирующей системе, а лишь как дополнение к ней. Термокосы не измеряют профили солености и плотности вод, а также скорости течения, и других важных параметров водной среды, таких как концентрация растворенного в воде кислорода, флуоресценция хлорофилла «а», мутность. Кроме того, толщина слоя воды, который охватывается измерениями для термокос, даже в перспективе не превышает 150 м, тогда как зондирующие системы могут измерять профили океанологических параметров в слое 800 м и более [1]. Необходимость зондирования до таких больших глубин обусловлена хотя бы тем, что таким образом удается контролировать слой Атлантических вод, которые являются основным источником тепла и соли для арктической водной среды.

Для мониторинга состояния морской среды разрабатывается автоматизированная система подледных зондирований в составе автономной ледовой дрейфующей станции (рис. 1). Система состоит из:

– подводного перемещающегося вверх-вниз носителя, автоматически передвигающегося по тросу, который вывешен с грузом с плавучего буя-держателя на припайном или дрейфующем льду [3];

– метеостанции (температура воздуха + атмосферное давление) с системой спутниковой связи Гонец-М или Iridium и навигации GPS/Глонасс.

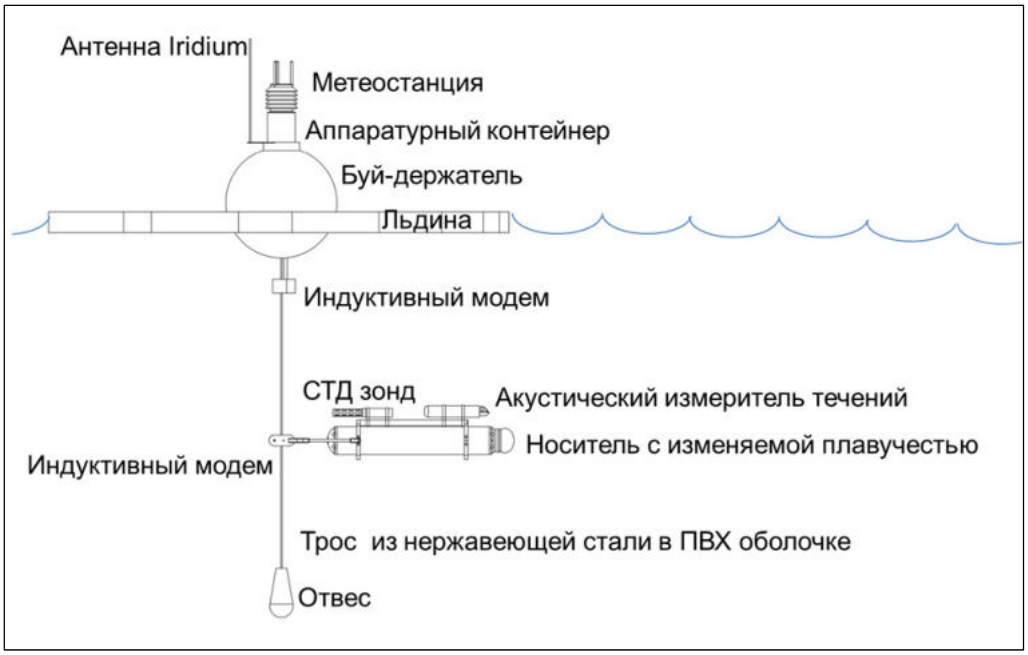


Рис. 1. Автономная ледовая дрейфующая станция ИОРАН

Разрабатывается особо экономичный носитель, периодически погружающийся воль троса на глубину и поднимающийся к нижней поверхности льда (рис. 2). В состав носителя входит программируемый движитель, выполненный на основе устройства изменения плавучести, котрое имеет адаптивный объем, позволяющий регулировать величину архимедовой силы, выталкивающей носитель из воды, что обеспечивает экономию источника электропитания носителя, который снаряжен батареей, достаточно энергоемкой для многократного профилирования водной толщи на протяжении не менее 6 месяцев. Общее количество циклов погружения/всплытия зависит от скорости течений и глубины погружения, но оно должно быть не менее 200 до глубины 300 м при скорости течения до 0,3 м/с.

Носитель оснащен:

– комплектом датчиков температуры, электропроводности и давления RBRBrevio СТД;

– акустическим доплеровским профилографом течений (АДПТ) Nortek Aquadopp.

Глубина погружения носителя с АДПТ будет регистрироваться по показаниям датчика давления. В минимальной комплектации АДПТ должен обеспечивать измерение вертикального профиля скорости течения в столбе воды толщиной не менее 3 м с разрешением по вертикали не хуже 0,3 м. Причем АДПТ должен быть смонтирован в верхней части носителя, а измерения должны про-

изводиться путем импульсного зондирования водной толщи снизу вверх. При подъеме носителя на некотором расстоянии от нижней кромки льда АДПТ начнет регистрировать отраженный от льда сигнал. По этим данным будет определяться расстояние до горизонта, с которого начинается ледовый покров. Остановка носителя должна производиться на определенном расстоянии от нижней поверхности льда. Используя знание этого расстояния, а также значение давления на горизонте остановки носителя, можно будет определить характерную толщину льда.

Периодически погружаясь вдоль троса на заданную глубину и поднимаясь к поверхности моря, разрабатываемый аппарат будет проводить измерения вертикальных профилей скорости течения. Для введения поправок на дрейф к измерениям скорости течений будет разработана методика, основанная на использовании данных позиционирования с помощью программно-технических средств GPS/ГЛОНАСС.

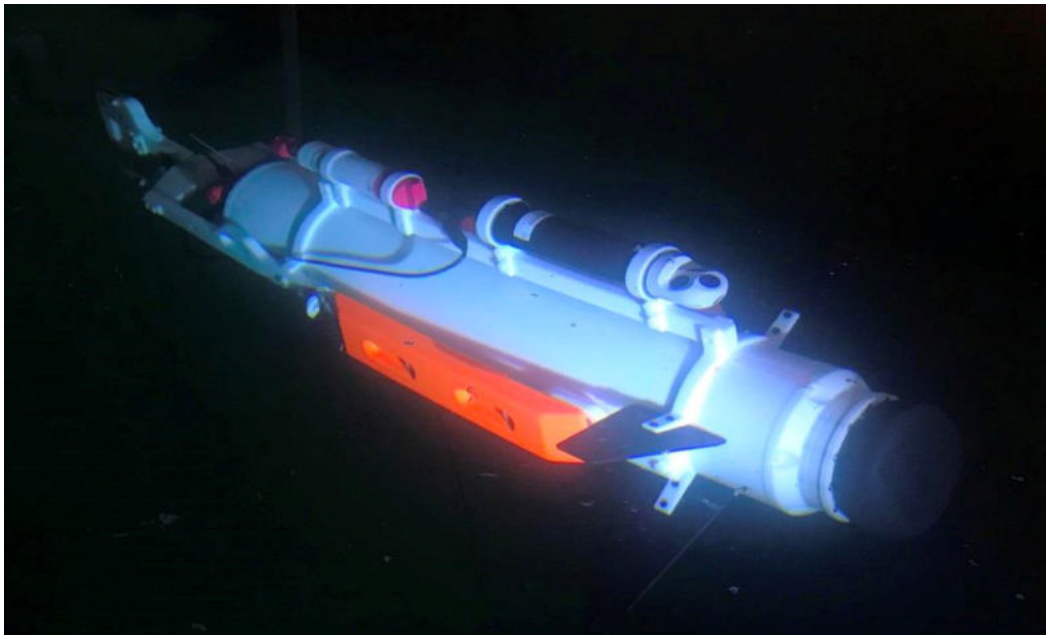


Рис. 2. Подводный профилирующий носитель с СТД зондом RBRBrevio и акустическим доплеровским профилографом течений Nortek Aquadopp (подводная съемка во время морских испытаний)

Для позиционирования, оперативной передачи данных и приема команд управления процессом измерений будет проведена разработка программно-технических средств передачи данных. Связной тракт будет состоять из двух основных участков:

– бесконтактной связи в морской воде между профилирующим зондом и поверхностным буем-держателем;

– связи между поверхностным буем-держателем и береговым пунктом сбора и обработки данных и управления мониторингом.

Технические средства, интегрирующие два основных участка связного тракта, должны располагаться в ретрансляционном плавучем буе, который вмораживается в лед. Буй будет оснащен метеостанцией с датчиками температуры

воздуха и атмосферного давления. В состав технических средств, размещенных на буе-держателе должен входить многофункциональный терминал связи Гонец/Iridium, способный принять и передать информацию на искусственные спутники Земли (ИСЗ) и определить координаты посредством встроенного ГЛОНАСС/GPS модема.

Буй-держатель должен иметь достаточную плавучесть, чтобы в случае разрушения или таяния ледяного покрова удержать на плаву всю систему, при этом стация должна сохранить работоспособность.

Работа выполнена по гранту РФФИ № 18-05-60124 – Арктика и теме госзадания Минобрнауки № 0149-2019-0011.

Список литературы

1. Automated Ice-Tethered Profilers for Seawater Observations under Pack Ice / R. Krishfield, J. Toole, A. Proshutinsky, M. -L. Timmermans // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2008. Vol. 25. P. 2091–2105.

2. Опыт применения термопрофилирующих дрифтеров для исследований арктического региона Мирового океана / С. В. Мотыжев [и др.] // Арктика: экология и экономика. 2016. № 1 (21). С. 38–45.

3. Автоматический подледный зонд / А. Г. Островский, А. Г. Зацепин, Д. А. Швоев, С. В. Волков, О. Ю. Кочетов, В. М. Ольшанский // Океанология/ 2020. Т. 16, № 6.

УДК 528.8

Применение данных тепловой инфракрасной съемки для оценки характеристик «острова тепла» г. Братска

Е. Н. Сутырина (ensut78@gmail.com)

Иркутский государственный университет, г. Иркутск

Аннотация. Приводятся предварительные итоги исследования городского «острова тепла» г. Братска. С применением информации о температуре поверхности суши, восстановленной по данным радиометра AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) за период с 1998 по 2019 г., были определены размеры городского «острова тепла» г. Братска, изучена его суточная, сезонная и многолетняя динамика. Оценены значения разницы температур между городом и пригородом, которые достигают летом в дневное время суток 8–10 °С.

Ключевые слова: город Братск, температура поверхности, данные радиометра AVHRR, городской «остров тепла».

Введение

Целью исследования является изучение изменения границ и интенсивности городского «острова тепла» г. Братска за многолетний период. Формирование городского «острова тепла» служит примеров антропогенного влияния на климат города. «Острова тепла» проявляются более высокой температурой воздуха в городе по сравнению с окружающей территорией. Основными причинами появления городских «островов тепла» являются увеличение использования искусственных материалов и повышение антропогенного производства тепла. Оценка характеристик городских «островов тепла» важна для целого ряда вопросов и тем в науках о Земле, имеющих ключевое значение для городской климатологии, глобальных изменений окружающей среды и взаимодействия человека с окружающей средой, а также важна для практики планирования и муниципального управления.

Материалы и методы исследования

В рамках данной работы для оценки пространственного распределения теплового загрязнения и исследования феномена «острова тепла» г. Братска была использована информация о температуре поверхности суши (LST), восстановленная с применением алгоритмов, описанных в [1], по данным радиометра AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) на борту метеорологических околополярных спутников серии NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) за 1998–2019 гг. Спутниковые данные дают одновременное покрытие всей территории города. Это является одним из преимуществ использования данных дистанционного зондирования по сравнению с использованием данных, которые регистрируются на городских метеорологических станциях. Важным индикатором интенсивности «острова тепла» является разница между температурой города и его окрестностей [2]. Температура поверхности суши LST и ее пространственно-временные вариации могут быть использованы для исследований городского «острова тепла», так как разница

между температурой поверхности в пределах города и его окрестностей является результатом изменений в процессе урбанизации подстилающего покрова, теплоемкости и трехмерной структуры городских построек. В работе границы «островов тепла» выделялись по положению наибольшего градиента температуры поверхности суши LST.

Обсуждение результатов

В результате исследования были получены разновременные карты с отображением «острова тепла» г. Братска.

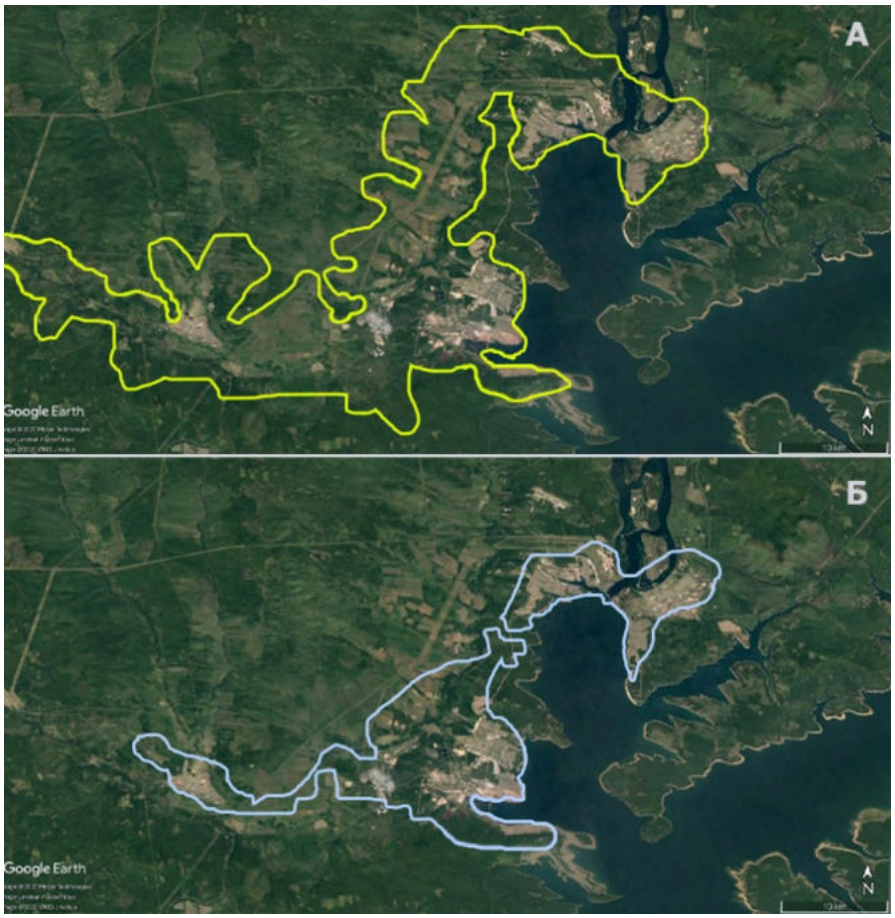


Рис. 1. Положение «острова тепла» г. Братска днем (А) и ночью (Б) в июле 2019 г.

«Остров тепла» г. Братска характеризуется хорошо выраженной суточной динамикой, что достаточно характерно для этих тепловых аномалий, однако наибольших значений разница температур между городом и пригородом здесь наблюдается не ночью, а днем и может достигать летом 8–10 °С, вечером и ночью этот показатель существенно снижается до 3–5 °С. Это может объясняться тем, что в дневное время суток наибольший вклад в формирование данного «острова тепла» может давать недостаток или отсутствие растительности на городских и прилегающих к ним территориях, а также наличием сложных орографических и метеорологических условий влиянием крупных водных объектов на «остров тепла» данных населенных пунктов, а также. Размер «острова тепла» г. Братска в дневное время суток также превосходит по размеру «остров

тепла» в вечернее и ночное время, что видно на рис. 1. «Остров тепла» также детектируется зимой, но по размеру уступают «острову тепла» летом, что, видимо также может быть связано с наибольшим влиянием недостатка или отсутствия растительности на формирование «острова тепла» летом в дневное время.

Кроме суточной и сезонной динамики в работе оценивалась межгодовая изменчивость размеров в интенсивности изучаемого «острова тепла». И если интенсивность, выраженная через перепад температуры между городом и его окрестностью, не показала статистически значимых тенденций за период с 1998 по 2019 г., то площадь «острова тепла» заметно выросли за период исследования, что видно по положению границы «острова тепла» в июле 1998 и 2019 гг. в одно и тоже время днем (рис. 2). Обнаруженное увеличение площади вероятно связано с развитием исследуемых городов, а также с трансформацией ландшафтов и снижением густоты растительного покрова в пригородах.

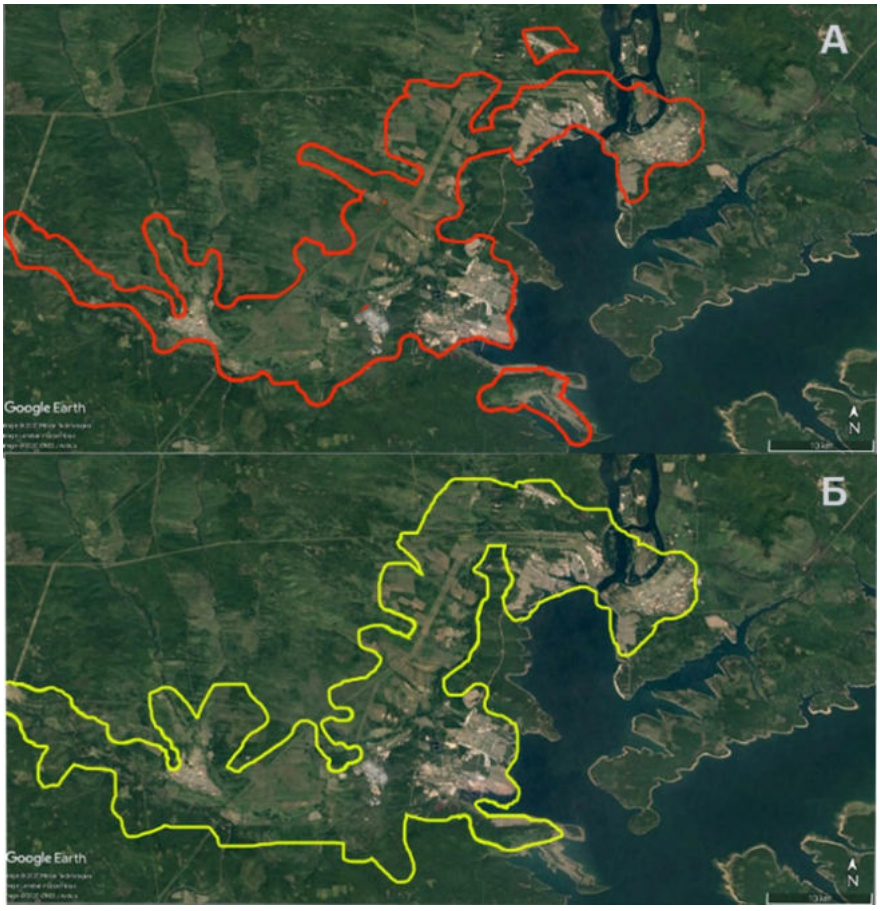


Рис. 2. Положение «острова тепла» г. Братска в 1998 (А) и 2019 г. (Б) в июле днем

В работе для оценки вклада недостатка растительности в формировании острова тепла летом в дневное время были сопоставлены значения температуры (LST) с рассчитанным по данным видимого и ближнего инфракрасного диапазонов значениям вегетационного индекса (NDVI), который широко используется для оценки состояния растительности. Более высокие значения NDVI указывают на более высокую долю растительности от площади пикселя. Анализ взаимосвязей между этими показателями обнаружил, что температура поверхно-

сти (LST) в дневное время суток находится в тесной обратной связи с NDVI, в то время как ночью и вечером эта связь оказалась менее выраженной. На рис. 3 продемонстрировано соотношение положения границ «острова тепла» г. Братска с характером растительности, которое показывает хорошее соответствие.

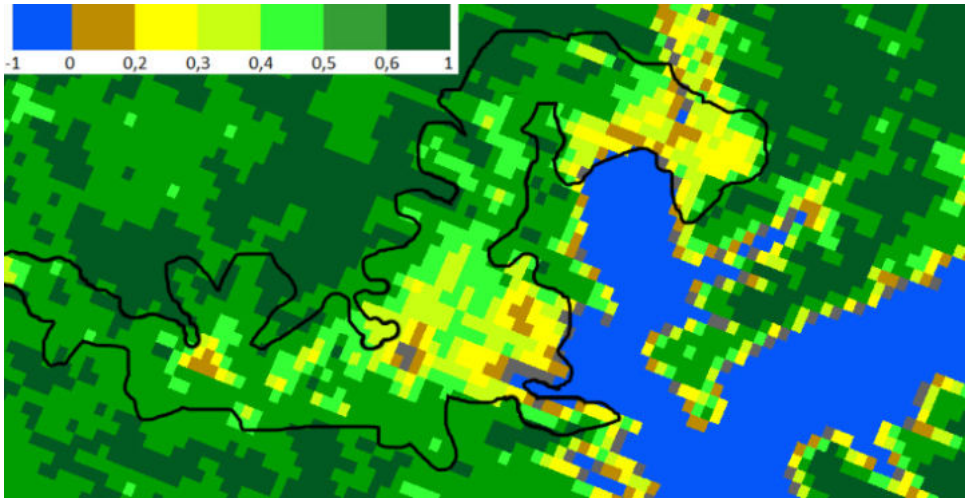


Рис. 3. Положение границ «острова тепла» г. Братска (показано черной линией) и распределения индекса NDVI (показан цветовыми градациями) по состоянию на 12 часов дня 1 июля 2019 г.

Выводы

Полученные результаты исследования городских «островов тепла» могут быть использованы городскими планировщиками и указывают на необходимость пересмотра политики городского проектирования и ландшафтного дизайна для смягчения неблагоприятных тепловых эффектов урбанизации. А выявленная отрицательная корреляция между LST и NDVI указывает на то, что создание дополнительных зеленых зон в пределах г. Братска и его пригородов могут ослабить эффект данного городского «остров тепла».

Исследование выполнено при поддержке РФФИ, гранты № 17-29-05045, 20-45-380032.

Список литературы

1. LST estimation from NOAA-AVHRR data / J. A. Sobrino, Y. Julien, V. Hidalgo, J. C. Jimenez, G. Soria, C. Mattar, B. Franch, R. Oltra, J. Cuenca // WATCH Technical Report. 2008. N 9. 14 p.

2. *Weng Q.* Techniques and Methods in Urban Remote Sensing. New Jersey : Wiley-IEEE Press, 2020. 384 p.

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПОДГОТОВКИ КАДРОВ В СФЕРЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ

УДК 378.016

Некоторые аспекты в подготовке гидрологов

О. А. Бархатова (barhat@geogr.isu.ru)

Иркутский государственный университет, г. Иркутск

Аннотация. Данное исследование является попыткой определить круг проблем и задач гидрологии, особенно в подготовке специалистов гидрологов. Гидрология как наука постоянно изменяется, появляются новые направления, методологии, приоритеты, что приводит к необходимости изменения подходов к гидрологическому образованию.

Ключевые слова: гидрология, гидрологи, гидрологическое образование.

Актуальность и перспектива

Роль гидрологии в жизни человека, часто недооцениваемая, исключительна, что обусловлено не особыми достоинствами гидрологов, а вполне объективными обстоятельствами – уникальными свойствами воды как химического вещества, являющегося главным компонентом всего живого и той среды, в которой мы способны обитать.

Возможности гидрологии еще до конца не осознаны и не продуманы. Они поистине неисчерпаемы. Традиционно в рамках гидрологии изучались речной сток на планете и в той или иной мере опасные гидрологические явления, но не все и не в полной мере. Но гидрология неизбежно должна расширять область своих интересов и своей ответственности, в том числе и там, где она пока себя еще не проявила, потому что и не пыталась это осуществить.

На сегодняшний момент произошли изменения в методах гидрологии, широко стали использовать моделирование, расчеты разного рода, оценку и прогнозирование гидрологических процессов и явлений.

Данное исследование, является попыткой определить круг проблем и задач гидрологии, которая постоянно изменяется, появляются новые направления, методологии и приоритеты.

Необходимо отдавать предпочтение аналитическому подходу перед чисто описательным. От студентов, обучающихся по направлению гидрометеорологии, это потребует более серьезных усилий и более глубоких познаний физики и математики, иначе продвижение вперед будет затруднено.

Гидрология приобретает все возрастающее значение при решении задач научного обоснования строительного и экологического проектирования, правильного земле- и водопользования, охраны природной среды, энергетических, водохозяйственных и коммуникационных проектов. Другая немаловажная область ее реализации – это прогнозы речного стока и опасных гидрологических явлений, таких как наводнения, селевые потоки, катастрофические обвалы и лавины в горах, загрязнение территории и речного стока.

Гидрология – это также один из важнейших научных элементов системы жизнеобеспечения человечества.

Сегодня уже никого не надо убеждать в том, что качественное высшее образование – залог успешного, обеспеченного будущего. Оно необходимо каждому человеку в современном мире, чтобы добиться успеха и реализовать себя. Гидролог – одна из тех профессий, которая высоко ценится на рынке труда из-за ее важности, поэтому подготовка квалифицированных специалистов этого направления – это государственная задача, которая стоит перед педагогическими составами вузов.

Развитие гидрологических знаний всегда стимулировалось, во-первых, извечным стремлением людей познать неизвестное, в частности законы природы, и, во-вторых, практическими потребностями.

Проблемные моменты в обучении гидрологов

В настоящее время гидрология, как и многие другие науки, испытывает определенный кризис. Фундаментальная гидрология в последнее десятилетия постепенно угасает.

Многие государственные программы, например связанные с экологическими проблемами или катастрофическими природными явлениями, заведомо обречены на неудачу, так как при своей реализации не имеют, подлинно научного и в первую очередь гидрологического обоснования.

Гидрология больше рассматривается как технология, чем как наука. Эта позиция указывает на очень низкий уровень гидрологии, что в свою очередь привело к очень несовершенной технологии в прикладных дисциплинах.

Наблюдается также подмена некоторыми частными фирмами, выполняющими на заказ проектную документацию и экспертизу, научного подхода красивой «компьютерной картинкой».

Одна из постоянных и главных проблем – это разобщенность гидрологического сообщества, рассредоточившегося по разным «углам» гидрологической науки, как следствие ее дезинтеграции [1].

Имеются проблемы и в подготовке специалистов гидрологов. Первое, что можно отметить, это то, что достижения в гидрологии за последние полвека практически не нашли своего отображения в учебниках для студентов, специализирующихся по данной или смежным специальностям. Такому положению вещей в немалой степени способствовало жесткое правило соответствия содержания учебников учебным программам, которые разрабатывались в МГУ, под эгидой УМО. Поэтому многие преподаватели вынуждены читать свои курсы, не ориентируясь на устаревшие учебники и программы, или же наоборот, при-

способливаясь к ним. Ситуацию немного смягчало возможность выпуска учебных пособий, при создании которых (по сравнению с учебниками) предоставлена большая степень свободы и где имеется возможность отобразить новые тенденции в гидрологии.

Произошли значительные изменения в структуре высшего образования. Произошел переход от хорошо отработанной схемы подготовки специалистов к ступенчатым направлениям: бакалавриат – магистратура – аспирантура. При формировании новых направлений подготовки потерялась некоторая целостность в образовании. Так, объединение двух специальностей в одно направление «Гидрометеорология» в рамках бакалавриата и магистратуры привело к утрате индивидуальности гидрологии как самостоятельной дисциплины. Был потерян ряд основополагающих дисциплин, снижен объем блока физико-математических дисциплин, что привело к ослаблению фундаментальных знаний, необходимых для прогнозов и гидрологических расчетов. Исчезла формулировка в дипломе «Гидролог. Инженер», что сразу снизило привлекаемость получаемого образования. Можно также считать ошибкой разрешение поступать на двухлетний курс обучения в магистратуру лицам, не имеющим соответствующего профиля бакалаврского образования, что вызывает существенные трудности в общении даже на уровне терминологии.

Имеются и другие проблемы. При реализации образовательного процесса Министерством науки и высшего образования РФ дополнительно не финансируются условия необходимые при организации учебного процесса, такие как, например, технические: наличие компьютеров, программных пакетов, гидрометрических и геодезических приборов и плавсредств и др., тем самым ограничивает возможности применения теоретических знаний на практике.

Еще одна проблема, в том, что гидрологов вузами по всей стране выпускается мало. Специальность в настоящее время довольно редкая, и всего только семь вузов страны готовят классических гидрологов [2]. Так, например, на протяжении последних пяти лет в Иркутском государственном университете (ИГУ) ежегодно набирают всего 11 человек, а выпускают не более 5 и в этом тоже проблема подготовки гидрологов. Это связано с тем, что при поступлении на направление «Гидрометеорология» профильным предметом определена география. В результате этого поступающие на данное направление не догадываются о том, что при обучении им придется столкнуться с большим объемом дисциплин физико-математического блока, что приводит к образованию академической задолженности у студентов и последующим их отчислением. Второй отрицательный момент выбора профильной дисциплиной географии – это то, что школьники очень неохотно выбирают ее в качестве дисциплины ЕГЭ. При опросе поступающих школьников на географический факультет было отмечено, что многие из них не могут объяснить, что такое гидрология. В результате этого конкурс на это направление самый низкий. Схожая картина наблюдается во всех вузах, где ведется подготовка гидрологов.

Почему же школьники практически не имеют представления о гидрологии? Возможно, это связано с уникальностью науки и малочисленности специ-

алистов, способных личным примером воодушевить подрастающее поколение романтикой, сложностью и привлекательностью дела, слабой профориентационной работе в школах. Возможно, и с формированным культом обеспеченной жизни современным поколением, где стремление к «красивой и богатой» жизни ставится превыше всего. Хотя гидрология в последнее время становится достаточно прибыльной профессией.

В стране существует явный дефицит специалистов этого профиля. Начиная с 2000 г. спрос на выпускников гидрологов многократно превышает предложение, так на пример в ИГУ на одного выпускника приходится несколько официальных заявок, а неофициальных еще больше. Особенно много предложений поступает от отраслевых институтов, получающих заказы под реализацию конкретных проектов строительства дорог, трубопроводов и т. п. Этот, безусловно, позитивный результат связан с реальной нехваткой специалистов в отраслевых и академических институтах, в различных водохозяйственных организациях и особенно в последнее время в подразделениях Росгидромета.

Один из этапов выхода из этой ситуации это переустроить гидрологическое образование и найти новые пути привлечения молодых людей в гидрологию.

Все вышесказанное свидетельствует о необходимости подготовки нового поколения гидрологов, профессионально и морально готовых поднимать свою науку на должный уровень.

Научно-методические подходы, используемые в гидрологии

Сергеем Александровичем Советовым на основе курса гидрологии был создан в 1920 г. первый учебник по «Общей гидрологии», который дважды (1929, 1935) переиздавался и являлся пособием по гидрологии для географов нескольких поколений вплоть до Великой Отечественной войны. Гидрологию С. А. Советов относил к циклу географических наук, определяя ее как науку, «изучающую воду на земном шаре во всех ее состояниях и все процессы – физические, механические, химические и др., происходящие в водяной оболочке земного шара» [3].

Однако слишком всеобъемлющая геофизическая концепция гидрологии, как ее представлял С. А. Советов, не получила впоследствии поддержки и развития. На смену ей пришла концепция комплексного географо-гидрологического направления в изучении природных вод суши, основоположником которой был выдающийся ученый-гидролог, профессор Виктор Григорьевич Глушков.

В основе комплексного географо-гидрологического подхода лежит представление о водных объектах как о неотъемлемых элементах географического ландшафта, свойства которых неразрывно связаны с окружающей средой. Географо-гидрологическая концепция предполагает обязательное изучение генезиса гидрологических явлений, взаимосвязей между различными объектами гидросферы, а также между гидросферой и другими компонентами природного комплекса.

С течением времени географо-гидрологическая концепция, заложенная В. Г. Глушковым, не только не потеряла своей актуальности, но и получила дальнейшее развитие в трудах его последователей и учеников. Убежденным сторонником географического направления в гидрологии был Владимир Николаевич Лебедев, специалист в области гидрологии озер, который был автором курса «Общая гидрология».

Концепция как система взглядов на процессы и явления и на причины их обусловливающие является необходимым элементом каждой науки. Поэтому ознакомление с набором концепций учения о стоке, и гидрологии вообще, дает возможность гидрологам получить упорядоченную информацию для размышлений о цельности, сущности и особенностях своей науки, а «негидрологам» осознать, что кроется за понятием «гидрология». Существующие концепции, используемые в гидрологии, прекрасно сформулировал Виноградов Юрий Борисович в своих работах [1; 4]:

- *О гидрологическом цикле.*
- *О наземной части гидрологического цикла.*
- *О стоке воды.*
- *О физических и химических особенностях воды.*
- *О законах природы.*
- *О законах сохранения.*
- *Об уклоне.*
- *О речном бассейне.*
- *О стоковом элементе.*
- *О стокоформирующем комплексе.*
- *О роли воды в жизни экосистем.*
- *О формах скопления воды на суше.*
- *О взаимодействии подземных и поверхностных вод.*
- *О загрязнении.*
- *Об опасных гидрологических явлениях.*
- *О роли воды в экзогенных геологических процессах.*
- *Об экспериментальной гидрологии.*
- *О роли математики.*
- *О математическом моделировании.*
- *О детерминизме и стохастике.*
- *. 0 вероятности.*
- *О взаимодействии с другими науками о Земле.*
- *О взаимоотношении с географией.*
- *О прикладной гидрологии.*
- *О расчетах стока.*
- *О прогнозах стока.*
- *О совмещении проблем расчетов и сверхдолгосрочных прогнозов.*

Кроме основных концепций учения о стоке могут быть сформулированы многочисленные частные концепции, например [4]:

• о первичности адекватности моделируемых процессов природным;

• об алгоритмическом подражании природе;

• о предельности простоты математических аппроксимаций при описании процессов формирования стока и т. п.

Существует три варианта методологии наук о Земле по уровню рассмотрения предмета ее исследований:

1) эмпирико-описательный;
2) теоретический заимствованный;
3) теоретический собственный.

Первому уровню отвечает гидрология, которую условно можно назвать «традиционной». Это та гидрология, основы которой в более или менее явной форме были заложены в 30–50-е гг. XX в. и которая во многом сохранила свои позиции и в настоящее время. Второму уровню соответствует теоретическая основа, почти в чистом виде импортированная из механики, гидродинамики и математической физики, но, в первую очередь, из математической статистики. Третий уровень только еще угадывается, хотя крупицы его проявления можно было заметить и в рамках традиционной гидрологии.

В свое время Михаил Андреевич Великанов [5] среди четырех методов гидрологии (наряду с экспедиционным, стационарным и экспериментальным) назвал «теоретический анализ, как вытекающий из обработки данных и эксперимента, так и строящийся непосредственно из основных законов физики и механики».

Гидрологию, которую большинство ее служителей воспринимают на данном этапе как науку издавна привычную, установившуюся в своих подходах и методах, не нуждающуюся в каких-либо кардинальных переменах, уместно называть «традиционной гидрологией» в отличие от зарождающейся и грядущей «гидрологии нового поколения».

Педагогический эксперимент

Все изменения в состоянии рек и озер связаны с изменением погоды на территории их бассейнов. Развиваясь под влиянием метеорологических факторов, гидрологические процессы происходят не мгновенно, так, например, продолжительность паводка, вызванного ливневым дождем в крупном бассейне, намного больше продолжительности самого дождя.

Более медленное развитие гидрологических процессов по сравнению с метеорологическими дает возможность с хорошей заблаговременностью составлять гидрологические прогнозы. Прогнозы уровня, стока, образования и разрушения ледостава, ветрового волнения невозможны без знания будущего состояния погоды, т. е. без метеорологических прогнозов.

В нашей стране гидрологическими и метеорологическими наблюдениями и прогнозами занимается гидрометеорологическая служба – Росгидромет, где гидрологи и метеорологи работают в тесном контакте. В области научно-прикладных исследований такого тесного контакта уже не наблюдается.

Обучение специалистов – гидрологов и метеорологов в нашей стране проводится без тесного контакта и необходимого взаимопонимания. Курсы метеорологии у гидрологов и гидрологии у метеорологов урезаны и читаются без взаимной увязки. Метеорологи мало интересуются гидрологией, то же можно

сказать и о гидрологах. В некоторых учебных пособиях по гидрологии в обозначениях метеорологических величин даны неверные названия и единицы измерения.

Возможно, более тесное взаимодействие метеорологических и гидрологических специальностей, проведение совместных исследований по гидрологической и метеорологической тематикам, а также использование зарубежных методов прогноза максимального количества осадков позволило бы увеличить период заблаговременного прогноза катастрофических наводнений и уменьшить причиняемый ими ущерб.

В связи с этим 1 сентября 2020 г. на географическом факультете осуществился набор на новую направленность «Информационные технологии в гидрометеорологии» по направлению подготовки магистратуры 05. 04. 04 «Гидрометеорология», где будут обучаться совместно гидрологи и метеорологи. Это очень перспективное и интересное направление, особенно востребованное на сегодняшний момент.

Конец XX и начало XXI в. ознаменовались настоящей революцией в гидрометеорологии, связанной с массовым внедрением в практику работы метеослужб вычислительной техники и информационных технологий и темп внедрения развития техники и технологий продолжается достаточно интенсивно.

Использование информационных технологий в гидрометеорологии необходимо для получения знаний по обработке данных, их анализа и визуализации с использованием современных компьютерных технологий, приобретения практических навыков реализации конкретных задач по тематике специальности средствами компьютерных технологий [6].

Большие перспективы перед гидрологией будущего, несомненно, открываются и с приходом принципиально новых возможностей дистанционных методов измерений.

В результате обучения студенты овладеют знаниями об основных и наиболее применяемые математических методах в гидрометеорологии; современных компьютерных технологий, используемых для количественной обработки результатов исследования, новых дистанционных методов измерений.

Смогут правильно организовать численный эксперимент прикладных исследований: ставить цель и задачи, формулировать гипотезы, организовать сбор первичного материала для статистического анализа.

Обучение позволит овладеть знаниями использования основных методик и программных продуктов статистической оценки состояния окружающей среды и картографирования полученных данных.

Список литературы

1. *Виноградов Ю. Б., Виноградова Т. А.* Современные проблемы гидрологии: учебное пособие. М. : Академия, 2008. 320 с.

2. *Аргучинцева А. В., Бархатова О. А.* 55-летний юбилей кафедры гидрологии Иркутского государственного университета // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2019. Т. 29. С. 129–136.

3. *Вуглинский В. С., Пряхина Г. В.* Кафедра гидрологии суши: история и современность // Вестник СПбГУ. Сер. 7. 2015. Вып. 1. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/kafedra-gidrologii-sushi-istoriya-i-sovremennost

4. *Виноградов Ю. Б.* Думы о гидрологии // Гидросфера, опасные процессы и явления. 2019. Т. 1, вып. 4. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/dumy-o-gidrologii

5. *Великанов М. А.* Гидрология суши. Л., 1948. 78 с.

6. Разработка регионального ситуационного центра по мониторингу и прогнозу опасных гидрометеорологических процессов / В. С. Инюхин, С. А. Кущев, К. Б. Лиев, В. В. Суслов // Современные информационные технологии в гидрометеорологии и смежных с ней областях : материалы Второй науч.-практ. конф. 21–23 нояб. 2017 г. М. : Высокогорный геофизический институт, 2017.

УДК 378.145:630*181.351

К вопросу об актуальности углубленной экологизации образования в сфере гидрометеорологии

А. В. Каверин (kaverinav@yandex.ru), Г. Р. Резаков (gayasloko@yandex.ru),
Н. П. Бочкарев (newzlomaes@mail.ru)

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва, г. Саранск

Аннотация. Дано обоснование актуальности скорейшей экологизации образования в сфере гидрометеорологии в вузах Российской Федерации на основе сравнительного анализа учебных планов подготовки бакалавров по направлению 05.03.04 – Гидрометеорология в 13 вузах страны. Выявлена степень представленности в учебных планах дисциплин, которые формируют современные взгляды на окружающую среду и направляют на решение проблемы сохранения природных экосистем (прежде всего лесных) как гарантов сохранения биологического разнообразия и устойчивого поддержания глобального климата.

Ключевые слова: изменение климата, концепция лесного насоса, теория биотической регуляции окружающей среды, экологизация образования.

Введение

Об актуальности экологизации в сфере гидрометеорологии настоятельно высказывались ведущие отечественные экологи современности. Так, Н. Ф. Реймерс [10] среди основных экологических проблем широко известных и обсуждаемых в научной, популярной и текущей газетно-журнальной печати в числе первых указывал следующие:

– изменение климата (геофизики Земли) на основе усиления тепличного эффекта, выбросов метана и других низкоконцентрированных газов (малых газовых примесей), аэрозолей, легких радиоактивных газов, изменения концентрации озона в тропосфере и стратосфере;

– общее ослабление стратосферного озонового экрана, образование «озоновой дыры» над Антарктидой, малых «дыр» над другими регионами планеты;

– загрязнение атмосферы с образованием кислотных осадков, сильно ядовитых и пагубно действующих веществ в результате вторичных химических реакций, в том числе фотохимических (в этом одна из основных причин разрушения озонового слоя, на который воздействуют фреоны, водяные пары, вещества типа NOx, малые газовые примеси).

Первая из перечисленных проблем признается наиболее острой и потенциально опасной, так как имеет связи с проблемой «сокращения площади тропических и северных лесов, ведущее к дисбалансу кислорода и усилению процесса исчезновения видов животных и растений» [10].

Другой эколог, профессор В. Г. Горшков, автор научной концепции биотической регуляции окружающей среды [4], совместно с А. Н. Макарьевой выдвинул теорию биотического насоса атмосферной влаги [5], согласно которой девственные леса и болота обеспечивают транспорт влажного воздуха с океана на сушу (рис. 1).

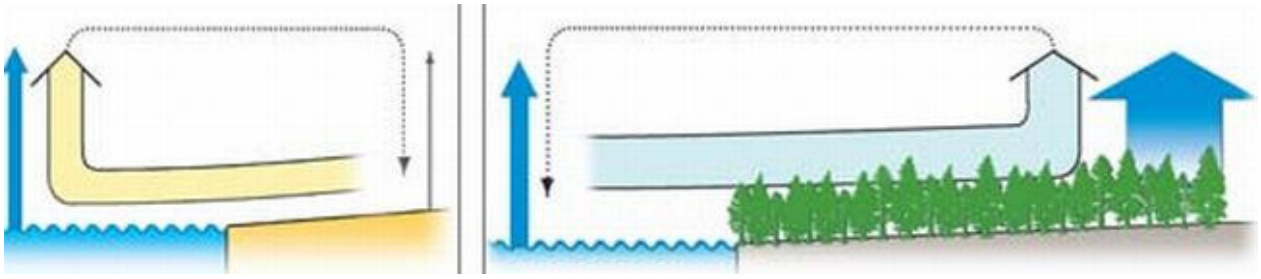


Рис. 1. Схема, иллюстрирующая гипотезу В. Г. Горшкова, согласно которой «если вырубить леса, ветер не будет дуть с океана и над сушей не выпадут дожди» [9]

Опираясь на подход к рассмотрению взаимодействия биоты с окружающей средой, авторы теории полагают [9], что:

– существующий природный биотический механизм управления окружающей средой беспрецедентен во Вселенной по своей сложности и эффективности;

– в отсутствие биотического управления окружающая среда и климат Земли быстро перейдут в состояние, непригодное для жизни человека;

– устойчивое поддержание благоприятных параметров окружающей среды невозможно без сохранения естественных экосистем в глобальных масштабах.

Такими выводами В. Г. Горшков и А. Н. Макарьева стараются привлечь внимание научной общественности и властей к катастрофическим последствиям широкомасштабной ликвидации лесного покрова во многих странах, в том числе и в России. В открытом письме от 05.05.2006 (Леса как гаранты существования русских рек и жизни на суше (к вопросу о принятии нового Лесного Кодекса)) [1] ими предполагается: «что существование рек и осадков на суше определяется деятельностью ненарушенных естественных лесов. Ненарушенный лес представляет собой живой насос, на основе солнечной энергии закачивающий на сушу атмосферную влагу, испарившуюся с поверхности океана. Показано, что засухи, пожары, наводнения, а также ураганы и смерчи на суше являются следствием нарушения лесного покрова и прекращения действия лесного насоса влаги. Уничтожение лесов приводит к полному опустыниванию континентов».

Из этой новой физической картины авторы теории биотического насоса считают, что «поскольку лес эффективно запасает влагу в почве и интенсивно ее испаряет, воздух над лесом всегда влажный и, следовательно, легко поднимается (так как при подъеме происходит охлаждение и конденсация). Этот подъем компенсируется притоком влажного воздуха из близлежащих областей, например, с океана. Приносимая с океана влага выпадает в виде осадков над лесом и компенсирует речной сток. Таким образом, пока есть лес, идет дождь, и текут реки. Можно сказать и так: чтобы ходить, необходимы ноги, чтобы летать – крылья, а чтобы распространить жизнь из океана вглубь суши, биоте нужно было создать леса. Если лес исчезнет, то круговорот воды на суше станет в среднем на порядок менее интенсивным, а в глубине суши прекратится вовсе. Это утверждение также является новым. Оно составляет суть концепции биотического насоса атмосферной влаги (лесного насоса). Лес способен управлять испарением, конденсацией и переносом водяного пара из области испаре-

ния над океаном в область конденсации над лесом. Стягивая водяной пар, испарившийся над океаном, лес уносит с океанов энергию, необходимую для возникновения ураганов и распределяет эту энергию на осадки и ветер над лесом, компенсируя речной сток в океан. Процессы в биоте на много порядков величины сложнее любых геофизических процессов. Описать в деталях биофизику действия биотического насоса вряд ли когда-либо удастся. Поэтому указание на существование биотического лесного насоса может быть получено из непосредственных наблюдений за распределениями осадков, ветров, давления и температуры над лесом, океанами, соприкасающимися с речными лесными бассейнами и лишенными леса территориями суши» [11].

Ссылаясь на своих зарубежных коллег [13], В. Г. Горшков и А. М. Макарьева полагают, что сплошной ненарушенный лес зрелых высоких деревьев, покрывающий несколько миллионов квадратных километров, обладает важнейшими возможностями:

1) увеличивать испарение в десятки раз по сравнению с открытой поверхностью океанов;

2) распределять осадки испарившейся влаги с помощью регуляции давления и ветра, вызываемых конденсацией и испусканием биологических аэрозольных ядер конденсации;

3) устранять возникновение ураганов и смерчей с помощью регуляции сопротивления ветру листового покрытия древесных крон высоких деревьев и множеством других особенностей леса, которые пока неизвестны.

Они также считают, что «Западная Европа, благодаря Средиземному морю, по сути является островным государством и страдает то от наводнений, то от засух. Она не стала пустыней из-за существования Евразийского лесного пояса России, засасывающего влагу, в основном, с Атлантического океана через Западную Европу. Уничтожение лесов России скажется, в первую очередь, на климате Западной Европы. Последняя должна была бы быть крайне заинтересована в сохранении российских лесов. Леса необходимо защищать для сохранения осадков и рек, и регуляции климата. Лес это не возобновляемый «ресурс» биосферы, не запас углерода древесины, пригодной для использования человеком. Лес – не источник кислорода. Кислород атмосферы имеет массу, в тысячу раз большую массы всего органического углерода в лесах. Кислород атмосферы не может управляться биотой и человеком. Даже если будет сожжена вся биомасса лесов и всего ископаемого топлива, включая каменный уголь, масса кислорода в атмосфере изменится не более чем на 1 % (это однозначно следует из наблюдаемого количества кислорода в атмосфере и органического углерода в ископаемом топливе). Это меньше величины разницы концентрации кислорода между Петербургом и Москвой, определяемой разницей в атмосферных давлениях. Кислород регулируется водной биотой только в растворенном виде в океанах, озерах и реках» [11].

А. М. Макарьева, В. Г. Горшков и профессор Калифорнийского университета Б. Ли попытались продемонстрировать воздействие лесов на наблюдаемые осадки в Евразийском лесном поясе длиной 7 тыс. км и шириной более

1 тыс. км, в Амазонии, Конго, в Австралии, в Канаде и на Аляске [12] и таким образом высказали гипотезу, что летом евразийский лес стягивает осадки с океанов. Осадки в океанах летом меньше, чем над лесом. Зимой, когда лес не активен, наоборот. Зимний лесной покров подобран так, чтобы осадки в виде снега были оптимальны, вплоть до весны и паводков. То же в Амазонии и Конго, в Канаде и на Аляске. В Австралии осадков над сушей всегда намного меньше, чем над океаном и в сухой, и в относительно влажный сезон.

Из этого авторами теории предполагается, что дальнейшее игнорирование определяющей роли ненарушенных экосистем Земли в поддержании устойчивости окружающей среды и климата приведет к разрушению круговорота воды на суше, полному опустыниванию и прекращению жизни на суше. Жизнь может сохраняться только в прибрежных областях суши, граничащих с мировым океаном. При современной эксплуатации лесов это может произойти в течение столетия. Климат Земли, пригодный для жизни в океане, может сохраниться из-за невозможности разрушения биотической регуляции окружающей среды океана ничтожным по величине биомассы фитопланктоном, недоступным для поедания крупными животными и человеком. Для того чтобы снизить наносимый ущерб природным экосистемам, первоочередные меры должны быть направлены на сохранение лесов мира с полной ликвидацией лесопромышленности в них (с переводом производства древесины на плантации) и запретом проведения дорог через леса, запретом средств технического передвижения по лесным рекам и по воздуху над лесом. Леса должны быть доступны только для естественной, немоторизованной рекреации. Необходимо, чтобы средства массовой информации формировали представления о непрестижности занятости в любых отраслях, связанных с уничтожением лесов [9].

По предположению В. Г. Горшкова и А. М. Макарьевой теория биотической регуляции является законом жизни в такой же мере, как и закон сохранения энергии, основным физическим законом, но принятие биотической регуляции как основного закона жизни откладывается лишь потому, что эти данные относятся ко всем без исключения областям науки.

В современном научном сообществе, состоящем, в основном, из узких профессионалов, на данный момент предложенная теория не получили широкого отклика, поддержки и одобрения. В этой связи важнейшая задача – повышение образованности специалистов лесного хозяйства и гидрометеорологов в области знаний о природе. Лишь в этом случае такие меры будут поддержаны и населением, и руководителями государства. Но на сегодняшний день, по мнению В. Г. Горшкова: «Специалистов, имеющих общие представления об окружающей среде и биосфере, и принципах ее функционирования, просто нет. Подобно узкоспецифичным клеткам тела животного современные эксперты обладают знаниями лишь в какой-то одной области. Необходимо прорваться через границы этих областей и сформировать компетентные сообщество ученых-универсалов» [9].

По мнению авторов данной статьи, помимо этого, к частичному вытеснению научных исследований в области изменений климата профанацией привело распространение компьютерных моделей и распределение грантов на основании цитируемости в естественных науках. Отсюда нарастающая лавина публикаций в сети Интернет на тему «Заблуждения о CO_2 и глобальном потеплении» [6; 3; 7].

Постановка проблемы

Слабому проникновению и развитию экологических идей в сферу гидрометеорологии соответствует невысокий уровень экологического образования в профильных вузах.

В наше время высшее образование в сфере гидрометеорологии в России, построенное в основном на фундаменте советской высшей школы, переживает очередную реформу. Современные преобразования обусловлены внедрением нового федерального государственного образовательного стандарта ФГОС ВПО по направлению подготовки 05.03.04 – Гидрометеорология (уровень бакалавриата) (Приказ Министерства образования и науки РФ от 7 августа 2014 г. № 953). Согласно п. 4.1 этого стандарта областью профессиональной деятельности выпускников, освоивших программу бакалавриата, является изучение атмосферы, вод суши, океанов и морей; прогноз погоды, гидрометеорологические явления, охрана окружающей среды, изменение климата. Такая расстановка приоритетов обусловливает углубленное изучение дисциплин биологического и экологического циклов знаний, которые формируют взгляды на жизнь и окружающую среду и направляют на решение проблемы сохранения биоты и прежде всего лесов как гарантов сохранения биологического разнообразия и устойчивого поддержания глобального климата.

Нами выполнен сравнительный анализ содержания в учебных планах вузов России, ведущих подготовку бакалавров по направлению 05.03.04 – Гидрометеорология на предмет степени представленности в учебных планах дисциплин, формирующих современные взгляды на окружающую среду. При исследовании нами использован такой интегральный показатель как рейтинг на 2020 г. [2]. Подготовку по направлению 05.03.04 – Гидрометеорология в Российской Федерации ведут 15 вузов.

Целью нашего исследования явился сравнительный анализ содержания в учебных планах вузов дисциплин, формирующих современные взгляды на окружающую среду и изменения климата. Таковыми являются дисциплины биологического и экологического профилей.

Материалы и методы

В основу исследования положен сравнительный анализ. Основными исходными материалами стали учебные планы вузов по направлению 05.03.04 – Гидрометеорология, в которых приведена количественная характеристика в часах долей учебной нагрузки по биологии и экологии. Нами отобраны 13 вузов, как входящих в ТОП-10, так и для репрезентативности, вузы, занимающие средние и нижние позиции (табл.).

Таблица 1

Характеристика вузов России, ведущих подготовку бакалавров по направлению 05.03.04 Гидрометеорология, по представленности в учебных планах дисциплин, формирующих современные взгляды на окружающую среду

Вуз	Ранг и рейтинг (в баллах) среди всех вузов РФ	Количество контактных академических часов по дисциплинам	
		биологического цикла	Экологического цикла
Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова	1 (647)	36	65
Санкт-Петербургский государственный университет	2 (616)	57	37
Национальный исследовательский Томский государственный университет	9 (568)	–	44,3
Казанский (Приволжский) федеральный университет	10 (563)	76	228
Южный федеральный университет	11 (557)	90	54
Уральский федеральный университет имени Б. Н. Ельцина	15 (547)	51	51
Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского	50 (496)	–	100
Иркутский государственный университет	122 (452)	70	66
Российский государственный гидрометеорологический университет	125 (451)	42	98
Башкирский государственный университет	128 (450)	56,8	27,6
Российский государственный аграрный университет им. К. А. Тимирязева	179 (431)	171	171

Результаты, полученные в ходе исследования, позволяют критически оценить информацию, содержащуюся на сайтах вузов, и выявить основные проблемы на пути к формированию современных взглядов на окружающую среду у будущих специалистов в сфере гидрометеорологии.

Результаты исследований и их обсуждение

Рассматривая наличие в учебных планах дисциплин, формирующих современные взгляды на окружающую среду (напомним, что они необходимы для осознания роли естественных экосистем в биотическом управлении окружающей средой и понимания процессов функционирования биотического (лесного) насоса атмосферной влаги и др.), необходимо отметить следующие методологические и методические просчеты:

1. В 5 из 13 представленных в таблице вузов, дисциплины биологического цикла преподавались в малом объеме – менее 60 контактных часов за весь период обучения, а еще в двух – совсем не представлены;

2. В 9 из 13 вузов «принижена» роль экологии (100 и менее часов за весь период обучения).

Выводы

Для исправления сложившегося положения в образовании в сфере гидрометеорологии необходима существенная корректировка учебных планов в направлении повышения роли дисциплин биологического и экологического профилей, формирующих современные взгляды на природный биотический механизм управления окружающей средой.

Список литературы

1. Биотическая регуляция для всех. URL: https://www.bioticregulation.ru/life/les2_r.php. (дата обращения: 09.09.2020).

2. Вузы России по направлению подготовки 05.03.04 – Гидрометеорология. URL: https://vuzoteka.ru/%D0%B2%D1%83%D0%B7%D1%8B/%D0%93%D0%B8%D0%B4%D1%80%D0%BE%D0%BC%D0%B5%D1%82%D0%B5%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%B8%D1%8F-05–03–04. (дата обращения: 09.09.2020).

3. Глобальный обман глобального потепления. URL: https://www.kp.ru/daily/27088.3/4159464. (дата обращения: 09.09.2020).

4. *Горшков В. Г.* Физические и биологические основы устойчивости жизни / отв. ред. К. С. Лосев. М. : Б. и., 1995. 470 с.

5. *Горшков В. Г., Макарьева А. М.* Биотический насос атмосферной влаги, его связь с глобальной атмосферной циркуляцией и значение для круговорота воды на суше. СПб. : ПИЯФ, 2006. 49 с.

6. Заблуждения о глобальном потеплении. URL: https://www.proza.ru/2012/10/30/1006. (дата обращения: 09.09.2020).

7. Заблуждения о CO_2 и глобальном потеплении. URL: http://izverzhenie-vulkana.ru/2019/05/zabluzhdeniya_o_co2_i_globalnom_poteplenii.html. (дата обращения: 09.09.2020).

8. *Макарьева А. М., Горшков В. Г.* Лесной биотический насос влаги (популярное изложение). СПб. : Отделение теоретической физики, Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова РАН, 2006. 16 с.

9. Памяти Виктора Георгиевича Горшкова. URL: https://ecodelo.org/rossiyskaya_federaciya/44599-pamyati_viktora_georgievicha_gorshkova. (дата обращения: 09.09.2020).

10. *Реймерс Н. Ф.* Экология (теории, законы, правила принципы и гипотезы). М. : Журнал «Россия Молодая», 1994. 367 с.

11. *Gorshkov V. G., Makarieva A. M.* Biotic pump of atmospheric moisture as driver of the hydrological cycle on land // Hydrology and Earth System Sciences. 2007. Vol. 11. P. 1013–1033.

12. *Makarieva A. M., Gorshkov V. G., Li B. L.* Revisiting forest impact on atmospheric water vapor transport and precipitation // Theoretical and Applied Climatology. 2013. Vol. 111. P. 79–96. URL: https://dx.doi.org/10.1007/s00704-012-0643-9 (date of access: 09.09.2020).

13. Evidence of a reduction in cloud condensation nuclei activity of water-soluble aerosols caused by biogenic emissions in a cooltemperate forest / A. Muller [et al.] // Scientific Reports. 2017. URL: https://10.1038/s41598-017-08112. (date of access: 09.09.2020).

УДК 378.147+556.5.04

Опыт проведения учебной гидрометрической практики в дистанционном формате

Е. Н. Сутырина (ensut78@gmail.com)

Иркутский государственный университет, г. Иркутск

Аннотация. Приводятся основные итоги проведения гидрометрической практики со студентами второго курса направленности «Гидрология» в дистанционном формате. Обсуждаются применяемые образовательные технологии и основные особенности и недостатки дистанционного формата обучения, применительно к реализации учебной гидрометрической практики.

Ключевые слова: гидрометрическая практика, дистанционный формат обучения, геймификация, тестирование.

Введение

Летняя гидрометрическая практика входит в состав Учебной практики по получению первичных профессиональных умений и навыков (гидрологическая) и проводится со студентами второго курса направления 05.03.04 Гидрометеорология, направленности «Гидрология». В связи с ситуацией с распространением COVID-19 в 2019/2020 учебном году данная практика в течение четырех недель проводилась в дистанционном формате.

Очевидно, что при проведении учебной практики, в результате прохождения которой студенты должны овладеть методами гидрометрических измерений и камеральной обработки материалов наблюдений, проявляется ряд существенных затруднений в ее реализации в дистанционном формате. Во-первых, проблемы проведения гидрометрической практики связаны с отсутствием непосредственной работы студентов с измерительными приборами, в результате которой должны были выработаться или закрепиться практические навыки работы с геодезическими и гидрометрическими инструментами и оборудованием. Во-вторых, во время учебной практики происходит обучение студентов работе в команде, которое осуществляется в результате выполнения определенных функций в составе бригады при производстве гидрометрических работ.

Применяемые образовательные технологии и подходы

Проведение летней гидрометрической практики осуществлялась средствами образовательного портала ФГБОУ ВО «ИГУ», развернутого на платформе электронного обучения Moodle (Modular Object-Oriented Dynamic Learning Environment) [3]. На платформе Moodle есть встроенный редактор, позволяющий разрабатывать курсы, назначать роли пользователей, создавать лекции, опросы, форумы, задания, тесты, загружать учебные материалы, видео и аудиофайлы. В Moodle реализована система обратной связи.

Для развития навыков работы с инструментарием в ходе выполнения расчетно-графических работ студентам требовалось заполнить ряд журналов на основе материалов, имитирующих работу с приборами. Например, для построения продольного профиля участка реки студентам требовалось снять отсчеты

по изображениям, имитирующим поле зрения нивелира (рис. 1), и внести их в журнал нивелирования для последующей обработки.

Также для обучения обращению с приборами в курсе приводились ссылки на учебные видеоматериалы, посвященные работе с гидрометрическим и геодезическим оборудованием, размещались подробные иллюстрированные пошаговые инструкции.

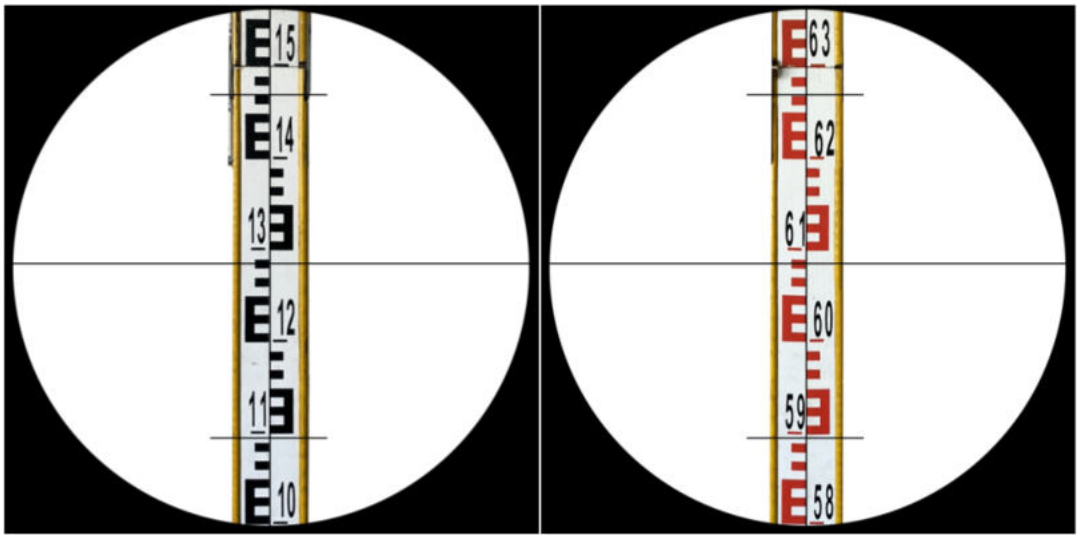


Рис. 1. Пример имитации поля зрения нивелира (черная и красная сторона рейки)

Для лучшего закрепления данного материала даны задания для отчета, в которых требовалось изучить учебные материалы, дополнительные литературные источники и привести описание ряда ключевых моментов в работе с изучаемыми приборами, используемыми при конкретном виде гидрометрических работ. Кроме этого, в мини-тесты включались вопросы, требующие внимательного изучения конструктивных особенностей и основ работы с тем или иным прибором (рис. 2, *А, Б*).

Мини-тесты генерировались случайным образом автоматически из банка вопросов с превосходящим количеством вопросов, включающем вопросы открытого типа, вопросы на установления соответствия, множественный выбор и т. д., что создавало большое число вариантов при прохождении разными студентами, а также возможность повторного ответа на тестовые вопросы для лучшего закрепления материала, с одной стороны, и возможности набора необходимого количества баллов студентами – с другой.

Наименьшие затруднения при проведении практики в дистанционном формате вызывала реализации камерального этапа обработки, связанного с заполнением гидрометрических книжек и журналов нивелирования и тахеометрической съемки, а также графического представления результатов работ, что успешно осуществлялось в ходе практики в виде выполнения расчетно-графических работ, снабженных разработанными автором иллюстрированными пошаговыми подробными указаниями.

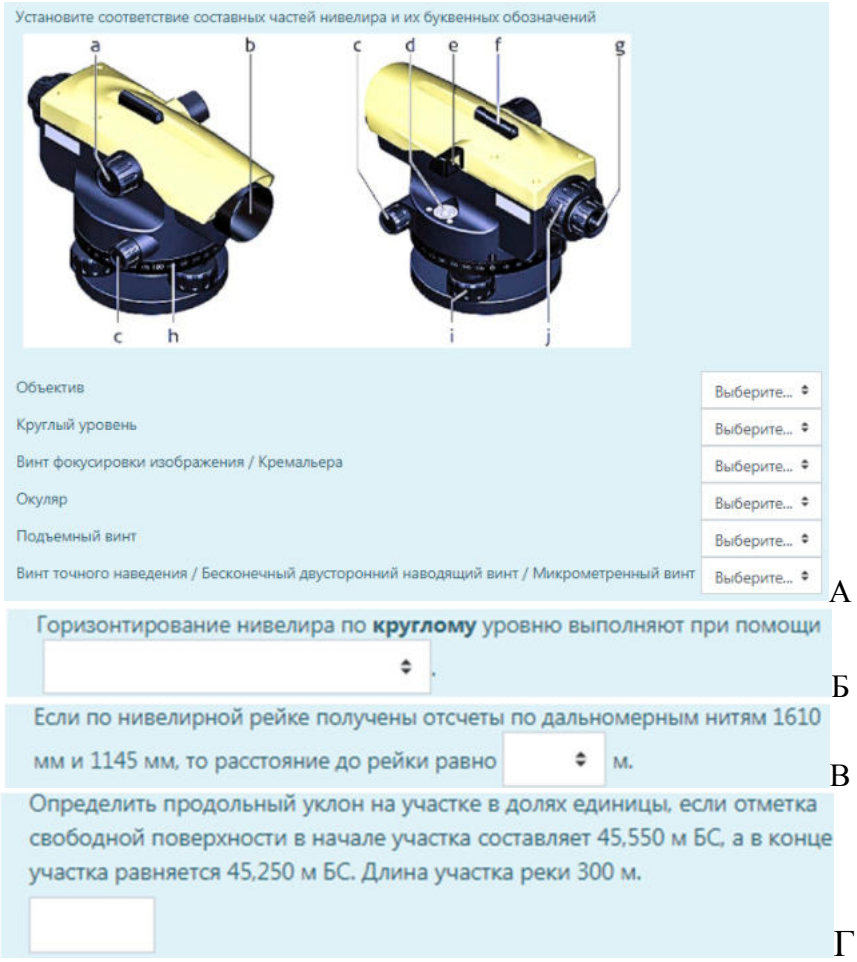


Рис. 2. Примеры вопросов в мини-тесте по теме «Построение продольного профиля участка реки»

Во избежание недостаточно осмысленного, «шаблонного» выполнения расчетов, а также для закрепления материалов студентам требовалось пройти проверочные мини-тесты, в которых в числе прочих присутствовали вопросы, требующие осуществления расчетных действий «по мотивам» выполненных расчетно-графических работ (рис. 2, *В, Г*).

В рамках реализации учебной практики в дистанционном формате в учебной процесс также были внедрены такие образовательные технологии, как геймификация, т. е. технология, подразумевающая адаптацию игровых методик к неигровым, в том числе образовательным процессам для большей вовлеченности в них обучающихся. Все виды образовательных игр используются, чтобы помочь студентам в обучении. Для создания различных интерактивных игр используются уже имеющиеся в дистанционном курсе вопросы банка вопросов или глоссарии. Баллы, полученные за прохождение игр, автоматически заносятся в оценочные ведомости [1]. При реализации учебной практики в дистанционном формате была использована игра «Кроссворд», которая является одним из примеров геймификации в обучении (рис. 3), генерируемая на основе банка вопросов по теме случайным образом для создания разных вариантов прохождения и представления студентам возможности повторных попыток.

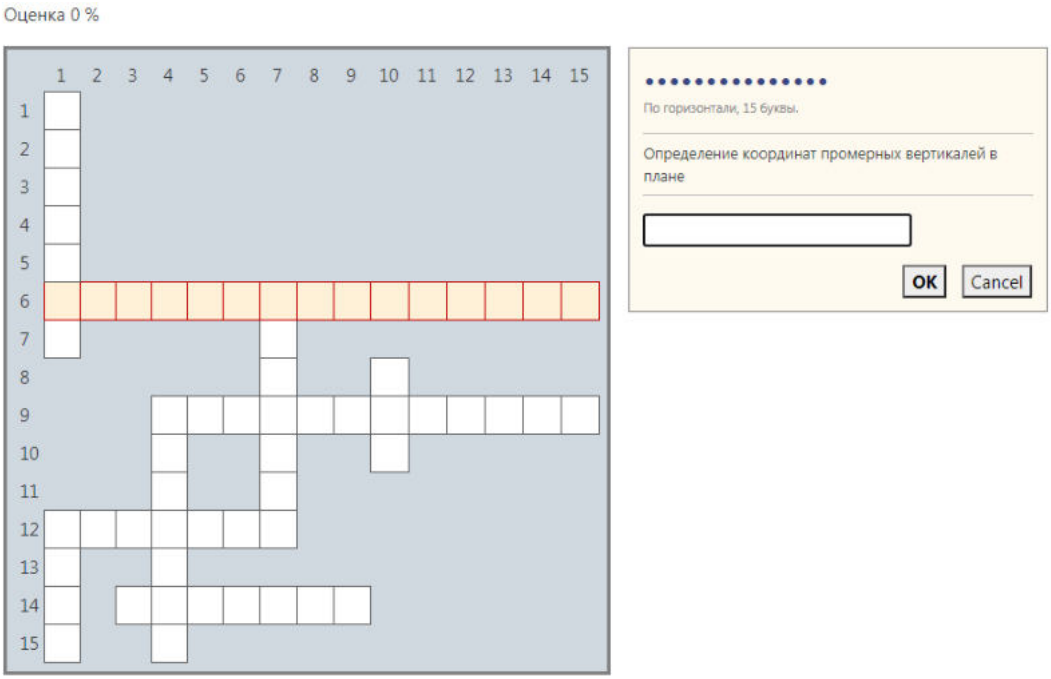


Рис. 3. Пример варианта кроссворда

Так как при прохождении учебной практики предполагается закрепление или усвоение новых терминов, то игра «Кроссворд» оказалась эффективным средством закрепления подобной информации. Мозг человека гораздо лучше усваивает информацию, полученную не в результате заучивания, а при попытке решить/разгадать какую-либо загадку. Разгадывая кроссворд, человек не просто ищет подходящее слово, а пытаемся найти словесный эквивалент некому понятию, и если это удается, то такой термин надолго остается в памяти. Если же какая-то часть кроссворда не поддается разгадке, то приходится обращаться повторно к теоретической части, но уже с игровым азартом. «Кроссворд» также помогает запомнить правильное написание терминов. Часто схватывается общий образ нового слова, а на деле при попытке произнести термин, случаются досадные оговорки из-за недостаточно внимательного прочтения слова. «Кроссворд» привлекает необходимое внимание к термину, чтобы обучающийся мог не просто узнать его в тексте, но и безошибочно воспроизвести. Таким образом, использование игры «Кроссворд» помогает студентам изучить материал и усвоить лексику, более эффективно приобрести знания и навыки, при этом позволяет им сохранять информацию в долговременной памяти для использования в будущем в профессиональной деятельности [1; 2].

Опыт внедрения игры «Кроссворд» при реализации учебной гидрометрической практики показал, что студенты проходили повторные попытки данный игры, даже когда необходимое для получения наивысшей оценки за практику количество баллов было ими уже набрано, т. е. демонстрировали большую вовлеченность в процесс обучения по сравнению, например, с прохождением тестов на схожую тематику.

Выводы

Сложившаяся в 2019/2020 учебном году форс-мажорная ситуация привела к вынужденному проведению учебных практик в дистанционном формате, что выявило существенные недостатки такого формата реализации практик в плане формирования навыков работы в команде, требуемой в том числе и при выполнении гидрометрических полевых работ. Общение студентов в основном протекало в рамках форумов и чатов и касалось выбора индивидуальных заданий и распределения их между студентами для подготовки отчетов, что с трудом может сравниться с опытом командной работы при выполнении гидрометрических работ в полевых условиях в составе бригады.

Также проблема возникла с формированием навыков эксплуатации гидрометрического и геодезического оборудования в дистанционном формате обучения. Очевидно, что реализованные в дистанционном формате подходы к решению данной проблемы путем представления визуальных и тестовых учебных материалов, выполнения студентами заданий, имитирующих работу с приборами, лишь частично могут восполнить получение практических мануальных навыков использования приборов и не могут служить полноценной заменой опыту, полученному в ходе непосредственной эксплуатации оборудования студентами.

Реализация практики в дистанционном формате, в свою очередь, показала перспективность внедрения геймификации в учебный процесс при подготовке студентов-гидрологов, в том числе для запоминания студентами специальной терминологии. Использование геймификации также повлияло на увеличение вовлеченности студентов в учебный процесс и формирование более позитивного отношения студентов к обучению.

Список литературы

1. *Колокольникова А. И.* Базовый инструментарий Moodle для развития системы поддержки обучения. М. ; Берлин : Директ-Медиа, 2020. 291 с.

2. Кроссворды как элемент практических заданий к курсу. URL: http://blog.websoft.ru/2008/03/blog-post_04.html (дата обращения: 31.08.2020).

3. About Moodle. URL: https://docs.moodle.org/39/en/About_Moodle (дата обращения: 31.08.2020).