СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ В РОССИИ

Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции
Иркутск, 24–26 ноября 2021 г.

ISBN 978-5-9624-2009-7

УДК 556.5+551.5(470+571)(063)
ББК 26.22:26.23(2Р)л0

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

Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии : материалы IV Всероссийской научно-практической конференции, приуроченной к Году науки и технологий. Иркутск, 24–26 ноября 2021 г. / ФГБОУ ВО «ИГУ». – Иркутск : Издательство ИГУ, 2021. – 1 электронный оптический диск (CD-ROM). – Заглавие с этикетки диска. https://doi.org/10.26516/978-5-9624-2009-7.2021.1-547
ISBN 978-5-9624-2009-7

Материалы содержат результаты исследований по направлениям: «Погода и климат. Мониторинг и прогнозирование», «Мониторинг, моделирование и прогнозирование состояния водных объектов», «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. +7 (3952) 51-19-00
Издательство ИГУ, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 124
тел. +7 (3952) 52-18-53; e-mail: izdat@lawinstitut.ru
Подписано к использованию 29.12.2021. Тираж 15 экз. Объем 21,7 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», 2021

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ В РОССИИ

Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции
Иркутск,
24–26 ноября 2021 г.

ISBN 978-5-9624-2009-7

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

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ В РОССИИ

Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции
Иркутск, 24–26 ноября 2021 г.

ISBN 978-5-9624-2009-7

СОДЕРЖАНИЕ

ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ

Балагуров А. М. Высотные данные зондирования в Арктике 8
Гареев А. М. Основные характеристики трансформации склонового и речного стока и ее последствия 17
Гареев А. М. Современные проблемы гидрометеорологического образования в Российской Федерации и пути их решения 35
Георгиевский В. Ю., Грек Е. А., Молчанова Т. Г. Многолетние изменения стока рек бассейна Иртыша и их причины 42
Шмакова М. В., Кондратьев С. А. Расчет распространения загрязняющих веществ в гидрографической сети водосбора и русле р. Невы (сценарий аварии на полигоне токсичных отходов) 52

СЕКЦИЯ «ПОГОДА И КЛИМАТ. МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ»

Антипова Д. А., Кочугова Е. А. Изменения дат начала и окончания климатических сезонов года на примере отдельных станций Иркутской области 57
Бутаков Н. Ю. Оценка влияния океанической модели ROMS на прогноз метеополей в атмосферной модели WRF-ARW при сопряженном моделировании 64
Гизатуллин Р. Д., Елисеев А. В. Особенности распределения соединений серы на территории Европы в начале XXI в. 69
Дурнева Е. А., Чхетиани О. Г. Анализ блокирующих антициклонов над европейской территорией России за период 2018–2020 гг. 76
Зароченцев Г. А., Рубинштейн К. Г. Прогнозирование не-гидродинамических параметров численной модели прогноза погоды с использованием машинного обучения на примере дальности видимости 84
Лощенко К. А., Агальцов А. А. Сравнительный анализ изменений климата на территории Арктики и Антарктиды 90
Лощенко К. А., Москалев Н. С. Сезонные особенности температурного режима на территории России в сравнении с глобальными вариациями 95
Мазуркин П. М., Кудряшова А. И. Почасовая динамика метеопараметров Гренландии 103
Мазуркин П. М. Взаимные влияния метеопараметров Гренландии по часовым измерениям 112
Окуличева А. А., Ермакова Т. С. Ранние внезапные стратосферные потепления 121
Серых И. В., Костяной А. Г., Лебедев С. А., Костяная Е. А. О переходе климата Северо-Запада России в новое фазовое состояние 126
Ступишина О. М., Головина Е. Г., Гончик К. Р. Исследование возможности прогноза погоды для жизнедеятельности человека 131
Фролов Д. М. Численный метод для оценки глубины промерзания грунта на основе данных о толщине снежного покрова и температуре воздуха 137

СЕКЦИЯ «МОНИТОРИНГ, МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ»

Алексанина М. Г. Выявление стадий цветения вредоносной водоросли Karenia осенью 2020 г. у Камчатки по спутниковым данным 140
Бархатова О. А., Потапова Е. В. Критерии оценки водоохранных зон 144
Болданова Е. В. Использование дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) для мониторинга состояния водоемов 148
Гайдукова Е. В., Коновалов М. Ю., Винокуров И. О. Оценка гидрологических последствий изменения климата в АЗРФ с учетом таяния мерзлых грунтов 155
Гавриков С. А. К защите Уссурийска от наводнений 160
Гречушникова М. Г., Репина И. А., Ломова Д. В., Ломов В. А. Эмиссия метана с разнотипных водохранилищ 165
Дичёва Р. П. Многолетняя изменчивость стока притоков юго-западного побережья оз. Байкал 171
Евсеева А. А. Уродство створок диатомовой водоросли *Nitzschia Palea* как показатель загрязнения поверхностных вод водотоков бассейна верхнего Иртыша 175
Захарова М. В. Региональная модель расчета нормы стока рек бассейна верхней Оки 181
Землянскова А. А., Макарьева О. М., Нестерова Н. В., Осташов А. А. Междисциплинарные научные стационары Магаданской области: прошлое, настоящее и будущее 188
Кашницкая М. А., Болгов М. В. Оценка изменения гидрологического режима Торейских озер в результате антропогенных воздействий 196
Котова В. Е., Андреев Ю. А., Михайленко О. А., Рязанцева И. А. Установление компонентного состава нефтепродуктов и возможных источников их поступления в воду р. Волги в районе г. Волгограда 202
Нестерова Н. В., Макарьева О. М., Осташов А. А., Землянскова А. А. Актуальные проблемы гидрологических расчетов в зоне распространения многолетнемерзлых пород 208
Потапова Е. В. Сити-логистика при развитии водоохранных зон 214
Серикбай Н. Т., Тиллакарим Т. А., Абаев Н. Н., Биримбаева Л. М., Айтымова Б. Б., Пшенчинова А. С. Применение гидрологической модели HBV для прогноза притока в Астанинское водохранилище на основе различных климатических сценариев 218
Словягина А. Н., Фащевская Т. Б., Полянин В. О., Алгушаева А. В. Мониторинг состояния реки Лихоборки в пределах урбанизированного водосбора г. Москвы 225
Сутырина Е. Н., Антонова Т. И. Привлечение данных радарной топографической съемки для учета стока (на примере гидропоста р. Ия – г. Тулун) 234
Сучкова К. В. Оценка трансформации генетической структуры речного стока под влиянием климатических изменений 239
Теа М., Потапова Е. В. Общие рекомендации по анализу водоохранных зон 246
Токтонов М. Ю. Оценка распределения температуры поверхности в оз. Гусиное (Республика Бурятия) по данным дистанционного зондирования 250

Турутина Т. В. К вопросам изучения водно-эрозионных процессов рек криолитозоны 254
Хорошевская В. О., Матвеева Н. П., Голубкина М. А. Анализ изменений в наблюдательной сети Росгидромета за загрязнением поверхностных вод суши за 2016–2020 гг. 256
Шорникова Е. А. Динамика содержания металлов в воде Сургутского водохранилища 262

СЕКЦИЯ «ОПАСНЫЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ И ПРОЦЕССЫ»

Вазаева Н. В., Чхетиани О. Г. О вихревых критериях прогнозирования полярных мезоциклонов 266
Землянская Д. И., Стадничук Е. М. Влияние гидрометеоров на лавины релятивистских убегающих электронов 275
Игнатов Р. Ю., Рубинштейн К. Г. Эксперименты по прогнозу возникновения и максимальной толщины гололедных отложений 276
Калмыкова О. В. Прогноз угроз возникновения смерчей вблизи Черноморского побережья России на базе выходной продукции мезомасштабной модели COSMO-Ru2 с использованием регионального индекса смерчеопасности 284
Лощенко К. А., Развозжаев А. И. Смерчи на Байкале 293
Лукша М. В. Анализ и прогноз гроз в холодный период года на примере аэродрома Минск-2 297
Наурозбаева Ж. К., Шишкина Г. М. Характеристика туманов в казахстанском секторе Каспийского моря 305
Нестерова А. О., Волобуева О. В. Анализ условий возникновения сдвига ветра на аэродроме Талаги (г. Архангельск) 313
Носкова Е. В., Вахнина И. Л. Повторяемость заморозков на территории Забайкальского края 320
Парыгина Е. А., Кичигина Н. В. Анализ максимальных уровней воды на гидрологических постах Иркутской области (на примере бассейна Ангары) 324
Петриченко С. А., Калмыкова О. В., Козлов С. В. Расчет полей вероятности зарождения (обнаружения) полярных мезоциклонов в Арктическом регионе России с использованием региональных пороговых значений индексов конвективной неустойчивости 329
Романский С. О., Вербицкая Е. М. Смерч над Амуром в Хабаровске 11 сентября 2021 г. 338
Рысалиева Л. С. Статистический анализ засушливости на территории северного Казахстана 345
Стадничук Е. М., Землянская Д. И. Необходимые условия формирования Terrestrial Gamma-ray Flashes в грозовых облаках за счет механизмов обратной связи в динамике лавин релятивистских убегающих электронов 354
Стамбеков М. Д. Интенсивность метелей в Западно-Казахстанской области в XXI в. 357

СЕКЦИЯ «РЕГИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ АТМОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ»

Абдурашидов А. М., Дадашев А. М., Шапоренко С. И. О признаках климатического опустынивания последних лет в районе Туралинских озер – г. Махачкалы 365

Алимпиева М. А., Морозова С. В., Полянская Е. А. Климатические изменения на Северном полушарии в переходные сезоны года (на примере осени) 373
Ахтиманкина А. В., Таюрская А. П. Исследование концентраций радона в воздухе жилых помещений (на примере р. п. Качуг, Иркутская область) 378
Бухарова М. Г. Продолжительность летнего муссона на юге Приморского края 386
Гордеева С. М., Малинин В. Н., Митина Ю. В., Ангудович Я. И. Межгодовая изменчивость увлажнения территории Сибири по данным наблюдений 389
Дроздов Е. Д., Торопов П. А., Турков Д. В., Шестакова А. А., Андросова Е. Е. Оценка эффекта сублимации ледяных кристаллов при метелях над поверхностью горного ледника на основе натурных данных и численного моделирования 397
Киселева Е. М., Волобуева О. В. Исследование температурных аномалий полярных областей 405
Ладохина Е. М., Рубинштейн К. Г. Улучшение качества численного прогноза для города с помощью изменения коэффициентов подстилающей поверхности 411
Латышева И. В., Злыгостева М. В., Золотухина Е. В. Условия возникновения снежных гроз на территории России 419
Латышева И. В., Орлова А. В. Многолетняя динамика максимальных сумм атмосферных осадков в Иркутской области 424
Мустаева П. А., Латышева И. В. Климатический режим ст. Восток 431

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

Абрамова З. В., Литвинцева З. О. Картографирование современных экзогенных процессов (на примере Центральной экологической зоны Байкальской природной территории) 438
Лаппо В. М., Гледко Ю. А. Оценка влияния опасных гидрометеорологических явлений на состояние автомобильных дорог Беларуси: результаты апробации методики расчета экономического эффекта 442
Лебедева Л. С. Современные изменения речного стока в бассейнах рек Алдан и Вилюй 448
Мельников Ю. И. Современное изменение климата Южного Предбайкалья и его влияние на динамику природных условий, плотность и структуру населения птиц 453
Смирнов И. А., Дронова Е. А. Оценка связи значений урожайности озимой пшеницы на территории Ростовской области с характером глобальных атмосферных циркуляций в Северном полушарии Земли 463
Сумачев А. Э., Банщикова Л. С., Агафонова С. А. Анализ многолетней изменчивости температуры воздуха холодного периода в низовьях Печоры как фактора ледового режима 468
Яковлева Д. М., Кочугова Е. А. Изменение объема снегопереноса на автомобильных дорогах Иркутской области 474

СЕКЦИЯ «СОВРЕМЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ

Тасенко С. В., Кузьмич С. А., Алексеев В. Ю., Дерюгина В. В., Зубченок Е. Е., Кровотынцев В. А., Кухарский А. В., Невский А. А., Позняк Т. Л. Информационная система спутникового мониторинга окружающей среды сопредельных территорий Республики Беларусь и Российской Федерации (ГИС Союз) 479

Магрицкий Д. В. Новая методика расчета теплового стока неизученных рек (на примере рек Северо-Востока России) 485

СЕКЦИЯ «СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ»

Бобровский А. П., Дьяченко Н. В., Косцов В. В., Михтеева Е. Ю., Потапова И. А., Скобликова А. Л., Хлябич П. П., Яковлева Т. Ю. Лидарная прозрачнометрия слабо замутненной атмосферы 495

Бузмаков С. В., Юхно А. В., Зорина А. А., Лубенцов А. С. Измерение расхода воды с помощью ADCP в период ледостава 500

Григоров Н. О., Никитина В. С. Оценка точности измерения метеорологической дальности 510

Евстигнеев В. П., Кузнецов П. Н., Воронин Д. Ю., Наумова В. А. Сравнительный анализ консолидированных данных малогабаритных датчиков о состоянии окружающей среды и данных стандартных измерений на метеорологической станции 512

Осташов А. А., Нестерова Н. В., Макарьева О. М., Землянскова А. А. Применение БПЛА для мониторинга пространственно-временных изменений наледей подземных вод 521

Сутырина Е. Н., Шерстова В. Д. Анализ межгодовой изменчивости ледового режима озера Байкал по спутниковым данным 527

СЕКЦИЯ «АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПОДГОТОВКИ КАДРОВ В СФЕРЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ»

Гледко Ю. А., Лопух П. С. О подготовке специалистов в области гидрометеорологии в Белорусском государственном университете: проблемы и перспективы 532

Новгородцева Т. Ю., Бурдуковская А. Ю., Бархатова О. А., Сагалуева И. Н. Исследование факторов, оказывающих влияние на успешность освоения образовательных программ направлений, реализуемых на географическом факультете ФГБОУ ВО «ИГУ» 537

Терехова Р. А. Актуальные проблемы подготовки кадров в сфере гидрологии для АЗРФ 543

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

УДК 551.501.7

Высотные данные зондирования в Арктике

А. М. Балагуров (a.balagurov@mail.ru)

Центральная аэрологическая обсерватория Росгидромета, Долгопрудный

Аннотация. Данные аэрологического зондирования атмосферы в Арктике крайне важны для оценки численного прогноза погоды в Северном полушарии. Кроме недостаточной плотности аэрологической наблюдательной сети в Арктическом регионе России одной из главных проблем, влияющих на прогностическую значимость отдельного выпуска, является высота уровня окончания зондирования и, соответственно, объем получаемых радиозондовых данных, зависящий от качества радиозондовых оболочек. Ежегодно в зимний период в Арктике наблюдается критическое снижение средней высоты зондирования, связанное с понижением температуры в стратосфере. Более 90 % оболочек разрываются, не достигая стандартной высоты 25 км. Зимой на арктических станциях среднемесячная высота зондирования становится меньше 20 км. Приведены результаты исследования возможности получения высотных данных в зимний период в Арктическом регионе за счет применения радиозондовых оболочек, изготовленных по специальной технологии, разработанной с учетом результатов их эксплуатационных испытаний.

Ключевые слова: аэрологическая сеть, высота зондирования, температура в стратосфере, радиозондовые оболочки, испытания.

1. Радиозондирование в Арктической зоне России

В настоящее время плотность аэрологической наблюдательной сети Российской Федерации недостаточна, особенно на севере и северо-востоке, на островах Северного Ледовитого океана, в Арктическом регионе России. В 1970-е гг. сеть радиозондирования на территории России включала 129 аэрологических станций (АЭ) (2). В настоящее время сеть радиозондирования РФ насчитывает 115 станций, а 18 АЭ законсервированы. В список законсервированных АЭ вошли такие станции Арктического региона, как Амдерма, о. Врангеля, м. Шмидта, Анадырь и другие станции, работавшие многие годы, и данные радиозондирования которых были ключевыми для прогнозов погоды в Арктике.

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. До 2030 г. необходимо поэтапно восстановить все законсервированные АЭ, что, безусловно, будет способствовать улучшению пространственного разрешения аэрологической информации. Отсутствие аэрологической информации в этом регионе препятствует безопасному судоходству, а также активному развитию легкой авиации.

2. Критическое снижение высот радиозондирования зимой в Арктике

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 (1). Значимость качества оболочек радиозондирования определяется тем, что именно оболочки определяют максимальный уровень, до которого получены данные. В СССР использовались отечественные оболочки неплохого качества, но они были не пластифицированы и поэтому их подготовка к полету была достаточно сложной (2). В настоящее время для выпуска радиозондов в полет используются пластифицированные (готовые к использованию) радиозондовые оболочки китайского и японского производства.

Анализ результатов применения китайских оболочек на аэрологических станциях Арктического региона показал, что ежегодно, начиная с ноября-декабря, наблюдается снижение средней высоты зондирования. В зимний период более 90 % оболочек разрываются, не достигая высоты 25 км, которую должны обеспечивать китайские оболочки 500 гр. по ТЗ для аукционов закупки оболочек. По результатам анализа высот зондирования на АЭ Арктического региона было установлено, что высота зондирования в значительной степени зависит от минимальных температур в стратосфере. В качестве примера на рис. 1 и 2 приведены графики высот радиозондирования и температур на уровне 70 гПа на АЭ Кандалакша в январе 2014 г. Видно, что высота зондирования коррелирует с температурой в стратосфере и при понижении температуры ниже минус 75 °С становится ниже 20 км.

В декабре – феврале 2015–2016 гг. наблюдалось критическое снижение высот зондирования на ряде станций, включенных в сеть ГУАН. Аэрологические станции ГУАН (3) имеют существенное значение как для синоптических, так и климатологических целей, входят в базовую сеть, именуемую ГСНК (Глобальная сеть наблюдений за климатом). Пример – АЭ о. Диксон, станция ГУАН, январь 2016г. – ни один радиозонд не долетел до высоты 20 км. То есть все данные радиозондирования выше этого уровня были потеряны. Средняя высота зондирования на станции о. Тикси (ГУАН) в январе 2017 г. составила 18,5 км.

В зимнее время в стратосфере Арктики формируется стратосферный полярный вихрь и происходит существенное понижение температур. Например, 01.02.2018 выпущенный на АЭ Архангельск в 12:00 UTC радиозонд зафиксировал на высоте 22 км температуру минус 96,9 °С (рис. 3). Этот показатель был самым низким за 40-летний период. Причина таких минимальных температур в нижней стратосфере над Арктическим регионом объясняется радиационными условиями – охлаждением воздуха в период полярной ночи.

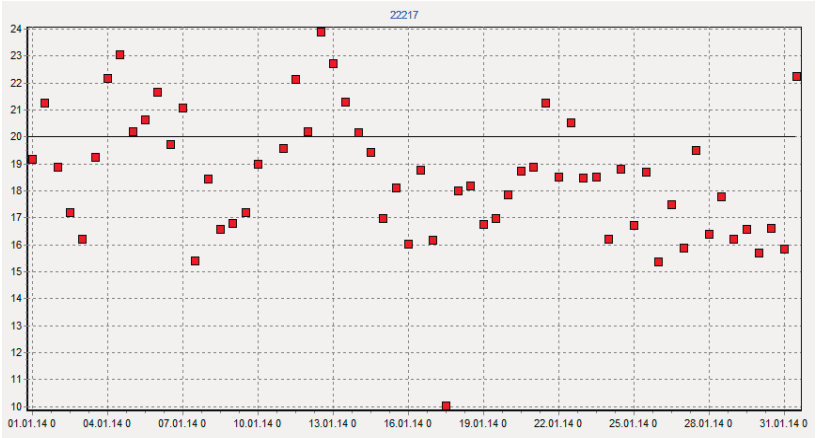


Рис. 1. Высоты зондирования (км) на АЭ Кандалакша (с 1 по 31 января 2014 г.)

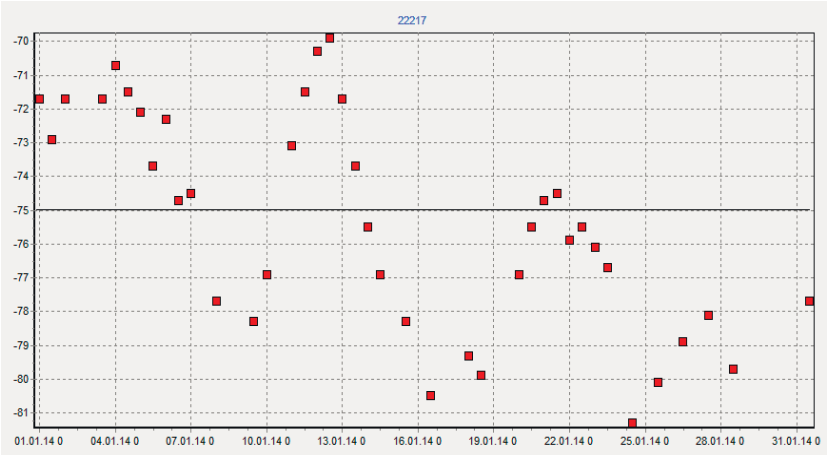


Рис. 2. Температура на уровне 70 гПа на АЭ Кандалакша (с 1 по 31 января 2014 г.)

Необходимо отметить, что при использовании отечественных непластифицированных оболочек, которые применялись до 2004–2005 гг., высоты радиозондирования менее зависели от низких температур в стратосфере. В основном, это определялось особенностями подготовки оболочек к выпуску радиозонда. Непластифицированные оболочки подвергались обработке керосином по специальной технологии, при этом высота зондирования существенно зависела от качественной подготовки оболочек к выпуску.

При проведении анализа влияния низких температур в стратосфере на высоту радиозондирования были получены данные для финской аэрологической станции Соданкюля, на которой используются японские оболочки TOTEX (рис. 4 и 5).

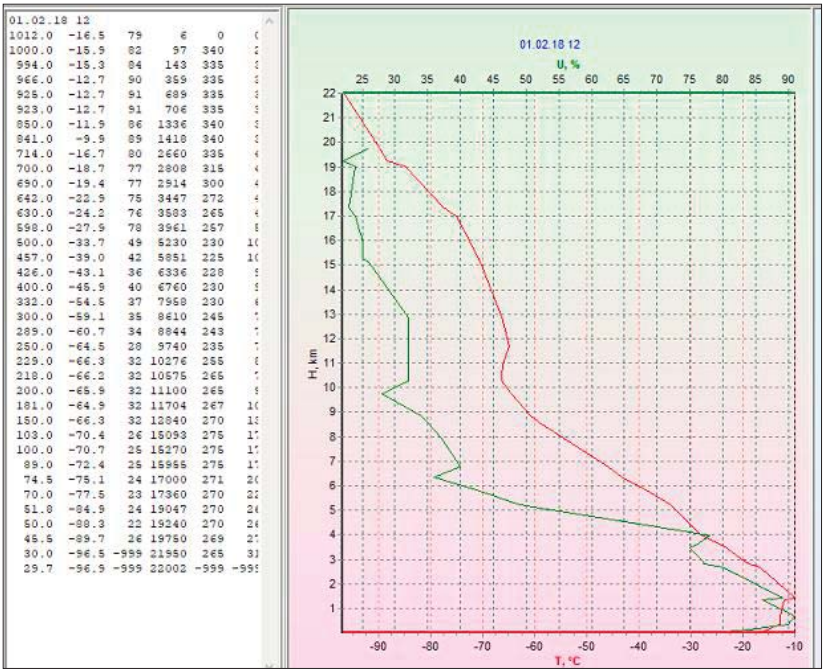


Рис. 3. Результаты радиозондирования на АЭ Архангельск, 01.02.2018 в 12:00 UTC

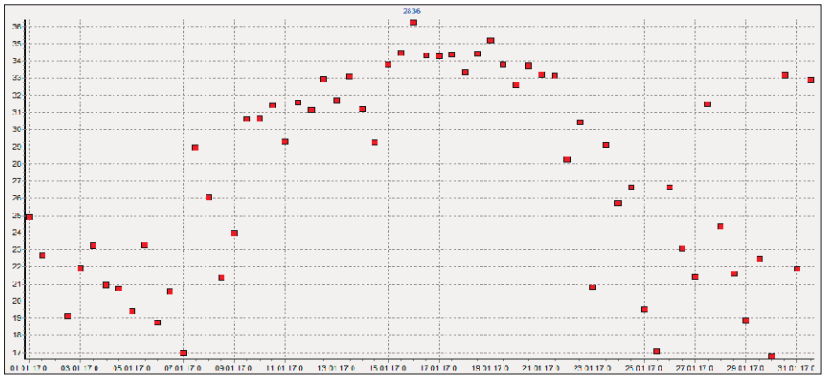


Рис. 4. Высоты зондирования (км) на АЭ Соданкюля (с 1 по 31 января 2017 г.)

Видно, что при понижении температур ниже минус 80 °С высота зондирования существенно снижается. Однако при температурах от минус 75 до минус 80 °С высота зондирования составляет 25–30 км, что подтверждает более высокое качество оболочек TOTEX по сравнению с китайскими оболочками (результаты зондирования на АЭ Кандалакша, рис. 1 и рис. 2).

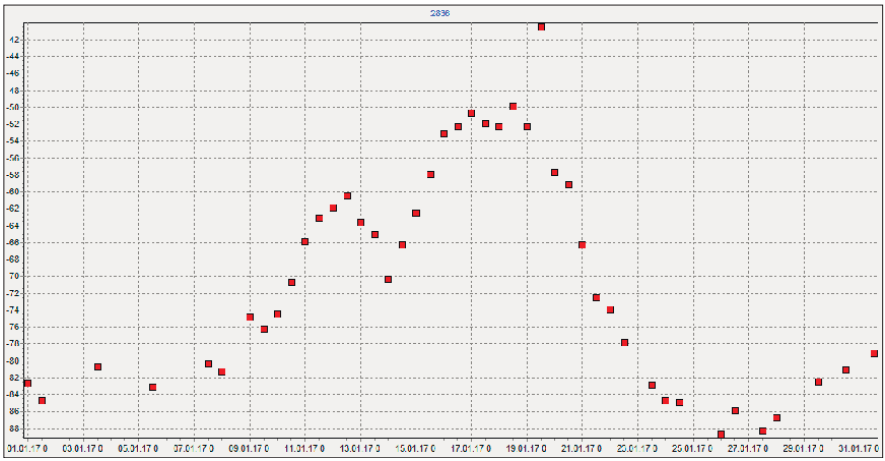


Рис. 5. Температура на уровне 30 гПа на АЭ Соданкюля (с 1 по 31 января 2017 г.)

Также был проведен анализ высот радиозондирования в зимний период на аэрологических станциях мыс Челюскин (сетевая АЭ с применением китайских оболочек 500 грамм) и мыс Баранова (станция ААНИИ, перемещенная с СП-40, с применением оболочек TOTEX), начиная с 2014 г. Эти станции расположены в Арктике на расстоянии 200 км между ними. Анализ показал, что на станции мыс Челюскин наблюдается резкое снижение высоты зондирования в период с декабря по февраль – ниже 20 км. В то же время на станции мыс Баранова высоты сохраняются на уровне 28–29 км. В табл. 1 приведены данные о средних высотах радиозондирования на АЭ мыс Челюскин и мыс Баранова в 2020 г.

Таблица 1

Данные о средних высотах радиозондирования на АЭ мыс Челюскин и мыс Баранова в 2020 г.

АЭ/месяцы	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
Челюскин, км	18,8	17,5	25,4	31,7	30,8	31,4	30,6	31,1	29,6	28,1	21,9	19,5	26,4
Баранова, км	28,0	28,1	28,2	31,5	32,5	33,6	33,1	33,2	32,2	31,7	29,0	29,3	30,9

3. Исследование возможности получения высотных данных

По решению совместной коллегии Комитета Союзного государства по гидрометеорологии и мониторингу загрязнения окружающей среды от 07.07.2016 № 63/2 с декабря 2016 г. по март 2017 г. на аэрологической сети Росгидромета проведены эксплуатационные испытания оболочек TOTEX. По результатам эксплуатационных испытаний в зимний период 2016–2017 гг. оболочки TOTEX (500 грамм – TX500 и 350 грамм – TX350) показали преимущества использования в зимних условиях по сравнению с китайскими оболочками 500 грамм (№ 500).

Поскольку достигаемые высоты существенно зависят от стратификации температуры и расположения аэрологической станции, то при сравнительном анализе результатов применения оболочек TOTEX и китайских оболочек № 500 в расчеты были включены данные только за те месяцы, в которые на конкретной АЭ производились выпуски обоих типов оболочек (типа ТХ и китайских № 500 – не менее 4 выпусков одного типа оболочек). При этом в расчеты высот включались только результаты выпусков, в которых причина прекращения зондирования зафиксирована, как «лопнула оболочка». То есть выпуски, в которых достигнутая высота ограничивалась отказом радиозонда, или наземного оборудования, исключались из анализа. Результаты сравнительного анализа применения оболочек TOTEX (ТХ500 и ТХ350) и китайских оболочек № 500 в период декабрь 2016 г. – март 2017 г. на АЭ Росгидромета, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты сравнительного анализа применения оболочек TOTEX (ТХ500 и ТХ350) и китайских оболочек № 500 в период декабрь 2016 г. – март 2017 г. на АЭ Росгидромета

Сравнение декабрь 2016г.-март 2017г.		Оболочки ТХ500 (ТХ350)					Оболочки №500 (Китай)				
Управления/станций всего /станций с испытаниями оболочек	Тип обол ТХ500, ТХ350	Число выпусков	Из них "лопнула оболочка"	**Н среднее**	Н миним	Н максим	Число выпусков	Из них "лопнула оболочка"	**Н среднее**	Н миним	Н максим
Башкирское/1/1	ТХ500	51	51	27504	14980	30600	5	5	25108	20690	30380
Верхне-Волжское/2/1	ТХ350	30	30	25731	18360	31810	32	32	25640	18490	32410
Иркутское/4/4	ТХ500	73	66	30064	17475	34160	174	115	27047	17002	33610
Мурманское/2/1	ТХ500	39	39	23841	16874	31643	37	37	23100	14901	31528
ЦАО/1/1	ТХ350	124	105	25330	19640	31140	108	94	23470	18170	31100
Якутское/15/5	ТХ500	250	176	25831	6199	37540	282	223	25740	7167	36216
В целом по РФ/115/14	Все	567	467	26383	6199	37540	638	506	25017	7167	36216
Башк,Ирк,Мурм,Якут УГМС	**ТХ500**	413	**332**	**26810**	6199	37540	498	**380**	**25249**	7167	36216
ВВолжс УГМС,ЦАО	**ТХ350**	154	**135**	**25531**	18360	31810	140	**126**	**24555**	18170	32410

В период с декабря 2016 г. по март 2017 г. оболочки TOTEX применялись на 14 АЭ. За весь период было выпущено 945 радиозондов с оболочками TOTEX (ТХ500 – 432 штуки, ТХ350 – 513 штук). В целом средняя высота подъема радиозондов с оболочками TOTEX за весь период составила для ТХ500 – 26989 м, для ТХ350 – 25 412 м, что удовлетворяет требованиям радиозондирования.

Для сравнительного анализа использованы результаты 467 выпусков оболочек TOTEX (ТХ500 – 332 выпуска и ТХ350 – 135 выпусков) и 506 выпусков китайских оболочек № 500. Средняя высота подъема оболочек ТХ500 составила 26 810 м по сравнению с 25 249 м для оболочек № 500 (разница составляет 1561 м). Средняя высота подъема оболочек ТХ350 составила 25 531 м по сравнению с 24 555 м для оболочек № 500 (разница составляет 967 м). Таким образом, оба типа оболочек TOTEX показали среднюю высоту подъема выше, чем оболочки № 500. Максимальная разница средних высот для оболочек ТХ500 по сравнению с оболочками № 500 – 3017 м получена по результатам сравнительных выпусков в Иркутском УГМС. Максимальная разница средних высот для оболочек ТХ350 по сравнению с оболочками № 500 – 1860 м получена по результатам сравнительных выпусков в ЦАО.

Поскольку испытания были проведены только на 14 АЭ, было принято решение о проведении дополнительных эксплуатационных испытаний оболочек TOTEX на аэрологических станциях в северных географических регионах в зимний период 2017–2018 гг. В период с декабря 2017 г. по март 2018 г. оболочки TOTEX (типа TX500 и TX350) применялись на 9 АЭ. Для сравнительного анализа использованы результаты 451 выпусков оболочек TOTEX (TX500 – 336 выпусков и TX350 – 115 выпусков) и 459 выпусков китайских оболочек № 500. Средняя высота подъема оболочек TX500 составила 26 414 м, для оболочек № 500 – 26 438 м. Средняя высота подъема оболочек TX350 составила 23 562 м, для оболочек № 500 – 27 129 м. По результатам испытаний зимой 2017–2018 гг. оболочки TX500 показали среднюю высоту подъема аналогичную оболочкам № 500, а также аналогичную средней высоте подъема по результатам испытаний зимой 2016–2017 гг. Оболочки TX350 показали существенное снижение средней высоты по сравнению с результатами испытаний зимой 2016–2017 гг. (примерно на 2 км), что не удовлетворяют требованиям оперативного радиозондирования в соответствии с нормативными документами. Результаты сравнительного анализа применения оболочек TOTEX (TX500 и TX350) и китайских оболочек № 500 в период декабрь 2017 г. – март 2018 г. приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты сравнительного анализа применения оболочек TOTEX (TX500 и TX350) и китайских оболочек № 500 в период декабрь 2017 г. – март 2018 г.

Сравнение декабрь 2017г.-март 2018		Оболочки TX500 (TX350)					Оболочки №500 (Китай)				
Управления/станций всего /станций с испытаниями оболочек	Тип обол TX500, TX350	Число выпусков	Из них "лопнула оболочка"	H среднее	H миним	H максим	Число выпусков	Из них "лопнула оболочка"	H среднее	H миним	H максим
Забайкальское/7/1	TX500	90	78	29208	21200	33380	90	83	28496	17040	32720
Иркутское/4/4	TX500	260	210	24436	8820	33955	210	173	24078	10140	31586
Колымское/3/1	TX500	29	26	29287	20485	30620	29	27	28158	9060	32100
ЦАО/1/1	TX350	79	73	26073	10940	31600	44	41	27169	17420	33990
Якутское/15/2	TX500	28	22	22725	9650	30960	85	77	25022	8760	34300
Все TX500: Забайк, Иркутск, Колымск, Якутск	**TX500**		**336**	**26414**				**360**	**26438**		
Все TX350: Якутск, ЦАО	**TX350**		**115**	**23562**				**99**	**27129**		

Анализ стратосферных условий в период декабрь 2017 – март 2018 гг. показал, что в месяцы, в которые были получены результаты сравнительных испытаний на станциях, на которых использовались оболочки TOTEX, не наблюдались пониженные температуры (ниже минус 75 С) в стратосфере в период их использования. В качестве вывода в акте испытаний отмечено, что целесообразно обеспечить закупку оболочек TX500 на зимний период 2018–2019 гг. для использования на 12 арктических станциях, расположенных вблизи и выше северного полярного круга в рамках централизованной закупки расходных материалов для радиозондирования. Использование оболочек TOTEX целесообразно проводить при понижении температуры в стратосфере ниже минус 75 °С.

По результатам испытаний было отмечено, что высоты зондирования оболочками TOTEX и китайскими № 500 имеют существенные различия на разных АЭ. В частности, по результатам испытаний на станции Якутск (Якутское УГМС) средняя высота подъема оболочек TX350 зимой 2017–2018 гг. составила

19 795 м, что не удовлетворяет требованиям оперативного радиозондирования в соответствии с нормативными документами. В то же время по результатам испытаний на станции Долгопрудный (ЦАО) средняя высота подъема оболочек TX350 зимой 2017–2018 гг. составила 26 073 м, что удовлетворяет требованиям оперативного радиозондирования. На станции Сеймчан (одна из самых северных станций по результатам испытаний 2017–2018 гг.) средняя высота оболочек TX500 составила 29 287 м, а оболочек № 500 – 28 158 м. В части оболочек TX350 специалисты сети отмечали удобство использования за счет меньшего диаметра оболочки при выпуске в условиях сильного ветра, что является важным фактором для Арктических станций.

4. Перспективы обеспечения высотными данными Арктического региона

В 2019–2020 гг. оболочки TOTEX на аэрологической сети Росгидромета практически не использовались по причине более высокой цены, по сравнению с китайскими оболочками. При этом необходимо отметить, что в зимний период 2019–2020 гг. ситуация с критически низкими высотами на сети радиозондирования Росгидромета сохранилась. Отмечено резкое увеличение количества аэрологических станций со средней высотой зондирования ниже 22 км – с 3 в октябре 2019 г. до 43 в декабре. То есть при понижении температуры в зимний период высота разрыва оболочек существенно снижалась. При этом за 1-й квартал 2020 г. 21 аэрологическая станция не достигла среднюю высоту зондирования 22 км. В это число входят арктические станции, расположенные выше Северного Полярного круга, такие, как Шойна, Нарьян-Мар, Малые Кармакулы, им. Э. Г. Кренкеля, Диксон, Норильск, им. Е.К. Федорова, Оленек, Тикси, о. Котельный, Верхоянск, Чокурдах, Черский, о. Айон. На 10 из этих 14 арктических станций средняя высота зондирования в январе 2020 г. была меньше 20 км.

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). В результате существенного снижения высот зондирования, а, следовательно, потери аэрологических данных, это 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 (20 км – на 20 % меньше от средних высот в 25 км), то организации Росгидромета недополучают 20 % данных радиозондирования. При общей стоимости расходов на радиозондирование для 10 аэрологических станций в месяц около 5 млн руб. это соответствует бесполезным затратам примерно 1 млн руб. в месяц. Соответственно, за 3 зимних месяца только для 10 арктических станций бесполезные затраты при проведении радиозондирования составляют около 3 млн руб. В то

время, как для зондирования на 10 АЭ в течение 3 зимних месяцев можно закупить 1800 (полное обеспечение) оболочек ТХ500 (вместо китайских 500 грамм) по цене 1700 руб. на общую стоимость около 3 млн руб., что позволит исключить потерю аэрологических данных.

В марте 2021 г., когда на нескольких аэрологических станциях Росгидромета было установлено понижение температуры в стратосфере ниже минус 75 °С, были проведены предварительные испытания оболочек TOTEX, изготовленных по специальной технологии, разработанной производителем оболочек с учетом эксплуатационных испытаний в зимний период на АЭ Росгидромета. По результатам предварительных испытаний в марте 2021 г. оболочки TOTEX (ТХ500 и ТХ350) удовлетворяют требованиям оперативного радиозондирования в соответствии с нормативными документами и показали преимущества использования в зимних условиях по сравнению с китайскими оболочками 500 граммов. Средняя высота подъема оболочек ТХ500 составила 31 165 м по сравнению с 25 285 м для китайских оболочек 500 граммов (разница составляет 5880 м). Средняя высота подъема оболочек ТХ350 составила 30 989 м. Однако число выпусков было недостаточно для подготовки объективных выводов. В настоящее время планируются эксплуатационные испытания оболочек TOTEX, изготовленных по специальной технологии, на АЭ Арктического региона в зимний период (декабрь – февраль). Возможность использования оболочек TOTEX на аэрологической сети России в последний год растет, поскольку в 2021 г. цены на китайские оболочки достигают 2000 руб. (и более), что превышает цены на оболочки TOTEX (1700 руб. за ТХ500 и 1250 руб. за ТХ350).

Результаты анализа и эксплуатационных испытаний оболочек TOTEX должны быть весьма важными для работы аэрологических станций Росгидромета, с точки зрения решения проблемы потери высотных аэрологических данных на государственной наблюдательной сети зондирования атмосферы в зимний период в Арктическом регионе Российской Федерации.

Список литературы

1. *Балагуров А. М.* Качество радиозондовых данных // Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России : материалы III Всерос. науч.-практ. конф. Иркутск, 25–27 нояб. 2020 г. Иркутск, 2020. С. 439–450.

2. Современное состояние и перспективы развития радиозондирования в России / Н. А. Зайцева, А. М. Балагуров, Н. Н. Крестьяникова, А. В. Николаев // Метеорология и гидрология. 2021. № 9. С. 5–20.

3. Наставление по Интегрированной глобальной системе наблюдений ВМО. Дополнение VII к Техническому регламенту ВМО. ВМО № 1160. Изд. 2015 г.

УДК 556.53

Основные характеристики трансформации склонового и речного стока и ее последствия

А. М. Гареев (aufar.gareev@mail.ru)
Башкирский государственный университет, Уфа

Аннотация. Раскрыты закономерности, отражающие характеристики трансформации склонового и речного стока в зависимости от влияния деградации природных комплексов на водосборе. Показано, что основными факторами, обусловливающими формирование максимальных показателей склонового и речного стока, являются переуплотнение верхних слоев почвенного покрова, существенное уменьшение инфильтрационных свойств почв и грунтов, соответственно, многократное увеличение коэффициента и модуля стока. Это отражается во внутригодовом перераспределении стока, проявляющемся не только в увеличении максимальных расходов воды во время весеннего половодья и летних ливней, но и возникновении ряда неблагоприятных хозяйственно-экономических и экологических процессов.

Ключевые слова: склоновый и речной сток, трансформация, увеличение максимальных и уменьшение минимальных расходов воды, неблагоприятные последствия.

Известно, что отечественная гидрологическая наука в настоящее время характеризуется довольно высоким уровнем развития, что находит отражение в ее применении в решении широкого круга научно-производственных и проектно-изыскательских задач. При этом достаточно активно используются как стохастические, так и ландшафтно-гидрологические методы расчетов оценок, которые имеют свои преимущества и недостатки.

Следует обратить внимание на то, что выполнение гидрологических расчетов и оценок преимущественно базируется на стохастических методах, что обусловлено случайностью проявления влияющих на сток естественных факторов и неопределенностью как времени, так и масштабов их проявления. Это требует необходимости привлечения материалов многолетних наблюдений за различными показателями речного стока, соответственно, их продолжительность позволяет оценивать такие показатели, как репрезентативность самих рядов наблюдений и достоверность (оправдываемость) полученных результатов и др. В то же время следует подчеркнуть то, что относительно обоснованные расчеты получаются только при наличии продолжительных рядов наблюдений на гидрометрических постах, что имеется только по бассейнам больших и средних рек. В отличие от них малые реки преимущественно отличаются отсутствием или наличием очень ограниченных во времени наблюдений. При этом выполнение расчетов по имеющимся методическим пособиям сопряжено большими погрешностями, достигающими иногда до 300–400 и более %. Это, как правило, приводит к получению не оправданных параметров характеристик речного стока и является причиной недостаточной гидрологической обоснованности решения проектно-изыскательских задач.

В отличие от стохастических ландшафтно-гидрологические методы позволяют проводить всесторонний анализ влияющих (как естественных, так и антро-

погенных) факторов, что осуществимо на основании проведения полевых изысканий и наблюдений с учетом методологических основ – геосистемного подхода и бассейнового принципа. Это имеет преимущества там, где происходят динамические процессы в изменении состояния ландшафтов, заметно влияющие на количественные и качественные характеристики склонового и речного стока. Таким образом, появляется необходимость обоснования научно-методической базы выполнения гидрологических расчетов с учетом специфики и масштабов проявляющихся изменений состояния природных комплексов на водосборах и бассейнах малых и очень малых рек, включая активизацию развития эрозионных и русловых процессов, наводнений, изменение водно-ресурсных показателей водотоков и экологических условий в них.

С учетом изложенного следует остановиться на результатах комплексной работы, проведенной нами по изучению особенностей влияния деградации природных комплексов (в том числе и пастбищной дигрессии) на трансформацию склонового и речного стока с последующей оценкой значимости происходящих процессов.

Углубленный анализ закономерностей, отражающих происхождение процессов трансформации склонового и речного стока в результате влияния хозяйственной деятельности выполнен под руководством автора по горно-лесной и лесостепной зонам Южного Урала и Приуралья. При этом применялись материалы продолжительных полевых изысканий и исследований, полученные на кафедре гидрометеорологии и геоэкологии Башкирского государственного университета. Были выделены репрезентативные районы и участки, в пределах которых в наибольшей степени проявляется в рельефе и ландшафтах водосборов влияние различных нагрузок, связанных с хозяйственной деятельностью. Наиболее показательными являются территории, в пределах которых отчетливо выражены последовательные стадии деградации природных комплексов как следствие преимущественно пастбищной нагрузки. Места расположения природных стационаров и площадок наблюдений устанавливались в зависимости от типичности и репрезентативности ландшафтов региона. В свою очередь, принцип единственного различия позволил учитывать разницу в уровне пастбищной нагрузки на растительность, дифференциацию условий формирования склонового и речного стока, в итоге – развитие эрозионных и русловых процессов. Проведенные наблюдения выявили абсолютные и относительные показатели изменчивости стокоформирующих факторов, определяющих их развитие.

Изучение условий формирования и изменчивости склонового стока, являющегося основной причиной плоскостной (смыва) и линейной эрозии, в зависимости от влияния антропогенных нагрузок первоначально осуществлялось на Махмутовском стационаре, расположенном в горно-лесной зоне Южного Урала в верховьях бассейна р. Белой. По данным наблюдений на стоковых площадках, временных водотоках в оврагах и балках, а также постоянных водотоках 1–2 порядка – в ручьях и на самых малых реках, в последующем изучались проявляющиеся закономерности.

Изучаемая территория, согласно физико-географическому районированию, выполненному И. П. Кадильниковым [8], расположена в пределах Приверхнобельского округа Прибельско-Уралтауской низкогорной и среднегорной подпровинции со светлохвойной тайгой и березовыми лесами. В связи с различиями в тектонических структурах и неоднородности литологии рельеф характеризуется сложным расчленением. Наряду с обширными выровненными пространствами, протягивающимися вдоль рек, в рельефе выступают останцевые горные возвышенности в виде гряд и хребтов с крутыми склонами и каменистыми вершинами. Выровненные пространства, образующие днища депрессий между хребтами, расположены на абсолютных высотах от 520 до 650 м. Уклоны поверхностей выравнивания достигают до 80, склонов и нижней части гряд – 12–140, верхней части – 22–280. Речные долины имеют хорошо разработанные плоские днища шириной 50 – 200 м и более, представлены поймой и надпойменной террасой.

Наблюдения охватили 1955–1999 гг., после чего в 1999–2013 гг. для конкретизации и установления достоверности выявленных закономерностей проводились полевые эксперименты, опыты и наблюдения в лесостепной зоне Предуралья на базе Удрякбашевского и Урмекеевского стационаров. Они находятся в западной части Башкортостана, относятся, соответственно, к Левобережно Прибельскому и Белебеевскому округам (рис. 1).

Характерной особенностью первого из них является распространение обширных низменных террасовых пологоволнистых равнин, покрытых широколиственными лесами, луговыми степями и пашнями на различных лесостепных почвах. Белебеевский возвышенно-равнинный округ расположен в пределах Бугульминско-Белебеевской возвышенности – возвышенной денудационной равнине, покрытой смешанными широколиственными и березово-дубовыми лесами, степями и пашнями, с преобладанием выщелоченных, карбонатных и типичных черноземов, а также темно-серых лесных почв. Речная сеть здесь развита хорошо. Наиболее значительными, берущими начало на территории округа, являются реки Ик (с притоками Ря, Кидаш, Усень с притоком Нугуш), Сюнь, Чермасан, Дема.

Основными показателями, позволяющими четко выявлять пространственную дифференциацию и трансформацию склонового стока и смыва, увеличение их абсолютных величин и показателей разрушающей способности потоков по мере нарастания антропогенных нагрузок на природные комплексы приняты показатели изменения коэффициента склонового стока (α) и модуля стока (μ). Как свидетельствуют данные, отраженные в табл. 1, величины модулей склонового поверхностного стока (л/(с*км^2)) в зависимости от влияния степени деградации природных комплексов на водосборах изменяются в широких пределах. Так, если на ненарушенных участках во все годы с различными величинами атмосферных осадков сток не наблюдался, то на площадках в пределах освоенных территорий по мере нарастания степени деградации произошло многократное его увеличение, что обусловило активизацию эрозионных процессов.

Рис. 1. Места расположения природных стационаров в пределах Республики Башкортостан: 1. Махмутовский стационар; 2. Удрякбашевский стационар; 3. Урмекеевский стационар; 4. Место расположения водно-балансовой станции «Дмитриевский»

Таблица 1

Характеристики изменения склонового стока (по Махмутовскому стационару)

Степень деградации	Характеристики	Модули стока, μ, л/с·км^2	Коэфф. стока, α
Отсутствует	Сохранились типичные характеристики природных комплексов	0	0
Слабая	Небольшие изменения видового состава растительности, местами – уплотнение почвенного покрова проявления пастбищной дигрессии	50–150	0,15–0,25
Средняя	Заметная разреженность и сокращение видового состава древесной и травянистой растительности, формирование скотобойных троп, появление неофитов, характерных для деградированных ландшафтов; обнаруживается смыв почвы	180–250	0,30–0,45
Сильная	Коренное изменение видового состава растительности, явные проявления активизации плоскостной эрозии, образование промоин и оврагов	277–450	0,5–0,65

На основании статистического анализа материалов наблюдений, проведенных на стоковых площадках Махмутовского стационара, установлено, что мутность воды, стекающей по склонам юго-восточной и южной экспозиций, существенно дифференцируется в зависимости от степени пастбищной дигрессии и, соответственно, интенсивности развития эрозии почв. Например, на площадках, расположенных на опушке леса при слабом уровне антропогенной нагрузки, мутность воды составляла 25–38 г/л, на открытых участках со средним уровнем нагрузки – 65–76 г/л, сильным уровнем – 98–112 г/л. На нижних участках склонов, характеризующихся наибольшей степенью развития эрозионных процессов, смытость почв по скотобойным тропам и оголенным участкам достигала в слое до 8–12 см при средней мощности плодородного слоя 18–26 см, т. е. до 44–46 %. Кроме того, в ходе рекогносцировочных исследований за пределами стационара, было выявлено то, что на отдельных территориях при значительной разреженности растительного покрова и образовании оголенных участков с переуплотнением верхних слоев почвенного горизонта произошло развитие промоин, ниже по склону переходящих в овраги глубиной до 0,85–1,35 м. Таким образом, приведенные показатели отражают влияние антропогенных факторов на трансформацию склонового стока и развитие эрозионных процессов с 70-х гг. XX в. до начала 2000 гг. [3–5].

Наблюдения показали то, что обнаруживается большая разница и в гидрографах склонового стока. Так, на контрольной площадке, расположенной в естественном лесу, сток отсутствовал. В то же время наибольшие величины максимальных расходов воды наблюдались по площадкам 2 и 3, испытывающим высокую пастбищную нагрузку (рис. 2). Наблюдалось также некоторое увеличение максимальных расходов воды и по р. Септинский, принимающему склоновые стоки, что явилось причиной активизации развития русловых деформаций на нем.

В лесостепной зоне, в наибольшей степени подверженной влиянию хозяйственной деятельности, эрозионные процессы на освоенных территориях проявляются довольно интенсивно. Об этом свидетельствуют материалы многолетних наблюдений, проведенных нами на Удрякбашевском и Урмекеевском стационарах. Характерно то, что в лесостепном Предуралье существенное сокращение лесистости произошло за последние 200 лет, и сейчас она составляет 15–23 % против 60–75 % в прошлом. Оно связано с интенсивным освоением равнинных территорий, отличающихся благоприятными климатическими условиями и плодородными черноземами. Деградация природных комплексов, наблюдаемая и в настоящее время, здесь происходит в условиях наложения совокупности антропогенных факторов: чрезмерной пастбищной нагрузки в лесах и на лугах, распашки обширных пространств, густой дорожной сети, селитебных территорий и др. Особенно заметные изменения приходятся на период времени с 50–60-х гг. до 90-х гг. XX в.

Сам механизм формирования склонового стока и разрушающей способности водных потоков чрезвычайно сложен, так как зависит от условий водопоглощения почвами и грунтами, изменения коэффициента сопротивления подстилающей потоки поверхности, их режима (ламинарного или турбулентного) и т. д.

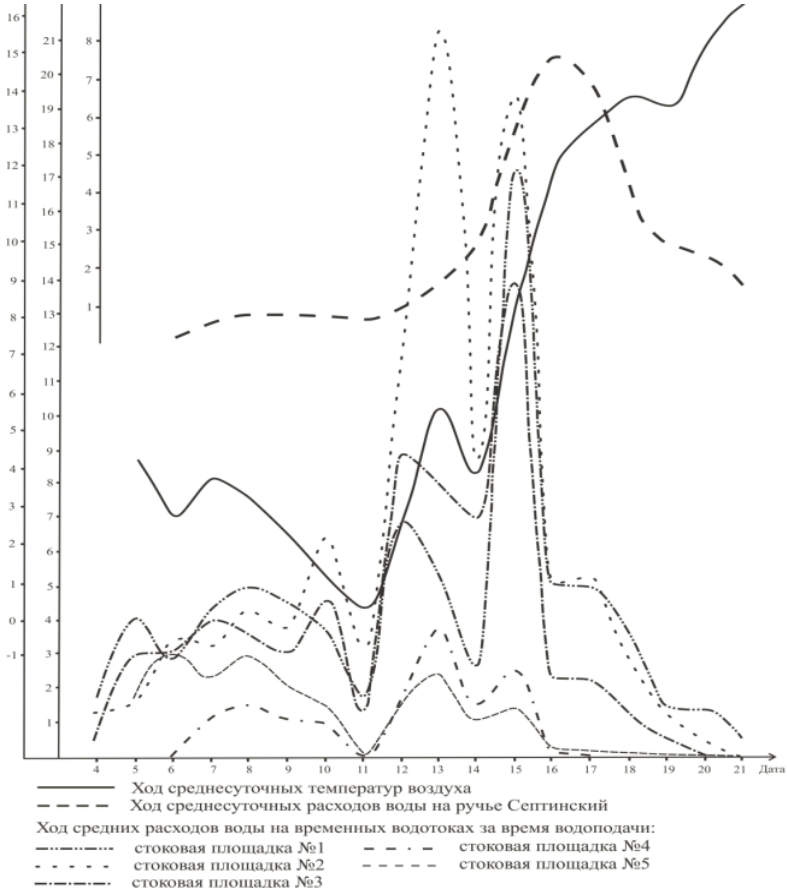


Рис. 2. Гидрографы склонового стока за время наблюдений (апрель 2000 г.)

Как показывают наблюдения, во время весеннего снеготаяния и водоотдачи снежным покровом в верхней части склонов потоки преимущественно ламинарные, которые далее, вниз по склону соединяясь по понижениям микрорельефа, трансформируются в турбулентные. Возникновение последних определяется числом Рейнольдса, т. е. зависит от скорости потока *V*, его глубины *h* и υ – кинематического коэффициента вязкости, который, в свою очередь, зависит от температуры воды, вследствие чего холодные потоки талой воды обладают меньшей эрозионной способностью. Как показывают исследования, проведенные Н. И. Маккавеевым [7], ламинарность дождевых потоков в верхних частях склонов нарушается благодаря так называемой «добавочной турбулентности», вызываемой воздействиями на них капель дождя и неравномерностью его выпадения (волновая «толчея», интерференция волн и волновой характер движения склоновых дождевых потоков). Это приводит к активизации эрозионных процессов

именно в верхних частях склонов. Вниз по склону, хотя потоки становятся турбулентными, растут водность и глубина, их роль как фактора смыва почв и грунтов ослабевает из-за исчезновения этих эффектов в связи с ростом глубины потоков, с одной стороны, и насыщенностью их смытым материалом (наносами), поступившими с вышележащих участков склона, с другой, т. е. частичной (или весьма существенной) реализации их транспортирующей способности.

Не углубляясь в анализ гидравлических и гидродинамических процессов в формировании и пространственной изменчивости водных потоков на склонах различной крутизны и экспозиций, отметим то, что подобные изменения в интенсивности эрозионных процессов характерны не только для территорий, подверженных пастбищной дигрессии, но и пашни. В литературе хорошо известны положения, отражающие влияние зяблевой вспашки на уменьшение склонового стока. Однако, как показывают наблюдения, при сочетании определенных условий на пашне происходит формирование склонового стока и, соответственно, развиваются эрозионные процессы. Основными факторами, их определяющими, кроме уклонов и протяженности склонов, являются глубина вспашки и влагоемкость почв. В частности, интенсивное разрушение почвенного покрова и последующее формирование водных потоков, размывающих почвы, обнаруживается при полном заполнении пор, т. е. обеспечении полной влагоемкости. Таким образом, образующиеся водные потоки на склонах, насыщенные материалами разрушения, отражают условия смыва почвы, транспорта наносов и растворенных веществ, их отложение в нижних частях склонов. Во многих случаях они выносятся за пределы пахотных земель (рис. 3).

Обобщение данных о развитии эрозионных процессов на деградированных пастбищах и пашне показывает, что они во многом схожи. И в первом, и во втором случаях общими в закономерностях их развитии являются: трансформация склонового стока, сопровождающаяся увеличением поверхностной и уменьшением подземной его составляющих, увеличением коэффициента и модуля стока, и, соответственно, нарастание размывающей способности водных потоков. Различия заключаются только в причинах: пастбищная деградация ландшафтов или распашка почвенного покрова.

Анализ двух периодов эксплуатации природных комплексов и природно-хозяйственных систем (до развала СССР и после) в нашей стране достаточно ярко отражает различия в развитии эрозионных процессов. Так, в 1980–1990-е гг. в условиях широкого вовлечения земель в различных ландшафтных зонах под интенсивное пастбищное использование и земледелие, эрозионными процессами были охвачены обширные пространства. В последующем произошли коренные изменения в масштабах, структуре природопользования, включая и сокращение поголовья скота на пастбищах (снижение пастбищной нагрузки), появление необрабатываемых земель и др. Это отразилось в уменьшении масштабов и интенсивности развития эрозионных процессов, зарастании эродированных земель и постепенном восстановлении водопоглощающей способности почв в некоторых регионах. Однако в Башкортостане на фоне продолжающегося экономического неблагополучия в сельском хозяйстве происходит увеличение поголовья скота в

частном секторе, что привело к передислокации мест выпаса скота. Это явилось причиной активизации эрозионных процессов на вновь освоенных под пастбища (места выпаса личного скота) землях. В то же время на заброшенных территориях наблюдается постепенное восстановление растительного покрова на уровне процессов сукцессии в соответствии с условиями тепло- и влагообеспеченности в разрезе ландшафтных зон и последовательное снижение активности развития водной эрозии почв. То же касается пахотных земель в районах, где земледелие сохранилось, но исчезли экономические стимулы защиты почв от эрозии или ее предотвращения, либо в связи с переделом собственности на землю произошло образование новых рубежей стока. В результате масштабы ускоренной эрозии здесь остаются существенными, и можно прогнозировать ее усиление в ближайшее время в связи с предполагаемым восстановлением землепользования.

Рис. 3. Эрозионные процессы на пашне в пределах Бугульминско-Белебеевской возвышенности

В отдельных районах Южного Предуралья последствия влияния плоскостной и овражной эрозии таковы, что за последние 50–55 лет (от начала широкомасштабного освоения целинных и залежных земель) мощность гумусового горизонта уменьшилось на 50–60 % и более, образовались значительные площади деградированных, непригодных для землепользования угодий. На Бугульминско-Белебеевской возвышенности, где располагаются многие районы Башкортостана и ряд районов Татарстана, развитию эрозионных процессов благоприятствуют как естественные факторы (неравномерность выпадения атмосферных осадков во времени, установление устойчивого снежного покрова зимой, рельеф местности и др.), так и высокая освоенность водосборов.

Более полную характеристику особенностей развития эрозионных процессов под влиянием физико-географических и антропогенных факторов дает их рассмотрение в двух бассейнах рек этого региона: Усени и Сюня.

Бассейн р. Усень площадью 2460 км^2 расположен в западной части Башкортостана на землях Туймазинского и Белебеевского районов. Рельеф бассейна сильно пересеченный с высокими платообразными междуречьями. Почвенный покров довольно пестрый. В верховьях на глинах и тяжелых суглинках развиты серые лесные почвы, в среднем и нижнем течении – черноземы. Растительность преимущественно лесостепная, залесенность бассейна – 15%, распаханность – 60 %. Река Усень впадает в р. Ик с правого берега, ее длина – 147 км, средний уклон – 1,9 %. В бассейне насчитывается 197 рек и ручьев, в том чиле 176 – длиной более 10 км.

Наиболее продолжительные исследования и наблюдения в бассейне нами проводились в окрестностях д. Урмекеево Туймазинского района, на водосборе ее притока – р. Нугуш (рис. 4). Здесь широко представлены как плоскостной смыв, так и линейный размыв, на самой реке – активные русловые процессы – меандрирование, сопровождающееся размывами берегов; из других экзогенных геоморфологических процессов развиты оползневые.

Рис. 4. Формы проявления эрозионных, русловых и склоновых процессов в пределах Урмекеевского стационара (фото А. М. Гареева)

При сохранении высоких показателей антропогенных нагрузок в бассейне обнаруживаются разнонаправленные изменения во времени интенсивности плоскостной и линейной эрозии. Так, крупные овраги в настоящее время испытывают тенденцию затухания, но одновременно происходит образование новых на склонах северо-западной и северной экспозиции. Причиной их возникновения и развития являются смыв в верхних частях склонов и отложение смытого материала на нижерасположенных участках, где происходит кольматаж естественных почв, соответствующее этому снижение их водопоглощающей способности и увеличение поверхностного склонового стока (его коэффициента). В результате по всей длине склонов возникают условия, способствующие образованию линейных эрозионных врезов – промоин и оврагов. На участках с хорошо сохранившейся естественной травянистой растительностью сток отсутствовал или был ничтожно малым (размыв не происходит), в то время как на кольматированных участках, где произошло резкое снижение водопоглощения, коэффициент стока достигал до 0,65–0,75, склоны оказываются наиболее эродированными и расчлененными.

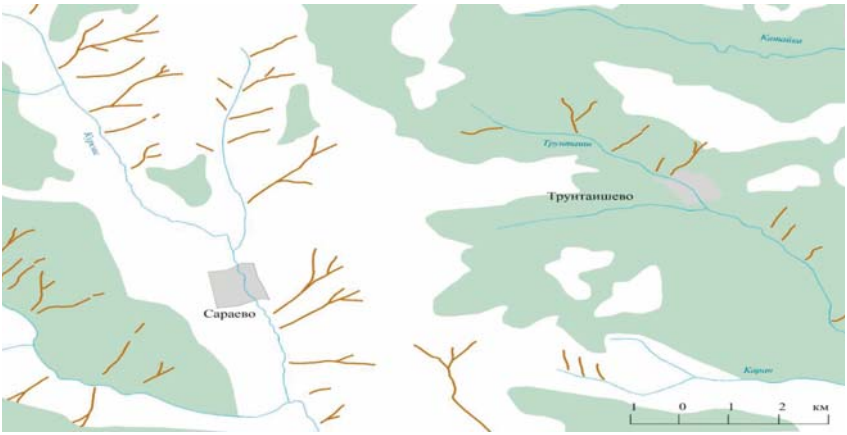
Бассейн р. Сюнь также характеризуется активным развитием эрозионных процессов. Река берет начало в 1 км южнее д. Ново-Сабанаево Бакалинского района и впадает в р. Белую слева на 83 км от устья. Длина реки 209 км, средний уклон – 1,0 %. Площадь водосбора – 4500 км^2, средняя его высота – 177 м, густота речной сети – 0,34 км/км^2.

Рельеф водосбора увалисто-холмистый. Поверхность расчленена долинами притоков и развивающейся овражно-балочной сетью. В верхней и частично в средней частях бассейн реки сложен известняками и гипсами, прикрытыми сверху слоем глин и суглинков. Почвы представлены в основном серыми лесными и выщелоченными черноземами. Растительность преимущественно лесостепная, местами встречаются островки ели, пихты, дуба. Залесенность водосбора – 22 %, распаханность – около 60 %.

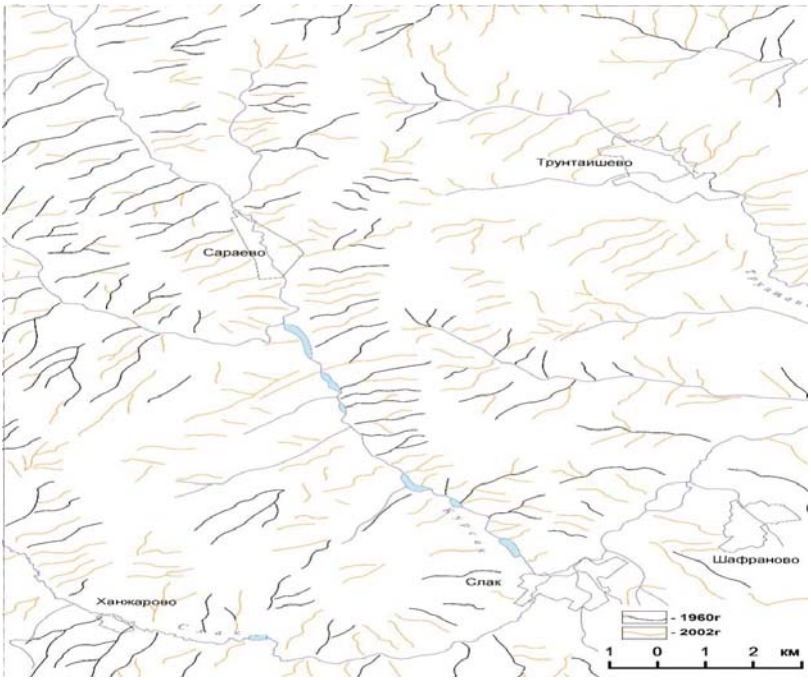
В бассейне реки наряду с плоскостной эрозией развитие получила эрозия в днищах овражно-балочные систем. Часто наблюдается наложение современных эрозионных форм рельефа на древние. Из-за интенсивного врезания русел ручьев Барсукъелга, Сармышъелга и других происходит провисание пересекающих их трубопроводов. При их повреждении транспортируемая ими продукция просачивается, вследствие чего происходит химическое загрязнение среды – еще один вид негативного воздействия линейной эрозии на природные комплексы.

Аналогичные эрозионные процессы наблюдаются и на водосборах других малых рек региона. По рис. 5, *а* и 5, *б* можно отчетливо обнаружить многократное увеличение густоты овражно-балочной сети в бассейне р. Курсак с середины XIX в. до 2002 г.

Они составлены на основании анализа крупномасштабных топографических карт, а также их уточнения посредством применения современных космических снимков высокой разрешающей способности.



А



Б

Рис. 5. А – Схема овражно-балочной сети в пределах среднего течения р. Курсак в 1842 г. Б – схема овражно-балочной сети в пределах среднего и нижнего течения р. Курсак в 2002 г.

В целом эрозионные процессы на Южном Урале и Предуралье наносят значительный экономический и экологический ущерб хозяйственным объектам, населенным пунктам и водным объектам. Последнее проявляется в том, что выносимые с водосборов продукты эрозии почв приводят к быстрому заилению прудов, русел и пойм самих малых и отчасти средних рек. На устранение негативных последствий ежегодно выделяются значительные средства, что требует необходимости научного обоснования и безотлагательного внедрения механизмов оптимального природопользования на речных водосборах с учетом требований бассейнового принципа и геосистемного подхода. В их числе очевидна необходимость широкомасштабного проведения системы противоэрозионных организационно-хозяйственных, агролесомелиоративных, гидротехнических и других мероприятий, которые в целом будут способствовать минимизации затрат, необходимых для предотвращения, нейтрализации или снижения последствий ускоренной эрозии на речных водосборах.

Анализируя особенности влияния трансформации склонового и речного стока, связанной с деградацией природных комплексов на речных водосборах, следует обратить внимание на следующее. К настоящему времени сформировались целостные концептуальные подходы, раскрывающие генезис и морфодинамику речных русел. В составе известных работ, посвященных указанному вопросу, следует привести фундаментальные работы М. Е. Великанова [1], Н. И. Маккавеева [7], Р. С. Чалова [9] и др., которые в принципе развили теорию русловедения, всесторонне и глубоко раскрывая ее теоретические положения и практическую значимость. Так, закон ограниченности морфологических комплексов, сформированный М. А. Великановым [1], позволяет осуществлять типизацию русловых процессов. В свою очередь, форма русла и его деформации со структурой потока, соответственно, морфологическая классификация русел рек является динамической. Таким образом, подобная классификация по существу является морфодинамической и элементы, ее составляющие – морфодинамическими типами русел [9].

Морфометрические характеристики русел рек по любому створу имеют непосредственную зависимость от соответствующих расходов воды в многолетнем разрезе и внутри года, транспортирующей способности водных потоков, оказывающих разрушающее и аккумулирующее воздействие на русло. Фактически, в результате последовательного увеличения разрушающей способности водных потоков по мере их движения в системе склон-русло в умеренном климатическом поясе как вертикальные, так и горизонтальные перемещения формируются в зависимости от влияния большой совокупности факторов, основными из которых являются: интенсивность линейного увеличения расходов воды; их разрушающей, траспортирующей способности; сопротивляемость грунтов, слагающих склон и русло к воздействию разрушающих сил; скорость вертикальных перемещений земной коры; масштабы антропогенной трансформированности природных комплексов на водосборе, соответственно, их естественной водорегулирующей способности.

Как было показано ранее, в пределах горно-лесной зоны Южного Урала и лесостепного равнинного Предуралья в условиях многократного увеличения антропогенных нагрузок на природные комплексы на водосборе в течение продолжительного времени сформировались процессы, способствующие трансформации склонового и речного стока. Это привело к соответствующему увеличению максимальных показателей и речного стока, включая очень малые, малые и отчасти средние реки. С учетом изложенного нами в последующем проводились расчеты и оценки, отражающие особенности изменения максимальных расходов воды по указанным категориям рек. На основании их анализа было выявлено, что те тенденции изменения речного стока, которые свойственны рекам Горного Башкортостана, характерны и для равнинного Предуралья. В то же время относительное увеличение максимального стока за 1970–2000 гг. варьирует в значительных соотношениях (5–16 %), что, кроме пространственной дифференциации масштабов антропогенных нагрузок, распаханности водосборов и др., зависит от показателей закарстованности бассейнов рек.

Таким образом, на основании обобщения обширных материалов, полученных как по бассейнам рек Горного Башкортостана, так и равнинного Предуралья, можно с большой уверенностью констатировать то, что деградация природных комплексов на речных водосборах во время весеннего снеготаяния сопровождается существенным увеличением склонового стока и максимальных расходов воды в малых реках. Это в последующем приводит к изменениям ландшафтоформирующих, экологических и хозяйственно-экономических характеристик территорий, должно учитываться не только во внесении корректировок при расчете показателей речного стока, но и управлении водохозяйственной и водоохранной деятельностью в бассейнах рек различной категории.

Так, в ходе проведения исследований в пределах лесостепного Предуралья, было выявлено то, что в условиях широкомасштабного и продолжительного негативного влияния хозяйственной деятельности человека до начала 90-х гг. XX в. здесь произошло многократное сокращение площадей лесов и других естественных угодий. Это отразилось также в трансформации склонового, речного стока и соответствующем увеличении максимальных расходов воды во время весеннего половодья.

Показатели абсолютных, относительных изменений величин максимальных расходов воды весеннего половодья, а также коэффициента (k_2), отражающего кратность его увеличения, рассчитывались на основании анализа материалов многолетних наблюдений за расходами воды по пунктам гидрометрических наблюдений. Во избежание ошибок расчеты проводились по бассейнам малых и средних рек, характеризующихся отсутствием или наименьшим зарегулированием речного стока прудами и водохранилищами при показателях наибольшей освоенности водосборов. В целях оценки норм стока и других статистических параметров обрабатывались многолетние ряды наблюдений, которые проверялись на однородность посредством применения известных методов: Вилькоксона, Фишера и нарастающих (интегральных) сумм. Следует обратить внимание на то, что, если критерии Вилькоксона и Фишера позволяют оценить наличие

самого факта нарушенности рядов, то метод нарастающих сумм наглядно отражает происходящее изменение в многолетнем разрезе, соответственно, позволяет определять показатели абсолютных изменений максимальных расходов воды, участвующих в формировании или изменении руслоформирующих расходов в целом. Таким образом, он позволяет подразделить весь период наблюдений (генеральную совокупность) на 2 выборки: 1) с естественным режимом речного стока, соответственно, и руслоформирующих расходов воды; 2) с измененными (увеличенными) показателями максимальных расходов воды весеннего половодья, а также нарастанием разрушающей способности водных потоков в указанное время. Изложенное отражено в значительном количестве опубликованных работ [3–5 и др.]. Они в целом характеризуют 2 периода с различными масштабами антропогенных нагрузок на природные комплексы речных водосборов: до широкомасштабного их освоения (приходящегося на 1950–1955 гг.) и наибольшего развития масштабов антропогенных нагрузок на природные комплексы (1984–1997 гг.).

На основании сопоставления показателей максимальных расходов воды весеннего половодья по пунктам наблюдений получены средние значения коэффициентов (k_2), отражающие их увеличение в зависимости от изменения соотношений стокоформирующих факторов на водосборе в условиях деградации природных комплексов [5]. Их значения отражены в табл. 2.

Таблица 2

Значения коэффициентов (k_2) к расчету максимальных расходов талых вод по бассейнам рек Башкирского Предуралья

№ п/п	Река-створ	*K*	Примечание
1	Чермасан – с. Новоюмраново	1,12	
2	Б.Ик – д. Таишево	1,08	
3	Буй – д. Татарская Урада	1,27	Подлежит уточнению
4	Бирь – д. Малосухоязово	1,14	
5	Уршак – д. Ляхово	1,17	
6	Лемеза – д. Ниж. Лемеза	1,14	
7	Мияки – д. Мияки-Тамак	1,14	

Как видно из табл. 2, в бассейнах малых и средних рек, испытывающих чрезмерное влияние хозяйственной деятельности, коэффициенты, отражающие увеличение максимальных расходов воды весеннего половодья, достигают до 1,08–1,17. Соответственно, такие величины могут быть приняты и по другим бассейнам рек, испытывающих аналогичные виды и масштабы влияния антропогенных факторов.

Следует обратить внимание на то, что после 1994–1997 гг. значительные площади сельскохозяйственных земель оказались заброшенными. Постепенно поля заросли травянистой, кустарниковой и древесной растительностью, что отразилось в заметном сокращении темпов развития эрозионных процессов на речных водосборах. Это проявляется и на некотором снижении активности развития русловых процессов на малых реках. Об этом свидетельствуют исследования и

Е. В. Водогрецкого [2], Н. И. Коронкевича [6], в которых подчеркнута значимость лесов и лесных полос в уменьшении склонового стока, в свою очередь имеющая и противоэрозионное значение.

Таким образом, на основании подробного статистического и графического анализа материалов многолетних гидрометеорологических наблюдений можно выявить то, что в условиях заметного снижения масштабов хозяйственной деятельности человека на водосборах малых рек, постепенного зарастания заброшенных полей, что характерно для многих регионов РФ, происходит некоторое снижение темпов активизации развития эрозионных и русловых процессов.

Приведенные значения коэффициентов (k_2) могут быть ориентировочно приняты как повышающие при расчете максимальных расходов воды весеннего половодья и для неизученных рек, по бассейнам которых обнаруживаются виды и масштабы хозяйственной деятельности, которые свойственны и для изученных рек.

Особенности изменения русловых процессов в зависимости от увеличения максимальных расходов воды (в составе руслоформирующих) достаточно отчетливо проявляются на основании сравнительного анализа картографических материалов (рис. 6, 7), отражающих структуры гидрографической сети, относящихся к двум этапам наблюдений с различными масштабами антропогенных нагрузок.

Следует обратить внимание на то, что в активизации русловых деформаций кроме антропогенных принимают участие также естественно-исторические процессы, обусловленные циклическими многолетними и внутривековыми колебаниями условий увлажнения территорий, соответственно и расходов воды рек различной категории.

В результате наложения антропогенных факторов на естественные формируются условия, характеризующие изменчивость во времени разрушающей и аккумулирующей способности водных потоков, которые обусловливают не только формирование изменчивости горизонтальных и вертикальных перемещений русел рек, но и заметное трансформирование гидрографической сети. Как видно из рис. 6, 7 за период времени с 40-х гг. XIX в. к началу XX в. отдельные реки 1–2-го порядков превратились во временные водотоки, некоторые прекратили свое существование. Следует подчеркнуть то, что за указанные сроки русла многочисленных малых и средних рек, протекающих в пределах лесостепной и степной зон, претерпели существенных изменений. Это не характерно для горно-лесной зоны Южного Урала, несмотря на то что эта территория характеризуется наибольшими потенциальными показателями для развития эрозионных процессов.

В качестве негативных последствий влияния ускоренной эрозии на водосборах на морфометрические характеристики русел рек, паводково-пойменные комплексы, пруды, водохранилища и др. следует привести то, что эти указанные объекты испытывают процесс интенсивного заиления. Это является причиной резкого ухудшения условий природопользования (в том числе и водопользования), русловых деформаций, эвтрофикации водоемов и др. Процесс заиления и зарастания достаточно отчетливо проявляется на примере пруда на р.Усень, являющегося объектом промышленного водоснабжения г. Белебей в пределах Республики Башкортостан (рис. 8).

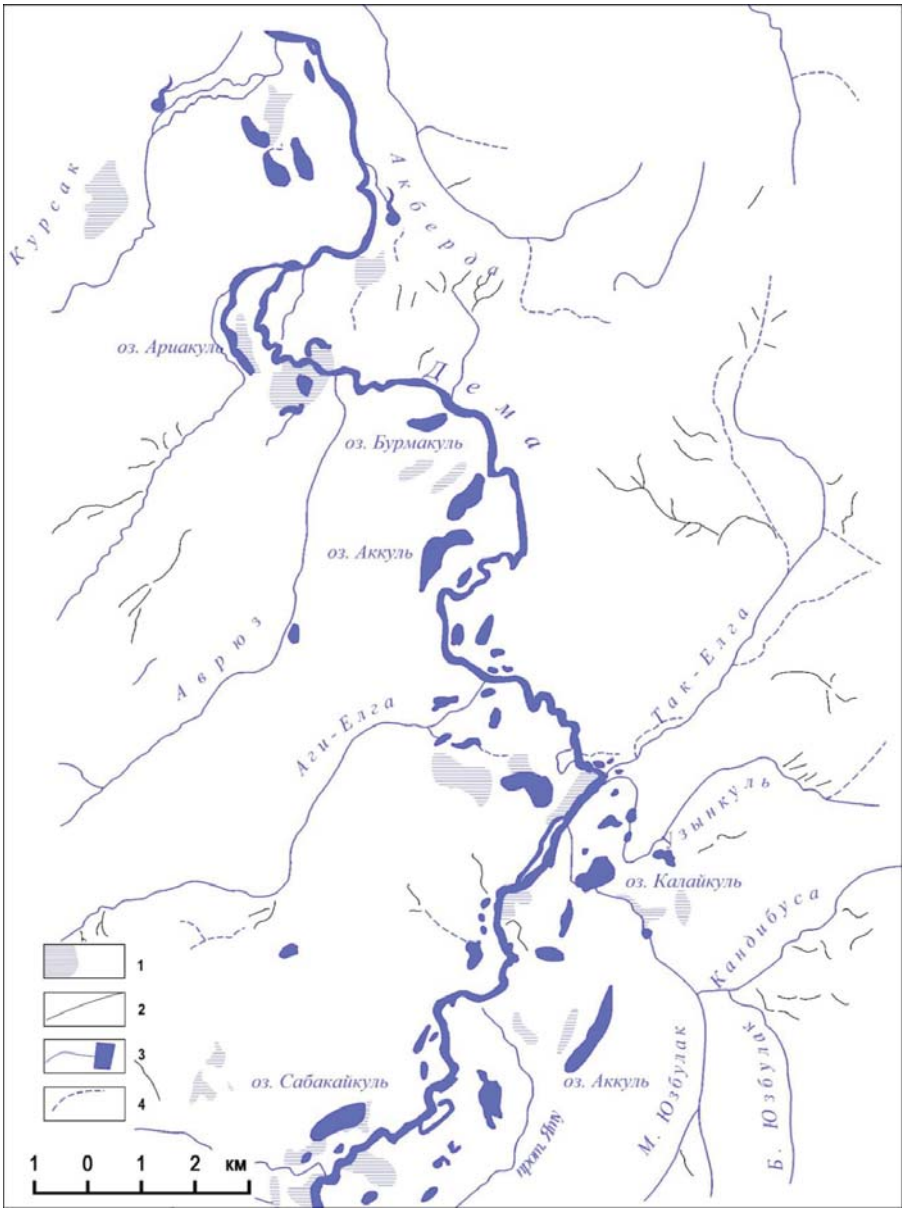


Рис. 6. Гидрографическая сеть в пределах среднего участка р. Дема в 1840–1842 гг.: 1 – болота; 2 – овраги; 3 – реки и озера; 4 – временные водотоки

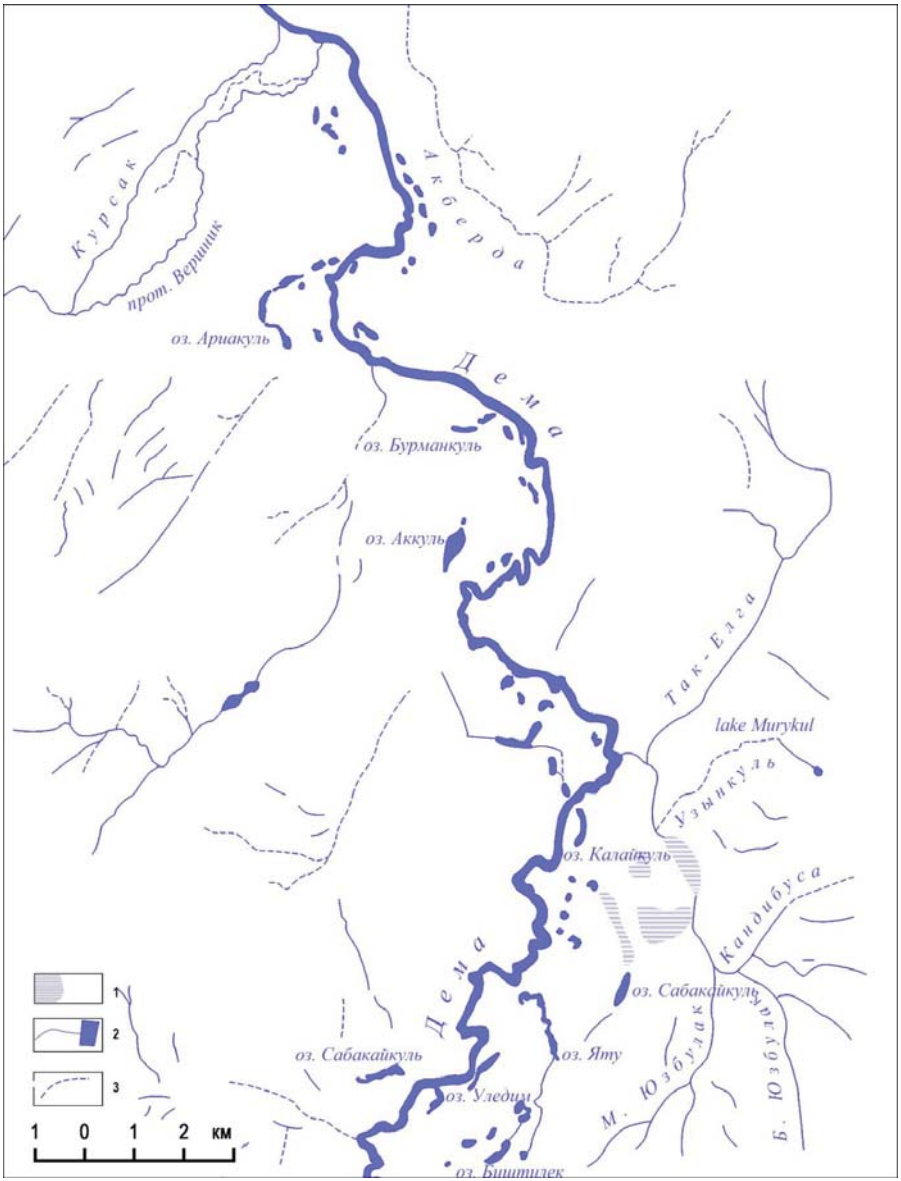


Рис. 7. Гидрографическая сеть в пределах среднего участка р. Дема в 1984–1997 гг.: 1 – Болота; 2 – Реки и озера; 3 – Временные водотоки

Рис. 8. Процесс заиления и зарастания пруда на р. Усень в результате активного смыва продуктов разрушения почв и грунтов на ее водосборе

Обобщая материалы многолетних наблюдений, экспериментов и опытов, проведенных нами в бассейнах малых и средних рек Южного Урала и равнинного Приуралья, а также анализа картографических материалов за различные периоды съемок можно однозначно констатировать:

1. Трансформация склонового, а затем и речного стока на малых реках характеризуется заметным увеличением максимальных расходов воды во время весеннего половодья, соответственно, уменьшением минимальных расходов воды в летне – осенний и зимний периоды. Это является причиной возникновения неблагоприятных хозяйственно – экономических и экологических последствий.

2. Интенсивность активизации развития русловых процессов на малых реках зависит от степени деградации природных комплексов на водосборах, обусловленной масштабами и направлением влияния хозяйственной деятельности человека.

3. Показатели заиления русел малых рек в ряде случаев (особенно в среднем и нижнем течениях) – это не признак их «старения», а проявление влияния совокупности естественных и антропогенных факторов в данном отрезке времени, в пределах определенно влияющей климатической эпохи. Соответственно, техническое решение задач в виде проведения дноуглубительных, берегоукрепительных и иных работ должно обосновываться на необходимости выполнения соответствующих гидрологических расчетов с учетом происходящих изменений в состоянии естественной водорегулирующей способности речных водосборов.

4. Классические приемы типизации речных русел в условиях происходящих изменений требуют необходимости уточнения и внесения поправок.

5. Ландшафтно-гидрологические подходы к изучению особенностей фомирования и изменения склонового и речного стока позволяют выявлять причинно-следственные связи и обосновать необходимые протвоэрозионные и иные мероприятия по басенйнам малых рек с учетом масштабов деградации природных комплексов на их водосборах.

Список литературы

1. *Великанов М. А.* Русловой процесс. М. : Наука, 1958. 356 с.

2. *Водогрецкий В. Е.* Антропогенные изменения стока малых рек. Л. : Гидрометеоиздат, 1990. 176 с.

3. *Гареев А. М.* Ландшафтно- гидрологические иследования изменчивости склоногвого сока и развития эрозионных процессов // Экологические проблемы современности. Ч. 1. Уфа : БГПУ, 2001. С. 25–33.

4. *Гареев А. М.* Некоторые характеристики изменения стока малых и средних рек в результате антропогенных факторов // Чистая вода России. Екатеринбург : РосНИИВХ, 2003. С. 176.

5. *Гареев А. М., Хабибуллин И. Л.* Естественные и антропогенные факторы активизации развития эрозионных процессов.Уфа : РИЦ БашГУ, 2010. 122 с.

6. *Коронкевич Н. И.* Вопросы формирования стока и влияния на него хозяйственной деятельности // Вопросы географии // Ландшафт и воды. М. : Мысль, 1976. С. 29–46.

7. *Маккавеев Н. И.* Русло реки и эрозия в ее бассейне. М. : Наука, 1955. 205 с.

8. Физико-гографическое районирование Башкирской АССР // Ученые записки БашГУ. Серия географическая. 1964. Т. 16, № 1.

9. *Чалов Р. С.* Руслоформирующие расходы воды // Вестник Московского университета. Сер. 5, География. 2006. № 1. С. 11–19.

УДК 378.1

Современные проблемы гидрометеорологического образования в Российской Федерации и пути их решения

А. М. Гареев (aufar.gareev@mail.ru)

Башкирский государственный университет, Уфа

Аннотация. Приведены результаты обобщения материалов, отражающих подготовку бакалавров и магистров в вузах Российской Федерации. В качестве основных показателей приняты контрольные цифры приема (КЦП), отражающие контингент студентов группах, обучающихся по направлению «Гидрометеорология» на бюджетной основе. Выявлены проблемы, отражены пути их решения в течение ближайших лет.

Ключевые слова: направление «Гидрометеорология», контингент студентов, контрольные цифры приема.

Характерной особенностью деятельности бакалавров и магистров, получивших высшее образование по профилям гидрология и метеорология, входящим в состав направления «Гидрометеорология», является то, что они являются остро востребованными в решении большой совокупности научно-производственных и педагогических задач, в том числе проектно- изыскательской деятельности.

Например, это обусловлено тем, что составление проектов строительства объектов различного профиля, выполнение прогнозных расчетов по оценке рисков возникновения неблагоприятных гидролого-экологических и экономических ситуаций, а также выявление закономерностей, происходящих в природно-хозяйственных системах в условиях влияния совокупности естественных и антропогенных факторов и др. не могут быть осуществлены без участия гидрологов и метеорологов. Это имеет особую актуальность в настоящее время, что характеризуется усилением влияния изменения климата как в глобальном, так и региональном масштабах. Как известно, своевременное и полномасштабное решение указанных задач может быть достигнуто только при наличии необходимого количества специалистов как в стране в целом, так и различных регионах. С учетом изложенного в соответствии с планом работ Консультативного совета при Росгидромете в 2020 г. автором была проведена работа по изучению характера изменения контрольных цифр приема по высшим учебным заведениям страны в течение последнего десятилетия.

В целях получения достоверной информации был осуществлен опрос их представителей, включая ректоров, деканов факультетов, заведующих кафедрой, а также известных ученых, педагогов – профессоров и доцентов. Ответы на поставленные вопросы получены из всех учебных заведений, в которых организован образовательный процесс. Они затрагивали различные аспекты организации, приема абитуриентов, проведения учебного процесса с обращением основного внимания на уточнение показателей контрольных цифр приема и включали следующие положения (вопросы):

1. Контрольные цифры приема в Ваш университет по направлению «Гидрометеорология» за последние 10 лет, отразив показатели каждого года по бакалавриату и магистратуре, по профилям гидрология суши, метеорология и климатология;

2. Средние показатели ЕГЭ абитуриентов, поступивших в Ваш вуз, по указанному направлению и как они отличаются от показателей других (родственных) направлений?

3. Из каких регионов страны поступают в Ваш вуз?

4. Показатели конкурса по сравнению с другими направлениями;

5. Каковы активность и уровень подготовленности абитуриентов, поступивших в вуз по указанному направлению?

6. Опишите, пожалуйста, особенности, отражающие низкую активность абитуриентов поступать в вуз по направлению «Гидрометеорология» (если это имеется);

7. Вкратце охарактеризуйте, пожалуйста, особенности участия представителей научной и производственной сфер деятельности, а также подразделений Росгидромета в учебном процессе в вузе по данному направлению;

8. Считаете ли Вы достаточными контрольные цифры приема по направлению «Гидрометеорология», выделяемые Министерством науки и образования РФ?

9. Имеется ли дефицит специалистов (бакалавров и магистров) в Вашем регионе?

10. Насколько полномасштабно работает Ваш вуз в удовлетворении потребностей Росгидромета в специалистах (бакалаврах и магистрах) на уровне Российской Федерации в целом?

11. Каковы Ваши пожелания относительно увеличения контрольных цифр приема по направлению в Вашем вузе на ближайшие годы (с учетом востребованности бакалавров, магистров и оптимальных параметров трудоустройства)?

12. Приведите (опишите), пожалуйста, и другие положения, отражающие специфику подготовки бакалавров и магистров по направлению «Гидрометеорология», возможности их трудоустройства, а также Ваши пожелания.

На основании обобщения и анализа представленных сведений было выявлено следующее (характеристики ответов по указанным пунктам):

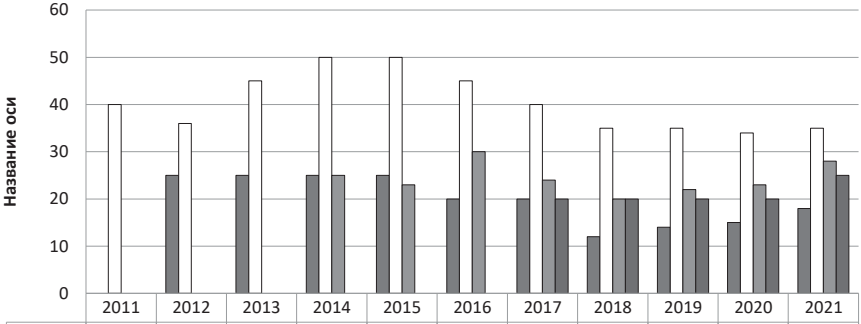
1. Контрольные цифры приема в бакалавриат по направлению «Гидрометеорология» по вузам существенно различаются. При этом, в отдельных учебных заведениях обучение бакалавров осуществляется по всем основным профилям: гидрология суши, метеорология и климатология, океанология (МГУ, РГГМУ, СПбГУ). В Пермском, Иркутском государственных университетах ведется подготовка бакалавров по профилям гидрология и метеорология. В Башкирском и Казанском Федеральном государственных университетах обучаются бакалавры, соответственно, по профилям гидрология суши и гидрометеорологический мониторинг (по новому учебному плану в соответствии с требованиями ФГОС3++), метеорология и климатология. Следует отметить то, что в некоторых вузах учебный процесс организован в целом по направлению «Гидрометеорология», к которым относятся Северный (Арктический) и Южный федеральные университеты.

Следует обратить внимание на то, что в динамике изменения контрольных цифр приема за период времени с 2011 по 2021 г. обнаруживается нестабильность. Так, если в 2011–2014 гг. группы в основном были полными, включали 20–25 студентов, то в 2015–2019 гг. по ряду вузов наблюдалось резкое уменьшение КЦП. Это, например, произошло по РГГМУ, Башкирскому, Иркутскому и Пермскому государственным университетам (рис. 1).

Например, по РГГМУ в 2015 г. КЦП составила 16 мест, Башкирскому государственному университету в 2018 г. – 12 мест, по Иркутскому и Пермскому госуниверситетам в 2018 г. – 20 и 35 мест соответственно (на 2 профиля). В последующем с 2020–2021 гг. по отдельным университетам наблюдается некоторое увеличение КЦП, за исключением Дальневосточного федерального и Тюменского государственных университетов. По указанным вузам приема в 2021 г. не было. В то же время, в разрезе некоторых университетов обнаруживается неизменность КЦП, или даже некоторое увеличение, к которым относятся МГУ (24), КФУ (25), САФУ (20).

Следует обратить внимание на то, что в целом по стране за указанный период также произошло уменьшение показателей КЦП. Так, если в 2011–2013 гг. общее количество мест по всем вузам составляло 234–240, то к настоящему времени оно уменьшилось до 215–216. При этом обнаруживается резкая дифференциация по охвату территории страны по подготовке бакалавров и их распределе-

нию в структуры Росгидромета и других научно- производственных, изыскательских организаций. Положение несколько улучшается в связи с тем, что по некоторым вузам осуществляется прием на обучение по направлению «Прикладная гидрометеорология». Так, к таким относятся РГГМУ и ПНИГУ, в которых организовано обучение бакалавров в количестве 18–20 бюджетников.



	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
БашГУ		25	25	25	25	20	20	12	14	15	18
ПГНИУ	40	36	45	50	50	45	40	35	35	34	35
ИГУ				25	23	30	24	20	22	23	28
КФУ							20	20	20	20	25

Рис. 1. Динамика изменения контрольных цифр приема (КЦП) в разрезе некоторых вузов РФ

Контрольные цифры приема в магистратуру в настоящее время согласно справкам, представленным представителями вузов, распределяются следующим образом: ПГНИУ – 20, КФУ – 10 (в 2020 г.) и 0 в 2021 г., БашГУ – 15, ИГУ – 5, МГУ – 23.

2. Как показывает анализ результатов ЕГЭ средние показатели баллов по направлению «Гидрометеорология» ниже, по сравнению с другими (родственными) направлениями: география, картография, информатика др. Так, они составляют от 55–59 баллов (САФУ, ПГНИУ, ИГУ) до 65–80 баллов (БашГУ, РГГМУ, КФУ, МГУ).

3. Выявлено то, что в РГГМУ и МГУ абитуриенты поступают из всех регионов страны, а также из зарубежья. Например, по РГГМУ это выглядит следующим образом: страны СНГ (3), регионы РФ (82), Казахстан, Украина, Беларусь. По другим вузам обнаруживается то, что в них в основном поступают абитуриенты из регионов, где располагается вуз, а также из соседних республик и областей. Например, по КФУ – основная масса абитуриентов поступает из регионов, входящих в ПФО, а также Челябинской обл., Республики Крым, Ханты-мансийского АО.

По Иркутскому государственному университету: Иркутская область, Республика Бурятия, Забайкальский край, Республика Тыва, Красноярский край, Якутия (Саха), Новосибирская область, Кемеровская область, Амурская область.

По БашГУ: Казахстан, Узбекистан, Туркменистан, Киргизия, Оренбургская, Челябинская области, Республика Татарстан и др.

По ПГНИУ: Пермь и Пермский край, Свердловская обл., Кировская обл., Челябинск, Удмуртия, Башкортостан, Татарстан, ХМАО, Республика Коми, Архангельская область, Калмыкия, Хабаровский край, Краснодарский край, Карачаево-Черкессия, Белгородская область.

4. По многим вузам на направлениях со схожими вступительными испытаниями (география, математика, русский язык), ежегодно конкурс выстраивается (по убыванию): Картография и геоинформатика, География, Гидрометеорология.

5. Уровень активности и подготовленности абитуриентов, поступающих в вуз, по ряду университетов считают достаточно высоким (МГУ, ПГНИУ), удовлетворительным (САФУ, КФУ, БашГУ), а также недостаточно высоким (РГГМУ, ИГУ). Так, по Пермскому государственному университету показано то, что в последние 3–4 года наблюдается увеличение интереса к специальности «Гидрология» и «Прикладная гидрология», около трети абитуриентов делают осознанный выбор, а не по остаточному принципу. Это связано с увеличением количества профориентационных мероприятий и популяризации специальности в СМИ посредством освящения природных катаклизмов. Уровень трудоустройства выпускников по профилю «Рациональное использование и охрана водных ресурсов» за последние 5 лет колеблется от 75 до 95 %, причем многие начинают трудовую деятельность по специальности на 4-м курсе бакалавриата и продолжают, учась в магистратуре.

В отличие от указанного вуза по РГГМУ подчеркивается то, что уровень знаний абитуриентов по дисциплинам естественнонаучного цикла не высокий, поэтому обучающиеся 1 курса испытывают трудности при изучении технических дисциплин (например, физики, химии, физики атмосферы и т. д.).

6. По справкам, представленным из многих вузов, выявлена довольно низкая активность поступления абитуриентов на направления подготовки 05.03.04 – Гидрометеорология и 05.03.05 – Прикладная гидрометеорология. Это связано с:

а) низким уровнем оплаты труда, который ждет выпускников при трудоустройстве по специальности, является основной причиной оттока специалистов из отрасли;

б) низким уровнем информации по популяризации специальностей: метеоролог, гидролог, синоптик;

в) недостаточным материально-техническим обеспечением образовательного учреждения, требующего современное специальное оборудование;

г) отсутствием целевого набора по очной форме обучения со стороны профильного Министерства, ведомственных органов отрасли.

Так, в РГГМУ многие абитуриенты, заинтересованные в обучении по направлению подготовки 05.03.04 – Гидрометеорология, параллельно выбирают образовательную программу 05.03.05 – Прикладная гидрометеорология с профилями «Авиационная метеорология» и «Полярная метеорология и климатология».

Как показано в материалах, представленных из КФУ о низкой активности (мотивации) можно косвенно судить по тому, что абитуриенты принимают решение

подать заявление о согласии на зачисление на указанное направление в последний момент, когда становятся минимальными шансы поступления на другие (приоритетные) для абитуриента направления. Это характерно и по другим вузам.

Представители Иркутского государственного университета подчеркивают, что школьники практически не имеют полного представления о специальности гидрология и метеорология. Большая часть абитуриентов считает, что специалисты этих направлений получают очень мало и не являются престижными в плане карьеры и заработков. Это в первую очередь связано с уникальностью науки и малочисленностью специалистов, способных личным примером воодушевить подрастающее поколение романтикой, сложностью и привлекательностью дела, и во вторую очередь – слабой профориентационной работой в школах преподавателями вузов и представителями гидрометеорологической службы. Практически нет рекламы этих профессий ни в интернете, ни на телевидении. Возможно, это связно и с формированным современным поколением взгляда на жизнь, где стремление к «красивой и богатой» жизни ставится превыше всего. Однако реалии выглядят по-другому. Например, гидрологи, работающие в проектно-изыскательских организациях, как правило, получают высокую заработную плату.

7. На основании анализа полученной информации из вузов выявлено то, что многие из них образовательную и научно – исследовательскую деятельности осуществляют на уровне глубокой интеграции с научно- производственными организациями, министерствами, ведомствами, а также региональными управлениями Росгидромета. Это характерно для БашГУ, ИГУ, РГГМУ и др. Показательно то, что РГГМУ привлекает к реализации образовательного процесса работников Росгидромета (сотрудники ФГБУ «Северо-Западное УГМС»), в соответствии с договором о прохождении практики обучающиеся РГГМУ проходят производственную практику в следующих организациях: ФГБУ «Гидрометцентр России», ФГБУ «Северо-Западное УГМС», ФГБУ «Башкирское УГМС», ФГБУ «Мурманское УГМС», ФГБУ «Крымское УГМС», ЦГМС Республики Коми – филиал ФГБУ «Северное УГМС», ГМБ Череповец – филиал ФГБУ «Северное УГМС», Пермский ЦГМС – филиал ФГБУ «Уральское УГМС», Краснодарский ЦГМС – филиал ФГБУ «Северо-Кавказское УГМС», Псковский ЦГМС – филиал ФГБУ «Северо-Западное УГМС», Вологодский ЦГМС – филиал ФГБУ «Северное УГМС», Волгоградский ЦГМС – филиал ФГБУ «Северо-Кавказское УГМС», Новгородский ЦГМС – филиал ФГБУ «Северо-Западное УГМС», ФГБУ «ГАМЦ Росгидромета», ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета», Приволжский филиал ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета», Уральский филиал ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета», Верхне–Волжский филиал ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета», Крымский филиал ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета», Камчатский филиал ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета», Северо-Кавказский филиал ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета», Сочинский филиал ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета», Дальневосточный филиал ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета», Северный филиал, ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета», Среднесибирский филиал ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета», Се-

веро-Западный филиал ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета», Западно-Сибирский филиал ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета», Иркутский филиал ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета».

В БашГУ в учебном процессе принимают активное участие ведущие сотрудники ФГБУ «Башкирское УГМС», Академии наук Республики Башкортостан, Филиала «Центррегионводхоз» по мониторингу водных объектов бассейнов рек Белой и Урала, Отдела водных ресурсов Камского бассейнового водного управления по Республике Башкортостан и др.

8. Контрольные цифры приема по сведениям, представленным из всех вузов, считаются недостаточными. Подчеркивается то, что Министерство науки и высшего образования Российской Федерации распределяет бюджетные места на укрупненную группу 05.00.00 НАУКИ О ЗЕМЛЕ. Университеты распределяют КЦП самостоятельно между образовательными программами (География, Геология, Экология и природопользование, Гидрометеорология, Геофизика и др.).

Особенно критическая ситуация наблюдается в МГУ. Как было показано ранее, в указанный вуз Министерством науки и образования РФ выделяется 24 бюджетных места, в том числе по 9 по гидрологии и метеорологии, 6 – по океанологии. Это по многим параметрам не соответствует требованиям компоновки полных академических групп, соответственно создает большие проблемы в учебном процессе.

9. Как свидетельствуют предоставленные из вузов материалы, дефицит в высококвалифицированных кадрах гидрометеорологического профиля имеется по всей стране, за исключением городов Москва, Санкт-Петербург, Казань.

10. Выявлено то, что вузы потребности Росгидромета (в том числе и региональных управлений) в основном удовлетворяют по тем регионам, где они расположены (в Пермском крае, Республиках Башкортостан, Татарстан, Архангельской, Иркутской области и др.). В других регионах, особенно удаленных, имеется необходимость безотлагательного решения кадрового вопроса. Особенно не хватает высококвалифицированных специалистов в огромных пространствах Сибири и Дальнего Востока.

11. По всем вузам имеется необходимость увеличения КЦП с учетом их возможностей, а также востребованности специалистов (бакалавров и магистров) на региональном и общегосударственном уровнях.

12. Дополнительно раскрывая другие положения, отражающие специфику подготовки бакалавров и магистров по направлению «Гидрометеорология», следует подчеркнуть необходимость патронажного сопровождения Росгидрометом КЦП именно по гидрометеорологии. Кроме того, до сих пор отсутствуют профессиональные стандарты, что во многом затрудняет организацию учебного процесса в соответствии с требованиями ФГОС3++. Очевидна необходимость активизации участия представителей Росгидромета в популяризации гидрометеорологических знаний, профориентационной работе, широко используя свои возможности с учетом современного уровня развития информационных систем, практических навыков в обращении с приборами, оборудованием и др. Проведение слетов юных гидрометеорологов на региональном и общегосударственном

уровнях во многом позволит положительно решить имеющиеся проблемы при поступлении абитуриентов в вузы. Следует подчеркнуть то, что по результатам обсуждения данного вопроса в Консультативном совете при Росгидромете было принято решение, включающее следующие пункты:

1. Просить Росгидромет обратиться с ходатайством в Министерство науки и высшего образования Российской Федерации об увеличении контрольных цифр приема в вузах страны по направлению «Гидрометеорология» до 25 мест по всем функционирующим профилям.

2. Рекомендовать членам Консультативного совета усовершенствовать профориентационную работу со школьниками и студентами учебных заведений.

3. Просить Росгидромет о помощи в подготовке и проведению ежегодных всероссийских слетов юных гидрометеорологов.

Кроме того, в решении имеющихся проблем по приему абитуриентов по профилям направления «Гидрометеорология» могло бы способствовать предоставление целевых мест для укомплектования штатов региональных управлений Росгидромета, а также своевременное предоставление достоверной информации о наличии вакансий в разрезе субъектов Российской Федерации.

УДК 556.535.3

Многолетние изменения стока рек бассейна Иртыша и их причины

В. Ю. Георгиевский (georg@ggi.nw.ru), Е. А. Грек (elena_greck@mail.ru),
Т. Г. Молчанова (molch@ggi.nw.ru)

Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург

Аннотация. Представлены результаты анализа многолетних колебаний различных характеристик стока рек бассейна Иртыша. Доминирующим фактором, определяющим многолетнюю динамику годового стока рек российской части бассейна, являются естественные межгодовые и внутривековые колебания увлажненности территории. Наиболее существенные изменения во внутригодовом распределении стока произошли в результате регулирующего влияния водохранилищ. Установлено статистически значимое увеличение минимального зимнего стока, обусловленное влиянием климатических факторов и регулированием водохранилищами.

Ключевые слова: реки, водный режим, водохранилища, климат, изменение стока.

Введение

Река Иртыш протяженностью 4248 км протекает по территории Китая, Республики Казахстан и Российской Федерации, имеет водосборную площадь 1643 тыс. км^2, из которой 69 % расположено в пределах России. Водные ресурсы бассейна р. Иртыш играют значительную роль в обеспечении устойчивого социально-экономического развития больших регионов этих стран.

Водный режим р. Иртыш и его основных притоков испытывает значительные антропогенные воздействия, прежде всего связанные с регулированием стока, а также внутри и межбассейновым перераспределением стока в целях

наиболее полного удовлетворения потребностей населения и отраслей экономики в воде.

В последние десятилетия формирование стока в бассейне реки происходит в условиях происходящих климатических изменений, характеризующихся, прежде всего, повышением приземной температуры воздуха [1].

Целью настоящей работы являлся научный анализ происходящих под влиянием естественных и антропогенных факторов изменений в водном режиме рек бассейна Иртыша.

Исходные гидрологические данные

В качестве исходной информации были использованы данные по трем гидрологическим постам, расположенным на р. Иртыш, и четырем постам на основных притоках реки (табл. 1).

Таблица 1

Сведения о гидрологических постах

Код поста	Река – пост	Период наблюдений за стоком, гг.	Расстояние, км		Площадь водосбора, км^2	Координаты, в долях градуса	
			от истока	от устья		широта	долгота
11001	Иртыш – с. Буран	1938–2019	560	3688	55 900	48,00	101,60
11048	Иртыш – г. Омск	1923–2019	2424	1824	769 000	55,01	73,18
11056	Иртыш – г. Тобольск	1891–2019	6470	416	958 000	58,12	68,14
11313	Омь – г. Калачинск	1936–2019	970	121	47 800	55,04	74,35
11353	Тара – с. Муромцево	1933–2019	698	108	16 400	56,23	75,15
11412	Ишим – г. Ишим	1950–2019	1960	490	115 000	56,59	69,28
12014	Тобол – г. Курган	1912–2019	887	704	159 000	55,26	65,23

Исходными материалами для анализа многолетних колебаний стока рек послужили данные о месячном, годовом, максимальном и минимальном летне-осенним и зимнем стоке за весь период наблюдений по 2019 г. включительно. По гидрологическому посту р. Иртыш – с. Буран имелись только данные по годовому стоку.

Антропогенные факторы

В целях гарантированного водообеспечения населения, промышленности, сельского хозяйства, выработки электроэнергии, в бассейне Иртыша сооружен ряд водохранилищ, оказывающих влияние на водный режим реки и его основных притоков (рек Ишим, Тобол).

На территории республики Казахстан сток р. Иртыш зарегулирован каскадом Верхне-Иртышских водохранилищ (Бухтарминское, Усть-Каменогорское, Шульбинское), крупнейшим из которых является Бухтарминское. Это водохранилище было заполнено в 1960–1966 гг. Его полезный объем составляет 30,8 км^3, что позволяет вести глубокое сезонное и многолетнее регулирование стока.

Река Ишим на территории Казахстана зарегулирована двумя водохранилищами многолетнего регулирования – Вячеславским и Сергеевским с суммарным полезным объемом более 1 км^3. Их заполнение производилось, соответственно, в 1967–1971 гг. и 1969–1970 гг. В 1973–1974 гг. введено в эксплуатацию Петропавловское водохранилище.

В верхней части бассейна р. Тобол (до г. Кустанай) создан каскад из 8 водохранилищ [2], из них многолетнее регулирование осуществляет с 1978 г.Верхнетобольское водохранилище с полезным объемом 0,78 км^3, расположенное на р. Тобол. В российской части бассейна Тобола на его притоках (реках Исеть, Миасс и др.) функционирует множество напорных гидротехнических сооружений, в том числе водохранилища с полезным объемом менее 0,10 км^3, используемые для водоснабжения крупных индустриальных центров – Екатеринбург, Челябинск, Нижний Тагил и др. По оценке, приведенной в работе [3], всего в бассейне создано более 600 таких гидротехнических сооружений.

На водный режим р. Иртыш оказывает влияние переброска части его стока по каналам. По каналу Иртыш – Караганда, строительство которого велось в 1968–1975 гг., производится забор воды для переброски части стока реки в Карагандинскую и Акмолинскую области, а также для водообеспечения столицы Республики Казахстан – г. Нур-Султан (Астана) [4]. Пропускная способность канала – 2,37 км^3/год. На территории Китая с 2000 г. введен в строй канал Иртыш (Черный Иртыш) – Карамай, забор воды в который возрос от 1–1,5 до 2 км^3/год и более [3].

Интенсивное развитие водохозяйственного комплекса бассейна Иртыша сопровождалось увеличением заборов воды и безвозвратного водопотребления. К середине 1980-х гг. суммарный объем забора воды из речной сети и подземных вод в бассейнах рек, расположенных в пределах Советского Союза, составил более 10 км^3/год, при сбросе в водные объекты примерно 5км^3/год. При этом для российской и казахстанской частей бассейна забор и сброс составили, соответственно, ≈6 км^3/год и 4 км^3/год [5]. После распада СССР произошло резкое снижение водопотребления. Так, в российской части бассейна, общий забор поверхностных и подземных вод в настоящее время составляет около 2 км^3/год, при сбросе ≈ 1,6 км^3/год [5].

В работе [3] приводится следующая оценка современного распределения суммарного водозабора в бассейне Иртыша между тремя странами: Казахстан – 50,8 %, Китай – 25,5 %, Россия – 23,7 %.

Происходящие климатические изменения

В докладе об особенностях климата на территории Российской Федерации [1] отмечается, что средняя по России скорость роста среднегодовой температуры воздуха в 1976–2018 гг. составила 0,47 ºС /10 лет, что в 2,5 раза больше скорости роста глобальной температуры. Рост среднегодовых температур наблюдаются во всех физико-географических регионах страны, в том числе и в бассейне р. Иртыш, где их повышение за рассматриваемый период оценивается примерно в 0,30 ºС/10 лет. Наиболее быстрый рост наблюдается весной (0,62 ºС/10 лет).

Для российской части бассейна Иртыша в последние десятилетия преобладает тенденция, хотя статистически не значимая, к увеличению годовых сумм осадков [1]. Наиболее значительный рост сезонных сумм осадков наблюдается весной (8–9 % от нормы за 10 лет).

Годовой сток

На рис. 1 приведены данные по многолетним изменениям годового стока р. Иртыш и его разностные интегральные кривые по трем гидрологическим постам.

Гидрологический пост у с. Буран расположен на территории Казахстана вблизи границы с Китаем. Как отмечалось выше, на территории Китая с 2000 г. работает канал Иртыш (Черный Иртыш) – Карамай по которому производится переброска части стока реки. В работе [6] выполнена приближенная оценка изменений годового стока р. Иртыш у с. Буран на основе анализа его связи со стоком р. Бухтарма, режим которой является естественным. Авторами установлено, что в результате водозаборов в канал за первые пять лет его эксплуатации годовой сток реки уменьшился примерно на 1,3 км^3/год, а последующие – на 2,5 км^3/год, что составляет ≈ 25 % от средних многолетних водных ресурсов в этом створе. Колебания годового стока р. Иртыш у с. Буран за период 1938–2019 гг. (рис. 1) характеризуются с начала наблюдений по 1973 г. четко выраженной фазой с преобладанием его положительных аномалий с последующей фазой пониженной водности. В последние годы наблюдается сток, превышающий средний многолетний, несмотря на существенные водозаборы в канал.

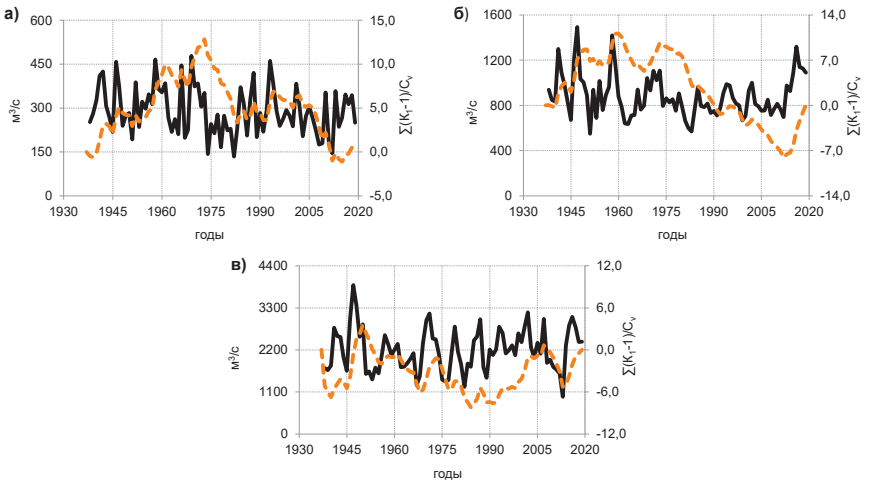


Рис. 1. Многолетние колебания годового стока (м^3/с) р. Иртыш и его разностные интегральные кривые: а) р. Иртыш – с. Буран , б) р. Иртыш – г. Омск ,в) р. Иртыш – г. Тобольск за период 1938–2019 гг.

Водные ресурсы у г. Омска формируются, в основном, на территории Китая и Казахстана и являются главным источником водоснабжения сельскохозяйственных районов Омской области и самого города [2]. Из общего объема стока Верхнего Иртыша 25 % формируется на территории Китая и 75 % – на территории Казахстана, из которых 40 % годового стока приходится на сток малых рек,

непосредственно впадающих в Иртыш от границы с Китаем до устья р. Бухтарма, где река входит в узкое горное ущелье и расположена плотина Бухтарминской ГЭС, а 35 % приходится на рекиУльба, Уба и малые притоки ниже г. Усть-Каменогорска [7].

До 1960 г., когда началось заполнение Бухтарминского водохранилища, водный режим р. Иртыш может рассматриваться как близкий к естественному. В последующие годы в результате создания водохранилищ, увеличения водопотребления, в том числе за счет заборов воды в канал Иртыш – Караганда, произошли изменения в стоке реки. По данным, приведенным в работе [7], годовой сток р. Иртыш у границы России и Казахстана в среднем за период 1975–2010 гг. снизился на 10 %. Разностная интегральная кривая годового стока р. Иртыш у г. Омска в общих чертах повторяет кривую для створа у с. Буран (рис. 1). Длительная маловодная фаза в период с 1974 по 2013 г., была обусловлена совместным влиянием естественных и антропогенных факторов. Обращает на себя внимание увеличение годового стока в 2014–2019 гг. в условиях роста водозабора в китайской части бассейна.

Влияние водохозяйственной деятельности на территории Казахстана и КНР на сток Иртыша существенно ослабевает ниже по течению от Омска за счет значительной боковой приточности, уже у г. Тобольск доля стока реки, сформировавшегося на территории России, составляет 61 %. Особенности многолетних колебаний годового стока Иртыша у г. Тобольска отличаются от их изменений на гидрологических постах у с. Буран и г. Омск. В многолетних изменениях годового стока реки в этом створе (рис. 1) можно выделить длительную фазу пониженной водности, начавшуюся с 1951 г. и продолжающуюся до середины 1980-х гг. В последние десятилетия преобладают годы со стоком выше среднего многолетнего, что объясняется увеличением водности основных притоков р. Иртыш.

В табл. 2 приведены эмпирические оценки статистических параметров годового стока рек, определенные по данным многолетних наблюдений.

Таблица 2

Годовой сток рек бассейна Иртыша

Река – пост	Период наблюдений, годы	Статистические характеристики годового стока			
		$Q_{ср.}$, м^3/с	W, км^3	C_v	C_s
Иртыш – с. Буран	1938–2019	294	9,28	0,28	0,33
Иртыш – г. Омск	1923–2019	879	27,7	0,21	0,89
Иртыш – г. Тобольск	1891–2019	2170	68,6	0,24	0,54
Омь – г. Калачинск	1936–2019	55,2	1,74	0,72	1,10
Тара – с. Муромцево	1933–2019	46,6	1,47	0,53	0,96
Ишим – г. Ишим	1950–2019	61,5	1,94	0,68	0,99
Тобол – г. Курган	1912–2019	42,4	1,34	0,87	1,76

Обращает на себя внимание очень значительная изменчивость годового стока притоков Иртыша, при коэффициенте вариации от 0,53 до 0,87. Наибольший за период наблюдений годовой расход воды превысил наименьший в 66 раз на р. Ишим и в 47 – на р. Тобол.

Сезонный сток и внутригодовое распределение

Водный режим рек Омь и Тара практически не подвержен сколько-нибудь существенному влиянию факторов хозяйственной деятельности, и может рассматриваться за весь период наблюдений, как близкий к естественному. В многолетних колебаниях водности этих рек четко прослеживается синхронность стока всех сезонов (рис. 2). На р. Тара со второй половины 1980-х гг., а на р. Омь – с начала 2000-х, наблюдается фаза увеличения всех составляющих годового стока, продолжающаяся до настоящего времени. Пониженный сезонный сток преобладал на рассматриваемых реках с начала 1950-х до начала 1980-х гг. Причиной формирования многолетних фаз различной водности являются долговременные изменения увлажненности бассейнов рек. Можно сделать вывод об увеличении стока всех месяцев, особенно значительном на р. Тара, в современных климатических условиях по сравнению с предшествующим периодом. При этом распределение стока по сезонам (в % от годового) за эти многолетние периоды практически не изменилось.

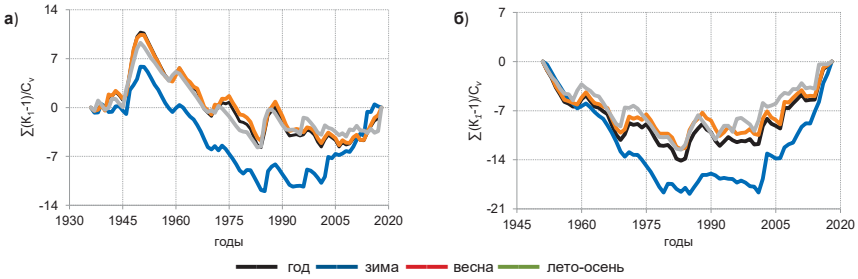


Рис. 2. Разностные интегральные кривые годового и сезонного стока притоков р. Иртыш с естественным водным режимом: а) р. Омь – г. Калачинск, б) р. Тара – с. Муромцево

Внутригодовое распределение стока р. Ишим, несмотря на наличие ряда водохранилищ в казахстанской части его бассейна, характеризуется по данным наблюдений на гидрологическом посту у г. Ишим увеличением водности в течение всего года, по сравнению с периодом до их создания (рис. 3, *а*). Это свидетельствует, на наш взгляд, о превалирующей роли климатических факторов в формировании водного режима реки, по крайней мере, применительно к рассматриваемому створу.

Во внутригодовом распределении стока р. Тобол у г. Кургана после введения в строй с 1978 г. Верхнетобольского водохранилища многолетнего регулирования произошли изменения, характеризующиеся уменьшением водности в весенние месяцы и увеличением – в меженные (рис. 3, *б*). Доля весеннего стока уменьшилась на 9 %, а летне-осеннего и зимнего – увеличилась на 4 %.

Распределение стока р. Иртыш в течение года на гидрологических постах у с. Буран и г. Омска в значительной мере определяется влиянием антропогенных факторов. В соответствии с результатами исследования, приведенными в работе

[6], в результате заборов воды в канал Иртыш – Карамай, осуществляемых в многоводный период года, сток реки в створе у с. Буран в июне и сентябре снизился на 30 %, а в июле – августе – на 40 %. В период с ноября по май существенных изменений не отмечалось, напротив, сток в эти месяцы в 2000–2010 гг. был выше, чем в предшествующий многолетний период. Можно предположить, что канал работает в период с июня по октябрь.

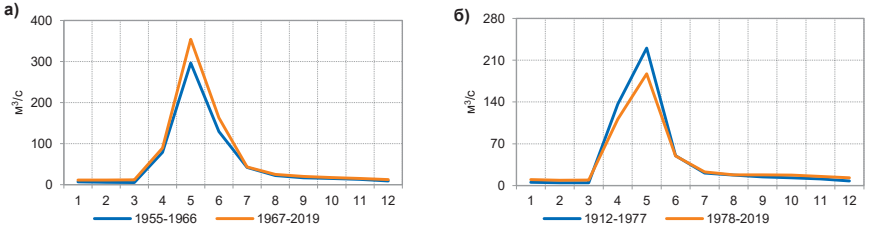


Рис. 3. Гидрографы стока р. Ишим – г. Ишим (а) и р. Тобол – г. Курган (б) за многолетние периоды

На водный режим р. Иртыш у г. Омска оказывает влияние весь комплекс факторов хозяйственной деятельности, связанный с использованием и регулированием стока на китайской и казахстанской частях его бассейна. За начало периода с антропогенно-измененным стоком в этом створе принят 1960-й г. (наполнение Бухтарминского водохранилища). В последующие годы произошли значительные изменения во внутригодовом распределении стока реки: в мае – октябре сток снизился, а в ноябре – апреле увеличился (рис. 4). При этом, если в незарегулированных условиях максимальный сток наблюдался в июне, то после создания Бухтарминского водохранилища – в мае. Доля весеннего стока в годовом уменьшилась с 70 до 60–62 %, а зимнего – увеличилась с 11 до 18–20 %.

Влияние антропогенных факторов на водный режим р. Иртыш у г. Тобольска существенно уменьшается (рис. 4, *б*) за счет значительной боковой приточности на участке от Омска до Тобольска. Вместе с тем можно отметить незначительное (на 3–4 %) снижение доли весеннего стока в годовом и увеличение – зимнего (на 2–4 %).

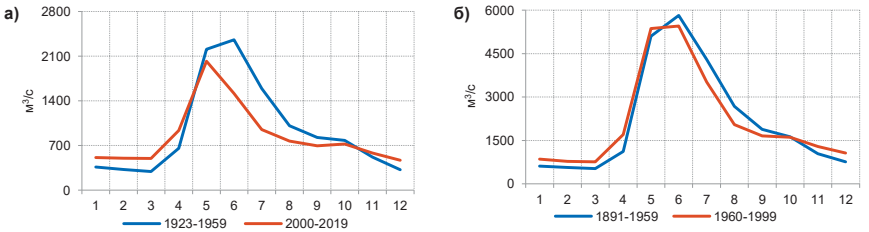


Рис. 4. Гидрографы стока р. Иртыш за многолетние периоды: (а) р. Иртыш – г. Омск, (б) р. Иртыш – г. Тобольск

Максимальный и минимальный сток

На рис. 5 приведены графики, характеризующие многолетние изменения максимальных в году расходов воды рассматриваемых рек.

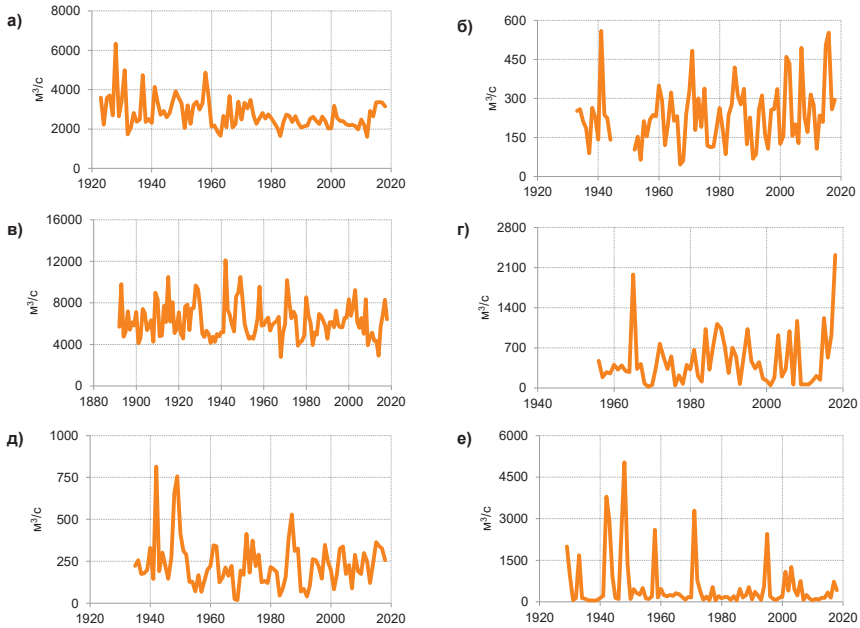


Рис. 5. Многолетние колебания максимальных в году расходов воды ($м^3/с$) р. Иртыш и его притоков: а) р. Иртыш – г.Омск, б) р. Тара – с. Муромцево, в) р. Иртыш – г. Тобольск, г) р. Ишим – г. Ишим, д) р. Омь – г. Калачинск, е) р. Тобол – г. Курган

Четко прослеживается уменьшение максимального стока р. Иртыш у г.Омск с 1960 г. под воздействием Верхне-Иртышского каскада водохранилищ, однако уже у г. Тобольск статистически значимого его снижения не обнаруживается. Влияние водохранилищ сказывается и на максимальном стоке р. Тобол, где в последние десятилетия он был меньше, чем в период до 1970-х гг. Тенденция увеличения максимальных расходов воды характерна для р. Тара с естественным водным режимом, а также для р. Ишим, где в 2017 г. наблюдался исторический максимум. По всей видимости, объемов регулирующих емкостей водохранилищ, расположенных в его бассейне, недостаточно для срезки максимальных расходов.

Наименьшие в году минимальные расходы воды в бассейне Иртыша наблюдаются в зимний сезон. На всех рассматриваемых реках происходит статистически значимое их увеличение (рис. 6). Если на реках Омь и Тара рост минимального зимнего стока обусловлен влиянием климатических факторов, то на осталь-

ных реках следует говорить о совместном воздействии естественных и антропогенных, прежде всего регулирования стока. Оценка вклада каждого из них является предметом специальных исследований.

Заключение

Особенностью многолетних колебаний водных ресурсов Иртыша и его основных притоков является наличие многоводных и маловодных фаз, длительность которых может достигать нескольких десятилетий. Доминирующим фактором, определяющим многолетнюю динамику годового стока рек российской части бассейна, являются естественные межгодовые и внутривековые колебания увлажненности территории.

На фоне естественной климатической изменчивости в последние десятилетия наблюдается тенденция повышения приземной температуры воздуха [1; 8]. Потепление в зимне-весенний период является причиной статистически значимого увеличения стока в холодный период года на реках с ненарушенным влиянием хозяйственной деятельности водным режимом, в том числе и минимальных расходов воды [9].

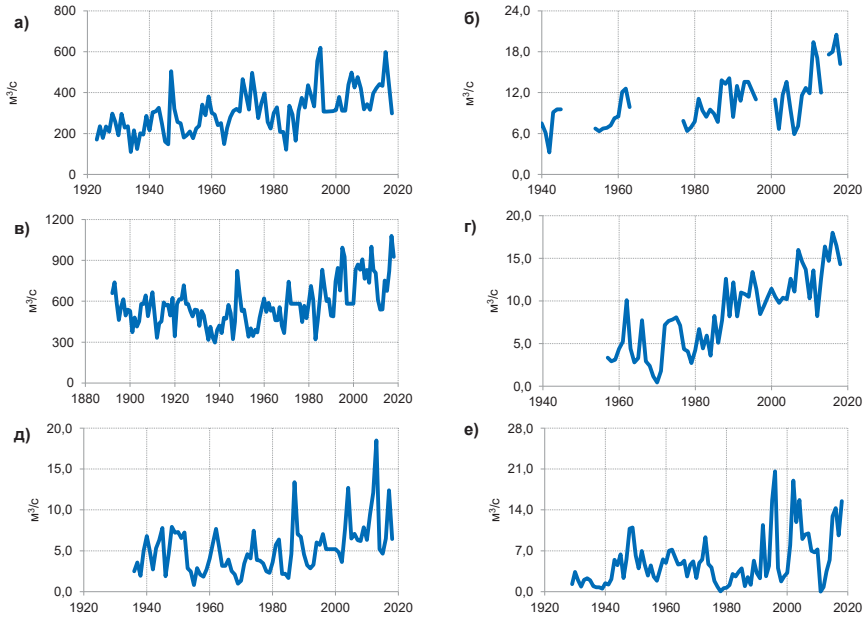


Рис. 6. Многолетние колебания минимальных расходов воды в зимний период ($м^3/с$) р. Иртыш и его притоков: а) р. Иртыш – г. Омск, б) р. Тара – с. Муромцево, в) р. Иртыш – г. Тобольск, г) р. Ишим – г. Ишим, д) р. Омь – г. Калачинск, е) р. Тобол – г. Курган

Наряду с климатическими факторами, на водный режим р. Иртыш и его основных притоков оказывают влияние антропогенные факторы, основными из которых являются регулирование стока водохранилищами, а также внутри и межбассейновые переброски стока. В зависимости от соотношения климатической и антропогенной составляющих формирования стока, реакция водного режима р. Иртыш и его притоков на их совместное воздействие может существенно отличаться, что необходимо учитывать при планировании проведения водохозяйственных мероприятий.

Список литературы

1. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2018 год. М. : 2019. 97 с.

2. *Винокуров Ю. И., Красноярова Б. А.* Трансграничный бассейн реки Иртыш в условиях современных вызовов : труды III Всероссийской научной конференции с международным участием (в четырех томах). 2017. С. 3–12.

3. *Винокуров Ю. И., Красноярова Б. А.* Диагностический анализ состояния, проблемы и перспективы водопользования в трансграничном бассейне реки Иртыш // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2016. № 4. С. 47–61.

4. *Бейсембаева М. А., Дубровская Л. И.* Оценка многолетней динамики водного стока Верхнего Иртыша в целях устойчивого водопользования // Вестник Томского государственного университета. 2014. № 379. С. 189–195.

5. Ресурсы поверхностных и подземных вод, их использование и качество (ежегодное издание) // Водный кадастр Российской Федерации. 1982–2015.

6. *Абдрахимов Р. Г., Джаксыкельдинов А. А.* Сток в верхнем течении реки Ертис (Иртыш) // Гидрометеорология и экология. 2013. № 4. С. 61–67.

7. *Бешкурцева Т. М.* Трансформация водного режима рек Тобол и Ишим в условиях антропогенного воздействия // Вестник Тюменского государственного университета. 2010. № 7. С. 130–137.

8. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствий на территории Российской Федерации. М. : Планета, 2014. 58 с.

9. Научно-прикладной справочник: Многолетние колебания и изменчивость водных ресурсов и основных характеристик стока рек Российской Федерации / под ред. В. Ю. Георгиевского. СПб. : РИАЛ, 2021. URL: http://hydrology.ru/ru/izdaniya_ggi_New (дата обращения: 20.09.2021).

УДК 556.5

Расчет распространения загрязняющих веществ в гидрографической сети водосбора и русле р. Невы (сценарий аварии на полигоне токсичных отходов)

М. В. Шмакова (m-shmakova@yandex.ru), С. А. Кондратьев (3718470@gmail.com)
ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН, Санкт-Петербург

Аннотация. Приведены результаты численного моделирования по оценке траекторий распространения в акватории Невы вод наиболее загрязненного притока реки Ижоры. Для математического описания процесса массопереноса в русле Невы использована сопряженная математическая модель движения воды, транспорта наносов и растворенных примесей в открытом русле IL_MTRiver, разработанная в Институте озероведения РАН.

Ключевые слова: Нева, Ижора, приток, распространение примеси, математическое моделирование.

Введение

Река Нева – источник питьевого водоснабжения Санкт-Петербурга. Забор воды осуществляется на нескольких водопроводных станциях, расположенных в черте города. Основная масса невских вод поступает из Ладожского озера и, как правило, соответствует требованиям водозабора. Однако, несмотря на небольшую протяженность, Нева имеет несколько притоков со значительно худшими показателями качества воды по сравнению с ладожской водой, которые расположены выше водозаборов. Это реки Черная, Мга, Тосна, Ижора и Славянка. На водосборах этих рек расположено большое количество промышленных, сельскохозяйственных и муниципальных предприятий с высоким риском возникновения нештатных экстремальных ситуаций, последствия которых могут негативно сказаться на качестве воды в городских водозаборах. В этой связи высокую актуальность приобретает проблема оценки возможного попадания загрязнений в городские водозаборы.

Целью настоящего исследования является выявление особенностей и закономерностей распространения вод притоков в акватории Невы методами математического моделирования.

Объект моделирования

В качестве основного объекта исследования выбрана р. Ижора – наиболее загрязненный приток Невы, расположенный выше водозаборов Санкт-Петербурга. Река берет начало на Ижорской возвышенности из родника у д. Скворицы и впадает в Неву с левого берега в 34 км от ее устья. Длина реки составляет 76 км, площадь водосбора около 1000 км^2. Среднемноголетний расход воды составляет 8,47 м^3/с. Значительную площадь водосбора занимают сельсохозяйственные угодья и пойменные луга. Естественная растительность носит вторичный характер, естественных лесов практически нет. На берегах р. Ижоры расположены следующие населенные пункты: Скворицы, Мута-Кюля, Петрово, Алапурская, Ивановка, Юля-Пурская, Покизен-Пурская, Пудость, Мыза-Ивановка, Кямяря, Вайлово, Малое Верево, Романовка, Горки, Руссолово, Веккелево, Шаглино, Бор,

Киволово, Лукаши, Вярлево, Кобралово, Антелево, Вяхтелево, Коммунар, Заречное, Аннолово, Войскорово, Пионер, Ям-Ижора, поселок Тельмана, Колпино, Металлострой и Усть-Ижора. В Скворицах разводят крупный рогатый скот, в Пудости расположена птицефабрика. Кроме того, на водосборе р. Ижоры находятся одно из старейших промышленных предприятий России – Ижорские заводы, а также производственные фирмы ТехноБалт, Бахус, Илком, Энергобумпром, Петролес, бумажная фабрика Коммунар, картонно-полиграфический комбинат, фабрика нетканых материалов и многие другие промышленные предприятия. В нижнем течении река принимает сток с полигона обезвреживания и захоронения токсичных отходов Красный Бор. В настоящее время вода реки непригодна для купания, питья и рыбной ловли. При этом ниже по течению от места впадения Ижоры расположено несколько водозаборов ГУП Водоканал СПб.

Методы и модели

Как показано в работе [5], при незначительных концентрациях твердого вещества в потоке для его описания могут быть использованы несопряженные модели, предполагающие невзаимосвязанный расчет водного потока и транспорта наносов. Подобные модели достаточно широко используются при решении широкого круга инженерных задач. Это относительно простые в практической реализации системы гидродинамических моделей и эмпирических формул. Однако область применения таких моделей ограничена низкой концентрацией твердого вещества в потоке. Сопряженные модели учитывают гидравлическую связь потока воды и твердого вещества. Численные схемы реализации этих моделей более устойчивы [3–5] и могут использовать больший шаг по времени в отличии от несопряженных моделей. При этом сопряженные модели обеспечивают решение более широкого диапазона инженерных задач [5]. В настоящем исследовании использована сопряженная математическая модель движения воды, транспорта наносов и растворенных примесей в открытом русле IL_MTRiver – Institute of Limnology model of Mass Transport in River (Свидетельство о государственной регистрации 2016612803 от 10.03.2016), разработанная в Институте озероведения РАН [1]. Модель основана на математическом представлении сил, действующих в системе «водный поток – донные отложения – наносы» [1].

Переменными состояния модели IL_MTRiver являются средние скорость и глубина потока, скорость движения и количество (масса) частиц, концентрация растворенного вещества в воде. Параметры модели – коэффициент внутреннего трения, параметр сцепления грунта при сдвиге, гидравлическая крупность частиц, коэффициент турбулентной диффузии в потоке.

Особенности настоящей модели заключаются в следующем:

1. В модели реализован взаимосвязанный расчет переменных состояния водного потока и потока твердого вещества. Единая система расчета движения воды и взвешенных частиц с физически обоснованной аппроксимацией процесса позволяет проследить перемещение взвешенного вещества по длине русла и оце-

нить скорость осаждения частиц в случае уменьшения транспортирующего потенциала потока в соответствии со своей гидравлической крупностью и исходной скоростью перемещения.

2. Взаимодействие движущегося потока и подстилающей поверхности в модели представлено физически обоснованными параметрами – коэффициентом внутреннего трения грунта и параметром сцепления грунта при сдвиге.

К числу задач, которые могут быть решены с помощью предложенной модели можно отнести:

– оценка переменных состояния потока (глубины потока, скорости движения воды, количества наносов и скорости их движения (т. е. расхода наносов);

– расчет вертикальных деформаций русла (перемещение и осаждение/взмыв твердого вещества в потоке);

– распространение растворенных примесей в речном потоке, поступающих от различных точечных и рассредоточенных источников загрязнения;

– расчет траекторий движения примесей и условий их попадания в важные с инженерной точки зрения места, например, в водозаборы;

– выполнение имитационных расчетов по выбору оптимального расположения инженерных сооружений в русле реки

На основе численной реализации модели IL_MTRiver были проведены расчеты гидравлических переменных состояния речного потока для 60-километрового участка р. Невы (от крепости Орешек до Большеохтинского моста). Всего на этом участке было намечено 24 гидрометрических створа, в которых через 10 м были проведены промеры глубин. Данные о расходе воды были получены по кривой $Q = f(H)$ для створа р. Нева – д. Новосаратовка на время поведения гидрометрических работ. Глубина для начальных и граничных условий в расчетных створах вычислялась интерполяцией между двумя соседними гидрометрическими створами, на которых проводились измерения. Аналогично была получена и площадь поперечного сечения, необходимая для расчета скорости воды при задании начальных и граничных условий.

При численной реализации модели размер ячеек криволинейной расчетной сетки составлял по продольной ординате – 200 м, по ширине – около 33 м, глубине – около 2 м, шаг по времени – 2 с. Примерно через 300 расчетных шагов по времени модель выходит на стационарный режим расчета. Модель адекватно описывает гидродинамическую ситуацию на расчетном участке реки в условиях неравномерного установившегося движения потока. Критерий Нэша – Сатклиффа NSE составил 92 %.

Расчеты переноса примеси в р. Неве выполнялись при среднем многолетнем значении расхода воды (2500 м^3/с), а также при его экстремальных значениях 1000 и 4000 м^3/с. Для расчета транспорта и переотложения наносов в русле р. Невы принимался средний по величине размер русловых фракций (0,33 мм). Концентрация растворенной консервативной примеси при впадении р. Ижоры в Неву принималась равной единице, что позволяет провести последующий пересчет результатов моделирования на любое конкретное значение концентрации. Фоновое значение концентрации примеси в р. Неве принималось равным нулю.

Результаты расчетов представлены на рисунке. Нетрудно видеть, что модель адекватно оценивает вдольбереговой распространение примеси при отсутствии перемешивания по сечению основного потока.

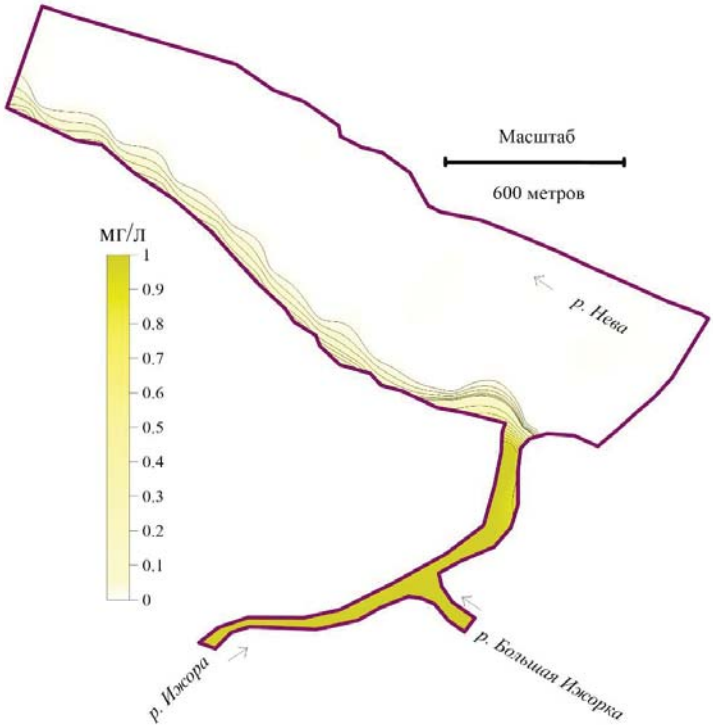


Рис. Результаты расчета распространения примеси, поступившей в Неву со стоком Ижоры

Результаты

Полученные результаты хорошо согласуются с проведенными экспериментальными исследованиями [2]. В результате моделирования показано, что в межень через 4–5 ч после поступления примеси в основное русло у ближайшего водозабора будет иметь место примерно семикратное разбавление вод Ижоры. Попадание растворенной примеси в конкретный водозабор будет определяться его конструкцией и расположением в акватории. В результате расчетов распространения твердых частиц-адсорбентов размера 0,1 мм с соответствующей гидравлической крупностью (8 мм/с), получено, что поступившие со стоком притока наносы не достигнут первого по пути следования оголовка водозабора и осядут приблизительно в 0,5 км от устья Ижоры.

Заключение

Результаты моделирования показали вдольбереговое распространение возможных загрязнений, поступающих в русло Невы со стоком боковых притоков и минимальные значения перемешивания в поперечном сечении. В дальнейшем разработанная в Институте озероведения РАН модель IL_MTRiver [1] может быть использована для решения задач оценки возможного загрязнения невской воды в районе городских водозаборов и прогноза последствий возникновения аварийных ситуаций, связанных со сбросом загрязненных стоков, на близлежащих предприятиях, в том числе и на полигоне Красный Бор.

Работа выполнена при финансовом обеспечении за счет средств федерального бюджета в рамках темы № 0154-2019-0001 «Комплексная оценка динамики экосистем Ладожского озера и водоемов его бассейна под воздействием природных и антропогенных факторов».

Список литературы

1. *Кондратьев С. А., Шмакова М. В.* Математическое моделирование массопереноса в системе водосбор – водоток – водоем. СПб. : Нестор-История, 2019. 246 с.

2. Экспериментальные и модельные исследования распространения вод реки Ижоры в русле реки Невы / С. А. Кондратьев, М. В. Шмакова, Н. В. Игнатьева, Е. В. Иванова, В. В. Гузиватый // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2020. Т. 13, № 3. С. 83–92.

3. *Cao Z., Day R., Egashira S.* Coupled and decoupled numerical modeling of flow and morphological evolution in alluvial rivers // J. Hydraulic Eng., ASCE. 2002. 128(3). P. 306–321.

4. *Saiedi S.* Coupled modeling of alluvial flows // J. Hydraulic Eng. ASCE. 1997. N 123(5). P. 440–446.

5. *Wu W.* Computational River Dynamics. CRC Press. 2007. 509 p.

Секция

ПОГОДА И КЛИМАТ. МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ

УДК 551.50(571.53)

Изменения дат начала и окончания климатических сезонов года на примере отдельных станций Иркутской области

Д. А. Антипова (dari.antipova11@yandex.ru), Е. А Кочугова (kochugovae@mail.ru)
Иркутский государственный университет, Иркутск

Аннотация. На примере метеорологических станций Иркутск обс. и Братск рассмотрены изменения дат устойчивого перехода температуры воздуха через 0 и 10 °С. Проведено сравнение дат наступления климатических сезонов в период 1950–2019 гг. с материалами климатического справочника. Проанализировано изменение продолжительности сезонов года.

Ключевые слова: климатические сезоны, даты перехода через различные пределы, среднесуточная температура.

Календарные сезоны года не совпадают с естественными фазами природных климатических циклов. Границы, разделяющие год на четыре равных по длительности сезона, не отражают естественную изменчивость климата. Очевидно, что продолжительность сезонов года в различных физико-географических условиях неодинакова. Она определяется широтой и высотой места над уровнем моря, степенью континентальности климата, особенностями атмосферных процессов, изменчивостью температурного режима и пр.

На фоне меняющегося климата происходят сдвиги дат начала и конца сезонов, которые способны оказать влияние на отдельные сферы деятельности человека, в том числе сельское хозяйство, экономику. Например, изменение даты перехода среднесуточной температуры через 8 °С, приведет к изменению продолжительности отопительного периода, а значит повлияет на увеличение или сокращение расходов на тепло. Вариации временных границ дат перехода через 10 °С неизбежно найдет отражение в изменении тепловых условий вегетационного периода, определяющих величину урожайности и валовый сбор сельскохозяйственных культур, пастбищной растительности и т. д.

В этой связи особый интерес вызывают изменения продолжительности климатических сезонов года в регионе проживания – Иркутской области. Для достижения цели были сформулированы и успешно решены следующие задачи:

1. Изучить методики расчета дат устойчивого перехода температуры воздуха через различные пределы.

2. Составить каталог дат устойчивого перехода средних суточных температур через определенные границы (0, 10 °С).

3. Оценить динамику продолжительности естественных климатических сезонов на отдельных метеорологических станциях Иркутской области.

4. Сравнить полученные результаты дат начала и конца климатических сезонов года с материалами климатического справочника.

В качестве исходного материала для выполнения работы были взяты данные метеорологических наблюдений за температурой воздуха суточного разрешения на двух станциях Иркутск обс. и Братск за период с 1950 по 2019 г., размещенные в открытом доступе на сайте http://aisori-m.meteo.ru/waisori/select.xhtml.

Под естественным климатическим сезоном года понимается обособленный период годового цикла, характеризующийся однотипностью климатообразующих процессов и явлений, и определенным термическим режимом [7]. Климатические границы сезонов не совпадают с календарными границами месяцев [6]. Зафиксировать конкретной датой конец данного сезона и начало последующего невозможно. Обычно под ними понимают некоторый промежуток времени, порядка нескольких дней, в течение которых происходит резкое изменение атмосферных процессов, радиационного режима, физических свойств подстилающей поверхности и условий погоды [5].

Как правило, для определения естественных климатических сезонов используются следующие параметры: среднемесячная температура воздуха, средние температуры холодных и теплых периодов, а также даты устойчивого перехода температуры через 0 и 10 °С [1]. К настоящему времени разработано несколько методик для определения дат начала и конца климатических сезонов года. Например, методика, предложенная А. Д. Педем, согласно которой, за дату устойчивого перехода температуры воздуха через определенные пределы принимается тот день, после которого обратного перехода не наблюдается [4]. В агрометеорологии известна методика А. В. Федорова, по которой дату устойчивого перехода температуры через тот или иной предел определяют путем сопоставления положительных и отрицательных отклонений сумм средних суточных температуру от того или иного предела.

В данной статье устойчивым считался переход, при котором среднесуточная температура воздуха в течение 5 дней была ниже или выше заданных значений. Дата начала следующего сезона наступает на 5-й день этого перехода [2]. Используя эту методику, мы проанализировали многолетнюю динамику колебаний дат перехода через заданные температурные границы, определяющие начало и конец климатических сезонов. Рассмотрим их более подробно.

Под зимним сезоном понимают переход среднесуточной температуры воздуха ниже 0 °С. На территории Иркутской области он длится около 6 месяцев. На большей части территории продолжительность зимы составляет 180–190 дней, на севере этот период увеличивается до 195–200 дней.

В Братске, как правило, зима начинается рано – 12 октября [1]. Однако в отдельные годы эта дата может значительно смещаться. Например, почти на две недели раньше средней многолетней, среднесуточные температуры опустились

ниже нуля в 1982 г. (30 сентября) и почти на 1,5 месяца позднее установились на следующий год (22 ноября 1983 г.) (табл. 1). В Иркутске устойчивые отрицательные температуры воздуха устанавливаются 16 октября, испытывая значительные колебания, от 2 октября до 16 ноября.

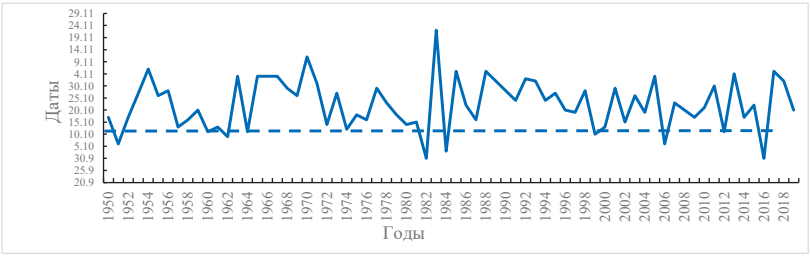
Анализируя динамику даты наступления зимы (рис. 1), можно видеть, что ее начало стало смещаться на более поздние даты. Конец зимнего сезона наблюдается практически в те же даты (вторая декада апреля), что указаны в [1]. Отклонение от средней многолетней даты не превысило 4 дней (см. табл. 1).

Таблица 1

Средние и крайние даты начала и конца климатических сезонов на метеорологических станциях Иркутск обс. и Братск

Даты	Начало сезона				Конец сезона			
	зима	весна	лето	осень	зима	весна	лето	осень
Станция Братск								
Средняя (за период 1950–2019 г.)	3.11	21.04	18.05	4.09	20.04	17.05	3.09	2.11
Ранняя (за период 1950–2019 г.)	30.09	20.03	10.05	23.08	19.03	10.05	22.08	29.09
Поздняя (за период 1950–2019 г.)	22.11	5.05	14.06	26.09	4.05	13.06	25.09	21.11
Средняя по справочнику [1]	12.10	18.04	26.05	7.09	19.04	25.05	6.09	11.10
Станция Иркутск обс.								
Средняя (за период 1950–2019 г.)	18.10	17.04	18.05	18.09	16.04	21.05	14.09	17.10
Ранняя (за период 1950–2019 г.)	2.10	18.03	3.05	29.08	24.03	12.05	28.08	1.10
Поздняя (за период 1950–2019 г.)	16.11	26.04	10.06	30.09	26.04	9.06	29.09	15.11
Средняя по справочнику [1]	16.10	13.04	24.05	7.09	12.04	23.05	6.09	16.10

а



б

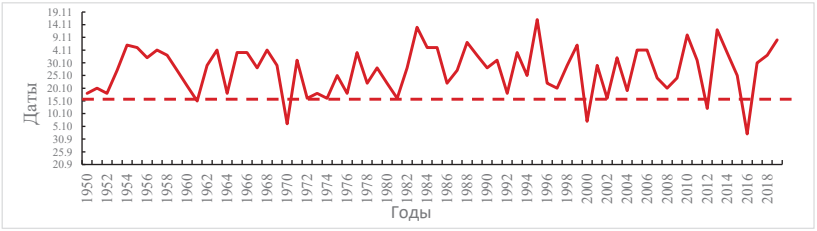
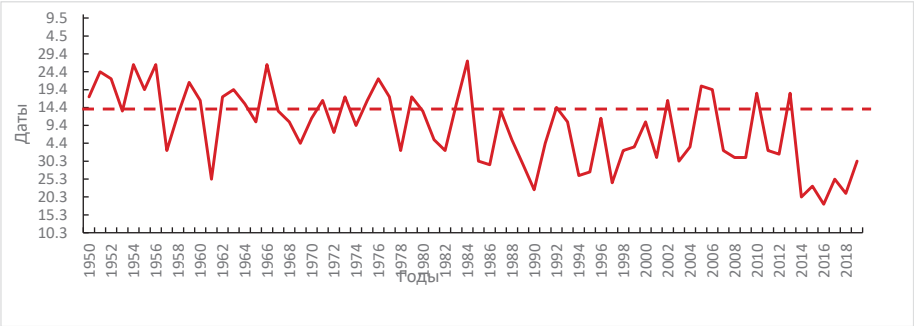


Рис. 1. Даты наступления зимы на ст. Братск (а) и Иркутск обс. (б). Пунктирной линией отмечена дата начала зимнего сезона по справочнику [1]

Весна начинается в конце апреля. За ее начало на территории исследования принято считать дату устойчивого перехода среднесуточной температуры воздуха через 0 °С. Продолжительность весеннего сезона в Иркутской области обычно не превышает 40–50 дней.

В среднем весенний сезон на территории Братска по материалам [1] начинается 18 апреля, испытывая значительные колебания от самой ранней, наблюдавшейся в 2014 г. 20 марта, до поздней даты, зафиксированной – 5 мая 1979 г. (см. табл. 1). Окончание весеннего сезона наблюдается в последней декаде мая или первой декаде июня. На рис. 2 хорошо выражено смещение даты наступления весны в Братске на более ранние сроки. Аналогичная динамика характерна для метеорологической станции Иркутск.

а



б

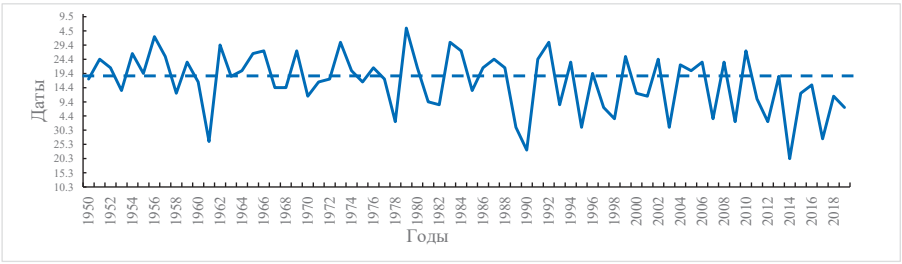


Рис. 2. Даты наступления весны на ст. Братск (а) и Иркутск обс. (б). Пунктирной линией отмечена дата начала весеннего сезона по справочнику [1]

Лето на территории Иркутской области короткое, но может быть очень жарким. Начинается оно в последних числах мая и за его начало принято считать период, в течение которого среднесуточная температура воздуха равна 10 °С и выше, до перехода ее через 10 °С в сторону понижения. Продолжительность летнего сезона на территории Иркутской области в среднем около 3 месяцев. В отдельные годы устойчивый переход через указанный температурный предел может наблюдаться уже в первых числах мая, а иногда задерживается до середины июня. Анализ рис. 3 позволил выделить следующую особенность динамики даты

начала летнего сезона: более позднее его наступление в Братске и смещение на более ранние сроки в Иркутске. Последнее особенно ярко проявляется после 2006 г.

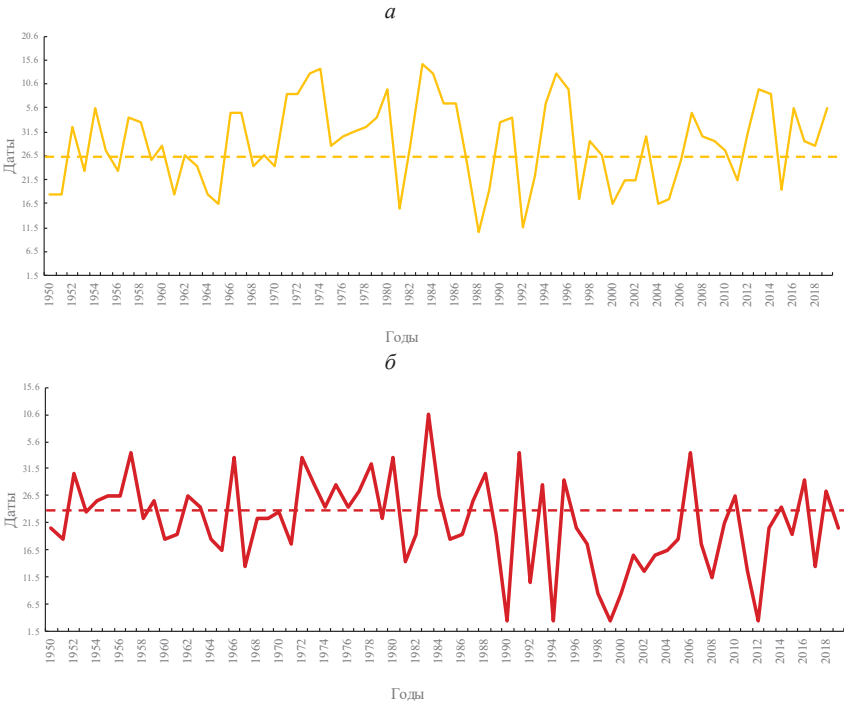


Рис. 3. Даты наступления лета на ст. Братск (а) и Иркутск обс. (б). Пунктирной линией отмечена дата начала летнего сезона по справочнику [1]

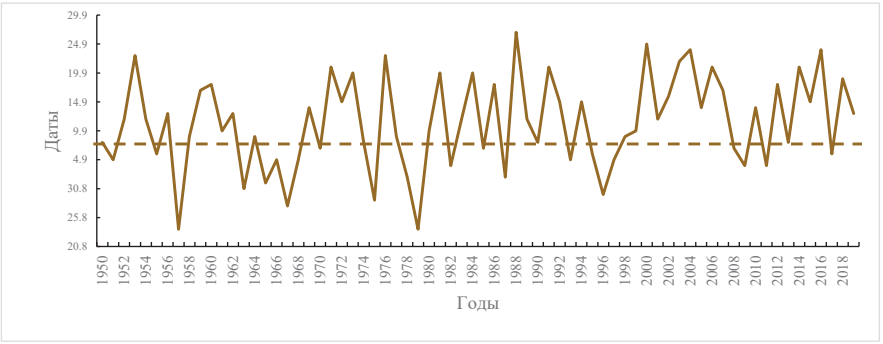
Осень характеризуется резкими суточными колебаниями температур и ранними заморозками [3]. Глубокой осенью начинает формироваться азиатский антициклон, устанавливается ясная и морозная погода [8]. За осенний сезон принимается период от перехода среднесуточной температуры воздуха через 10 °С и до устойчивого ее понижения до 0 °С. Осень в среднем в Иркутской области продолжается 30–40 дней.

На станции Братск средняя по справочнику дата наступления осеннего сезона – 7 сентября. Наиболее раннее наступление осени наблюдалось – 23 августа 1979 г., а позднее – 26 сентября 1988 г. (см. табл. 1). Судя по динамике (рис. 4), на станции Братск дата наступления осеннего сезона сместилась на конец сентября, что значительно позднее средней многолетней даты. Начиная с 1983 г., понижение температуры ниже 0 °С отмечалось на 8–12 дней позднее нормы. В

Иркутске поздняя осень стала наблюдаться значительно раньше. Ранее наступление этого переходного сезона наблюдалось только до 1968 г.Изменение дат начала и конца климатических сезонов привело к изменению их продолжительности. На рис. 5 и 6 изображены круговые диаграммы, соответствующие продолжительности сезонов в разные годы: 1950, 1990 и 2019. Общие тенденции на станциях наблюдаются в переходные сезоны, где в целом их продолжительность растет. Летний сезон характеризуется разнонаправленной тенденцией. Так, в Братске продолжительность лета сокращается: от 112 дней в 1950 г. до 98 дней в 2019 г., а в Иркутске, наоборот, она растет.

Продолжительность зимнего периода в Братске варьирует от 160 до 183 дней. Зима короче в Иркутске, ее длительность изменяется от 142 до 182 дней. В 2019 г. зима была самой короткой, по сравнению с другими рассматриваемыми временными интервалами.

а



б

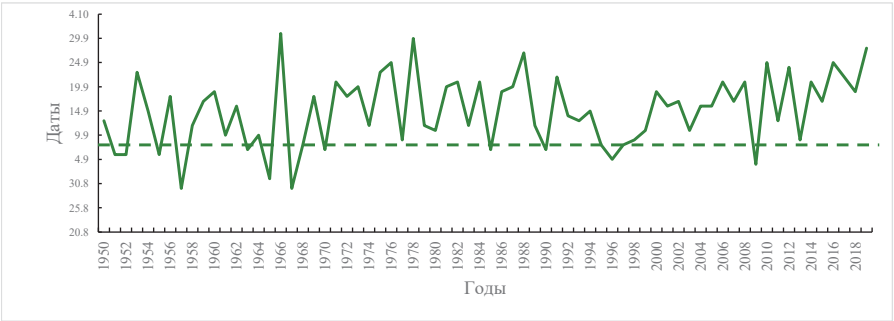


Рис. 4. Даты наступления осени на ст. Братск (а) и Иркутск обс. (б). Пунктирной линией отмечена дата начала осеннего сезона по справочнику [1]

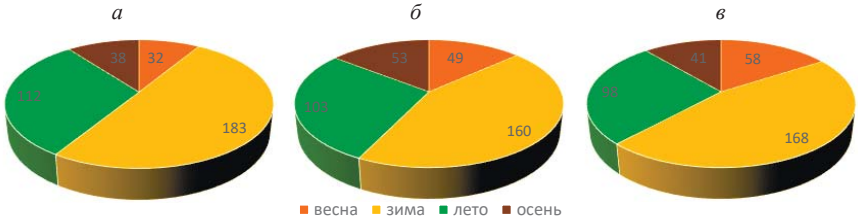


Рис. 5. Продолжительность сезонов года (дни) в 1950 (а), 1990 (б) и 2019 г. (в) на ст. Братск

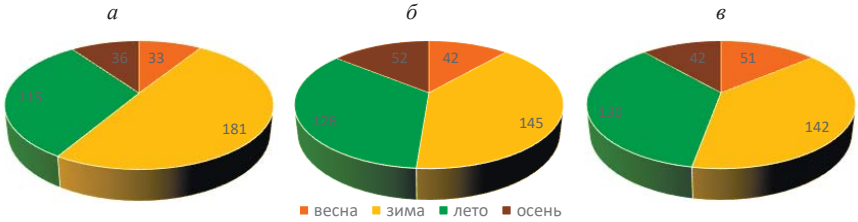


Рис. 6. Продолжительность сезонов года (дни) в 1950 (а), 1990 (б) и 2019 г. (в) на ст. Иркутск обс.

Таким образом, длительность климатических сезонов в различных физико-географических условиях неодинакова. В отдельные годы даты устойчивого перехода средней суточной температуры воздуха через определенные пределы могут значительно отклоняться от средних дат. Наиболее значительные изменения характерны для переходных сезонов года, что увеличивает степень риска для сельского хозяйства, оказывая влияние на сроки посадки и уборки урожая.

Список литературы

1. Агроклиматический справочник по Иркутской области. Л. : Гидрометеоиздат, 1962. 160 с.

2. Исследование климатических сезонов года и их влияние на живые компоненты болотного биогеоценоза (на примере олиготрофного болота подтаежной подзоны западносибирской равнины) / И. В. Курьина, Л. Б. Филандышева, У. А. Бокова (Булатона), Е. С. Сатьян, Н. В. Климова // Вестник Томского государственного университета. 2013. Вып. 376. С. 182–191.

3. Климатическая характеристика сезонов года. URL: https://pogoda51.ru/klimaticheskaya-kharakteristika-sezonov-goda (дата обращения: 17.03.2021).

4. Климат России / Н. В. Кобышева [и др.]. СПб. : Гидрометеоиздат, 2001. 654 с.

5. *Садоков В. П., Козельцева В. Ф., Кузнецова Н. Н.* Особенности дат устойчивого перехода температуры воздуха через + 5 и 0 °С осенью на европейской территории России и юго-западной части Западной Сибири // Труды Гидрометцентра России. 2013. Вып. 350. С. 193–202.

6. *Гурьянов Д. А.* Статистический анализ продолжительности сезонов года в Санкт-Петербурге // Известия РГПУ им. А. И. Герцена. 2013. № 163. С. 107–113.

7. *Педь Д. А.* Об определении дат устойчивого перехода температуры воздуха через определенные значения // Метеорология и гидрология. 1951. Вып. 10. С. 38–39.

8. *Ширяева А. В., Ширяев М. В., Семенов В. А.* Изменение продолжительности устойчивых теплого и холодного сезонов на территории России в начале XXI века // Доклады академии наук. 2018. Вып. 173, Т. 481. С. 207–210.

УДК 551.510.42

Оценка влияния океанической модели ROMS на прогноз метеополей в атмосферной модели WRF-ARW при сопряженном моделировании

Н. Ю. Бутаков (nikita.butakov.2019@mail.ru)[1,2]

[1]*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр РФ, Москва*
[2]*Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва*

Аннотация. Представлены оценки возмущений в полях приземной температуры и скорости приземного ветра, вызванные моделью океана в совместной модели атмосфера-океан для акватории Белого моря. Доказано возможность существенного влияния модели океана на прогноз приземной температуры и скорости приземного ветра над водной поверхностью.

Ключевые слова: совместная модель, Белое море, океан, атмосфера, WRF-ARW, ROMS.

Введение

Известно, что между атмосферой и океаном происходит непрерывный обмен энергией. Но в имеющихся моделях атмосферы влияние океана на атмосферу описано в очень упрощенном виде, а в некоторых и вовсе не учитывается. Поэтому возникает потребность в связывании атмосферных и океанических моделей для лучшего представления двусторонних связей в системе атмосфера-океан.

Цель данной работы: оценить влияние океанической модели на прогноз приземной температуры и скорости приземного ветра в модели атмосферы.

Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

1. Совмещение атмосферной модели WRF-ARW с океанической моделью ROMS.

2. Проведение численных экспериментов по оценке влияния океанической модели на прогноз метеополей в модели атмосферы.

1. Описание компонентов совместной модели и постановка экспериментов.

В качестве атмосферного компонента совместной модели была взята мезомасштабная модель WRF (Weather Research and Forecasting) с динамическим ядром ARW (Advanced Research WRF) [1]. Данная модель имеется в свободном доступе и обладает большим количеством пользователей по всему миру.

В качестве океанического компонента была выбрана региональная модель ROMS (The Regional Ocean Modeling System) [2]. ROMS так же, как и WRF, находится в свободном доступе и широко используется научным сообществом в самых разных задачах.

На данный момент разработано несколько программ для соединения различных моделей. В текущей работе использовался соединитель MCT (The Model Coupling Toolkit) [3].

Моделирование проводилось для региона, включающего в себя Белое море. Сетка океанической модели полностью покрывает собой акваторию Белого моря.

На рис. 1 представлена сетка модели ROMS в расчетной области WRF.

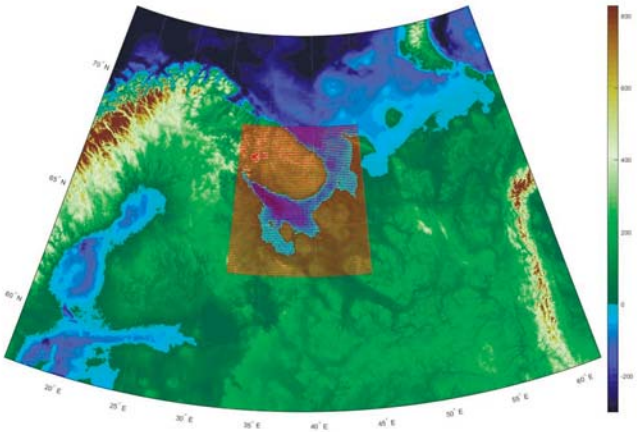


Рис. 1. Сетка ROMS в расчетной области WRF

Конфигурации сеток компонентов совместной модели представлены в табл. 1.

Таблица 1

Конфигурации сеток

	WRF-ARW	ROMS
Шаг сетки	21 000 м	0,15° – по долготе 0,09° – по широте
Количество узлов	84×81	86×84

В первом случае моделирование проводилось при помощи модели WRF-ARW отдельно от ROMS (далее автономное моделирование), во втором случае моделирование проводилось в связке с моделью ROMS (далее сопряженное моделирование). В случае сопряженного моделирования в модели ROMS было задано поле температуры океана на 16 уровнях модели таким образом, что температура воды на верхнем уровне модели составляет 10 °С и уменьшается с каждым уровнем вниз на 0,5 °С. В WRF модели также была задана температура поверхности моря равная 10 °С как в случае автономного моделирования, так и в случае сопряженного. Но, если в случае автономного моделирования температура поверхности моря постоянна, то в случае сопряженного моделирования температура поверхности моря рассчитывается в модели ROMS и передается в WRF с интервалом в 30 мин.

Оценивалось влияние океанической модели на поля приземной температуры и скорости приземного ветра в WRF модели над акваторией Белого моря.

Период моделирования 01.06.2016–03.06.2016 (48 ч).

Результаты

Приземная температура воздуха. На рис. 2. Представлено пространственное распределение разницы приземных температур между результатами автономного и сопряженного моделирования за 03.06.2016 00 UTC. Таким образом, положительные значения свидетельствуют о том, что приземная температура при автономном моделировании была больше, чем при сопряженном.

Различия в приземной температуре наблюдаются в основном над акваторией Белого моря, чего и следовало ожидать, а также над водоемами поменьше (оз. Выгозеро и оз. Сегозерское), в которых также расположены узлы сетки модели ROMS. В целом использование океанической модели ROMS приводит к уменьшению приземной температуры над акваторией Белого моря. Причем уменьшение приземной температуры в некоторых районах Белого моря может достигать 4 °С.

Далее на рис. 2 приведен график временного хода средней для всей акватории Белого моря разницы между результатами автономного и сопряженного моделирования. При построении графика для оценок влияния модели ROMS на приземную температуру воздуха брались только те узлы сетки WRF, которые непосредственно находятся над акваторией Белого моря.

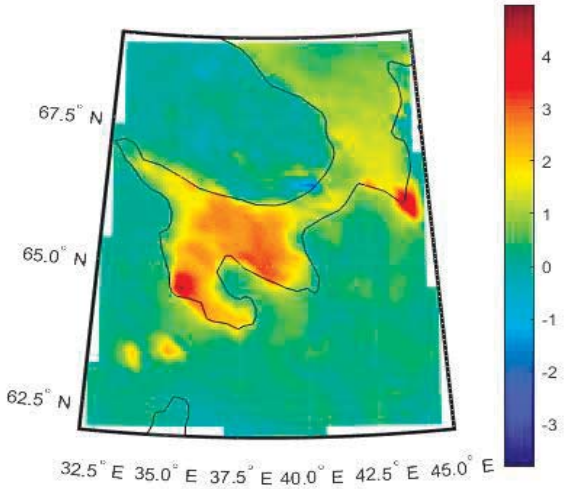


Рис. 2. Разница приземной температуры между автономным и сопряженным моделированием

Анализируя график, представленный на рис. 3, можно сделать вывод, что к концу периода моделирования приземная температура по результатам сопряженного моделирования меньше на 1,5 °С относительно результатов автономного моделирования в среднем по Белому морю.

Рис. 3. Временной ход разницы приземных температур

Скорость приземного ветра. На рис. 4 показаны возмущения в поле скорости приземного ветра, вызванные влиянием океанической модели при сопряженном моделировании за 03.06.2016 00 UTC.

Анализируя рис. 4, можно сделать вывод о том, что помимо приземной температуры океаническая модель оказывает существенное влияние и на прогноз скорости приземного ветра в модели WRF. Причем использование океанической модели в связке с WRF может приводить как к занижению скорости приземного ветра (красным), так и к завышению (синим) относительно автономного моделирования.

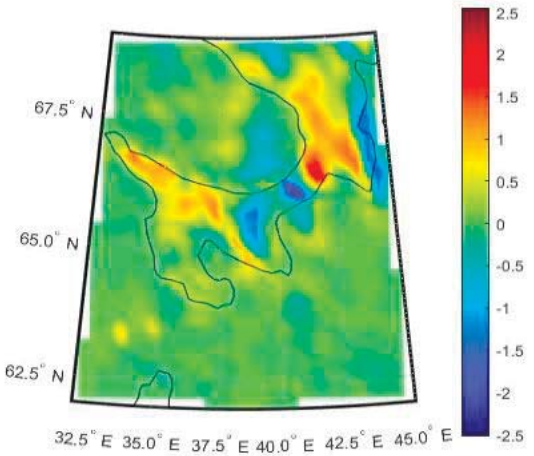


Рис. 4. Разница скорости приземного ветра между автономным и сопряженным моделированием

На рис. 5 представлен график временного хода средней для всей акватории Белого моря разницы между результатами автономного и сопряженного моделирования для скорости приземного ветра.

Рис. 5. Временной ход разницы скоростей приземного ветра

Анализируя график, представленный на рис. 5, можно сделать вывод о том, что использование океанической модели в связке с WRF-ARW приводит к уменьшению средней по акватории Белого моря скорости ветра. Причем это уменьшение может быть значительным (до 1,1 м/с).

Заключение

Влияние океанической модели ROMS в сопряженном моделировании с WRF приводит к перестройке всех рассмотренных в данной статье метеополей над акваторией Белого моря. Причем при определенных условиях влияние модели океана на прогноз метеополей может быть существенным.

Список литературы

1. Официальный сайт WRF модели. URL: https://www.mmm.ucar.edu/ (дата обращения: 25.10.2021).

2. Официальный сайт ROMS модели. URL: https://www.myroms.org/ (дата обращения: 25.10.2021).

3. Официальный сайт MCT соединителя. URL: https://www.mcs.anl.gov/research/projects/mct/ (дата обращения: 25.10.2021).

УДК 551.510.42

Особенности распределения соединений серы на территории Европы в начале XXI в.

Р. Д. Гизатуллин (gnrustam@gmail.com), А. В. Елисеев (eliseev.alexey.v@gmail.com)
Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань

Аннотация. Проведен анализ полей приземных концентраций содержания сернистого газа и сульфатов. Построенная ранее для региона Китая статистическая модель связи между концентрациями SO_2 и SO_4 обобщена и на другой регион значительного загрязнения соединениями атмосферы – Европу.

Ключевые слова: сернистый газ, диоксид серы, статистическая модель, физико-химические процессы цикла серы в атмосфере

Введение

Увеличение содержания сульфатных аэрозолей в тропосфере одна из причин глобальных климатических изменений. В связи с изменением содержания этих аэрозолей, в последние десятилетия замедляется потепление климата, могут произойти изменения характеристик углеродного цикла и обратной связи между климатом и углеродным циклом.

В атмосфере Земли существует ряд химически активных форм серы. Среди них наиболее распространен диоксид серы SO_2, который либо окисляется из его предшественников, таких как диметилсульфид (ДМС), сероводород H_2S и сероуглерод CS_2, либо образуется благодаря вулканической или антропогенной деятельности [3; 7; 8].

Дополнительный второстепенный источник SO_2 связан со сжиганием биомассы. Менее распространенными, но все же важными в глобальном цикле серы являются диметилсульфид, диметилсульфоксид (ДМСО) и метансульфоновая кислота (MSA). Все эти вещества химически взаимодействуют друг с другом и подвергаются влажному и сухому осаждению на поверхности Земли.

Все это побудило внедрить интерактивный цикл серы в глобальные климатические модели или, точнее, в модели системы Земли (МЗС, Earth system models), а также в ряд упрощенных в вычислительном отношении моделей Земной системы промежуточной сложности (МЗСПС).

Такие модели нуждаются в модулях для вычисления химического состава атмосферы. Например, из-за отсутствия интерактивного атмосферного цикла серы, МЗСПС пытаются моделировать изменения климата XX в. без учета радиационного воздействия тропосферных сульфатов. Это затрудняет оценку реалистичности моделей данного типа.

На сегодняшний день существует только две МЗСПС, которые реализовали радиационное воздействие сульфатов: ИФАРАН-МГУ (Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН – МГУ им. М. В. Ломоносова) [1] и Climber-2.0 [4].

Ранее при непосредственном участии автора работы была построена статистическая модель для связи приземных концентрации диоксида серы и сульфатов для региона Китая [2].

Целью данной работы является анализ полей указанных переменных для региона Европы и обобщение ранее построенной модели на этот регион.

1. Преобразования серы в атмосфере и ее основные источники выделения

Основные соединения серы в атмосфере – сернистый газ SO_2, диметилсульфид $(CH_3)_2S$ и сульфатные аэрозоли, содержащие сульфат-ион SO_4 (прежде всего – серная кислота H_2SO_4 и сульфат аммония $(NH_4)_2SO_4$).

Источником серы для атмосферы служат как естественные (выделения из вулканов, продукты жизнедеятельности морской биоты, наземные экосистемы), так и антропогенные процессы. Для антропогенных процессов наиболее значимо выделение сернистого газа SO_2.

Соединения серы в атмосфере участвуют в цепочках химических преобразований с образованием сернистого газа из диметилсульфида и сульфатных аэрозолей из сернистого газа. Сернистый газ также выводится из атмосферы преимущественно сухим оседанием, а сульфатные аэрозоли – влажным.

Соединения серы играют большую роль для климата и экологии. Наличие сульфатных аэрозолей в атмосфере приводит к развитию охлаждающего радиационно-возмущающего воздействия, частично компенсирующего нагрев из-за увеличения содержания парниковых газов. Это воздействие связано как с прямым рассеянием солнечной радиации сульфатами, так и с влиянием на радиационные характеристики облаков. Кроме того, соединения серы влияют на характеристики наземного углеродного цикла.

2. Географическое распределение содержания диоксида серы в Европейском регионе

По данным для географического распределения концентраций частиц SO_2 и SO_4, полученным по расчетам с моделью EMEP MSC-W за указанный выше период времени наибольшее среднее значение концентрации SO_2 на всей рассматриваемой территории отмечается в январе и составляет 1,4 мкг/м^3, наименьшее значение приходится на июль – 0,61 мкг/м^3 (рис. 1).

Пространственное распределение концентрации диоксида серы неравномерно, выделяются несколько максимумов – территория Исландии, Центральная Европа, южная часть Италии, запад Турции и Сирии, на территории России это – Свердловская и Челябинская области, значения в перечисленных районах достигают 15–20 мкг/м^3.

Причиной высоких значений концентрации над Исландией является, по-видимому, вулканическая деятельность – с 2000 по 2015 г. произошли четыре вулканических извержения. Максимальные значения q_{SO2} в годовом ходе отмечаются в октябре и достигают 35 мкг/м^3. Высокие значения концентрации двуокиси серы над Центральной Европой и югом Италии, где они достигают 15–20 мкг/м^3, связаны с выбросами от транспорта и металлургической промышленности. В северо-западной части Турции, где максимум q_{SO2} составляет 25 мкг/м^3, расположены два крупных государственных предприятия по производству черных металлов. Свердловская и Челябинская области в свою очередь являются одними из важнейших промышленных регионов России, в структуре промышленного комплекса которых доминируют черная и цветная металлургия, так что высокие значения концентрации SO_2 (20–30 мкг/м^3) отмечаются за все рассматриваемые месяцы.

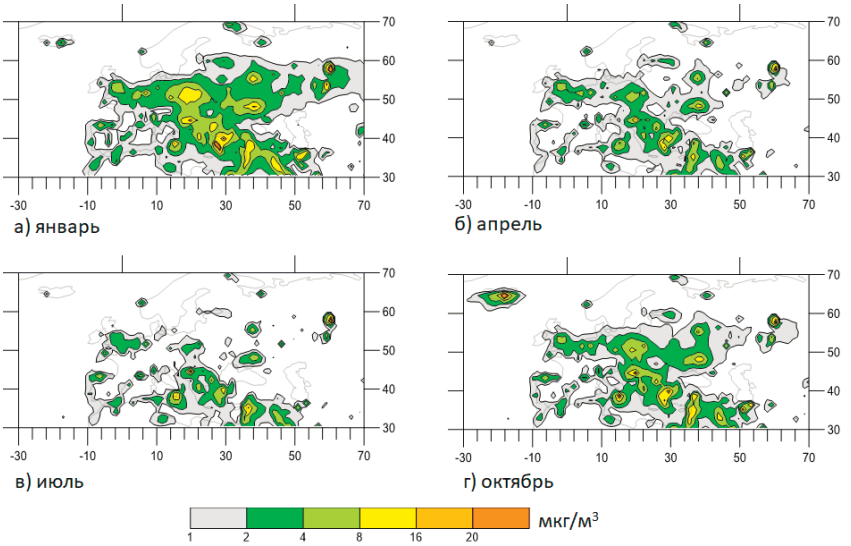


Рис. 1. Анализ глобального поля SO_2 по данным EMEP за 2000–2015 гг.

Минимальные значения концентрации отмечены над Скандинавским полуостровом. Исключением являются западное побережье Норвегии, где источниками выбросов сернистого газа являются заводы по производству алюминия и черная металлургия, а значения q_{SO2} достигают 5 мкг/м^3, а также территория вокруг Финского залива с приземными концентрациями порядка 2–3 мкг/м^3.

3. Географическое распределение содержания сульфатных аэрозолей в Европейском регионе

В среднем для указанного региона в годовом ходе концентрация SO_4 достигает максимума, равного 0,81 мкг/м^3, в январе, а минимум – в апреле (0,55 мкг/м^3) (рис. 2).

Максимальные концентрации сульфатов отмечаются в июле в районе юга Италии, прибрежной территории Турции и Сирии, где они достигают 10 мкг/м^3. Причиной высоких значений в районе острова Сицилии, по-видимому, являются вулканическая активность и загрязнения антропогенного характера. Западные регионы Турции и Сирии также имеют промышленные источники выделения серы. Было отмечено, что в январе распределение концентрации сульфатов в большей мере приходится на центральную и восточную Европу и европейскую территорию России, так как в холодный период характерно проявление атмосферных инверсий, что ведет к подавлению переноса загрязняющих веществ из приземного в более высокие слои атмосферы и, следовательно, увеличению их концентрации у поверхности Земли.

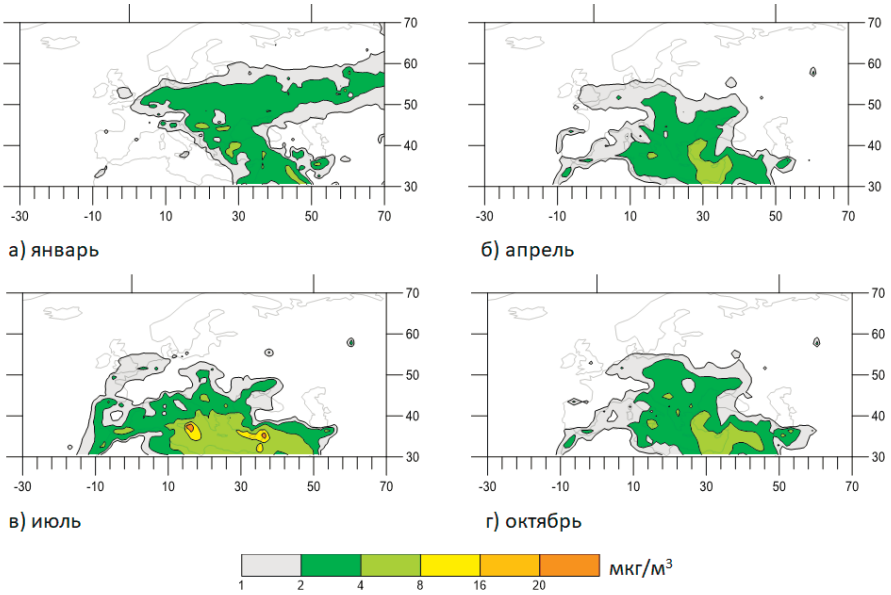


Рис. 2. Анализ глобального поля SO_4 по данным EMEP за 2000–2015 гг.

В июле самая широкая зона с наибольшим содержанием сульфатов располагается над Средиземным морем (10 мкг/м^3) что объясняется высоким уровнем испарения и, как следствие, повышенной влажности, также в летний период возрастает и влагоемкость атмосферы, что способствует протеканию химической реакции диоксида серы с молекулами гидроксил-радикала.

Однако можно отметить и небольшую долю вклада источников сульфатов вблизи восточного побережья Средиземного моря естественного происхождения, образующиеся благодаря окислению диметилсульфида, выделяемого морской биотой (рис. 3).

Было отмечено, что в январе распределение концентрации сульфатов в большей мере приходится на Центральную и Восточную Европу и европейскую территорию России, так как в холодный период характерно проявление атмосферных инверсий, что ведет к подавлению переноса загрязняющих веществ из приземного в более высокие слои атмосферы и, следовательно, увеличению их концентрации у поверхности Земли.

В июле самая широкая зона с наибольшим содержанием сульфатов располагается над Средиземным морем (10 мкг/м^3) что объясняется высоким уровнем испарения и, как следствие, повышенной влажности, также в летний период возрастает и влагоемкость атмосферы, что способствует протеканию химической реакции диоксида серы с молекулами гидроксил-радикала.

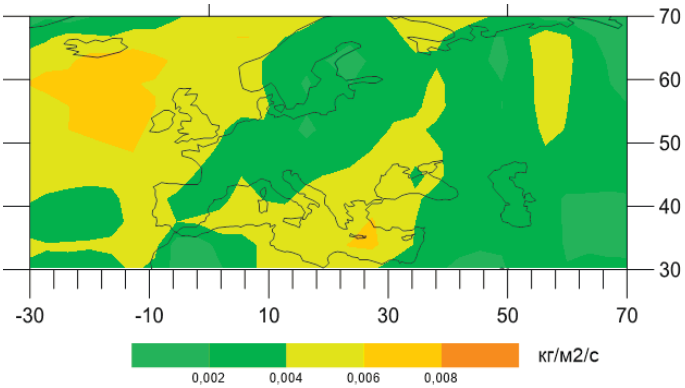


Рис. 3. Эмиссии диметильсульфида по данным CAMS за 2003–2019 гг.

4. Вычисление коэффициента связи приземных концентраций SO_2 и SO_4

Используемая в данной работе статистическая модель, связывающая приземные концентрации сернистого газа и сульфат-иона (q_{SO2} и q_{SO4} соответственно) и используемая в данной работе, основана на уравнении баланса массы SO_4 при наличии химических реакций его образования из SO_2 с интенсивностью R, интенсивностью притока SO_4 к данному объему атмосферы (или оттока от него) за счет динамических процессов (адвекции, диффузии и конвекции) D и стока из атмосферы с интенсивностью S [2]:

$$dq_{SO4} / dt = R + D + S. \quad (1)$$

Для интенсивности химических реакций образования сульфат-иона можно использовать кинетику первого порядка:

$$R = k_R q_{SO2} q_{ox}, \quad (2)$$

где q_{ox} – приземная концентрация окислителей SO_2. Эти окислители (гидроксил-радикал и пероксид-радикал [3; 6]) образуются при диссоциации водяного пара и перекиси водорода соответственно. Как следствие, q_{ox} можно считать пропорциональным содержанию водяного пара q_v в данном объеме атмосферы с коэффициентом k_{ox}:

$$q_{ox} = k_{ox} q_v. \quad (3)$$

Сток сульфат-ионов из атмосферы обусловлен их захватом осадками и гравитационным оседанием. Интенсивность обоих процессов можно считать пропорциональной q_{SO4} с коэффициентом $-k_S$, зависящим от интенсивности осадков [Seinfeld, Pandis, 2012; Суркова, 2002]. В данной работе для простоты указанная зависимость не учитывается, и k_S считается постоянной. Если дополнительно пренебречь вкладом динамики атмосферы D в изменение q_{SO4}, то отношение концентраций q_{SO4} и q_{SO2} можно выразить в виде:

$$K = q_{SO4} / q_{SO2} = k_R q_{ox} / k_S = (k_R k_{ox} / k_S) q_v = k q_v \quad (4)$$

В [2] по среднемесячным полям q_{SO2}, q_{SO4}, полученным по результатам расчетов с RAMS-SIMAQ, и метеорологических показателей атмосферы по данным реанализа был вычислены коэффициенты K и k. При построении соответствующей линейной регрессии после горизонтального осреднения полей по всему расчетному домену оценка значения коэффициента $k = 0{,}22 \pm 0{,}05$ кг/г. Если предварительное осреднение по пространству не проводить, то соответствующая оценка оказывается близкой: $0{,}21 \pm 0{,}01$ кг/г.

В данной работе коэффициент был повторно вычислен для региона Европы 30–82° с. ш. 30° з. д. – 90° в. д. для 2000–2015 гг. по данным расчетов с моделью EMEP MSC-W (European Program for Evaluation and Monitoring, Meteorological Synthesizing Center-West) о содержании SO_2 и SO_4 в атмосфере. Значения удельной приземной влажности, необходимые для использования соотношений (3) и (4), на уровнях 850, 900 и 1000 гПа были взяты из данных реанализа ERA-Interim [9] для 2000–2015 гг. Отметим, что выбор трех уровней для задания полей удельной влажности для статистической модели связи приземных концентраций соединений серы обусловлен быстрым (за несколько часов при отсутствии метеорологических инверсий) перемешиванием в приземном пограничном слое с типичной толщиной 1–2 км. Как следствие, использование трех близких между собой (но не идентичных друг другу) вариантов задания q_v позволяет проанализировать чувствительность полученных результатов к неопределенности значений удельной влажности.

Кроме того, из расчетов были исключены области с приземными концентрациями сульфатов менее 1,5 мкг/м^3. Причиной последнего является то, что соотношения (3) и (4) имеют физический смысл лишь при малом вкладе динамики атмосферы в значения концентраций сернистого газа и сульфатов в данной точке, тогда как в географических точках с малыми значениях этих концентраций они, скорее всего, связаны с периферией области переноса от достаточно удаленных источников.

При этом были получены следующие результаты:

$k_{850} = 0{,}195$ кг/г.

$k_{900} = 0{,}178$ кг/г.

$k_{1000} = 0{,}185$ кг/г.

Осредненное значение $k = 0{,}2$ кг/г

В результате эксперимента был повторно вычислен и проверен коэффициент отношения сульфатов и диоксида серы. Выявлено, что разница между коэффициентом для территории Китая и Европы невелика. Это говорит о достаточной широкой применимости построенной модели, по крайней мере на грубом (от сотен километров и более) пространственном масштабе в регионах сильного загрязнения атмосферы соединениями серы.

Заключение

В данной работе проведен анализ полей приземных концентраций содержания приземных концентраций сернистого газа и сульфатов (q_{SO2} и q_{SO4} соответственно) по данным расчетов с моделью EMEP MSC-W (European Program for Evaluation and Monitoring, Meteorological Synthesizing Center-West) в регионе 30–

82^o с. ш. 30^o з. д. – 90^o в. д для 2000–2015 гг. Этот анализ позволил выявить регионы с максимальным загрязнением приземного слоя атмосферы соединениями серы и связать их с естественными и антропогенными источниками серы и особенностями метеорологической ситуации в атмосфере.

Кроме того, построенная ранее при участии автора для региона Китая статистическая модель связи между q_{SO2} и q_{SO4} обобщена и на другой регион значительного загрязнения соединениями атмосферы – Европу. При этом дополнительно была проанализирована чувствительность результатов к неопределенности задания поля удельной влажности атмосферы. При этом было получено, что коэффициенты этой модели на больших (см. ниже) пространственных масштабах мало различаются между указанными регионами, так что $q_{SO4} / q_{SO2} = k\, q_v$ с $k \approx 0{,}2$ кг/г, где q_v – удельная влажность атмосферы (в г(H_2O)/кг(air)). Как следствие, можно говорить о том, что она в целом адекватно учитывает физико-химические процессы цикла серы в атмосфере на указанных масштабах.

В свою очередь достаточность пространственного масштаба для применимости модели может быть оценена, исходя из характерных времен жизни сернистого газа и сульфатов в нижней тропосфере – как произведение скорости ветра на наибольшее из таких времен жизни. Для сернистого газа и сульфатов эти времена составляют 1–2 сут. и 4–5 сут. соответственно [3; 5; 6], а характерной скорости ветра в пограничном слое, которая при среднемесячном осреднении составляет 5–10 м/с. Как следствие порядок величины минимального горизонтального масштаба применимости построенной модели может быть оценен величиной 10^3 км, т. е. примерно 2 градуса по широте и 4 градуса по долготе. Именно поэтому в данной работе мы ограничились рассмотрением регионов указанного размера.

Список литературы

1. *Елисеев А. В., Мохов И. И., Карпенко А. А.* Влияние учета прямого радиационного воздействия сульфатных аэрозолей на результаты численных экспериментов с климатической моделью промежуточной сложности // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2007. Т. 43, № 5. С. 591–601.

2. Влияние сернистого газа в атмосфере на наземный углеродный цикл / А. В. Елисеев, М. Чжан, Р. Д. Гизатуллин, А. В. Алтухова, Ю. П. Переведенцев, А. И. Скороход // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. С. 41–53.

3. *Суркова Г. В.* Химия атмосферы. М. : МГУ, 2002. 210 с.

4. Climatic response to anthropogenic sulphate aerosols versus well–mixed green-house gases from 1850 to 2000 AD in CLIMBER–2 / E. Bauer, V. Petoukhov, A. Ganopolski, A. Eliseev // Tellus B. 2008. Vol. 60. P. 82–97

5. Tropospheric sulfur simulation and sulfate direct radiative forcing in the Goddard Institute for Space Studies general circulation model / D. Koch, D. Jacob, I. Tegen, D. Rind, M. Chin // J. Geophys. Res: Atmospheres. 1999. 645 p.

6. *Seinfeld J. H., Pandis S. N.* Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change. Wiley. Hoboken, 2012. 1232 p.

7. *Seinfeld J. H., Pandis S. N.* Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change. Wiley. Hoboken, 2006. 1152 p.

8. *Warneck P.* Chemistry of the Natural Atmosphere. San Diego : Academic Press, 2000. 927 p.

9. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. URL: https://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-mnth/levtype=pl/ (дата обращения: 01.10.2021).

УДК 551.515.7

Анализ блокирующих антициклонов над европейской территорией России за период 2018–2020 гг.

Е. А. Дурнева (eadurneva@aari.ru)[1,2], О. Г. Чхетиани (ochkheti@ifaran.ru)[2]

[1]*Арктический и Антарктический НИИ, Санкт-Петербург*
[2]*Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН, Москва*

Аннотация. Представлен анализ блокирующих антициклонов над европейской территорией России за период 2018–2020 гг. Выявлены два преобладающих процесса появления блокинга: выход сформировавшегося высотного антициклона с территории Скандинавии и образование центра над самой европейской территорией России. Отмечено, что продолжительность жизни антициклонов над рассматриваемым районом за трехлетний период в среднем составляла около пяти суток, за исключением двух эпизодов летом 2018 г. и осенью 2020 г. Процессы формирования блокирующих антициклонов в этих двух случаях представлены более подробно с характеристиками интенсивности и положения высотного струйного течения на изобарической поверхности 300 гПа, полями потенциальной температуры на уровне тропопаузы и геопотенциальных высот на уровне 500 гПа и 300 гПа. Отмечены различные атмосферные условия средней и верхней тропосферы в процессе формирования блокинга над Скандинавией и европейской территорией России.

Ключевые слова: блокирующие антициклоны, планетарные волны, струйные течения.

Введение

Известно, что блокирующие антициклоны (блокинги) – малоподвижные, долгоживущие и высокие барические образования – вносят значительные изменения в общий западно-восточный перенос умеренных широт [10], являются причинами аномального проявления погоды, иногда достигающие катастрофических последствий [2; 16]. Механизм формирования блокинга связывают с нелинейной неустойчивость [4] и опрокидыванием длинных волн типа Россби, проявляющихся обращением знака градиента геопотенциальной высоты на изобарической поверхности 500 гПа [13] или градиента потенциальной температуры на уровне тропопаузы, поверхности потенциального вихря Эртеля [9]. Расчеты индексов блокирования, основанные на этих процессах, демонстрируют основные районы и сезоны года образования блокингов в Северном полушарии. В первую очередь, это осенние и зимние периоды над восточными акваториями Атлантического и Тихого океанов, затем территориями Европы (в частности, над Скандинавией) и некоторыми регионами Азии [5; 14].

С формированием блокингов, как причиной частых экстремальных погодных проявлений, связывают изменчивость некоторых характеристик элементов общей циркуляции атмосферы. Меандрирование высотного струйного течения и планетарных волн считаются неотъемлемыми составляющими образования и поддержания блокинга [7; 8]. Таяние ледников Гренландии, температурные аномалии поверхностных вод океанов, ледовая изменчивость Баренцева и Карского морей и фазы Североатлантического и Атлантического мультидекадного колебаний в разной степени являются предшественниками атмосферных условий благоприятных для образования блокингов Северного полушария [12; 15].

В данной работе представлен анализ блокирующих антициклонов над европейской территорией России (ЕТР) их продолжительность и характер формирования за период с 2018 по 2020 г. Выявлено два преобладающих способа появления блокинга над ЕТР: выход сформировавшегося высотного антициклона с территории Скандинавии и образование центра над самой Европейской территорией России. Также за трехлетний период отмечено, что продолжительность жизни этих антициклонов над ЕТР в среднем составляла около пяти суток, за исключением двух эпизодов летом 2018 г. и осенью 2020 г. Процессы формирования блокингов в этих двух случаях представлены более подробно с характеристиками интенсивности и положения высотного струйного течения на изобарической поверхности 300 гПа, адвекцией потенциальной температуры на уровне тропопаузы и полей геопотенциальных высот 500 гПа и 300 гПа. Отмечены различные особенности характеристик средней и верхней тропосферы при обрушении планетарной волны в случае формирования блокинга над Скандинавией и ЕТР.

Анализ и результаты

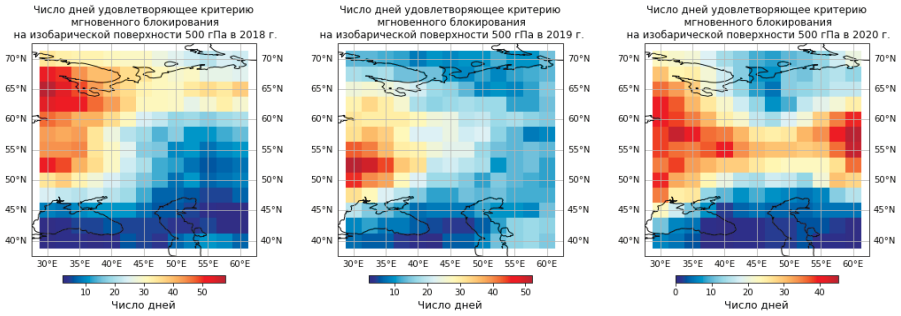
Для обнаружения блокирующей ситуации по данным реанализа NCEP/NCAR с пространственным разрешением 2,5°×2,5° были рассчитаны меридиональные градиенты геопотенциальных высот изобарической поверхности 500 гПа в каждом узле сетки для каждого дня. Использовались критерии и условия, позволяющие установить так называемое мгновенное (instantaneous) блокирование, предложенные в [3; 12]:

$$GHGS(\lambda_0,\varphi_0)=\frac{Z_{500}(\lambda_0,\varphi_0)-Z_{500}(\lambda_0,\varphi_S)}{\varphi_0-\varphi_S},\ GHGN(\lambda_0,\varphi_0)=\frac{Z_{500}(\lambda_0,\varphi_N)-Z_{500}(\lambda_0,\varphi_0)}{\varphi_N-\varphi_0}. \quad (1)$$

Здесь λ_0 и φ_0 координаты узлов сетки района, соответствующего ЕТР и ограниченного 30–60° в.д. и 40–70° с.ш.; $\varphi_S = \varphi_0 - 15°$, $\varphi_N = \varphi_0 + 15°$. Для каждой точки ($\lambda_0$, φ_0) мгновенное блокирование определялось, если одновременно выполнялись два условия:

$$GHGS\ (\lambda_0, \varphi_0) > 0 \text{ и } GHGN\ (\lambda_0, \varphi_0) < -10 \text{ м/гр. широты.} \quad (2)$$

В итоге ситуация считалась блокирующей над ЕТР, если критерий мгновенного блокирования соблюдался непрерывно в каждой точке как минимум на протяжении 15° по долготе и не менее пяти дней. При распространении этой зоны в широтном направлении или смещении первоначальной в пределах 5° широты, район блокирования ограничивался широтами, в пределах которых попрежнему не менее пяти дней критерий мгновенного блокирования оказывался удовлетворительным. Далее, при описании конкретных случаев внутри каждого года будет указываться диапазон широт или окрестность широты (±2,5°), в которых наблюдалось блокирование; определяться западная или восточная часть ЕТР, подразумевая что они ограничены 30–45° в. д. и 45–60° в. д. соответственно и дополняться районами по географическому разделению европейской территории России. На рис. 1 представлено количество дней в течение каждого года рассматриваемого периода, когда в общем критерии мгновенного блокирования были соблюдены над ЕТР.



а *б* *в*

Рис. 1. Суммарное число дней удовлетворяющее критерию мгновенного блокирования а) в 2018 г., б) в 2019 г. и в) в 2020 г.

В целом за трехлетний период – 2018 г. (рис. 1, *а*), 2019 г. (рис. 1, *б*) и 2020 г. (рис. 1, *в*) отмечаются общие районы с максимальным числом дней, удовлетворяющих критерию мгновенного блокирования, – над западными районами ЕТР. В течение каждого года здесь отмечается более сорока, местами пятидесяти дней с мгновенным блокированием, но количество случаев, которые можно отнести к эпизоду блокирования с учетом всех условий, описанных выше для ЕТР, выделено не более семи со средней продолжительностью около пяти дней, за исключением единичных случаев, рассмотренных ниже.

Так, в 2018 г. над ЕТР можно выделить семь случаев обнаружения блокирующих антициклонов с продолжительностью в среднем пять дней, а максимальным порядка двадцати дней, если учитываться признак «мерцания» планетарной волны, в данном конкретном случае проявляющейся ослаблением и смещением барического гребня на изобарической поверхности 500 гПа на короткий период времени (до трех дней). Шесть случаев из семи отмечались над северо-западом и севером ЕТР и ограничивались районом 60–70° с. ш. Во второй декаде января, в первой декаде мая и второй декаде декабря 2018 г. удовлетворительные критерии блокирования над северо-западом ЕТР были связаны с формированием высотного антициклона над Скандинавией, медленно смещавшегося затем на территорию ЕТР и последующим разрушением, или, как в январском случае, смещением далее на район Западной Сибири. Существование этих антициклонов в виде замкнутых изогипс на поверхности 500 гПа над ЕТР не превышало пяти дней. Во второй декаде ноября непродолжительный блокинг отмечался в окрестности 55° с. ш., проявлявшийся развитием высотного гребня с юго-запада на ЕТР, формированием антициклона в виде замкнутых изогипс в течение трех дней и дальнейшим разрушением над востоком ЕТР. В первой декаде ноября также отмечался случай блокирования, но с образованием высотного антициклона над территорией Восточной Европы, если бы в рамках данной работы рассматривался район с большим распространением на запад, то регион юго-западной части ЕТР мог бы оказаться в районе блокинга, в данном случае, ограничиваясь

30° в. д. критерии блокирования не удовлетворяют непрерывности 15° в. д. Самый продолжительный случай блокирования произошел в июле 2018 г. Последствия аномальной атмосферной циркуляции – с самым северным положением планетарной высотной фронтальной зоны в Атлантико-Европейском секторе летом за последние тридцать лет [3] и проявлениями волн жары – оказались нехарактерными для стран Северной Европы. Высокие рекордные температуры отмечались в Нидерландах, Бельгии, а в странах Скандинавии в дополнении распространялись засуха и лесные пожары [16]. Критерии блокирования для северной части ЕТР, в диапазоне широт 65–70° с. ш. и в одном случае с распространением до 60° с.ш., подтверждали три эпизода, которые можно объединить в единый с оговоркой, что для некоторых узлов сетки, рассматриваемого региона, критерии прерывались на короткое время (как правило, не более трех дней). Так, в конце первой декады июля усиливался высотный азорский гребень на территорию Скандинавии; сформировавшийся там антициклон во второй декаде июля смещался над ЕТР в восточном направлении, за Урал. Сразу же над Скандинавией усиливался новый антициклон, к середине третьей декады июля выходящий на восток ЕТР, далее с ослаблением вдоль Уральских гор на юг. Третий антициклон сформировался над Скандинавией в конце месяца и смещался на северо-запад ЕТР с окончательным разрушением в первых числах августа. Таким образом, в рассматриваемом регионе, северной части ЕТР, общее число дней с блокированием может быть сложено из трех эпизодов продолжительностью: шесть дней, десять дней и пять дней. Данный анализ 2018 г. еще раз подтверждает, что район Скандинавии является одним из распространенных регионов формирования блокингов.

В 2019 г. над ЕТР было выделено также семь эпизодов блокирования с продолжительностью каждого не более шести дней. В разные сезоны года блокинги отмечались на разных широтах, но по долготе распределение сохранялось преимущественно над западом ЕТР. Два блокинга отмечались в пределах 57,5–65° с. ш. продолжительностью пять дней в третьей декаде апреля и второй декаде мая 2019 г. В первом случае высотный гребень распространялся с юго-запада с формированием антициклона над Северным морем, с последующим смещением через юг Скандинавии на северо-запад ЕТР. Просуществовав три дня в виде замкнутых изогипс на высоте 500 гПа, разрушался на юге ЕТР. Во втором случае барический гребень распространялся с юго-востока с формированием антициклона преимущественно над восточной частью ЕТР; в виде замкнутых изогипс просуществовав два дня, смещался на юг ЕТР с последующим ослаблением. В третьей декаде июля барический гребень распространялся с юго-запада, запада на побережье Баренцева моря. Антициклон формировался над Скандинавией и в дальнейшем смещался на акваторию Норвежского моря, но тем самым в районе северо-запада ЕТР ограниченном 62,5–70° с. ш. критерии блокирования оказывались удовлетворительными в течение шести дней. В первых числах сентября барический гребень развивался с юго-запада на ЕТР с формированием высотного антициклона над юго-западной частью ЕТР; блокирование отмечалось в окрестности 60° с. ш. продолжительностью пять дней. В октябре и ноябре 2019 г. три случая блокирования над ЕТР ограничивались в пределах 45–50° с. ш. В третьей

декаде октября высотный антициклон преобладал над Восточной Европой, барический гребень распространялся на юго-запад ЕТР, тем самым критерии подтверждали блокирование в течение пяти дней в окрестности широты 50° с. ш. В ноябре два эпизода блокирования отмечались также с продолжительностью в пять дней с формированием высотных антициклонов над югом и юго-западом ЕТР в окрестности широты 45° с. ш.

В 2020 г. общее число блокингов над ЕТР составило шесть эпизодов. Большинство случаев также отмечались с продолжительностью около пяти дней, исключение составили два эпизода – осенью и зимой 2020 г., длительность присутствия которых над ЕТР сохранялась в течение около двух недель и восьми дней соответственно. Распределение блокингов над территорией также было разнообразно. В широтном диапазоне – преимущественно в пределах 50–60° с. ш., по долготе – как над западными, так и восточными районами ЕТР. В первых числах июня 2020 г. под влиянием барического гребня с юга над ЕТР формировался высотный антициклон, смещавшийся в восточном направлении, за Урал; в течение пяти дней критерии блокирования подтверждали наличие блокинга в районе севера ЕТР в пределах 65–70° с. ш. Во второй декаде июня антициклон, сформировавшийся над Скандинавией, смещался на ЕТР и вместе с барическим гребнем с юго-востока поддерживали блокирующую ситуацию над западными районами ЕТР в пределах 55–60° с. ш. в течение шести дней. Во второй декаде июля высотный барический гребень распространялся с юго-запада на район юго-восточной части ЕТР; формировался антициклон в районе Южного Урала, в течение пяти дней просуществовав в виде замкнутых изогипс на высоте 500 гПа, смещался в восточном направлении. В этом случае блокирование отмечалось над востоком ЕТР в пределах 50–55° с. ш. в течение пяти дней. В середине третьей декады сентября над ЕТР усиливался барический гребень с юга, формировался высотный антициклон, просуществовавший в общей сложности порядка девяти дней. В первой декаде октября сохранялся барический гребень над всем районом ЕТР, к концу периода ослабевая над его южной частью. Критерии подтверждали наличие блокирования в течение семи дней в пределах 57,5–62,5° с. ш. на всех долготах рассматриваемого региона, и позже, перед разрушением, в районе между 50–55° с. ш. в течение пяти дней. Заключительный эпизод произошел в первой половине декабря 2020 г. В середине первой декады месяца барический гребень распространялся с юга на ЕТР с формированием антициклона. В общей сложности просуществовав в виде замкнутых изогипс на высоте 500 гПа порядка семи дней, медленно смещался на восток, разрушаясь в районе Южного Урала уже в начале второй декады декабря. Блокирование в этой ситуации отмечалось в диапазоне 52,5–62,5° с. ш. в течение восьми дней.

Таким образом, на анализе трехлетнего периода, можно сделать следующий вывод – блокирующие антициклоны над ЕТР в равной степени имеют два пути появления: выход сформировавшегося высотного антициклона, преимущественно с территории Скандинавии, или образование центра над самой европейской территорией России. Абсолютное большинство этих антициклонов, как правило, не задерживаются над ЕТР. В среднем, опять же по результатам данного

трехлетнего анализа, критерии блокирования удовлетворительны над различными районами ЕТР в течение не более пяти суток, в дальнейшем антициклоны либо смещаются на восток, либо разрушаются преимущественно над южной частью ЕТР. Далее, приводится дополнительный анализ условий образования двух самых продолжительных эпизодов за 2018–2020 гг.

Для лета 2018 г. и осени 2020 г. по данным реанализа NCEP/NCAR с пространственным разрешением 2,5°×2,5° рассмотрены следующие общие характеристики средней и верхней тропосферы в период до и после формирования блокинга: положение и интенсивность высотного струйного течения на изобарической поверхности 300 гПа, адвекция потенциальной температуры на уровне тропопаузы и поля геопотенциальных высот 500 гПа и 300 гПа. На рис. 2 представлены вышеописанные параметры за день до появления первых удовлетворительных критериев блокирования над ЕТР.

Летом, в отличие от зимы, тропосферные струйные течения выражены слабо, имеют меньшую скорость ветра на оси, часто не наблюдаются в виде непрерывного потока и смещены в сторону Северного полюса [1]. Данные особенности отмечались и в июле 2018 г.: ветвь североатлантического струйного течения (в период как до, так и после образования блокирующего антициклона над Скандинавией) с разрывами преобладала над Северной Атлантикой, вдоль границы Гренландского и Норвежского морей до акватории Баренцева моря (рис. 2, *а*). Скорость ветра в струйном течение отмечалась в пределах 30–50 м/с, с усилением на оси до 60 м/с за два дня до образования блокинга. Устойчивое положение высотной фронтальной зоны и струйного течения от юга Гренландского моря до Баренцева моря, еще до начала формирования блокинга, способствовало развитию высотного азорского гребня с теплой воздушной массой субтропического происхождения до Скандинавского п-ова (рис. 2, *б*). Дальнейшее развитие синоптического процесса уже описано выше и полностью соответствует антициклональному типу опрокидывания планетарной волны [14] на антициклональной стороне струйного течения [6], характерное для района Скандинавского п-ва.

В сентябре 2020 г. наблюдалось ярко выраженное струйное течение. За семь дней до формирования блокинга над ЕТР квазизональная североатлантическая ветвь отмечалась над Северной Атлантикой, Скандинавией и севером ЕТР со скоростью в различных участках струи от 30 до 70 м/с. За три дня структура струйного течения стала принимать меандрированную форму (рис. 2, *в*), скорость ветра на оси местами увеличилась до 80 м/с; усиливался высотный азорский антициклон над Северной Атлантикой и распространялась высотная ложбина с севера на акваторию Северного моря с формированием циклона на изобарической поверхности 500 гПа над территорией Европы (рис. 2, *г*). В этот же момент происходило усиление высотного гребня с юга на ЕТР с последующим образованием блокирующего антициклона (синоптический процесс приводился выше). После образования блокинга над ЕТР североатлантическое струйное течение заметно ослабевало (первые три дня после блокинга до 30–50 м/с), расщеплялось на две ветви и прослеживалось с разрывами над границей Гренландского и Норвежского морей, акваторией Баренцева моря и южнее, в районе северного побережья Средиземного моря.

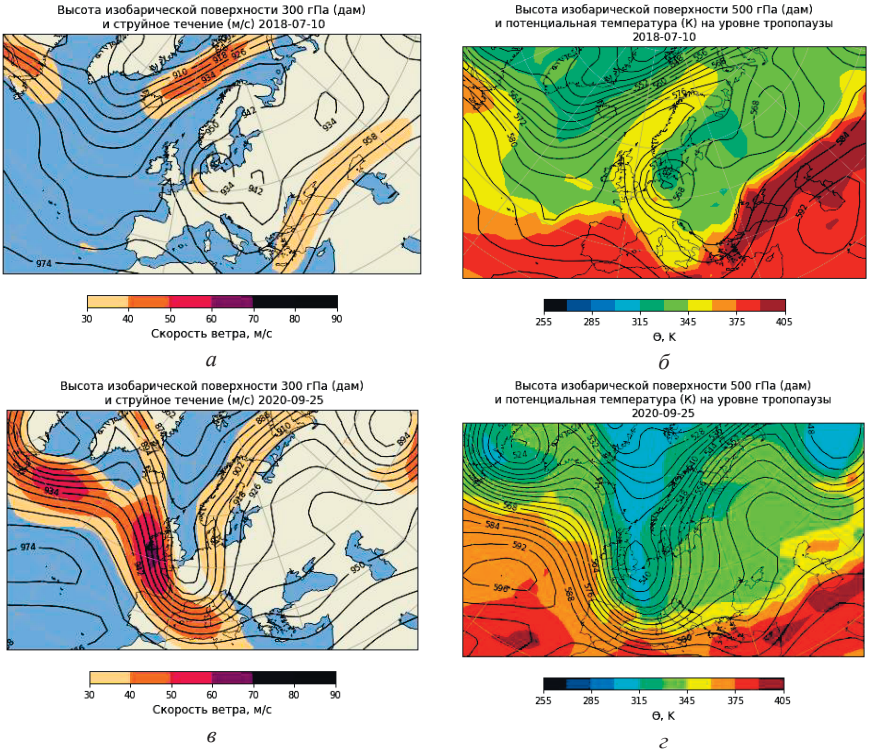


Рис. 2. Высоты изобарической поверхности и области струйного течения на уровне 300 гПа (слева); высоты изобарической поверхности 500 гПа и поля потенциальной температуры на уровне тропопаузы (справа) за один день до формирования блокинга над Скандинавией (а, б) и над ЕТР (в, г)

Заключение

В данной работе рассмотрен анализ блокирующих антициклонов над европейской территорией России их продолжительность и характер формирования за период с 2018 по 2020 г. Выявлено два преобладающих способа появления блокинга над ЕТР: выход сформировавшегося высотного антициклона с территории Скандинавии и образование центра над самой европейской территорией России. В среднем, по результатам трехлетнего периода, критерии блокирования были удовлетворительны над различными районами ЕТР в течение не более пяти суток, в дальнейшем высотные антициклоны либо смещались на восток, либо разрушались преимущественно над южной частью ЕТР.

При сравнении двух самых долгоживущих блокингов, отметившихся над европейской территорией России в период 2018–2020 гг. можно выделить следующие общие и отличительные условия формирования. Несмотря на то что эпи-

зоды блокирования происходили в разные времена года и ветвь североатлантического струйного течения в июле 2018 г. была выражена слабее, чем в сентябре 2020 г., отмечалась общая тенденция увеличения скорости ветра на оси струи за два-три дня до обрушения планетарной волны и последующее ослабление после образования высотного антициклона, и в течение первых дней сохранение в виде слабого расщепленного потока (в частности, осенью 2020 г.). Формирование блокингов происходило при развитии высотных гребней, по антициклональному типу опрокидывания планетарной волны. Только в случае 2018 г. высотный азорский гребень способствовал образованию антициклона над Скандинавией, а в 2020 г. гребень с юга над ЕТР, который усиливался под влиянием азорского гребня над Северной Атлантикой и ложбины с севера на центральную Европу. Таким образом, при формировании блокинга над ЕТР добавляется еще один элемент в виде высотной ложбины с севера и адвекцией холодного воздуха. В рамках данной работы не рассматривается случай самого продолжительного и катастрофического блокинга над ЕТР летом 2010 г. [2; 11], но процесс его образования был схож с режимом осени 2020 г. Условия роста высотного барического гребня над ЕТР сопровождалось также усилением высотной ложбины с севера, образованием циклона и адвекцией холода над территорией Европы. Дальнейшим продолжением данной работы может стать более подробный анализ участия характеристик высотного струйного течения при образовании блокингов как над территорией Скандинавии, так и европейской территории России, а также исследование блокирующих антициклонов, зарождающихся над ЕТР, в частности, роль развития высотных ложбин с адвекцией холода на территорию Европы и энергетическое взаимодействие планетарных волн, высотных струйных течений и вихрей синоптического масштаба.

Настоящее исследование поддержано Российским научным фондом (проект № 19-17-00248).

Список литературы

1. *Воробьев В. И.* Струйные течения в высоких и умеренных широтах. Л. : Гидрометеоиздат, 1960. 234 с.

2. *Мохов И. И.* Особенности формирования летней жары 2010 г. на Европейской территории России в контексте общих изменений климата и его аномалий // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47, № 6. С. 709–716.

3. *Дурнева Е. А., Чхетиани О. Г.* Планетарная высотная фронтальная зона в Атлантико-Европейском секторе в летние сезоны в 1990–2019 гг. // Метеорология и гидрология. 2021. № 6. С. 24–33.

4. *Шакина Н. П., Иванова А. Р.* Блокирующие антициклоны: современное состояние исследований и прогнозирование // Метеорология и гидрология. 2010. № 11. С. 5–18.

5. Bidimentional diagnostics, variability and trends of northern hemisphere blocking / P. Davini, C. Cagnazzo, S. Gualdi, A. Navarra // Journal of Climate. 2012. Vol. 25, N 19. P. 6496–6509.

6.. European blocking and Atlantic jet stream variability in the NCEP/NCAR reanalysis and the CMCC-CMS climate model / P. Davini, C. Cagnazzo, P. G. Fogli, E. Manzini, S. Gualdi, A. Navarra // Climate Dynamic. 2014. Vol. 43, N 1. P. 71–85.

7. *Di Capua G., Coumou D.* Changes in meandering of the Northern Hemisphere circulation // Environmental Research Letters. 2016. Vol. 11, N 9. P. 094028.

8. *Francis J. A., Vavrus S. J.* Evidence for a wavier jet stream in response to rapid Arctic warming // Environmental Research Letters. 2015. Vol. 10, N 1. P. 014005.

9. *Pelly J. L., Hoskins B. J.* A new perspective on blocking // Journal of the Atmospheric Sciences. 2003. Vol. 60, N 3. P. 743–755.

10. *Rex D.* Blocking action in the middle troposphere and its effect upon regional climate: I. An aerological study of blocking action // Tellus. 1950. N 2. P. 196–211.

11. *Russo S., Sillmann J., Fischer E. M.* Top ten European heatwaves since 1950 and their occurrence in the coming decades // Environmental Research Letters. 2015. Vol. 10, N 12. P. 124003.

12. Two-dimensional indices of atmospheric blocking and their statistical relationship with winter climate patterns in the Euro-Atlantic region / S. Scherrer, M. Croci-Maspoli, C. Schwierz, C. Appenzeller // International Journal of Climatology. 2006. N 26. P. 233–249.

13. *Tibaldi S., Molteni F.* On the operational predictability of blocking // Tellus. 1990. N 42A. P. 343–365.

14. *Tyrlis E., Hoskins B. J.* The morphology of Northern Hemisphere blocking // Journal of the Atmospheric Sciences. 2008. Vol. 65, N 5. P. 1653–1665.

15. *Wang H., Luo D.* Summer Russian heat waves and their links to Greenland's ice melt and sea surface temperature anomalies over the North Atlantic and the Barents-Kara Seas // Environmental Research Letters. 2020. Vol. 15, N 11. P. 114048.

16. Analyses of the Northern European Summer Heatwave of 2018 / P. Yiou, J. Cattiaux, D. Faranda, N. Kadygrov, A. Jézéquel, P. Naveau, A. Ribes, Y. Robin, S. Thao, G. J. van Oldenborgh, M. Vrac // Bulletin of the American Meteorological Society. 2020. Vol. 101, N 1. P. S35–S40.

УДК 551.509.325+551.591.2+004.032.26

Прогнозирование не-гидродинамических параметров численной модели прогноза погоды с использованием машинного обучения на примере дальности видимости

Г. А. Зароченцев (xztv@mail.ru)[1], К. Г. Рубинштейн (k.g.rubin@gmail.com)[1,2]

[1]*Гидрометцентр России, Москва*

[2]*Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва*

Аннотация. Представлена схема произведенных экспериментов, приведены примеры по прогнозированию горизонтальной дальности видимости на 12-часовой срок в аэропорту Внуково с использованием рекуррентной нейронной сети.

Ключевые слова: метеорологическая видимости, мезомасштабное моделирование, нейронные сети, lstm.

Введение

Видимость – это важное свойство воздуха. Ее ухудшение имеет большое значение для транспорта и авиации, причем, чем выше скорость перемещения, тем важнее прогноз видимость, а точнее ее ухудшения. Например, ежегодно аэропорты несут многомиллионные убытки из-за задержек авиарейсов из-за образования на взлетно-посадочной полосе туманов, а сотни людей страдают в дорожно-транспортных происшествиях, вызванных ухудшением видимости на дороге.

Дальность видимости – не-гидродинамическая характеристика атмосферы, на которую оказывает влияние большой ряд атмосферных процессов: все виды атмосферных осадков (дождь, снегопад и т. д.), загрязнение воздуха аэрозолями, образование туманов, пыльные бури и т. д. Точный прогноз дальности видимости, а точнее ее изменения, сложная задача. Оценки качества прогноза дальности видимости [1] также имеют определенные трудности, поскольку на

метеостанциях она измеряется преимущественно наблюдателями и носит субъективно-оценочный характер, а инструментальные наблюдения проводятся в основном в аэропортах и крупных аэродромах.

Несмотря на то что модели численного прогноза погоды активно развиваются в последние десятилетия, но общепринятой модели, позволяющей надежно и с высокой степенью точности описать процесс ухудшения видимости, не существует. Например, большинство существующих методов прогноза тумана, который представляет наибольшую опасность, так как при его образовании видимость падает до 1000 м и ниже [4], имеют либо четкую локальную географическую привязанность, либо сводят задачу прогноза тумана к не менее сложной задаче прогноза абсолютного содержания сконденсированной воды в приземном слое атмосферы [2].

Существует также ряд численных методов прогноза видимости, которые в качестве входных параметров используют либо значения приземных концентраций гидрометеоров [6; 9], либо используют эмпирические зависимости различных приземных параметров (температуры, влажности, скорости ветра и т. д.) [5], либо используют оба принципа при расчете прогноза [2]. Однако данные методы показывают высокую оправдываемость только при прогнозе дальности видимости от 2000 м и выше [3], что является недостаточным, поскольку наибольший интерес представляет именно прогноз «плохой» видимости (2000 м и менее).

При прогнозе видимости большое влияние оказывают различные локальные особенности (например, в ложбинах после дождя высока вероятность образования радиационных туманов), которые не могут быть учтены в модели численного прогноза погоды (ЧПП), имеющей, как правило, разрешение в несколько километров и выше. Поиск возможных предикторов, уточнение параметров связи между ними, а также коррекция выходных данных модели ЧПП в рассматриваемой точке может быть реализована при помощи модели коррекции, которой в данной работе выступает рекуррентная нейронная сеть.

Схема численного эксперимента

В качестве модели коррекции была выбрана рекуррентная нейронная сеть, которая является математической моделью, построенной по принципу организации и функционирования сетей нервных клеток живого организма, которые представляют собой систему соединенных и взаимодействующих между собой простых процессоров (нейронов) [10]. В рекуррентной нейронной сети связи между этими элементами образуют направленную последовательность, что позволяет обрабатывать серии событий во времени или последовательные пространственные цепочки. Нейронные сети состоят из входного слоя, ответственного за анализ входных данных, выходного, который ставит в соответствии определенным зависимостями преобразование входных данных в выходные, и скрытых, которые позволяют модели извлекать из входных данных функции, необходимые для распознавания шаблонов, чтобы с их помощью классифицировать различные входные данные (рис. 1). В качестве скрытого слоя была выбрана архитектура LSTM (Long Short-Term Memory – Долгая краткосрочная память) [7].

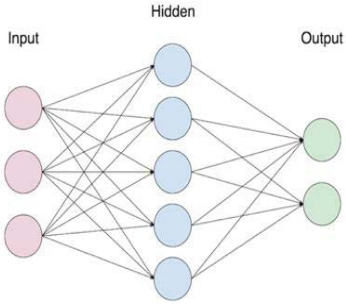


Рис. 1. Пример блок-схемы простой нейронной сети [10]

Основным источником данных о наблюдаемых значениях дальности видимости являются сводки METAP, наблюдения проводятся круглосуточно или только в период полетов с интервалом в 15–30 мин. В качестве рассматриваемой точки был выбран аэропорт Внуково.

Для получения прогностических метеорологических полей была использована гидродинамическая мезомасштабная модель WRF-ARW версии 3.9.1.1 [8], расчетная область – территория Европы и европейская часть России (область прогноза представлена на рис. 2) с горизонтальным разрешением 18 км (320×340 точек) и 41 уровнем по вертикали. Пространственный шаг модели составил 18км, данные прогнозов записывались каждые три часа. Для описания характеристик подстилающей поверхности рассматриваемой территории использована база данных MODIS с разрешением 0,5 градусов. В качестве входных данных для модели WRF-ARW использованы поля глобальной модели GFS с пространственным разрешением 0,25 градусов.

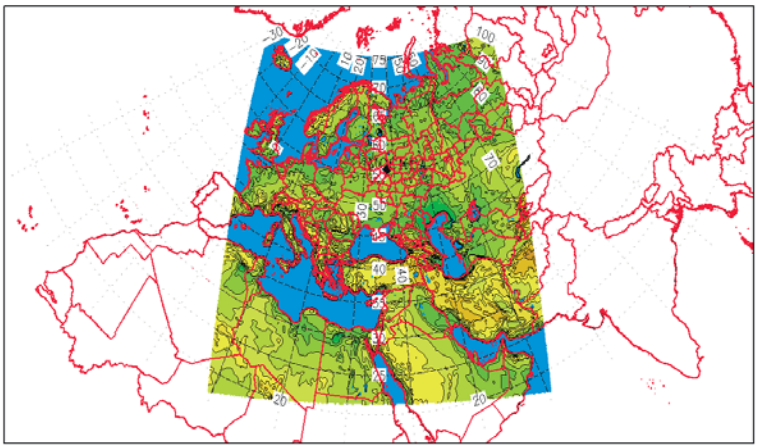


Рис. 2. Карта расчетной области модели WRF-ARW с пространственным разрешением 18 км

Исследуемый интервал составил 365 дней – с 01.02.2020 по 01.02.2021. Для каждого дня был рассчитан численный прогноз с помощью модели WRF-ARW на срок 60 ч с шагом 3 ч, которые затем обрезались через 24 ч и «склеивались» в момент начала счета следующего в 00:00 UTC для получения непрерывного массива данных (рис. 3).

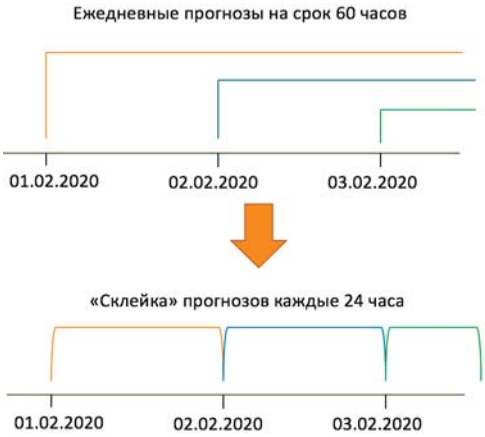


Рис. 3. Схема обработки данных

Исходный набор данных был разделен на две группы: 6 месяцев – обучающая выборка, 6 месяцев – валидирующая выборка, которые затем менялись местами. В качестве функции потерь была выбрана функция среднеквадратичной ошибки, по которой и производилась минимизация. Данные были регуляризованы (вычиталось средней значение, а затем производилось деление на среднеквадратичное отклонение). Запуск экспериментов происходил для 10 эпох (1 эпоха – это одна итерация по всем данным), каждая эпоха разбивалась на 200 шагов. Обучение производилось на данных наблюдаемой видимости, а также были добавлены дополнительные параметры: температура, влажность воздуха и скорость ветра. Для построения прогноза использовались данные за предыдущие пять дней, сам прогноз строился на следующие 12 ч.

На рис. 4 представлены графики зависимости среднего значения функции ошибки за эпоху в зависимости от номера эпохи. Для идеальной модели график должен убывать и стремиться к нулю, что, к сожалению, наблюдается только для обучающей выборки. Также смена обучающей и валидирующей выборки не должна приводить к изменению структуры и формы графика, что говорит о том, что данных для корректного обучения и дальнейшей работы модели недостаточно.

В качестве результатов приведем примеры прогноза параметра lg(1+VIS) для нескольких случаев из рассматриваемой выборки на рис. 5. Модель в некоторых случаях показывает очень близкий к наблюдаемым данным результат, а в

некоторых наоборот – прогнозирует абсолютно противоположный. Также модель не способна пока спрогнозировать кратковременные изменения видимости, продолжительностью менее пары часов.

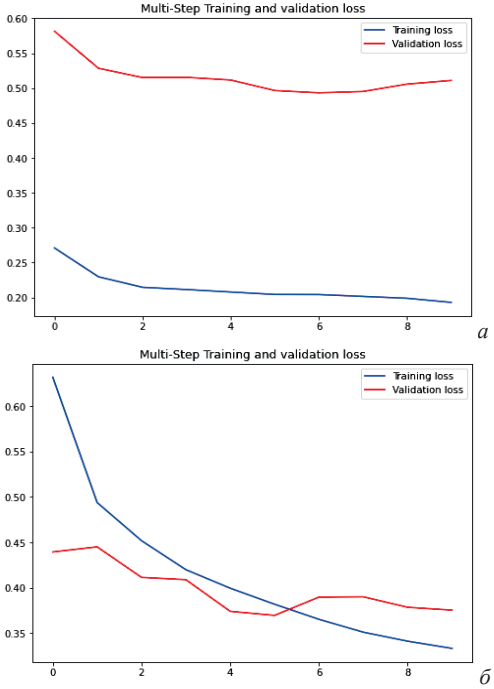


Рис. 4. Изменение функции потерь в зависимости от номера эпохи: а – первые 6 месяцев обучающая выборка, следующие 6 – валидирующая; б – выборки поменяны местами

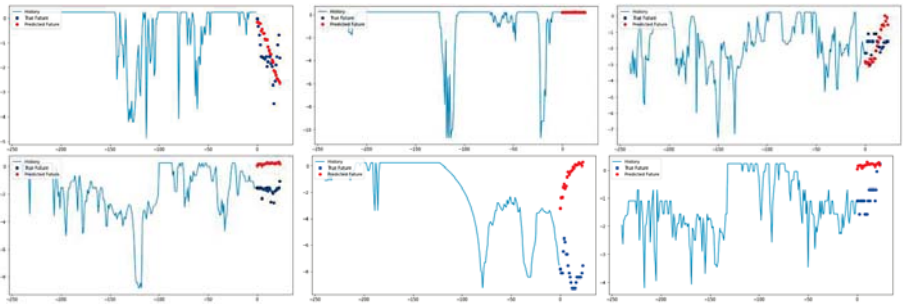


Рис. 5. Пример успешного прогноза дальности видимости (верхний ряд) и неудачного (нижний ряд) в аэропорту Внуково

Выводы

В данной работе произведено моделирование дальности видимости в аэропорту Внуково с использованием рекуррентной нейронной сети с использованием LSTM в качестве скрытого слоя. Модель показала неплохой результат в некоторых случаях, однако сильное отличие вида графика значения функции потерь при смене обучающей и валидирующей выборок говорит о том, что 6 месяцев пока недостаточно для корректного прогнозирования дальности видимости с помощью данной модели.

Список литературы

1. Сравнение нескольких численных методов прогноза туманов / Г. А. Зароченцев [и др.] // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31, № 12. С. 981–987.

2. *Зароченцев Г. А., Рубинштейн К. Г.* Комбинированный метод прогноза дальности видимости и тумана // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. №. 1 (375). С. 113–129.

3. *Зароченцев Г. А., Рубинштейн К. Г.* Качество современных численных прогнозов видимости // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34, № 08. С. 629–637. https://doi.org/10.15372/AOO20210809

4. *Хромов С. П., Мамонтова Л. И.* Метеорологический словарь. Л. : Гидрометеоиздат, 1974. 569 с.

5. *Bang C. H., Lee J. W., Hong S. Y.* Predictability experiments of fog and visibility in local airports over Korea using the WRF model // J. KOSAE. 2008. Vol. 24, N E2. P. 92–101.

6. Prediction of visibility and aerosol within the operational Met Office Unified Model. I: Model formulation and variational assimilation / P. A. Clark, S. A. Harcourt, B. Macpherson, C. T. Mathison, S. Cusack, M. Naylor // Q. J. R. Meteorol. Soc. 2008. Vol. 134, N 636. P. 1801–1816.

7. *Hochreiter S., Schmidhuber J.* Long short-term memory // Neural computation. 1997. Vol. 9, N 8. P. 1735–1780.

8. A description of the advanced research WRF version 2. Mesoscale and Microscale Meteorology Division, National Center for Atmospheric Research / W. C. Skamarock, J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, W. Wang, J. G. Powers. Boulder; Colorado, USA, 2005. N NCAR/TN468+STR. https://doi.org/10.5065/D68S4MVH

9. *Stoelinga M. T., Warner T. T.* Nonhydrostatic, mesobeta-scale model simulations of cloud ceiling and visibility for an East Coast winter precipitation event // J. Appl. Meteorol. 1999. Vol. 38, N 4. P. 385–404.

10. towardsdatascience.com. URL: https://towardsdatascience.com/step-by-step-guide-to-building-your-own-neural-network-from-scratch-df64b1c5ab6e (дата обращения: 24.10.2021).

УДК 551.583.13+551.21.(98)(99)

Сравнительный анализ изменений климата на территории Арктики и Антарктиды

К. А. Лощенко (loshchenko@bk.ru), А. А. Агальцов (aghaltsov@mail.ru)
Иркутский государственный университет, Иркутск

Аннотация. Проанализированы сезонные и межгодовые вариации температуры воздуха в Арктике и Антарктиде со второй половины XX в. В качестве причин климатических вариаций и их долговременных трендов рассматриваются синоптические процессы. Анализ аномалий полей давления в периоды зимнего потепления Арктики и Антарктиды указывает на вклад подвижного циклогенеза.

Ключевые слова: климат, Арктика, Антарктида, температура воздуха, атмосферные осадки,

Введение

Возможность длительного пребывания человека в экстремальных условиях внешней среды во многом определяется способностью организма адаптироваться к существующим там факторам. В этой связи оценка степени суровости климата должна проводиться для каждой арктической или антарктической станции отдельно с учетом не только метеорологических данных, но и факторов местной погоды. В настоящее время при подобных оценках учитывается в основном жесткость погоды, которая в холодном типе климата чаще всего оценивается по индексу Бодмана. Данная оценка учитывает в основном воздействие минимальных температур воздуха, которые существенно различаются в зависимости от рельефа местности, господствующих атмосферных процессов и происходящих изменений климата [5].

Одним из направлений современных исследований климата является разработка методов оценки уровня комфортности/дискомфортности среды обитания для человека с учетом происходящих изменений климата, которые по-разному проявляются в различных регионах земного шара. Если рассматривать условия жизнедеятельности в полярных районах Северного и Южного полушарий, то организм человека часто подвержен комплексному воздействию низких температур воздуха в сочетании с сильным ветром. Поэтому неслучайно, что к концу зимовки у полярников возникает так называемый синдром полярной зимовки, или «антарктический синдром», который характеризуется напряжением центральных, вегетативных и клеточных механизмов регуляции.

Низкие температуры представляют реальную опасность во время полевых и научно-исследовательских работ на континентальных полярных станциях, а в прибрежных районах негативное влияние низких температур и порывов сильного ветра усиливают повышенные значения относительной влажности воздуха. Согласно существующим классификациям биоклиматических индексов [4] при критерии «экстремальный холод» в диапазоне температур от минус 29,9 °С до минус 51 °С деятельность на открытом воздухе опасна, а при понижении температур ниже минус 51 °С возможно очень быстрое обморожение открытых участков тела [1].

В этой связи особый интерес представляет исследование климатического режима низких температур в Арктике и Антарктиде. По ранее проведенным исследованиям [3] выполнен сравнительный анализ климатического режима на основе непрерывных данных метеорологических станций, расположенных вблизи Северного и Южного полюса. Оказалось, что в Арктике за последние 40 лет отмечается повышение средней годовой температуры воздуха, которое происходит во всей толще тропосферы и в нижней стратосфере, увеличивающееся по значениям с высотой. Что касается Антарктиды, то повышение средних температур хорошо выражено в нижнем 5-км слое тропосферы, которое максимальных значений достигает вблизи уровня тропопаузы. В нижней стратосфере наблюдается обратная тенденция, которая проявляется в понижении средних температур. На фоне повышения температур в нижней тропосфере в высоких широтах Арктики и Антарктиды происходит понижение атмосферного давления, которое сопровождается усилением ветра, и, как следствие, усилением негативного влияния погодных климатических факторов на жизнедеятельность человека.

В многолетней динамике за прошедшие 40 лет средняя температура воздуха в Северной полярной области повысилась на 2,6 °С, тогда как в Южной полярной области темпы повышения температур оказались в пять раз меньше. Причиной более слабого роста средних температур в Антарктиде по сравнению с Арктикой может быть как мощное охлаждающее воздействие материка, задерживающее влияние антарктического полярного фронта для проникновения теплых вод с севера на юг, а также значительный рост числа откалывающихся от ледников айсбергов и донное (подводное) таяние шельфовых ледников [2].

Результаты исследования

Целью данной работы был сравнительный анализ изменений средних годовых значений температуры воздуха у поверхности Земли и средних значений температуры в середине календарных сезонов года в широтной зоне 60–90° с. ш. и ю. ш. за период 1948–2020 гг. по данным реанализа ERA5. Рассчитывались аномалии температурного режима относительно средних значений за период 1979–2000 гг. Установлено, что средние годовые температуры воздуха в Арктике имеют устойчивую тенденцию роста с начала XXI в. и за последние два десятилетия температуры повысились в среднем на 2 °С, что на 0,5 °С выше темпов похолодания в предшествующий период (рис. 1, *а*). Средние годовые значения температуры воздуха в Антарктиде имеют устойчивый рост только за последние пять лет, а повышение температур в четыре раза ниже темпов их роста в Арктике (рис. 1, *б*). Устойчивый период похолодания здесь отмечался с 1950 по 1980-е гг. Самым теплым в Арктике по значениям средних годовых температур был 2016 г., в Антарктиде 1980 г.

В середине зимы в Арктике начало роста средних температур согласуется во времени со средними годовыми значениями и достигает 5 °С, что выше предшествующего с 1950 г. периода похолодания, где в отдельные годы понижение средних температур относительно климатической нормы достигало 4 °С. В середине зимы в Антарктиде устойчивый рост температур происходит более продол-

жительный период (с середины 1980-х гг.) и достигает 3 °С, что ниже предшествующих темпов похолодания в этом регионе и на 2 °С ниже темпов потепления климата Арктики. В середине лета положительные аномалии температур в Арктике устойчиво сохраняются только с начала XXI в. и в большинстве случаев не превышают 1 °С, что в пять раз меньше темпов потепления Арктики в середине зимы. В середине лета в Антарктиде с начала 1990-х гг. происходит понижение средних температур, которое в большинстве случаев не превышает 1 °С. В середине весны в Арктике, начиная с 1992 г., происходит устойчивый рост средних температур, который достигает 3 °С, что на 2 °С выше зимних показателей. В середине весны в Антарктиде устойчивый рост средних температур происходит аналогично зимнему периоду с середины 1980-х гг., но, в большинстве случаев не превышает 2 °С, что ниже показателей Арктики и роста средних температур в зимние месяцы в Антарктиде. В середине осени в Арктике примерно с середины 1990-х гг. происходит рост средних температур, который достигает 4 °С, что выше темпов предшествующего похолодания в этом регионе, но одинаков с темпами зимнего потепления в Арктике. В Антарктиде в середине весны устойчивый рост температур происходит только с начала XXI в. и достигает 3 °С, что выше темпов предшествующего похолодания, но ниже темпов потепления в зимний период.

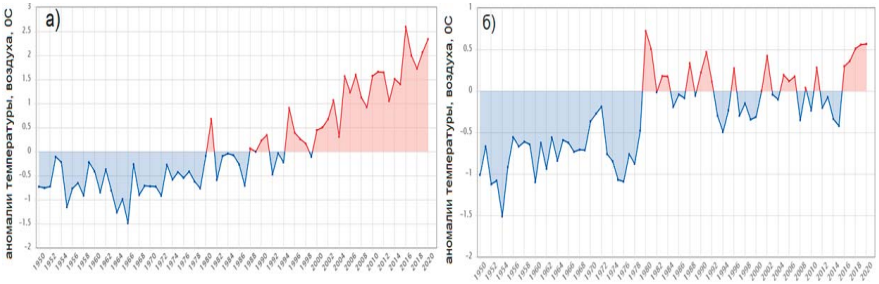


Рис. 1. Аномалии средних годовых значений температуры воздуха в широтной зоне 60–90° Северного (а) и Южного (б) полушария в 1948–2021 гг. по данным реанализов ERA5

Исследование циркуляционных факторов максимальных темпов потепления климата в высоких широтах Арктики и Антарктиды в зимние месяцы с начала XXI в. характеризуется максимальной скоростью роста средних температур на западном и восточном побережье Гренландии, в районе Баренцева моря и Новой Земли, где сопровождается увеличением количества атмосферных осадков (рис. 2, *а*) и усилением ветра (рис. 2, *б*) на фоне активизации циклонической деятельности над полюсом, Гренландией и севером Атлантики (рис. 2, *в*).

В Антарктиде в середине зимы максимальные темпы потепления климата наблюдаются над материком и ослабевают на побережье. Они сопровождаются аналогично региону высоких широт Северного полушария усилением ветра (рис. 3, *б*) и увеличением сумм выпавших осадков (рис. 3, *а*) на фоне понижения атмосферного давления над центральной частью Антарктиды и вдоль ее западного побережья (рис. 3, *в*).

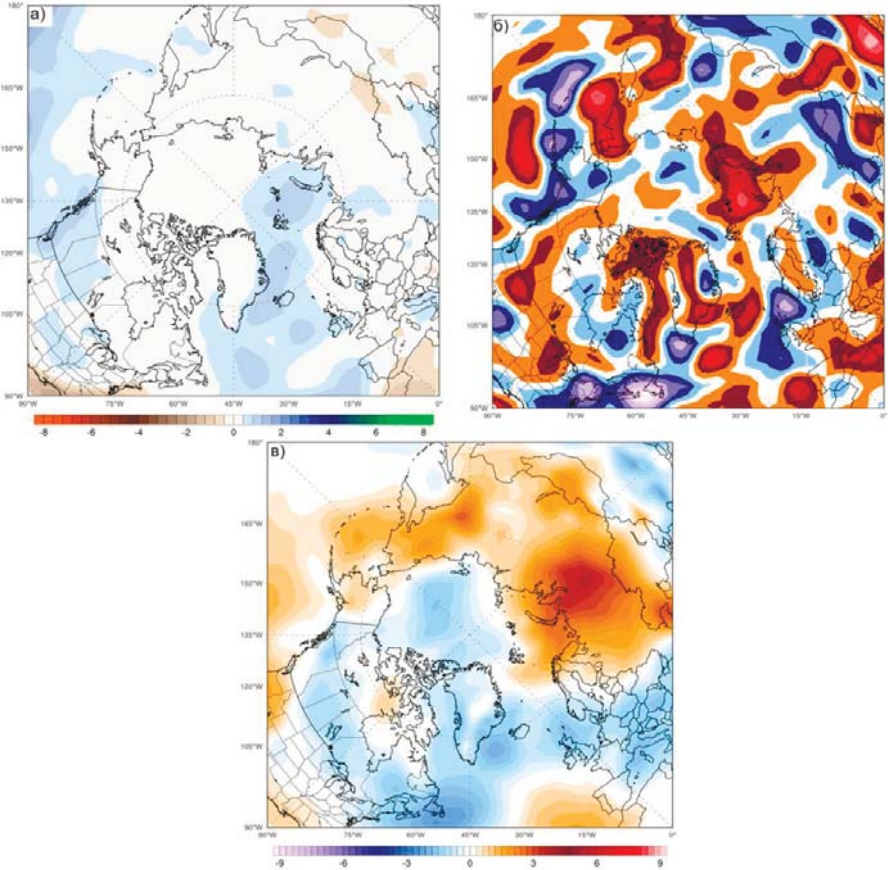


Рис. 2. Аномалии средних значений осажденной влаги(кг/м^2) (а), скорости ветра у поверхности Земли (м/с) (б) и приземного давления (гПа) в январе 2000–2021 гг. в высоких широтах Северного полушария по данным реанализов ERA5

Выводы

Таким образом, в Арктике во все календарные сезоны года происходит потепление, которое зимой и летом прослеживается с начала XXI в., в переходные сезоны года оно началось раньше, с начала 1990-х гг. Максимальных значений темпы потепления климата достигают зимой, которые в пять раз выше темпов роста средних температур в летний период. В Антарктиде повышение средних температур отмечается во все центральные месяцы календарных сезонов года, кроме лета. Наибольших значений оно достигает осенью и зимой, раньше всего началось зимой и в этот период достигает максимальных значений. Летом в Антарктиде наблюдается понижение средних температур, которое по темпам в три раза ниже зимнего похолодания.

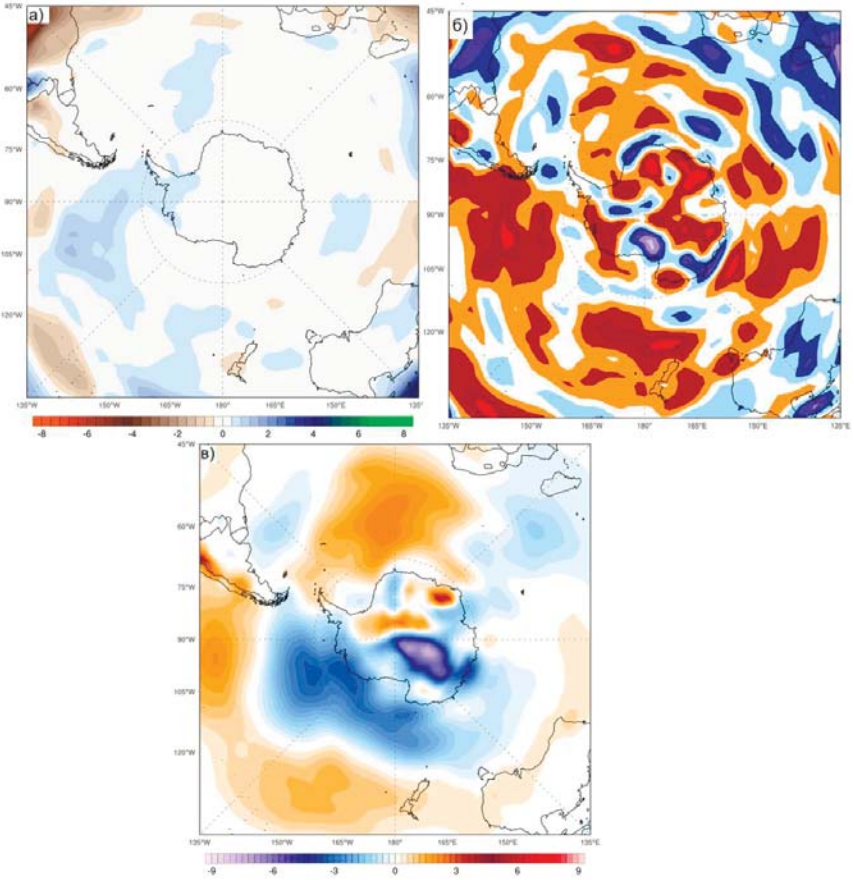


Рис. 3. Аномалии средних значений осажденной влаги(кг/м^2) (а), скорости ветра у поверхности Земли (м/с) (б) и приземного давления (гПа) в январе 2000–2021 гг. в высоких широтах Южного полушария по данным реанализов ERA5

Максимальный рост средних температур в середине зимы тесно согласуется с усилением процессов подвижного циклогенеза, что указывает на существенный вклад атмосферных процессов в современные тенденции изменений климата Арктики и Антарктиды. Повышение температур сопровождается усилением ветра, которое ослабляет отепляющий эффект с точки зрения влияния погодных условий на организм человека.

Список литературы

1. *Белкин В. Ш., Финае А. Ф., Сороко С. И.* Биоклиматическая оценка уровня дискомфортности среды обитания для человека в различных районах Антарктиды // Физиология человека. 2016. Т. 42, № 2. С. 5–15.

2. *Малинин В. Н., Вайновский П. А.* К сравнению характеристик межгодовой изменчивости площади морского льда Северного и Южного полушария // Ученые записки РГГМУ. 2019. № 57. С. 77–90.

3. *Khrapov P. V., Kaniber V. V.* Comparative analysis of climatic changes in Antarctica and the Arctic // International Journal of Open Information Technologies. 2019. Vol. 7, N 8. P. 31–41.

4. *Sipple P. A., Passel C. D.* Measurements of dry athmospheric cooling in subfreezing temperatures // Proc.Amer. Phil. Soc. 1945. Vol. 89. P. 177.

5. *Strang R. E., Klein W. J.* Emotional and social adjustment of recent US winter-over parties in isolated Antarctic stations // Polar human biology. London, 1973. P. 410–416.

УДК 551.583

Сезонные особенности температурного режима на территории России в сравнении с глобальными вариациями

К. А. Лощенко (loshchenko@bk.ru), Н. С. Москалев (nikolay.moskalew@list.ru)
Иркутский государственный университет, Иркутск

Аннотация. Рассмотрены сезонные особенности климатического режима территории России и глобальные вариации климата в современный период. Показана определяющая роль крупномасштабных циркуляционных факторов в формировании экстремальных значений средних годовых температур воздуха на территории России.

Ключевые слова: температура воздуха, климат, глобальные изменения, циркуляция атмосферы, теплосодержание океана.

Введение

Одной из актуальных проблем современности является исследование региональных и глобальных изменений климата с целью уменьшения или предотвращения возможных социально-экономических и экологических последствий, связанных с ними. В глобальном аспекте вызывают тревогу такие последствия, как все возрастающий в ряде регионов дефицит пресной воды, рост числа стихийных бедствий и связанной с ними миграции населения в более безопасные районы земного шара, проблемы, обусловленные дефицитом топлива и продовольствия и др. [5]. На территории России, где значительную часть занимают лесные массивы, которые можно называть «легкими страны» в условиях возрастания повторяемости засушливых периодов все чаще возникают лесные пожары. Ярким примером являются пожары, охватившие летом 2019 г. территорию Сибири, а в 2021 г. Якутии [7].

Глобальное потепление в статистическом аспекте определяется осреднением температур, измеренных по данным непрерывных метеорологических наблюдений на сети метеорологических станций и постов, которые крайне неравномерно распределены по территории земного шара. Это накладывает значительные неопределенности в исследовании причин наблюдаемых вариаций климата, особенно в высокогорных районах и в акваториях морей и океанов. Известно, что климат может изменяться как по естественным причинам, так и вследствие антропогенного воздействия. К естественным факторам относятся: вариации потоков прямой, рассеянной и отраженной радиации, а также достига-

ющих верхней границы атмосферы и ослабленных, и поглощенных по мере поступления на подстилающую поверхность. Все чаще рассматриваются так называемые внешние климатообразующие факторы, как изменения параметров земной орбиты, а также эндогенные факторы, порождающие разные по периодичности вариации составляющих климатической системы [1]. Нельзя не упомянуть о возможных причинах изменчивости климата, как возросшая частота вулканических извержений, которая существенно изменяет прозрачность атмосферы и, как следствие, влияет на процессы облако- и осадкообразования [2].

Наложение естественных факторов на антропогенную составляющую определяет сложный характер временной динамики средних температур, на которую также накладывается влияние и орографического фактора. Во временной динамике среднегодовой температуры поверхности Земли отчетливо выделяются трендовая составляющая, проявляющиеся на ее фоне положительные и отрицательные аномалии, а также периоды замедления долговременных трендов, для объяснения которых выдвинуто множество теорий, опирающихся на данные наблюдений и компьютерного моделирования. Наиболее обоснованными и убедительными представляются гипотезы о влиянии на климат многолетних периодических изменений температуры океана и процессов взаимодействия океана и атмосферы. Изучается влияние теплых и холодных фаз ЭНЮК на крупномасштабные волны Россби и процессы тропического циклогенеза. Среди наиболее значимых факторов, определяющих короткопериодные флуктуации климата, особое место занимают водяной пар и облачность, свойства которых модулируются посредством испарения с поверхности океана и суши [9]. Наиболее значимая корреляция между океаническими и атмосферными процессами наблюдаются в восточной и центральной зонах приэкваториальной части Тихого океана между 30° ю. ш. и 30° с. ш. Интересно, что в целом по планете скорость приповерхностного ветра в период 1998–2013 гг. незначительно уменьшилась, однако в тропической зоне Тихого океана и также в циркумполярной зоне Южного океана наблюдался ее статистически значимый рост. Возможно, это могло способствовать усилению океанических течений и зональному переносу ими тепла [8]. С точки зрения влияния антропогенного фактора наряду с выбросами углекислого газа важно учитывать, что в последние десятилетия идет накопление метана. Учитывая, что продолжительность его жизни в атмосфере меньше, чем углекислого, но агрессивность в отношении влияния на климат гораздо выше, возможно, что рост его содержания внесет свою лепту в увеличение потенциальной энергии атмосферы Земли [6].

Наряду с анализом данных метеорологических наблюдений для оценки глобальных и региональных изменений климата широко используются численные методы моделирования, в том числе будущего состояния климата Земли [9; 11]. Например, численные расчеты с климатической моделью института физики атмосферы РАН проводились для всего периода голоцена с учетом изменений параметров орбиты Земли, интенсивностью потока солнечного излучения, оптической толщины стратосферных (вулканических) аэрозолей (для 501–2000 гг.),

содержания парниковых газов (CO_2, CH_4, N_2O) в атмосфере, площади распространения пастбищ, пашни и плотности населения. При учете изменений содержания сульфатного аэрозоля в тропосфере предполагалось, что его уровень в середине XIX в. характеризует распределение сульфатов естественного происхождения для всего голоцена [3]. Предполагается, что в условиях повышения глобальных температур уменьшение глубины промерзания почв, рост суммы активных температур и увеличение вегетационного периода приведет к активизации продукционного процесса, увеличится глубина почвенного профиля, усилится интенсивность внутрипочвенного выветривания, получит большее развитие иллювиально-гумусовый процесс, произойдет смена хвойной растительности на широколиственную [11].

В Северном полушарии наиболее подвержены климатическим изменениям те регионы, которые попадают в зимнее время под влияние тропосферных ложбин, определяющих интенсивность затоков холода на материк, в летнее время под влияние тропосферных гребней, определяющих интенсивность адвекции тепла. К числу таких регионов относится Иркутская область, которая расположена на стыке взаимодействия арктического, полярного и тропического воздуха в условиях сезонного проявления континентальных центров действия атмосферы (Азиатского антициклона и Центрально-Азиатской депрессии), на фоне резко расчлененного рельефа. Средние годовые температуры воздуха Южного Прибайкалья, для которых характерно повышение, можно связать с изменениями глобальной температуры и температуры Северного полушария [4]. В качестве примера, можно отметить, что обнаружена хронологическая синхронность колебаний изменения температуры воздуха в Таджикистане с изменением глобальной температуры как в среднем за год, так и по месяцам. При этом тенденция потепления воздуха уменьшается с высотой местности над уровнем моря, а увеличение температуры произошло больше в холодном, чем в теплом полугодии. Также выявлена положительная тенденция к увеличению осадков, особенно в холодное время года, но, в горах они увеличились больше, чем в долинах. За вековой период годовое количество осадков возросло от 1,6 % в южных долинах до 10–14 % в среднегорье и 52 % в высокогорье [10].

Результаты исследования

В России в условиях неоднородного рельефа и большой изменчивости синоптических процессов климатический режим характеризуется большой вариабельностью во времени и в пространстве. В качестве примера можно привести лето 2021 г., которое в азиатской части России оказалось на 2–5 °С теплее многолетних значений и стало 3-м самым теплым в истории метеорологических наблюдений, на европейской территории положительные аномалии не превысили +1…+2 °С, а в отдельных районах Приволжского и на юге Северо-Западного федеральных округов были близки к нулю, т. е. средняя температура примерно соответствовала норме. Холоднее обычного прошедшее лето было на востоке страны в Хабаровском крае, Амурской области и частично на Сахалине.

В этой связи возник интерес к сравнительному анализу климатических вариаций на территории России за период 1948–2021 гг., выполненный по данным

реанализа ERA5. Проведен сравнительный анализ аномалий средних месячных величин, осредненных по территории России и земного шара в целом. Аномалии средних месячных температур рассчитывались по отношению к средним значениям за период 1979–2000 гг. Особое внимание уделялось изменениям температурного режима последних двух десятилетий, когда не только существенно возросла изменчивость климата, но и увеличилась продолжительность меридиональных потоков и процессов блокирования. Для исследования многолетней динамики средних месячных температур на территории России были использованы географические координаты следующих точек: крайняя северная материковая точка России: м. Челюскин – 77°43' с. ш., крайняя южная точка России: г. Базардюзю (Кавказ) – 41°13' с. ш., крайняя западная точка России: Коса в Гданьском заливе (Балтийское море) – 19°38' в. д. и крайняя восточная материковая точка России: м. Дежнева – 169° 40' з. д.

Как показало исследование, в январе на территории России число положительных отклонений средних месячных температур существенно возросло с начала XXI в. и в отдельные годы они превышают +3 °С (2007, 2020), а наиболее холодным был февраль 1969 г. (–4,8 °С). В глобальном масштабе во времени устойчивый рост совпадает с изменениями температур на территории России, в 2020 г. он также достиг максимальных значений (+0,9 °С), но они оказались в три раза ниже темпов потепления в России. Минимальные значения температур приходятся на 1951 г. с аномалией –0,6 °С. В феврале темпы роста температур в России достигают +3,9 °С (1995, 2020 гг.), а наиболее холодным был февраль 1969 г. (–6,0 °С). Глобальные температуры в феврале также возросли, начиная с 1995 г. до + 0,9 °С в 2016 г., что в четыре раза меньше темпов роста температур в целом по территории России. Наиболее холодным был 1951 г. с отрицательными температурными аномалиями (до –0,7 °С). В марте число положительных аномалий температур в России в 2000–2021 гг. составило 75 %, достигло максимума (+3,8 °С) в 2017 г., а наиболее холодными были 1955, 1969 и 1999 гг. В глобальном масштабе с 2000 г. во все годы в марте температуры воздуха были выше средних значений. При этом максимальный рост (+ 0,9 °С) приходится на 2016 г., где он в четыре раза ниже темпов потепления в России, минимальные температуры отмечались в 1976 г. (–0,7 °С). В апреле в России устойчивый рост температур происходит с 2007 г. и в 2020 г. достигает +2,4 °С, а минимальные температуры в исследуемый нами период приходятся на 1979 г. (–2,6 °С). Глобальные температуры воздуха устойчиво повышаются в апреле с более раннего периода (2000 г.), максимального роста достигают в 2016 и 2020 гг. (+0,8 °С), что в два раза ниже темпов потепления в России, а наибольшие отрицательные аномалии отмечаются в 1955 г. (–0,6 °С). В мае рост средних месячных температур устойчиво сохраняется в России с 2000 г. Максимальных значений (+1,8 °С) рост температур достигает в 2020 г., минимальные значения приходятся на май 1968 г., когда отрицательные температурные аномалии достигли 1,6 °С. Для глобальных температур в мае устойчивый рост сохраняется с 2000 г., достигая максимальных аномалий +0,7 °С, что в два раза меньше, чем в России. Наибольшие значения отрицательных аномалий приходится на 1976 г.

(–0,6 °С). В июне, начиная с 2003 г., ежегодно в России отмечаются положительные температурные аномалии, которые наибольших значений достигают в 2021 г. (+1,5 °С), наибольшие по значениям отрицательные температурные аномалии приходятся на 1958 г. (–1,2 °С). В глобальном масштабе ежегодно положительные аномалии температур отмечаются с 1997 г., достигают максимума в 2019 г. (+0,6 °С), что в два раза ниже темпов потепления в России. Наибольшие отрицательные аномалии (–0,6 °С) приходятся на 1956 г. В июле с 2010 г. в России отмечаются только положительные температурные аномалии, которые наибольших значений достигли в 2001 г. (+1,4 °С), а наибольшие отрицательные аномалии в исследуемый период приходятся на 1976 г. (–1,1 °С). Положительные аномалии глобальных температур в июле ежегодно отмечаются с 2005 г., достигают максимальных значений (+0,6 °С) в 2019 г., что в два раза ниже темпов роста в России. Наибольшие отрицательные аномалии (-0,6 °С) приходятся на 1955 г. В августе ежегодно положительные аномалии в России отмечаются с 2005 г., максимальных значений достигают в 2016 г. (+1,5 °С), а наибольшие отрицательные аномалии отмечаются в 1978 г. (–1,0 °С). Изменение глобальных температур в августе характеризуется ежегодными положительными аномалиями с 1995 г., максимальных значений (+0,7 °С) они достигают также в 2016 г., но, оказываются вдвое ниже российских показателей. Наибольшие отрицательные аномалии (-0,6 °С) приходятся на 1956 г. В сентябре в России аналогично июню положительные аномалии ежегодно отмечаются с 2003 г., достигают максимальных значений в 2020 г. (+1,8 °С), минимальные температуры с аномалиями –1,3 °С в 1997 г. В глобальном масштабе температуры воздуха в сентябре ежегодно повышаются с 1997 г., достигая максимума в 2020 г. (+0,7 °С), что в два раза ниже темпов потепления в России. Наибольшие отрицательные аномалии (–0,6 °С) отмечаются в 1956 г. В октябре число положительных температурных аномалий в России резко возросло с 2003 г., максимальных значений они достигают в 2018 г. (+2,5 °С), а наибольшие по значениям отрицательные аномалии приходятся на 1976 г. (–3,4 °С). Глобальные температуры в октябре ежегодно возрастают с 2001 г., наибольших значений (+0,8 °С) достигают в 2019 г., что в три раза ниже темпов роста температур в России, а наибольших отрицательных значений (–0,6 °С) в 1976 г. В ноябре число положительных аномалий температур в России возросло с 2004 г., максимальных значений (+3,2 °С) достигло в 2013 г., тогда как максимальные отрицательные аномалии (–3,8 °С) приходятся на 1952 г. Глобальные температуры в ноябре также ежегодно выше средних значений, начиная с 2004 г., достигают максимальных положительных аномалий (0,9 °С) в 2020 г., что в три раза ниже темпов потепления в России. Наибольших отрицательных значений (–0,5 °С) они достигли в 1955 г. В декабре положительные аномалии в России ежегодно отмечались в период 2013–2020 гг., достигли максимальных значений (+3,1 °С) в 2013 г., а самым холодным был декабрь 2002 г. (–3,3 °С). В глобальном масштабе в декабре ежегодно с 2001 г. средние температуры растут, достигают максимальных значений для положительных отклонений в 2015 г. (+0,8 °С), что в четыре раза ниже темпов

потепления в России, а наибольшие отрицательные аномалии (–0,6 °С) приходятся на 1955 г.

В целом за год на территории России средние температуры ежегодно выше климатической нормы начиная с 2002 г. Они достигают максимальных положительных отклонений (2,0 °С) в 2020 г., а наибольшие отрицательные аномалии (1,8 °С) приходятся на 1969 г. Если рассматривать глобальные температуры, то они ежегодно выше средних значений с 1995 г. и достигают максимума в положительных отклонениях (0,7 °С) в 2016 и 2020 гг., а наибольшие отрицательные аномалии (0,5 °С) отмечаются в 1956 г.

Для определения возможных причин повышения глобальных и региональных температур были построены карты аномалий средних за год значений приземной температуры воздуха и приземного атмосферного давления в аномально теплый (2020 г.) и аномально холодный (1969 г.) годы на территории России. В аномально теплый 2020 г. средние температуры воздуха были высокими над значительной частью земного шара, но максимальные положительные аномалии приходятся на территорию России и высоких широт Северного и Южного полушарий (рис. 1, *а*). В холодном 1969 г. ситуация практически противоположная, похолодание в России происходит на фоне отрицательных температурных аномалий в высоких широтах Северного и Южного полушарий (рис. 1, *б*). Изменения температурного режима в аномальные годы тесно согласуются с крупномасштабными циркуляционными факторами и проявляются в понижении атмосферного давления над областями роста температур (рис. 1, *в*) и повышении давления над областями падения температур (рис. 1, *г*).

Существенно различаются в аномальные по температурному режиму годы теплосодержание океанов (рис. 2, *а*, *б*) и потоки влаги в средней тропосфере (рис. 2, *в*, *г*). Повышение средних температур на территории России в 2020 г., как и для земного шара в целом, очевидно, сопровождалось активными выносами теплого воздуха с океанической поверхности на материк. Это отчетливо проявляется над Северной Атлантикой, где активизация циклонической деятельности обусловила отепляющее воздействие на территорию России, особенно в холодный период года.

Выводы

Таким образом, темпы потепления климата в России в период 1948–2021 гг. оказались в два раза выше, чем глобальных температур в теплый период года (с апреля по сентябрь) и в 3–4 раза выше в холодный период, достигая наибольших значений в феврале, марте и декабре. Кроме того, в большинстве случаев современное потепление климата в России началось в среднем на 5–10 лет позже, чем в глобальном масштабе. Наибольшие положительные аномалии средних месячных температур в России приходятся на февраль и март (3,8–3,9 °С), а наименьшие на май (0,7 °С). Как наиболее теплые годы в России выделяются 2016, 2019 и 2020, а как наиболее холодные 1967–1969 гг. и 1976–1979 гг. В глобальном масштабе, так же как наиболее теплые, выделяются 2016, 2019 и 2020 гг., а как наиболее холодные 1951, 1955¸ 1956 и 1976 гг.

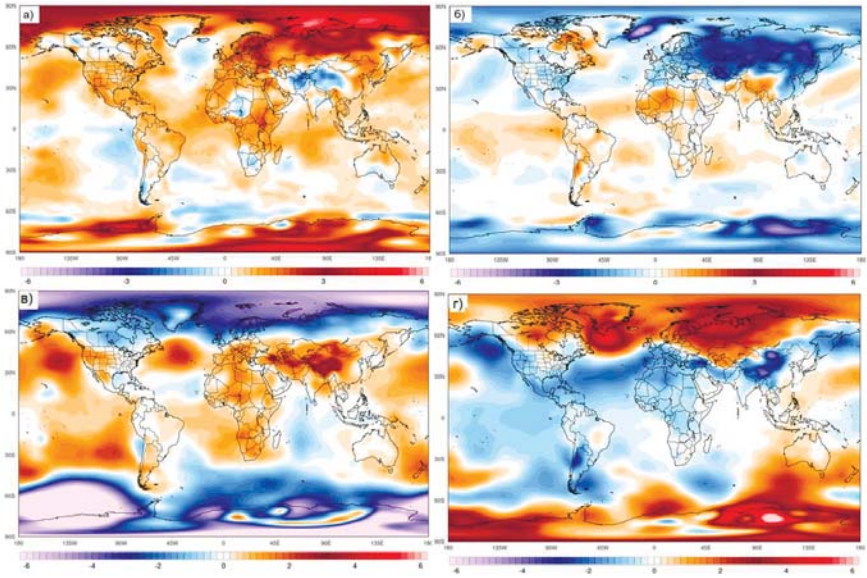


Рис. 1. Карты аномалий средних годовых значений приземной температуры воздуха (°С) (а, б) и приземного атмосферного давления (гПа) (в, г) соответственно для 1969 и 2020 гг. по данным реанализа ERA5

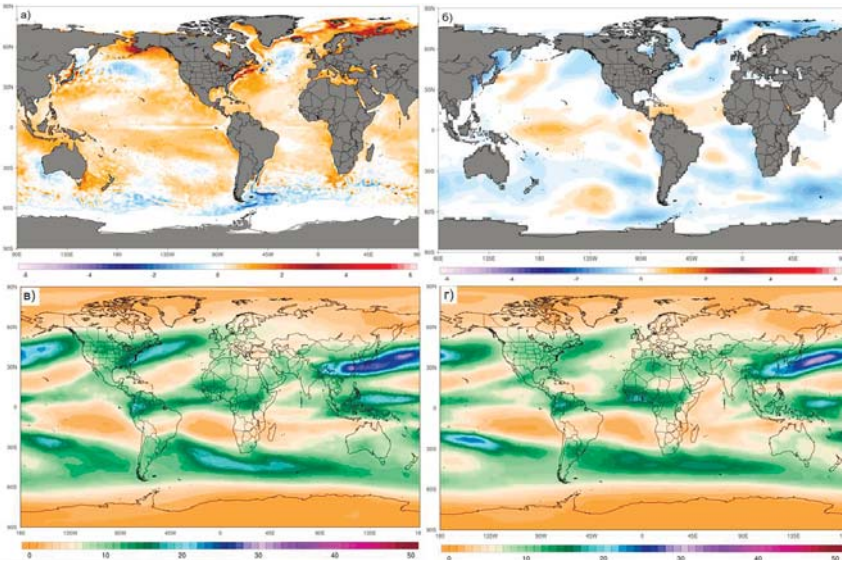


Рис. 2. Карты среднегодовых значений аномалий температуры поверхности океанов (°С) (а,б) и потоков влаги (кг/кг·м/с) (в,г) соответственно для 1969 и 2020 гг. по данным реанализа ERA5

Максимальные значения среднегодовой температуры воздуха на территории России в 2020 г. можно объяснить возросшим вкладом адвективных переносов тепла и влаги на материк при положительных аномалиях температуры поверхности океана и развитии подвижного циклогенеза над Атлантикой и высокими широтами Северного полушария. Соответственно в аномально холодном 1969 г. синоптическая ситуация была противоположной, что указывает на важность изучения циркуляционных причин изменений климата в современный период.

Список литературы

1. Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем / О. А. Анисимов [и др.]. М. : НИЦ «Планета», 2012. 512 с.

2. *Гусев Г. А.* Глобальное потепление: критический взгляд // Биология. 2010. № 11 (906). С. 11–15.

3. *Карпачевский Л. О.* Роль растений и глобальных изменений климата в эволюции почв // Почвоведение. 1993. № 9. С. 20–26.

4. Современные изменения климата на территории Иркутской области / И. В. Латышева, Е. П. Белоусова, С. В. Олемской, К. А. Лощенко // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2010. Т. 2. С. 110–125.

5. *Макаров И. А.* Глобальное изменение климата как вызов мировой экономике и экономической науке // Экономический журнал ВШЭ. 2013. № 3. С. 479–494.

6. *Моргунов Б. А., Терентьев А. А., Козельцев М. Л.* Оценка трансграничных рисков и глобальных последствий изменений климата и экономической деятельности в бассейнах Арктических морей // Природопользование и геоэкология. 2019. № 2. С. 100–108.

7. Основы защиты населения и территорий в кризисных ситуациях / под ред. Ю. Л. Воробьева. М., 2006. 544 с.

8. *Baldridge A. M.* The ASTER Spectral Library Version 2.0 // Remote Sens. Environ. 2009. Vol. 113. P. 711–715.

9. *Berger A. L.* Long-term variations of daily insolation and quaternary // J. Atmos. Sci. 1978. Vol. 35 (12). P. 2362–2367.

10. *England M. H.* Recent intensification of wind-driven circulation in the Pacific and the ongoing warming hiatus // Nat. Clim. Chang. 2014. Vol. 4. P. 222–227.

11. *Finaev A. F.* Climatic Changes in the Mountain Glacier Area of Pamir // ASI Series I. 1999. Vol. 56. P. 289–294.

УДК 551.524.32+551.4.06: 911.52

Почасовая динамика метеопараметров Гренландии

П. М. Мазуркин (kaf_po@mail.ru), А. И. Кудряшова (Little-one7@yandex.ru)
Поволжский государственный технологический университет, Йошкар-Ола

Аннотация. Приведены результаты вейвлет анализа метеопараметров станции Summit, Greenland (SUM) по 2880 измерениям с 2016.01.01.00 по 2016.04.30.23. Получен рейтинг по убыванию коэффициента корреляции у трех первых составляющих: 1) барометрическое давление (0,8275); 2) температура воздуха на высотке 2 м (0,7186); 3) влажность воздуха (0,5782); 4) направление ветра (0,4692); 5) скорость ветра (0,3970). Динамические почасовые ряды давления и температуры получили адекватность «сильная связь». Наиболее четко происходит изменение давления, и такая плавность динамического ряда позволяет разложить процесс на множество квантов поведения в виде асимметричных вейвлетов. При этом ряд давления не имеет разрывов и поэтому вейвлет анализ может быть доведен до последнего члена, обеспечивающего погрешность моделирования меньше погрешности измерений 0,01 ГПа. Тогда получится, что барометрическое давление, как и температура, имеет квантовую определенность.

Ключевые слова: Гренландия, метеопараметры, почасовая динамика, вейвлет анализ.

Введение

Динамика температуры на разных метеостанциях мира получает хорошее разложение на отдельные колебания (асимметричные вейвлет сигналы) с переменными амплитудой и периодом возмущения. Например, вдоль Ледовитого океана в двух точках (остров Тикси и Мурманск) температура приземного слоя воздуха в динамике отличается [1].

В России приняты трехчасовые измерения метеопараметров [2; 3], по которым на метеостанции Йошкар-Ола были получены закономерности влияния температуры на высоте 2 м от поверхности почвы на развитие и рост листьев березы повислой в вегетационный период. Однако, как оказалось [4], рост листьев является кумулятивным процессом, поэтому на онтогенез листьев сильное влияние оказывает сумма температур в вегетационный период.

Для снижения антропогенного влияния необходимо принять метеостанции, находящиеся в безлюдных местах. Например, метод вейвлет анализа по ежемесячной динамике температуры и парниковых газов был применен к данным измерений по Антарктике [5]. Однако здесь оказалось сильное влияние на метеопараметры месторождений метана.

По максимальной ежегодной температуре Центральной Англии с 1878 по 2017 г. [6] был дан прогноз о глобальном потеплении. Но мы считаем, что в глубине Евразии, например, в Иркутске, будет в будущем глобальное похолодание. Таким образом [7], метод вейвлет анализа динамики позволит выявить закономерности волнового изменения метеопараметров.

Цель статьи – вейвлет анализом выявить волновые закономерности почасовой динамики пяти метеопараметров Гренландии на метеостанции Summit (SUM) и доказать сложную и быструю цикличность квантового поведения приземного слоя атмосферы.

Материалы и методы

Данные (табл. 1) от метеостанции *Summit, Greenland (SUM)* [8] были получены с сайта http://www.esrl.noaa.gov. Расположение метеостанции Summit: широта 72,58º, долгота –38,45º, высота над уровнем моря 3207 м.

Таблица 1

Данные метеопараметров станции Summit, Greenland (SUM) по 2880 измерениям

Год	Месяц	Сутки	Час	Время τ, сутки	Азимут ветра φ, град	Скорость ветра v, м/с	Барометр. давлен. σ, ГПа	Температура на 2 м t_2, °С	Влажность W, %
2016	1	1	0	0	162	9,4	647,04	–33,4	50
2016	1	1	1	0,041667	157	9,3	648,08	–36	48
2016	1	1	2	0,083333	152	8,9	648,92	–38,1	46
…	…	…	…	…	…	…	…	…	…
2016	4	30	21	120,875	111	5,9	675,02	–20,8	55
2016	4	30	22	120,9167	117	6,1	674,64	–21,7	59
2016	4	30	23	120,9583	120	8,3	674,24	–21	62

Первое измерение относится к 2016.01.01.00, а последнее 2880-я точка – 2016.04.30.23.

Такая длина динамического ряда объясняется возможностями программной среды CurveExpert-1.40 (максимальное количество строк до 3300 шт.).

Непрерывное время вычисляли по формуле τ = январь-1 + сутки-1 + час/24 для января. Для февраля применяли формулу 31 + сутки-1 + час/24, для марта 60 + сутки-1 + час/24 и для апреля 91 + сутки-1 + час/24. Всего получилось по длине ряда 121 сутки.

Колебания (вейвлет сигналы) записываются формулой [1–7] вида:

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

где y – показатель, i – номер составляющей (1), x – объясняющая переменная, $a_1 ... a_8$ – параметры (1), идентифицируемые для каждой составляющей в программной среде CurveExpert-1.40 (http://www.curveexpert.net/); A_i – амплитуда (половина), p_i – полупериод.

Вначале выявляется тренд в частном случае, когда $a_2 = 0$, по модели (1)

$$y = aexp(-bx^c) + dx^e \exp(-fx^g), \quad (2)$$

где y – показатель, x – влияющая переменная, $a - g$ – параметры (2) тренда, идентифицируемые в CurveExpert-1.40.

Результаты

В табл. 2 даны параметры модели (1) по каждому метеопараметру. По вычислительным возможностям программной среды CurveExpert-1.40 в табл. 2 приведены значения параметров модели (1) по трем составляющим. Сравнение пяти метеопараметров выполнено по рейтингу убывания коэффициента корреляции. На первом месте находится динамика давления при коэффициенте корреляции 0,8275. на втором месте находится температура (0,7186), на третьем – влажность

воздуха (0,5782), на четвертом – направление ветра (0,4692) и на последнем пятом месте располагается скорость ветра (0,3970). Таким образом, сильные связи (коэффициент корреляции не менее 0,7 для первых трех членов) от влияния времени в часах наблюдаются только для давления и температуры воздуха на высоте 2 м.

Таблица 2

Параметры модели (1) почасовой динамики метеопараметров Гренландии (SUM)

№ i	Асимметричный вейвлет $y_i = a_{1i} x^{a_{2i}} \exp(-a_{3i} x^{a_{4i}}) \cos(\pi x / (a_{5i} + a_{6i} x^{a_{7i}}) - a_{8i})$								Коэф. корр. r
	Амплитуда (половина) колебания				Полупериод колебания			Сдвиг	
	a_{1i}	a_{2i}	a_{3i}	a_{4i}	a_{5i}	a_{6i}	a_{7i}	a_{8i}	
Азимут (направление) ветра φ, град									
1	161,12623	0	0,0053177	1,41165	0	0	0	0	
2	3,23083e-5	4,04773	0,039054	0,99630	0	0	0	0	0,4692
3	–37,73299	4,01358	2,91298	0,45099	0,53053	0,17412	0,83286	0,88269	
4	–6,3333e-22	15,22255	0,0034521	1,93350	4,32782	1,71092	0,0002042	1,69501	0,2818
Скорость ветра v, м/с									
1	12,25209	0	0,35900	0,36540	0	0	0	0	
2	0,030769	1,28017	0,0095100	0,97120	0	0	0	0	0,3970
3	–0,82817	0	–0,021970	0,79886	24,68835	–0,03–567	1,01917	0,29967	
4	–0,0014023	1,90017	0,017220	0,95457	4,80587	0,0042357	1,00712	1,17699	0,3968
Барометрическое давление σ, ГПа									
1	667,8647	0	0,00033189	1,33414	0	0	0	0	
2	0,033757	1,73049	0	0	0	0	0	0	0,8275
3	–8,24403	0	1,47148e-5	1	12,61901	–0,031963	0,85540	0,030875	
4	–1,25588	0	–0,013088	1,02021	8,73301	–0,013407	1,00234	–2,98311	0,4338
5	6,44532	0	0,0075315	1	17,69949	0,42986	0,51694	1,81947	0,5398
6	0,050787	6,46113	0,97924	1,00631	8,13017	0,076984	0,13398	0,71695	0,2933
Температура на высоте 2 м от поверхности почвы t_2, °С									
1	–35,48764	0	–0,0010423	1,34904	0	0	0	0	
2	0,00032195	2,49295	0	0	0	0	0	0	0,7186
3	–5,88404	0,31094	0,00075274	1,84186	0,85320	0,34348	0,78706	4,65880	
4	–6,7790e-11	6,15173	0,0019000	1,59320	6,06003	0	0	–0,053370	0,4580
5	–0,00013663	4,21191	0,13593	1	7,01513	–0,0026116	1,27467	0,70415	0,2031
6	–4,8509e-25	15,90762	0,10076	1,09391	13,87584	–0,0032323	1,32078	–2,76150	0,3925
Влажность воздуха W, %									
1	48,13891	0	0,0015603	1,47060	0	0	0	0	
2	0,10566	1,29333	0	0	0	0	0	0	0,5782
3	–5,67690	0	–,23394e-5	1	16,41669	–0,0004596	1,89319	1,18614	
4	3,90388	0,47124	0,031898	1	3,15429	0,12741	1	4,70004	0,4203

Известно, что годичная динамика [6] может быть квантована на отдельные вейвлеты вплоть до ошибки измерений температуры. Например, для Центральной Англии среднегодовая температуры с 1659 г. была разложена на 188 составляющих. Год является физическим параметром и соответствует одному обороту Земли вокруг Солнца. Поэтому в вейвлетах были выявлены полупериоды колебаний, соответствующие циклам солнечной активности (в среднем 11,3 года) и циклам обращения Солнца вокруг самого себя (в среднем 22,6 года).

Следующим физическим параметром являются сутки, являющиеся оборотами Земли вокруг самого себя. Трехчасовые измерения показали влияние Луны (месяцы, половина месяца и неделя) на температуру воздуха [2; 3].

Из табл. 2 видно, что среди идентифицированных вейвлетов минимальный полупериод 0,54053 сутки получает направление ветра, а максимальное 26,90374 сут. имеет давление воздуха. Тогда можно утверждать, что за 120 сут. (период измерений) на метеопараметры Гренландии сильнейшее влияние оказывают циклы Луны и самой Земли.

Квантование на составляющие по табл. 2 показало, что хорошую квантовую определенность получают давление и температура воздуха. По-видимому, эти метеопараметры при любой длине непрерывного почасового динамического ряда могут быть разложены на множество асимметричных вейвлетов, когда погрешность моделирования станет даже меньше погрешности измерений.

Однако остальные три метеопараметра имеют высокую квантовую неопределенность, так как уже после четвертого члена процесс идентификации сильно затрудняется.

Обсуждение

Каждый из пяти метеопараметров рассмотрим по отдельности.

Направление ветра (рис. 1) изменяется с резкими переходами и порывами. Скорость ветра (рис. 2) за январь-апрель изменяется явно неритмично, видны резкие порывы ветра через определенные периоды спокойного течения воздушных масс.

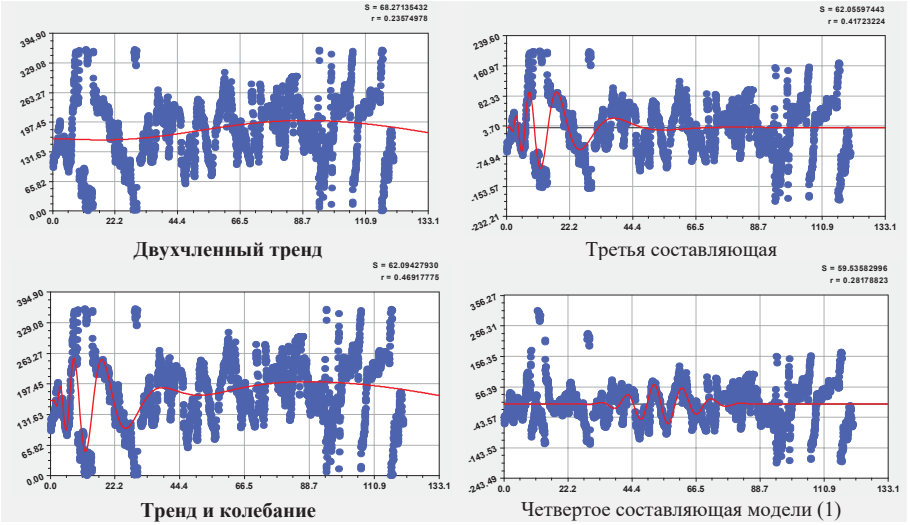


Рис. 1. Графики изменения направления ветра за 120 сут. в Гренландии (в правом верхнем углу: S – стандартное отклонение; r – коэффициент корреляции)

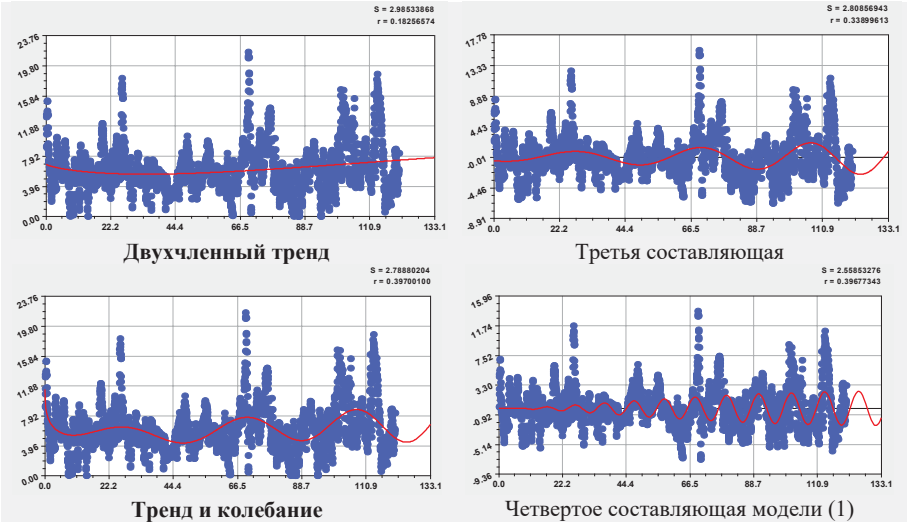


Рис. 2. Графики изменения скорости ветра за 120 сут. в Гренландии

Наиболее четко в виде ломанной линии происходит изменение барометрического давления (рис. 3), такая плавность динамического ряда позволяет разложить процесс динамики давления на множество квантов поведения в виде асимметричных вейвлетов. Из-за такой плавности первые три члена модели (1) дали наибольший коэффициент корреляции. Чуть больше неровностей имеет график изменения температуры воздуха (рис. 4).

При этом температура и влажность воздуха (рис. 5) получили разрывы в ряду из-за отсутствия данных измерений. Для вейвлет анализа всегда необходимы динамические рады без пропусков. Такую непрерывность имеет в динамике барометрическое давление.

Первый член из табл. 2 у всех пяти факторов является модифицированным нами законом Мандельброта $y = a\exp(-bx)$ (в физике) при условии $c \neq 1$. Этот же закон экспоненциального изменения известен как закон Лапласа (в математике), Перла-Ципфа (в биологии) и Парето (в эконометрике). Второй член у давления, температуры и влажности вместо биотехнического закона [1] и-за исключения торможения получил вид степенной функции.

У четырехчленной модели изменения азимута ветра после тренда два колебания получили амплитуду колебаний в виде биотехнического закона. Поэтому направление ветра, по-видимому, не имеет бесконечной мерности длины вейвлета. Колебания являются конечномерными. Аналогично динамика температуры, из-за короткой длины ряда в 120 сут., получила амплитуды колебаний также по биотехническому закону.

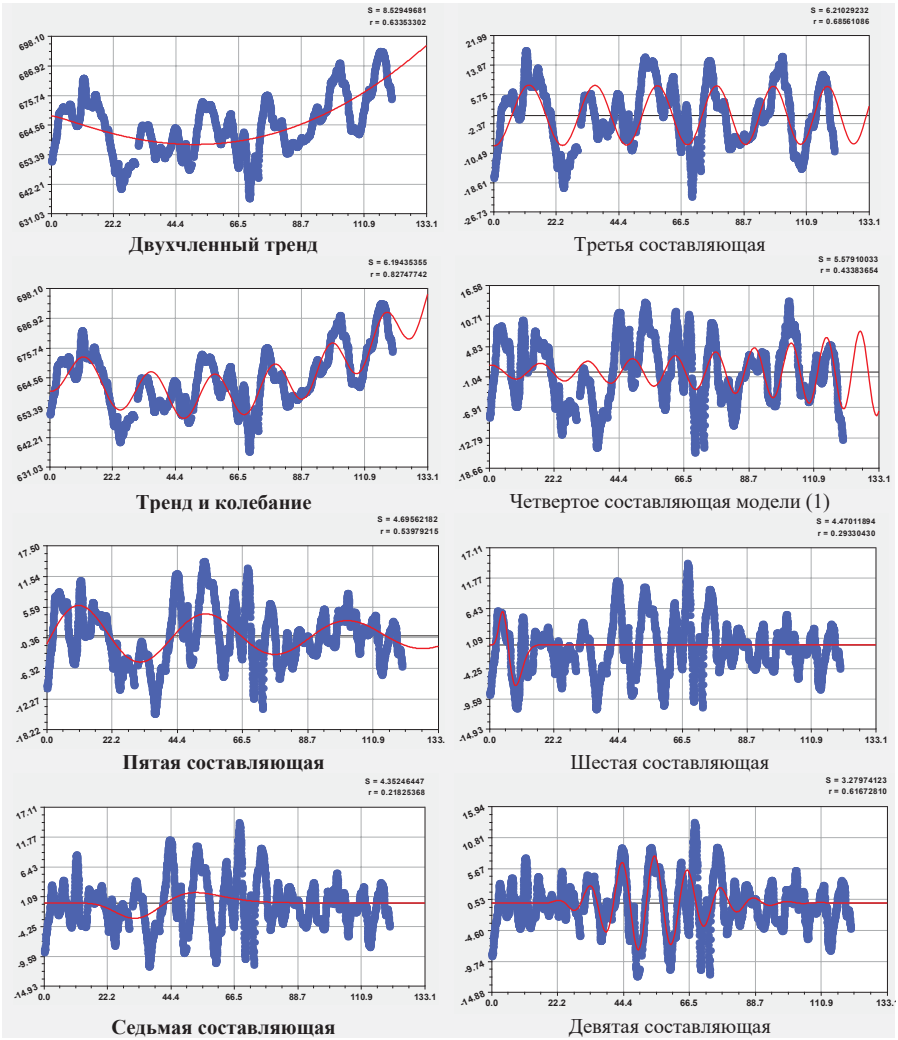


Рис. 3. Графики динамики барометрического давления за 120 сут. в Гренландии

Остальные три метеопараметра (скорость ветра, давление и влажность) получили некоторые колебания по амплитуде в виде экспоненциальных формул. Поэтому они продолжаются до начала отсчета времени и после завершения периода измерений. Тогда такие колебания относятся к бесконечномерным вейвлетам. Например, составляющие 3, 4 и 5 динамики давления являются бесконечномерными вейвлетами, из которых колебания 3 и 4 имеют амплитуду по закону Мандельброта, а вейвлет 4 имеет амплитуду по модифицированному нами закону Мандельброта.

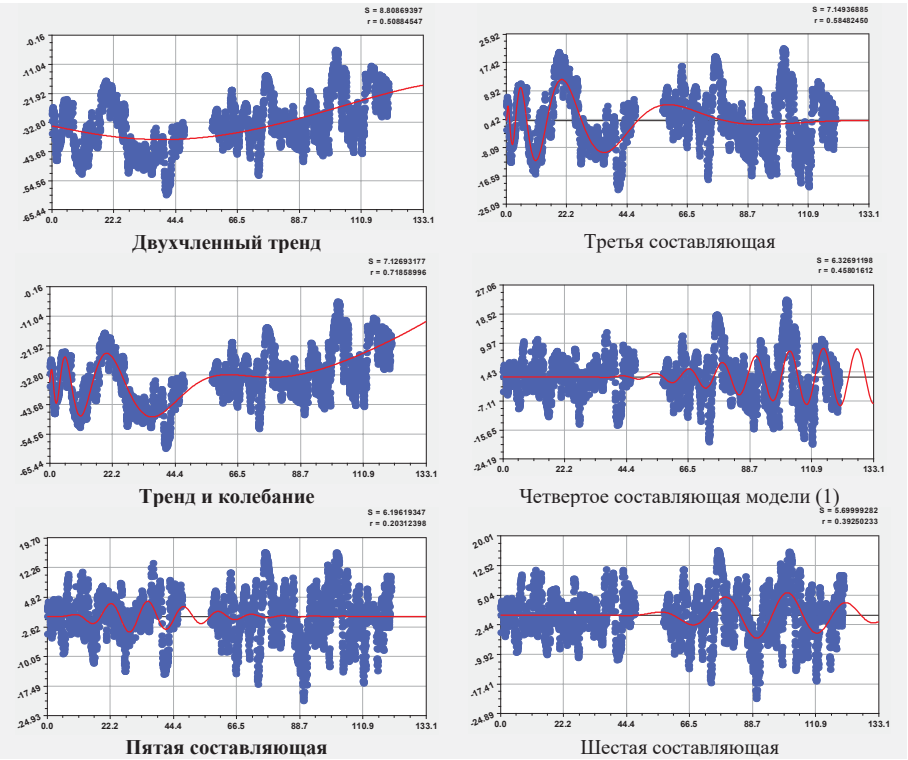


Рис. 4. Графики динамики температуры на высоте 2 м в Гренландии

Полупериод колебания постоянен только для вейвлета 4 изменения температуры и равен 6,06003 сут. Тогда период колебания за 120 сут. также будет постоянным и равным $2 \times 6{,}06003 \approx 12{,}12$ сут. Все остальные вейвлеты получили переменные полупериоды, которые с момента отсчета времени уменьшаются или, наоборот, нарастают.

Отрицательный знак перед первым параметром модели (1) показывает направленность составляющей по вектору роста (знак +) или снижению значений (знак -) метеопараметра. Например, составляющая 3 влажности ориентирована против роста влажности, а составляющая 4, наоборот, способствует увеличению влажности.

Таким образом, почасовая динамика показала высокую динамичность метеопараметров. По-видимому, в сравнении одним часом возможна и меньшая единица времени для установления минимальной цикличности у пяти приведенных выше метеопараметров.

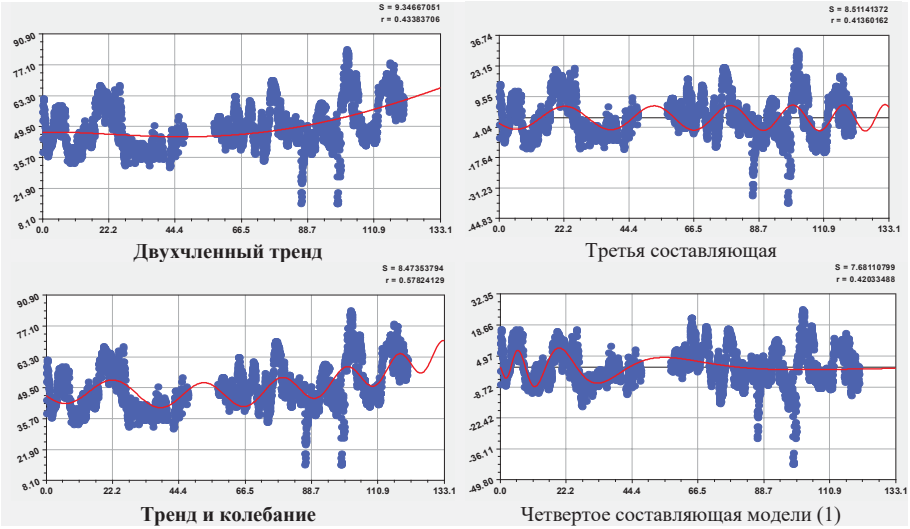


Рис. 5. Графики динамики влажности воздуха за 120 сут. в Гренландии

Заключение

Часовая периодичность измерений метеопараметров оказалась достаточной для выявления закономерностей методом идентификации асимметричных вейвлетов. Возможности памяти программной среды CurveExpert-1.40 при максимальном количестве точек до 3300 позволили выполнить вейвлет анализ динамики направления и скорости ветра, давления, температуры и влажности воздуха по 2880 почасовым данным.

Для обработки динамических рядов метеопараметров намного большей длины необходимо создать специализированную программную среду по нашим сценариям статистического моделирования. Необходимо одновременно идентифицировать однофакторную модель (1) по не менее 100 составляющих с не менее 1000 параметрами модели. При этом количество строк массива исходных данных пары факторов должно быть не менее 10^6.

Данные метеопараметров станции Summit, Greenland (SUM) по 2880 измерениям с 2016.01.01.00 по 2016.04.30.23 после идентификации асимметричным вейвлетом дали следующий рейтинг факторов по убыванию коэффициента корреляции у трех первых составляющих общей модели: 1) барометрическое давление (0,8275); 2) температура воздуха на высотке 2м от поверхности почвы (0,7186); 3) влажность воздуха (0,5782); 4) направление ветра (0,4692); 5) скорость ветра (0,3970). Динамические почасовые ряды давления и температуры получили адекватность на уровне «сильная связь» с коэффициентом корреляции более 0,7.

Наиболее четко в виде ломанной линии происходит изменение барометрического давления, и такая плавность динамического ряда позволяет разложить процесс динамики давления на множество квантов поведения в виде асимметричных вейвлетов. Из-за такой плавности первые три члена модели (1) дали

наибольший коэффициент корреляции 0,8275. При этом этот ряд не имеет разрывов и поэтому вейвлет анализ может быть доведен до последнего члена, обеспечивающего погрешность вейвлет анализа меньше погрешности измерений 0,01 ГПа. Тогда получится, что барометрическое давление имеет квантовую определенность.

Нами было доказано, что температура воздуха также имеет полную квантовую определенность. Однако динамический ряд температуры Гренландии имеет разрыв в данных. Поэтому несколько снижается уровень квантовой определенности. Остальные три метеопараметра получают коэффициенты корреляции менее 0,7. Набольшую квантовую неопределенность из них получает скорость ветра.

Цикличность процесса изменения погоды и климата зависит от полупериода колебания. В отличие от классических симметричных вейвлетов наши асимметричные вейвлеты имеют не только переменную амплитуду возбуждения, но и полупериод колебательной адаптации динамики поведения атмосферы к внешним условиям. Из табл. 2 видно, что среди идентифицированных вейвлетов минимальный полупериод 0,54053 сут. получает направление ветра, а максимальное 26,90374 сут. имеет барометрическое давление воздуха. Тогда можно утверждать, что за 120 сут. (период измерений) на метеопараметры Гренландии сильнейшее влияние оказывают циклы обращения Луна и самой Земли.

Квантование метеопараметров Гренландии на отдельные составляющие показало, что на земном шаре необходимо по многим метеостанциям, имеющим добротные измерения, провести полный вейвлет анализ до возможности достижения погрешности измерений. Результаты такой работы позволят выявить механизмы колебательной адаптации атмосферы в конкретных геодезических точках Земли, а также выявить сдвиги на каждой метеостанции в сторону глобального потепления или глобального похолодания.

Список литературы

1. *Мазуркин П. М.* Особенности динамики температуры приземного воздуха Арктики на острове Тикси и в Мурманске // Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России : материалы III Всероссийской научно-практической конференции, 25–27 ноября 2020 г. Иркутск : Изд-во ИГУ, 2020. С. 78–89.

2. *Мазуркин П. М., Кудряшова А. И.* Кванты поведения метеопараметров по трехчасовым измерениям в вегетационный период березы повислой // American Scientific Journal. 2019. № (24). С. 59–75.

3. *Мазуркин П. М., Кудряшова А. И.* Кванты поведения метеопараметров по трехчасовым измерениям между декабрьскими солнцестояниями // American Scientific Journal. 2019. № (24). С. 43–58.

4. *Мазуркин П. М., Кудряшова А. И.* Городская фитометеорология: влияние суммы температур на онтогенез листьев березы повислой // Географический вестник = Geographical bulletin. 2019. № 4(51). С. 45–58. https://doi.org/10.17072/2079-7877-2019-4-45-58

5. *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. Iss. 11. P. 31081–31098.

6. *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. Vol. 11 (09). P. 7315–7324. https://doi.org/https://doi.org/10.24941/ijcr.36626.09.2019

7. *Mazurkin P. M., Kudryashova A. I.* Method of measurement of dynamics of growth of leaves of the tree in clean ecological conditions // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM. 2018. Vol. 18 (5.1). P. 517–524. https://doi.org/10.5593/sgem2018/5.1/S20.067

8. Meteorological Measurements, in CMDL Summary Report / T. K. Mefford, M. Bieniulis, B. Halter, J. Peterson. 1994–1995. N 23. 1996. P. 17.

УДК 551.524.32+551.4.06: 911.52

Взаимные влияния метеопараметров Гренландии по часовым измерениям

П. М. Мазуркин (kaf_po@mail.ru)

Поволжский государственный технологический университет, Йошкар-Ола

Аннотация. По динамическим рядам почасовых измерений в Гренландии, без учета времени, сопоставлением пяти метеопараметров выявлены закономерности с включением, кроме тренда, вейвлетов. Такой метод факторного анализа позволяет по выявленным закономерностям рассчитать теоретические пределы квантов поведения погоды. После факторного анализа пяти метеопараметров Гренландии из сумм коэффициентов корреляции по строкам и столбцам видно, что оба рейтинга метеопараметров одинаковы: первое место занимает температура воздуха на высоте 2 м; на втором месте находится влажность воздуха; на третьем месте – барометрическое давление. Метод анализа взаимных влияний позволяет рассчитать предельные условия изменения погоды, а затем прогнозировать метеопараметры по динамике. В широком смысле для факторного анализа дополнительно можно в систему метеопараметров включить и другие параметры (например, природные, экологические, антропогенные).

Ключевые слова: Гренландия, метеопараметры, взаимное влияние, вейвлет анализ.

Введение

Основным разделом метеорологии является физика атмосферы, к основным разделам физики атмосферы относится физика приземного слоя воздуха. Например, по данным [1], вся толща атмосферы влияет на погрешности геодезических измерений.

Основной прием синоптического метода – сопоставление характеристик погоды: 1) значения одной величины в разных пунктах на разных высотах в один момент времени; 2) значения разных метеорологических величин в одном или разных пунктах на разных высотах в один момент времени; 3) сопоставление одних или различных величин в последовательные моменты времени (анализ эволюции) [2].

Данная статья относится к сопоставлению метеопараметров (параметр – это показатель, характеризующий систему) в динамике эволюции в последовательные моменты времени. Цель статьи – показать закономерности взаимовлияния пяти параметров (направление ветра, скорость ветра, давление, температура и влажность воздуха) по методу факторного анализа [3]. В отличие от [3] коэффициенты корреляции идентификации динамических рядов в зависимости от времени ставятся в диагональных клетках корреляционной матрицы.

Синоптическая метеорология (от греч. synoptikos – способный все обозреть), раздел метеорологии, изучающий атмосферные процессы, определяющие условия погоды и их изменения с целью разработки методов прогноза погоды [4].

Основной фактический материал метеорология получает путем наблюдений в природных условиях. Существенная особенность метеорологических явлений – их пространственно-временная изменчивость. Это вызывает необходимость такой организации наблюдений, которая позволит своевременно отметить возникновение явления и проследить за ходом его развития [5]. Но развитие метеорологических явлений всегда измеряется дискретно. В итоге условная непрерывность наблюдений во времени (через заданные интервалы времени) и пространстве (через расстояния между метеостанциями) достигается путем организации плотной сети наблюдательных пунктов, в которых регулярно проводятся наблюдения по единой общей программе с помощью однотипных приборов.

Существующая методология прогноза выполняется на основе данных множества метеостанций, и эти данные включаются в сложные дифференциальные уравнения. Мы же предлагаем другой путь прогнозирования по каждой метеостанции по динамическим рядам метеопараметров [6]. После выявления закономерностей динамики метеопараметров можно провести факторный анализ, причем с учетом и не метеорологических параметров [7; 8]. Затем по множеству метеостанций снова можно будет рассматривать вихревые функции на будущее.

Такой подход позволит объединить существующую и предлагаемую методологии.

Материалы и методы

Данные от метеостанции *Summit, Greenland (SUM)* были получены с сайта http://www.esrl.noaa.gov. Первое измерение относится к 2016.01.01.00, а последнее 2880-я точка – 2016.04.30.23.

Время вычисляли по формуле τ = январь-1 + сутки-1 + час/24 для января. Для февраля применяли формулу 31 + сутки-1 + час/24, для марта 31 + сутки-1 + час/24 и для апреля 91 + сутки-1 + час/24. Всего получилось 121 сутки. По ним выявили закономерности почасовой динамики.

При этом время в факторном анализе для выявления закономерностей между метеопараметрами исключается (табл. 1).

Таблица 1

Данные метеопараметров станции Summit, Greenland (SUM) по 2880 измерениям

Азимут ветра φ, град.	Скорость ветра *v*, м/с	Баром. давлен., σ ГПа	Температура на 2 м t_2, ^{0}C	Влажность *W*, %
162	9,4	647,04	-33,4	50
157	9,3	648,08	-36	48
152	8,9	648,92	-38,1	46
…	…	…	…	…
111	5,9	675,02	-20,8	55
117	6,1	674,64	-21,7	59
120	8,3	674,24	-21	62

Колебания (вейвлет сигналы) записываются формулой [3; 6–8] вида:

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

где y – показатель, i – номер составляющей (1), x – объясняющая переменная, $a_1 ... a_8$ – параметры (1), идентифицируемые для каждой составляющей в программной среде CurveExpert-1.40 (http://www.curveexpert.net/); A_i – амплитуда (половина), p_i – полупериод. При $a_2 = 0$ получаем тренд:

$$y = aexp(-bx^c) + dx^e \exp(-fx^g), \quad (2)$$

где y – показатель, x – влияющая переменная, $a - g$ – параметры (2) тренда, идентифицируемые в CurveExpert-1.40.

Результаты парных взаимодействий

В табл. 2 приведена полная корреляционная матрица и даны два рейтинга метеопараметров: а) как влияющих переменных (по строкам); б) как зависимых показателей, т. е. критериев оценки (по столбцам).

Таблица 2

Корреляционная матрица и рейтинг метеопараметров станции Summit, Greenland (SUM)

Влияющие переменные (параметры x)	Зависимые факторы (показатели y)					Сумма	Место
	φ, град.	v, м/с	σ, ГПа	t_2, ^{0}C	W, %	Σr	I_x
Азимут ветра φ , град	*0,4692*	0,3013*	0,2822	0,2445	0,2115	1,5087	5
Скорость ветра v , м/с	0,2763	*0,3970*	0,1970	0,5111	0,5347	1,9161	4
Барометр. давление σ , ГПа	0,1157	0,3746*	*0,8275*	0,5441*	0,5164*	2,3783	3
Температура на 2 м t_2, ^{0}C	0,2260	0,5049	0,5517*	*0,7186*	0,9169*	2,9181	1
Влажность воздуха W , %	0,2019	0,4911	0,4945	0,9595*	*0,5782*	2,7252	2
Сумма коэфф. коррел. Σr	1,2891	2,0689	2,3529	2,9778	2,7577	11,4464	–
Рейтинг показателей I_y	5	4	3	1	2	–	0,4579

Примечание: *Дополнительно к тренду выявлены не менее одного вейвлет сигнала.

В диагональных клетках помещены коэффициенты корреляции трех первых членов модели (1) закономерности динамики по 120 суткам (если система параметров составлена по объектам без учета времени (в некотором срезе времени), то в этих клетках размещаются адекватность закономерностей у ранговых распределений).

Из сумм коэффициентов корреляции по строкам и столбцам видно, что оба рейтинга одинаковы: первое место занимает температура воздуха на высоте 2 м; на втором месте находится влажность воздуха; и на третьем месте – барометрическое давление.

Коэффициент коррелятивной вариации свойств физического объекта исследования в виде погоды Гренландии за 120 сут. января – апреля 2016 г. равен отношению общей суммы коэффициентов корреляции к квадрату от количества факторов. По данным таблицы 2 коэффициент коррелятивной вариации будет равен 11,4464/ 5^2 = 0,4579. Он дает оценку функциональной связности всех элементов системы. Критерий позволяет сравнивать между собой разнородные системы. При этом этот коэффициент 0,4578 показывает слабую функциональную

связность между пятью метеопараметрами, так как средневзвешенный коэффициент корреляции находится в интервале адекватности 0,3–0,5 и характеризует уровень «слабая связь».

По-видимому, такая слабая связь в системе метеопараметров указывает на то, что погода и климат в целом являются весьма устойчивыми, но высоко динамичными, системами. Если бы коэффициент коррелятивной вариации для системы был бы более 0,9, то происходила бы быстрая разбалансировки как погоды, так и климата, на поверхности Земли.

Корреляционная матрица парных взаимодействий между пятью метеопараметрами приведена в табл. 3.

Таблица 3

Корреляционная матрица связей между метеопараметрами станции SUM

Влияющие переменные (параметры x)	Зависимые факторы (показатели y)				
	φ, град	v, м/с	σ, ГПа	t_2, °С	W, %
Азимут ветра φ, град		0,3013*	0,2822	0,2445	0,2115
Скорость ветра v, м/с	0,2763		0,1970	0,5111	0,5347
Барометр, давление σ, ГПа	0,1157	0,3746*		0,5441*	0,5164*
Температура на 2 м t_2, ^{0}С	0,2260	0,5049	0,5517*		0,9169*
Влажность воздуха W, %	0,2019	0,4911	0,4945	0,9595*	

Примечание: *Дополнительно к тренду выявлены не менее одного вейвлет сигнала.

Как видно из табл. 3, бинарные отношения между метеопараметрами в количестве $5^2–5 = 20$ шт. разделяются на две части: а) кванты взаимного влияния (13 шт.) характеризуются только трендами (2), поэтому эти кванты поведения погоды Гренландии имеют низкий уровень квантовой определенности: б) кванты поведения погоды дополнительно к тренду (7 шт.) идентифицируются одним или несколькими асимметрическими вейвлетами по модели (1), в связи с чем они получают более высокую квантовую определенность. Динамика поведения погоды Гренландии по температуре и барометрическому давлению получают полную квантовую определенность в поведении из-за того, что их динамические ряды вполне могут быть разложены на множество вейвлетов до погрешности измерений.

Рассмотрим каждую группу по убыванию коэффициента корреляции.

Обсуждение взаимных влияний метеопараметров на уровне тренда

Двухчленные тренды приведены в табл. 4. Переменная является влияющим фактором, а показатель – зависимым метеорологическим фактором. Модель тренда содержит две составляющие: 1) первый член является экспоненциальным законом, а второй – биотехническим законом проф. П. М. Мазуркина [3; 6–8]. В частном случае (например, первая строка в табл. 4 влияния скорости ветра на влажность воздуха) экспоненциальный закон превращается в общеизвестный закон Мандельброта (в физике), Лапласа (в математике), Перла-Ципфа (в биологии) и Парето (в эконометрике). Такой закон Мандельброта имеют три парных отношения.

Таблица 4

Параметры модели тренда (2) взаимовлияния метеопараметров Гренландии

Переменная x	Показатель y	Двухчленный тренд $y = aexp(-bx^c) + dx^e\exp(-fx^g)$							Коэф. корр. r
		Экспоненциальный закон			Биотехнический закон				
		a	b	c	d	e	f	g	
v , м/с	W , %	45,85472	–0,0015446	1	4,65824e-8	11,59681	0,68744	1,03830	0,5347
v , м/с	t_2 , ^{0}C	–34,59265	–0,052205	0,96458	0,26905	2,08356	5,32676e-5	3,21710	0,5111
t_2 , ^{0}C*	v , м/с	5,63538	0,0063592	1,25576	0,00018307	2,65547	0	0	0,5049
W , %	σ , ГПа	689,0824	0,0031972	1,20303	1,32100	1,25461	0	0	0,4945
W , %	v , м/с	5,04171	0,0015256	1,81949	0,0054557	1,75156	0	0	0,4911
φ , град	σ , ГПа	679,8938	0,00065457	1,10078	0,038507	1,57608	0,00060672	1,17324	0,2822
v , м/с	φ , град	212,90038	0,0017877	1	-0,0012583	10,88583	1,50401	1	0,2763
φ , град	t_2 , ^{0}C	–33,24144	–0,0080599	0,91056	0,012851	1,58907	0	0	0,2445
t_2 , ^{0}C*	φ , град	140,20696	–0,0058259	1,35538	–0,028281	2,32296	0	0	0,2260
φ , град	W , %	43,66445	0,00018905	1,83610	0,036322	1,55874	0,0035599	1,07595	0,2115
W , %	φ , град	6970,3051	0,83305	0,49273	11,21023	0,68908	0	0	0,2019
v , м/с	σ , ГПа	666,09206	0,00036494	1	1,61886e-16	24,05184	1,74731	1	0,1970
σ , ГПа	φ , град	0	0	0	0,033080	1,32496	0	0	0,1157

Примечание. *Принимается для температуры $x := t_2 + 70$.

На рис. 1 показаны первые шесть трендов, у трех из которых коэффициент корреляции попадает на уровень адекватности «средняя связь» (первая три строки) и «слабая связь» (четвертая и пятая строки) в интервале коэффициента корреляции от 0,3 до 0,5.

Из первого графика видно, что влажность воздуха с возрастанием скорости ветра медленно увеличивается, при этом получая максимум возбуждения по второму члену тренда в интервале от 14 до 16 м/с. По аналогичной конструкции формулы (начиная с отрицательного значения температуры –34,6 ºС при нулевом значении скорости ветра) изменяется влияние скорости ветра на температуру воздуха. По графику на рис. 1 максимум температуры –22 ºС достигается также в интервале скорости ветра от 14 до 16 м/с.

С возрастанием температуры воздуха по первому члену медленно снижается скорость ветра, однако по второму члену эта скорость резко увеличивается по степенной функции.

Первый член показывает рост температуры с –14,11 ºС при нулевой влажности (абсолютная сушь). Одновременно по второму члену в виде степенной функции происходит резкое увеличение температуры. В итоге, как видно из первого рисунка на рис. 1, температура снижается до влажности 27–28 %, затем увеличивается до влажности 78–79 %. После роста влажности выше 80 % температура воздуха снова снижается.

При влажности 0–60 % быстро угасает колебание с начальным полупериодом 33,5 % и начальной температурой в 129,8 ºС при нулевой влажности. Это означает, что при абсолютной сухости (w = 0 %) поверхность Гренландии, по-видимому, как и на Венере, по атмосфере станет очень горячей [6]. Вода при температуре 129,8 > 100 ºС выкипит из океанов.

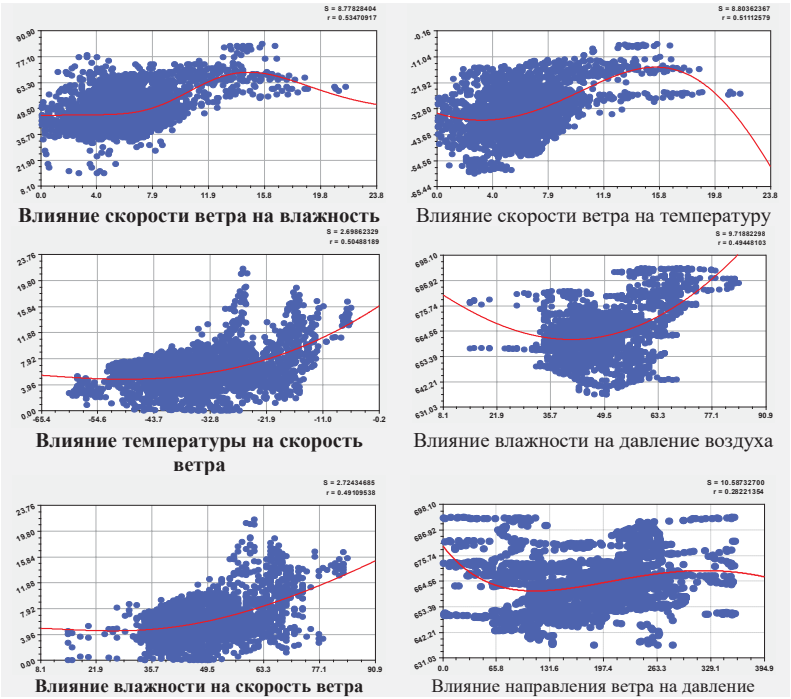


Рис. 1. Графики взаимного влияния за 120 сут. в Гренландии по трендам (в правом верхнем углу: S – стандартное отклонение; r – коэффициент корреляции)

Влияния метеопараметров с вейвлетами

Получены разные формулы (табл. 5).

На рис. 2 приведены составляющие модели (1) влияния влажности на температуру.

Такой сценарий может вполне произойти, так как три члена вместе дают коэффициент корреляции 0,9595 (сверхсильная связь при большем уровня 0,95).

Однако четвертая составляющая из-за отрицательного знака направлена против роста температуры воздуха. Поэтому для прогноза нужны закономерности влияния влажности на температуры по многим метеостанциям Земли.

Пятая составляющая показывает резкое увеличение температуры после влажности 60 %. При этом все три асимметричных вейвлета показывают учащение процесса влияния влажности воздуха (полупериод снижается от 33,5, 18,5 и 29,2 % влажности).

Из-за антропогенного воздействия многие ученые предсказывают глобальное потепление, включая и Гренландию (если не остановится течение Гольфстрима). На рис. 3 приведены графики влияния температуры воздуха на влажность в приземном слое воздуха.

Таблица 5

Параметры модели вейвлета (1) взаимовлияния метеопараметров Гренландии

Номер i	Асимметричный вейвлет $y_i = a_{1i}x^{a_{2i}}\exp(-a_{3i}x^{a_{4i}})\cos(\pi x/(a_{5i}+a_{6i}x^{a_{7i}})-a_{8i})$								Коэф. корр. r
	Амплитуда (половина) колебания				Полупериод колебания			Сдвиг	
	a_{1i}	a_{2i}	a_{3i}	a_{4i}	a_{5i}	a_{6i}	a_{7i}	a_{8i}	
1	–14,11277	0	–0,22104	0,63588	0	0	0	0	
2	0,020427	2,30553	0	0	0	0	0	0	0,9595
3	129,79802	0	0,067332	1,09770	33,50652	–0,39168	0,98113	2,90965	
4	–6,67746e-5	6,38985	0,36017	1,00008	18,50791	–0,25676	1,00013	1,14876	0,2181
5	0,0012747	0	–0,091598	1,02247	29,22596	–0,10688	1,00810	–2,35850	0,1915
Влияние температуры на высоте 2 м на влажность воздуха*									
1	28,59413	0	0	0	0	0	0	0	
2	0,036661	1,74211	0	0	0	0	0	0	0,9169
3	1,73690e-11	4,04656	–0,16349	0,90517	9,38855	–0,012598	0,99868	5,87729	
Влияние температуры на высоте 2 м на барометрическое давление воздуха*									
1	694,25131	0	0	0	0	0	0	0	
2	0,99741	1	0	0	0	0	0	0	0,5517
3	–56,07056	0	0,060416	1	66,52355	–0,77625	1	–1,64216	
Влияние барометрического давления на температуру воздуха на высоте 2 м									
1	–90,70852	0	0	0	0	0	0	0	
2	0,015637	0,60977	–0,0022983	1,15779	0	0	0	0	0,5441
3	–3,46089e5	3,60855	0,045334	1,02292	21,92148	0,00085031	1,20680	–1,13180	
Влияние барометрического давления на влажность воздуха									
1	1,01063e-14	5,56118	0	0	0	0	0	0	0,5164
2	1,22501e7	3,22561	0,054867	0,99807	57,58852	–0,027520	1,00118	0,069627	
Влияние барометрического давления на скорость ветра									
1	2,08496e-5	1,94628	0	0	0	0	0	0	0,3746
2	–2,1170e-10	3,50213	0	0	21,96442	–0,0032464	1,00259	4,60972	
Влияние направления ветра на скорость ветра									
1	5,04698	0	–0,0050526	0,95825	0	0	0	0	
2	–5,06429e-5	2,17077	0	0	0	0	0	0	0,3013
3	–0,00029515	1,55841	0	0	138,06074	–3,84958	0,47143	–0,027250	

Примечание. *Принимается для температуры $x := t_2 + 70$.

При температуре –70 ºС наблюдается постоянный член при влажности 28,6 %. С дальнейшим увеличением температуры происходит рост влажности по степенной функции. И только с температуры – 24 ºС начинается резкое колебание влажности (амплитуда изменяется по аномальному биотехническому закону). Поэтому с потеплением в Гренландии следует ожидать турбулентное изменение влажности воздуха.

Влияние температуры на давление воздуха показано на рис. 4.

По тренду при температуре –70 ºС давление достигает 694,25 ГПа. Колебание при этом убывает по амплитуде с –56,07 ГПа. Тогда в начале отсчета температуры давление равно 694,25–56,07 = 638,18 ГПа. Полупериод в начале отсчета равен 66,52 ºС.

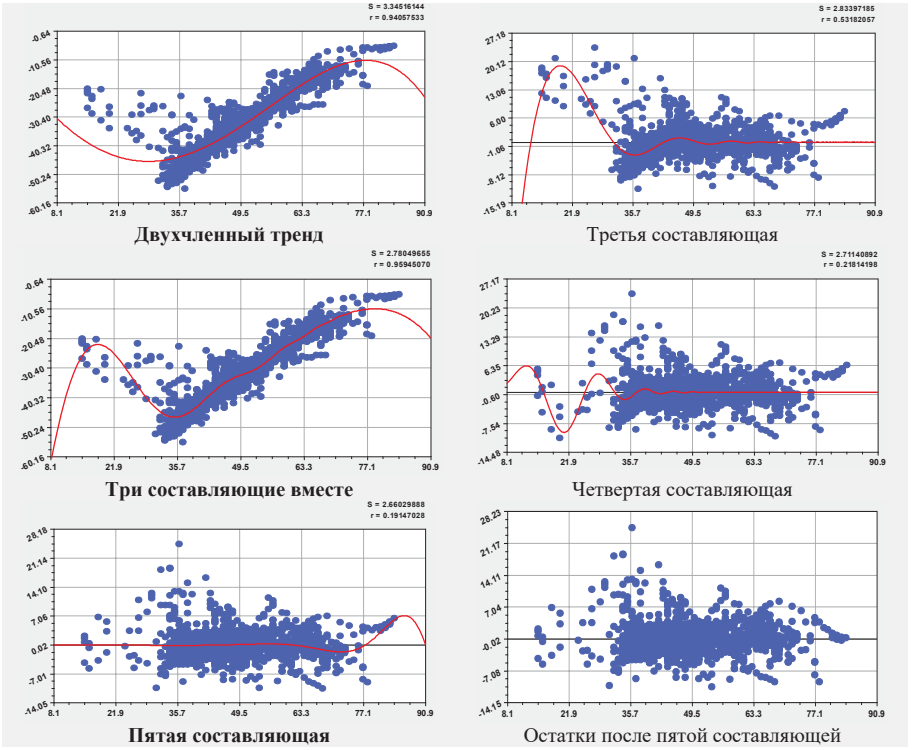


Рис. 2. Графики влияния влажности на температуру в Гренландии

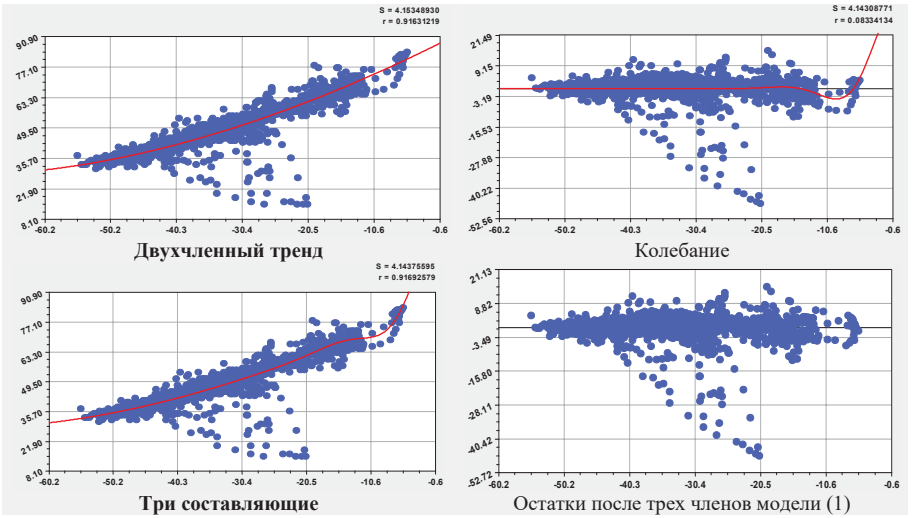


Рис. 3. Графики влияния температуры на влажность в Гренландии

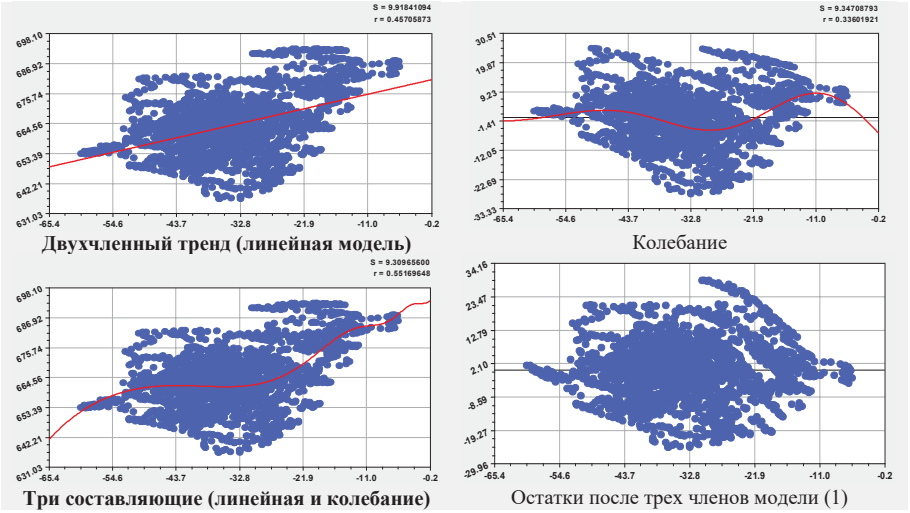


Рис. 4. Графики влияния температуры на давление в Гренландии

По обратной закономерности (см. табл. 5) теоретически при нулевом давлении воздуха получается минимум температуры –90,7 ºС. при нулевом давлении по следующей закономерности получаем почти нулевую влажность из-за отсутствия в атмосфере Земли воздуха. Скорость ветра при этом будет также близко к нулю.

Таким образом, даже на коротких по 120 суткам длине почасовых рядов метеопараметров можно получить закономерности парных отношений, по которым затем вполне можно вычислять теоретические пределы влияния метеопараметров друг на друга.

Заключение

По динамическим рядам почасовых измерений Гренландии, без учета параметра времени, можно сопоставлением выявлять сложные закономерности с включением асимметричных вейвлетов. Такой метод факторного анализа позволяет по выявленным закономерностям рассчитать теоретические пределы квантов поведения погоды.

Мы предлагаем прогнозировать параметры на каждой метеостанции. После выявления закономерностей динамики метеопараметров можно провести прогнозирование на горизонт прогноза, равный основанию прогноза. Затем следует провести факторный анализ и применить существующую методологию вихревых функций. Причем для факторного анализа дополнительно учесть и другие не метеорологические параметры (например, экологические).

После факторного анализа пяти метеопараметров Гренландии из сумм коэффициентов корреляции по строкам и столбцам видно, что оба рейтинга ме-

теопараметров одинаковы: первое место занимает температура воздуха на высоте 2 м; на втором месте находится влажность воздуха; и на третьем месте – барометрическое давление.

Список литературы

1. *Вшивкова О. В.* Физика Земли и атмосферы. Влияние атмосферы на результаты геодезических измерений : учеб. пособие. М. : МИИГАиК, 2017. 88 с.

2. *Гущина Д. Ю.* Синоптическая метеорология. Ч. 1. Лекции ученых МГУ. Геофак МГУ. М. : Фонд «Вольное дело». URL: synoptic-meteorology-M.pdf (дата обращения: 06.10.2021).

3. *Мазуркин П.М.* Факторный анализ субъектов Сибирского округа по 40 параметрам жизни населения // Биосферное хозяйство: теория и практика. 2021. № 5 (35). С. 17–39.

4. *Морина О. М., Дербенева А. М., Морин В. А.* Метеорология и климатология : учеб. пособие. Хабаровск : Изд-во ТОГУ, 2013. 67 с.

5. *Толмачева Н. И.* Методы и средства гидрометеорологических измерений (для метеорологов) : учебное пособие. Пермь : Пермский ГУ, 2011. 223 с.

6. *Mazurkin P. M.* Quantum Biophysics of the Atmosphere: Factor Analysis of the Annual Dynamics of Maximum, Minimum and Average Temperatures from 1879 to 2017 to Hadley English Temperature Center (Hadcet) // Journal of Environmental & Earth Sciences. 2021. Vol. 03, Iss. 01. P. 29–40. https://doi.org/10.30564/jees.v3i1.2489

7. *Mazurkin P. M.* Factor analysis of the parameters of samples of the steppe soil and grass of Mongolia and Inland Mongolia of China on the eastern transect of the Eurasian steppe // Journal of Geological Research. 2021. Vol. 03, Iss. 01. P. 1–10. https://doi.org/10.30564/jgr.v3i1.2520

8. *Mazurkin P. M., Kudryashova A. I.* Quantum meteorology: factor analysis of the three-hour measurements of four meteorological parameters for the years 2012–2018 // Journal of Xi'an University of Architecture & Technology. 2019. Vol. 11, Iss. 12. P. 608–625.

УДК 551.510.53

Ранние внезапные стратосферные потепления

А. А. Окуличева (arina-okulicheva@mail.ru), Т. С. Ермакова (taalika@mail.ru)
Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург

Аннотация. Внезапные стратосферные потепления (ВСП) – это сильные и внезапные повышения температуры в полярной и субполярной стратосфере зимой, иногда на 50° и более, продолжающиеся в течение нескольких суток или недель [1]. Потепление влияет на погоду в стратосфере, на стратосферные процессы и опосредовано на погоду в тропосфере, в том числе и средних широт. В зависимости от степени развития и длительности, ВСП классифицируют. Всемирная метеорологическая организация определяет канадские ВСП (КВСП), как ВСП, которые происходят в начале зимы в стратосфере Северного Полушария (СП), обычно в середине ноября или в начала декабря. В научных статьях упоминается только классификация КВСП, но остаются открытыми вопросы: наблюдаются ли они в последние годы и являются ли значимыми для динамики стратосферы. Целью исследования является определение частоты образования КВСП и анализ их проявления в зимней стратосфере СП.

Ключевые слова: внезапные стратосферные потепления.

Использовались данные двух реанализов: JRA-55 [2] и MERRA-2 [3]. Японский реанализ охватывает период с 1958 г., когда начали проводиться глобальные регулярные радиозондовые наблюдения. MERRA-2 – это глобальный атмосферный реанализ, созданный Глобальным управлением моделирования и ассимиляции NASA (GMAO). Он охватывает эпоху с 1980 г. по настоящее время.

Анализ построенных аномалий температуры и отклонений зональной компоненты ветра в зимний период времени с 1958 по 2019 г. показал, что КВСП наблюдаются в каждом десятилетии от 2 случаев и более. В научных публикациях, посвященных исследованию ВСП, отмечается, что частота ВСП (классических) снижена в 1990–1999 гг. [4]. Очевидно, что авторы не учитывают наличие канадских потеплений, однако по полученным результатам (рис. 1) именно частота КВСП увеличилась в это десятилетие.

Рис. 1. Частота канадских ВСП в ноябре

Потепление фиксируют, когда отклонение средне-зональной составляющей ветра имеет отрицательный знак, ее традиционно смотрят на средних широтах на высоте 40–50 км, а аномалию температуры в полярной области на 30 км. Климатическая составляющая рассчитана как среднее значение с 1958 по 2015 г.

По результатам исследования было выявлено, если зональная компонента имеет отрицательное значение продолжительное время на высотах стратосферы во время канадского потепления, то последующее ВСП (классическое) будет наблюдаться, скорее всего, с расщеплением полярного вихря. Например, в ноябре 2000 г. (рис. 2) зональная компонента была отрицательной с 12 ноября по 3 декабря, тогда как аномалия температуры наблюдалась не столь долго. При анализе каждой зимы с 1958 г. было обнаружено, что КВСП фиксируются, как и на рекомендованных ВМО высота, так и выше в стратосфере. Результат показал, что потепления, которые отмечаются выше «классических высот», также могут иметь продолжительное обращение средне зональной составляющей (рис. 3) и последующие ВСП также приводят к расщеплению полярного вихря (рис. 4).

При не продолжительном обращении зональной составляющей ветра на высоте 30–40 км и выше, последующие ВСП имеют тенденцию только к смещению или вытягиванию полярного вихря. Для примера в 1962 г. (рис. 5) в начале декабре отклонение зональной компоненты наблюдается не продолжительное время, и полярный вихрь отреагировал на КВСП легким смещением относительно центра. В конце января (рис. 6) во время ВСП (классического) полярный вихрь имел тенденцию только к вытягиванию.

Заключение

Необходимы дополнительные исследования для определения критического временного интервала, во время которого зональная компонента отрицательна, для однозначного определения расщепления стратосферного полярного вихря, во время последующего ВСП.

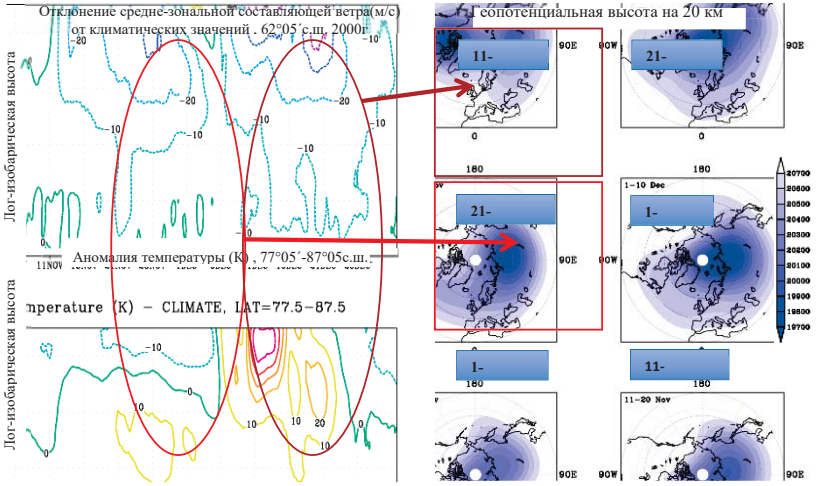


Рис. 2. Распределение с высотой отклонения средне-зональной составляющей ветра (верхняя левая панель), аномалии температуры (нижняя левая панель) от климатических значений и геопотенциальной высоты (правые панели.) в ноябре-декабре 2000 г. Геопотенциальная высота усреднена за 10 дней (1–10 ноября, 11–20 ноября и т. д.)

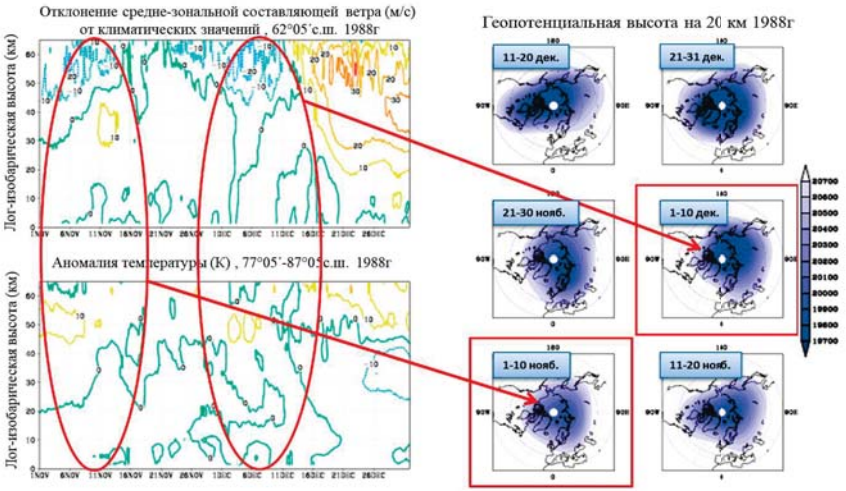


Рис. 3. Аналогично рис. 2, но для 1988 г.

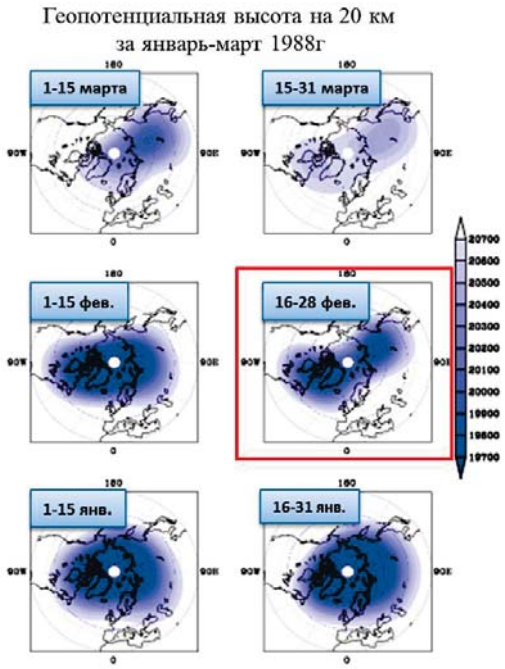


Рис. 4. Геопотенциальная высота в январе-марте 1988 г., усреднена за 15 дней (1–15 января, 15–31 января и т. д.)

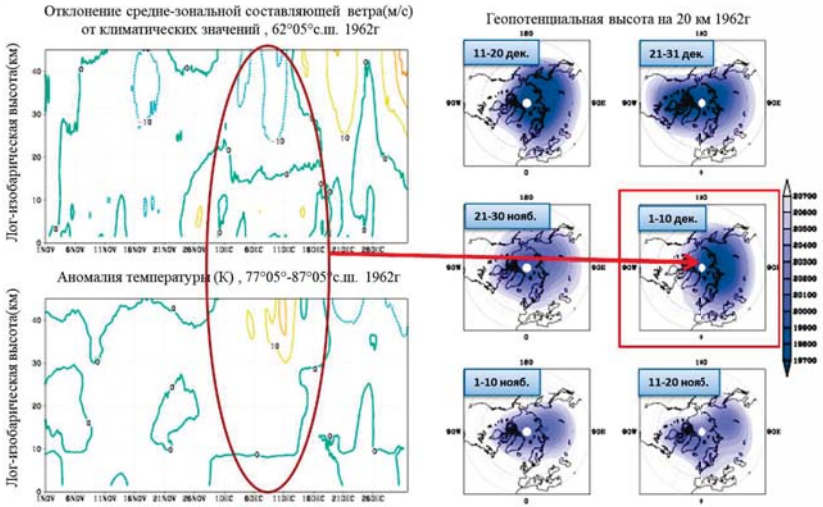


Рис. 5. Аналогично рис. 2, но для 1962 г.

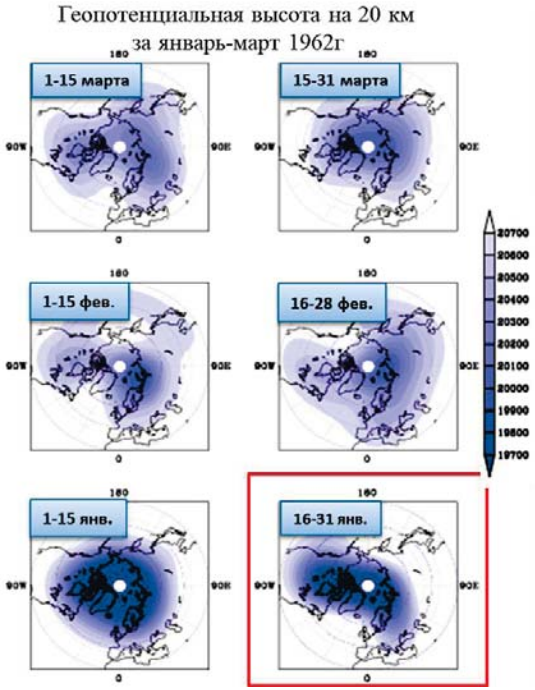


Рис. 6. Геопотенциальная высота в январе-марте 1962 г., усреднена за 15 дней (1–15 января, 15–31 января и т. д.)

Список литературы

1. Sudden stratospheric warmings / M. P. Baldwin [et al.] // Reviews of Geophysics. 2021. Vol. 59, e2020RG000708. https://doi.org/10.1029/2020RG000708

2. Использование JRA-55. URL: https://jra.kishou.go.jp/JRA-55/index_en.html#link

3. The Climate Data Guide: NASA's MERRA2 reanalysis. Retrieved from. URL: https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/nasas-merra2-reanalysis.

4. Влияние динамических факторов на озоновые аномалии в Арктике / С. П. Смышляев, А. И. Погорельцев, Е. А. Дробашевская, А. Ю. Канухина. URL: http://www.rshu.ru/university/notes/archive/issue41/uz41-136-148.pdf

УДК 551.583

О переходе климата Северо-Запада России в новое фазовое состояние

И. В. Серых (iserykh@ocean.ru)[1,2], А. Г. Костяной (kostianoy@gmail.com)[1,2], С. А. Лебедев (sergey_a_lebedev@mail.ru)[2], Е. А. Костяная (janekost@mail.ru)[1,2]

[1] *Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва*
[2] *Геофизический центр РАН, Москва*

Аннотация. Изменения температуры воздуха у поверхности (ТВП) в регионе Белого моря за период 1950–2020 гг. демонстрируют средний рост +0,24 °C / 10 лет. На фоне этого линейного роста наблюдаются существенные междекадные изменения ТВП. Выделяются три периода: усиления континентальности климата (1950–1976 гг.), более морского климата (1977–1998 гг.), и быстрого роста ТВП (1999–2020 гг.). Выдвинута гипотеза, что период быстрого роста ТВП вызван произошедшим переходом климатической системы западной части российской Арктики в новое фазовое состояние.

Ключевые слова: изменения климата, температура, Арктика, Белое море, Баренцево море, морской лед, атмосферная циркуляция.

Введение

Субарктическая зона России особенно уязвима к изменению климата, поскольку в зоне вечной мерзлоты расположена инфраструктура на сотни миллиардов долларов. В то же время по данным наблюдений с середины 1970-х гг. средние температуры здесь растут в 2,5 раза быстрее, чем в целом по планете. Если произойдет оттаивание мерзлых толщ, то из-за значительного содержания в них льда, средняя осадка грунтов может составлять 10 м и более. Железнодорожная инфраструктура в субарктических регионах эксплуатируется в чрезвычайно сложных инженерно-геологических и ландшафтно-климатических условиях, подвергаясь непрерывному воздействию различных внешних воздействий, приводящих к деформациям путей и искусственных сооружений [10]. В связи с этим исследования изменений климата рассматриваемого региона чрезвычайно важны для Российских железных дорог. Данное исследование является продолжением работ, начатых в [5–8].

Данные и методы

В статье анализировались среднемесячные данные температуры воздуха у поверхности (ТВП) на уровне сигма 0,995 из NCEP/NCAR Reanalysis на сетке 2,5°×2,5° за период 1950–2020 гг.. На этом уровне атмосферное давление в данной ячейке сетки на данном временном шаге в 0,995 раз превышает атмосферное давление у поверхности в этой ячейке сетки в это время, что приблизительно соответствует высоте 42,2 м над поверхностью.

В каждом узле сетки рассчитан средний за рассматриваемый период годовой ход исследуемых характеристик. Полученный отдельно для каждого узла сетки средний годовой ход вычитался из исходных данных для получений аномалий в каждом узле сетки относительно среднего годового хода (далее просто аномалий). Линейные тренды вычислялись с помощью метода наименьших квадратов.

Производилось осреднение аномалий ТВП для региона северо-запада России (61,25°–71,25° с. ш.; 28,75°–46,25° в. д.). Координаты указаны с учетом сетки NCEP/NCAR Reanalysis, поскольку каждый узел сетки содержит данные осредненные для своей окрестности ±1,25°. В исследуемый регион попадают узлы сетки с широтами 62,5°; 65°; 67,5°; 70° с. ш. и долготами 30°; 32,5°; 35°; 37,5°; 40°; 42,5°; 45° в. д. Таким образом, исследуемый регион включает в себя всю акваторию Белого моря, часть юга Баренцева моря, всю территорию Мурманской области и республики Карелия и большую часть Архангельской области.

Результаты

На временных рядах средних аномалий ТВП исследуемого региона (рис. 1) можно выделить три периода с отличающимися характеристиками. Первый период 1950–1976 гг. характеризуется сильными положительными аномалиями ТВП в теплые полугодия (май – октябрь). Во второй период 1977–1998 гг. ситуация изменилась и сильные положительные аномалии ТВП стали наблюдаться в основном в холодные полугодия, а в теплые полугодия стали наблюдаться в основном отрицательные аномалии. Третий период 1999–2020 гг. характеризуется резким ростом аномалий ТВП как в холодные (до +3 °С), так и в теплые (до +2 °С) полугодия.

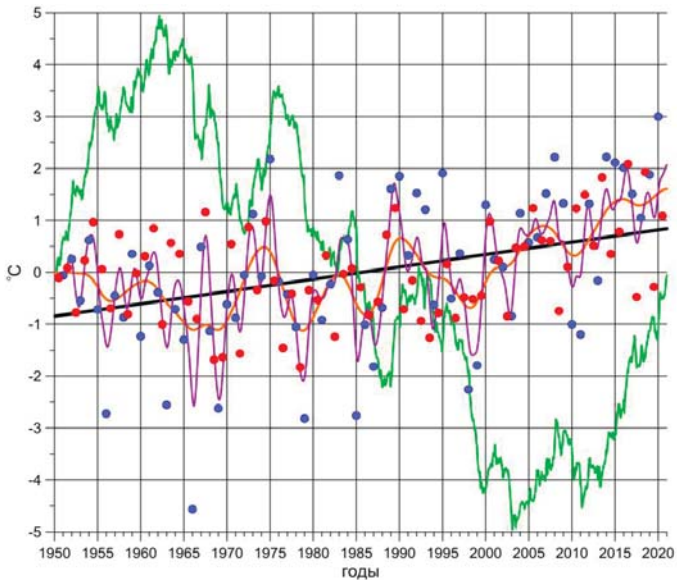


Рис. 1. Изменения средних аномалий температуры воздуха у поверхности (ТВП) в северо-западном регионе России за 1950–2020 гг., сглаженные 2-летним (фиолетовый) и 7-летним (оранжевый) фильтрами Баттерворта нижних частот. Их линейный тренд (черный) и накопленная сумма аномалий после удаления линейного тренда (зеленый). Кругами отмечены средние значения аномалий для теплого (май – октябрь) (красный) и холодного (ноябрь – апрель) (синий) полугодий

На полях средних ТВП за весь рассматриваемый период и за выделенные три периода (рис. 2) обращает на себя внимание то, что в первые два периода (1950–1976 и 1977–1998 гг.) средние ТВП мало отличались, но в третий период (1999–2020 гг.) произошел существенный сдвиг средних ТВП по сравнению с двумя предыдущими периодами. В первые два периода на юго-западе Кольского полуострова в регионе (66,5–68,5° с. ш.; 30–34° в. д.) и на востоке Архангельской области (64–67° с. ш.; 43–45° в. д.) средние ТВП были немного ниже нуля, из-за чего там существовала вечная мерзлота. В третий период средние ТВП стали выше нуля во всей области исследования, из-за чего следует ожидать таяния вечной мерзлоты в этих регионах.

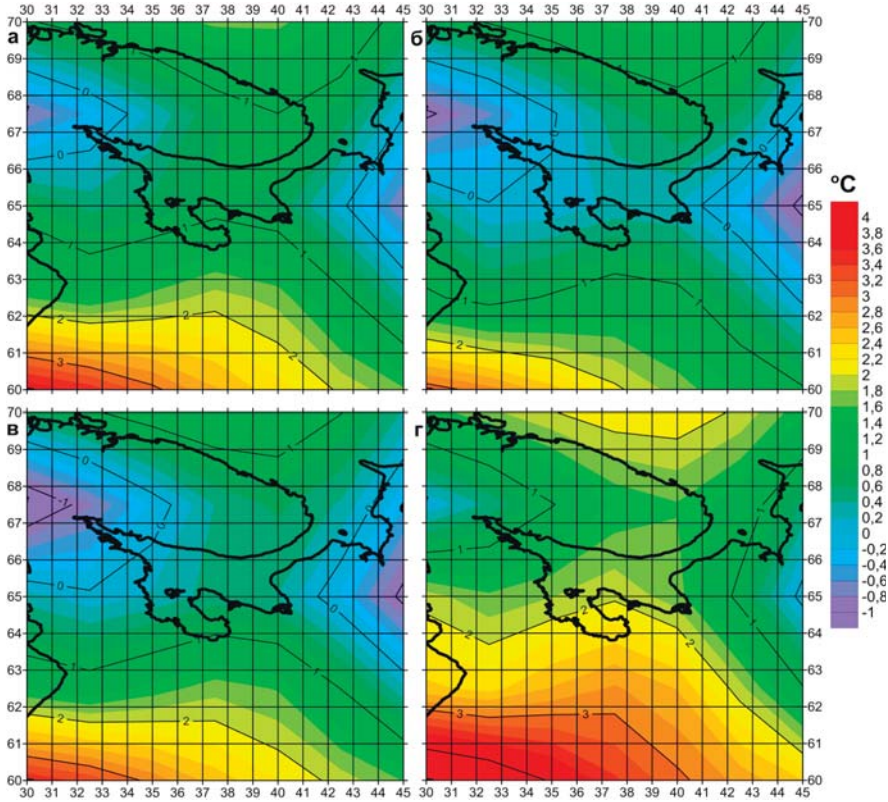


Рис. 2. Поля средних температур воздуха у поверхности (ТВП) за периоды: 1950–2020 гг. (а), 1950–1976 гг. (б), 1977–1998 гг. (в) и 1999–2020 гг. (г)

Обнаруженные изменения ТВП северо-западного региона России между выделенными периодами могут быть связаны как с антропогенным глобальным потеплением, так и с влиянием на исследуемый регион естественных мод климатической изменчивости. В Тихом океане в 1976/1977 и 1998/1999 гг. произошли

климатические сдвиги [2; 3; 9]. Они проявились в переходах между противоположными фазами Тихоокеанского декадного колебания. Эти климатические сдвиги оказали глобальное влияние, в том числе и на регион Северной Атлантики [1; 4; 11].

Северная Атлантика оказывает существенное влияние на исследуемый регион. Первый выделенный период (1950–1976 гг.) отличается холодными зимами и жаркими летними периодами, т. е. более континентальным климатом. Как показано в работах [1; 4; 11], это связано с ослабеванием влияния в этот период Северной Атлантики на исследуемый регион. Во второй выделенный период (1977–1998 гг.) зимы стали мягче, а летние аномалии ТВП стали в основном отрицательными. То есть климат исследуемого региона стал более морским по сравнению с предыдущим периодом. Это связано с усилением влияния Северной Атлантики на исследуемый регион во второй период [1; 4; 11]. В третий выделенный период (1999–2020 гг.) наблюдается резкий рост ТВП в исследуемом регионе. Можно предположить, что это связано с общим ростом температуры в Арктике, и существенным сокращением площади морского льда в Баренцевом море [12]. Это послужило причиной усиления положительной обратной связи в виде ослабления стратификации верхнего слоя воды Баренцева моря, усиления перемешивания и поднятия более теплых и соленых атлантических вод к поверхности. Также дополнительный вклад в рост температуры воды верхнего слоя Баренцева и Белого морей вносит положительная обратная связь от поглощения солнечного излучения: при потеплении Арктики площадь льда уменьшается, и это приводит к большему поглощению солнечного излучения поверхностью. Таким образом, резкий рост ТВП в третий выделенный период, по-видимому, связан с усилением действия обратных положительных связей, что означает переход климатической системы исследуемого региона в новое фазовое состояние.

Заключение

Проведенное исследование показало, что в регионе северо-запада России в последние 2 десятилетия (1999–2020 гг.) произошло существенное изменение регионального климата, которые выразилось в потеплении этого региона от 0,9 до 1,5 °С по сравнению с предыдущими годами (1977–1998 гг.), в резком увеличении роста температуры воздуха (+0,4 – +1,0 °С за 10 лет), к смещению изотермы +2 °С на 550 км на север вплоть до южной части Белого моря и к полному исчезновению средних отрицательных температур. Последний факт чрезвычайно важен, поскольку это означает фазовый переход, который приведет к растеплению вечномерзлых грунтов на всей территории Карелии, Мурманской и Архангельской областей. Растепление вечномерзлых грунтов и значительное повышение средних температур приведет к изменению водного баланса многочисленных рек и озер исследуемого региона, и может оказать негативное воздействие на инфраструктуру.

Благодарности. *Исследование выполнено в рамках проекта РНФ N 21-77-30010 «Системный анализ динамики геофизических процессов в российской Арктике и их воздействие на развитие и функционирование инфраструктуры железнодорожного транспорта» (2021–2024 гг.).*

Список литературы

1. О междекадной изменчивости климатических характеристик океана и атмосферы в регионе Северной Атлантики / М. В. Анисимов, В. И. Бышев, В. Б. Залесный, С. Н. Мошонкин, В. Г.Нейман, Ю. А. Романов, И. В. Серых // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9, № 2. С. 304–311.

2. Океанический фактор мультидекадной изменчивости современного климата и перспективы ее мониторинга / В. И. Бышев, И. В. Серых, А. Н. Сидорова, В. Е. Скляров, М. В. Анисимов // Океанологические исследования. 2018. Т. 46, № 3. С. 5–19.

3.. Общая оценка статистической значимости и климатической роли глобальных атмосферных и океанических осцилляций / Ю. А. Романов, В. Г. Нейман, В. И. Бышев, И. В. Серых, Д. М. Сонечкин, А. В. Гусев, Н. К. Кононова, В. И. Пономарев, А. Н. Сидорова, А. Л. Фигуркин, М. В Анисимов // Океанологические исследования. 2019. Т. 47, № 2. С. 76–99.

4. *Серых И. В.* О влиянии Северо-атлантического диполя на междекадные изменения климата России / Труды Государственного океанографического института. 2018. № 219. С. 269–285.

5. *Серых И. В., Костяной А. Г.* О климатических изменениях температуры Балтийского моря // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2019. Т. 12, № 3. С. 5–12.

6. *Серых И. В., Костяной А. Г.* О влиянии Атлантического и Тихого океанов на изменение климатических параметров Каспийского моря // Метеорология и гидрология. 2020. № 5. С. 96–107.

7. *Серых И. В., Толстиков А. В.* О причинах долгопериодной изменчивости приповерхностной температуры воздуха над Белым морем // Вестник Московского университета. Серия 5, География. 2020. № 4. С. 83–95.

8. *Серых И. В., Толстиков А. В.* О причинах климатической изменчивости скорости ветра в районе Белого моря // Вестник Тверского государственного университета. Серия: География и геоэкология. 2019. № 4 (28). С. 43–56.

9. On the spatial nonuniformity of some parameters of global variations in the recent climate / V. I. Byshev, V. G. Neiman, Yu. A. Romanov, I. V. Serykh // Doklady Earth Sciences. 2009. Vol. 426, N 4. P. 705–709.

10. Impact of regional climate change on the infrastructure and operability of railway transport / E. A. Kostianaia, A. G. Kostianoy, M. A. Scheglov, A. I. Karelov, A. S. Vasileisky // Transport and Telecommunication. 2021. Vol. 22, N 2. P. 183–195.

11. *Serykh I. V.* Influence of the North Atlantic dipole on climate changes over Eurasia // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2016. Vol. 48. 012004.

12. *Serykh I. V., Kostianoy A. G.* Seasonal and interannual variability of the Barents Sea temperature // Ecologica Montenegrina. 2019. Vol. 25. P. 1–13.

УДК 551.586

Исследование возможности прогноза погоды для жизнедеятельности человека

О. М. Ступишина (olgastupishina@yandex.ru)[1],
Е. Г. Головина (goloveg@yandex.ru)[2], К. Р. Гончик (ksu.gon4ik@gmail.com)[2]
[1]*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург*
[2]*Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург*

Аннотация. Представлены результаты исследования влияния метеорологических и гелиогеофизических характеристик на организм человека и роли космической погоды в формировании циркуляции атмосферы для определения предикторов специализированных прогнозов состояния атмосферы. Показана необходимость мониторинга метеорологических и гелиогеофизических факторов в различных регионах России для оценки значимости солнечно-атмосферных связей.

Ключевые слова: метеорологические и гелиогеофизические факторы, специализированный прогноз погоды, космическая и земная погода, мониторинг.

Одним из направлений прикладной метеорологии является биометеорология, изучающая влияние земной и космической погоды на биосферу, в частности, на организм человека. Изучение влияния состояния атмосферы на человека издавна интересовало специалистов самых различных областей знаний. Со времени А. И. Воейкова, положившего начало серьезным научным исследованиям в области медицинской метеорологии и климатологии, достигнуты значительные успехи в развитии данного направления метеорологической науки. Но на практике полученные знания должным образом не используются. Тем не менее, общий эффект от осуществления мероприятий по комплексной метеопрофилактике патологических реакций имел бы серьезное социальное и экономическое значение.

В настоящее время исследования ученых доказывает, что на биосферу влияет не только состояние земной, но и космической погоды. Таким образом, решения биометеорологических проблем требуют рассмотрения взаимосвязи составляющих двух очень сложных систем: окружающей среды (в частности, факторов земной и космической погоды) и организма человека. Многообразие факторов, влияющих друг на друга внутри каждой системы, и взаимодействие между системами создает трудности в определении критериев, оценивающих степень влияния на человека, окружающей его среды.

Целью наших исследований является изучение возможности прогноза погоды для медицинских целей. Для этого необходимо определить предикторы прогноза, т. е. основные биометеорологические и биогелиогеофизические факторы и последовательность вероятных воздействий составляющих земной и космической погоды на человека. Поэтому *первой задачей стала оценка метеорологических и гелиогеофизических факторов, влияющих на здоровье и их временную последовательность воздействия на человека*. Примером результатов исследований по методике, разработанной О. М. Ступишиной, [3] является изучение одновременной изменчивости ежесуточного количества сердечно-сосуди-

стых событий (обострений ишемической болезни сердца, (ИБС) и вариаций комплекса характеристик земной и космической погоды с использованием метода наложенных эпох. В данной работе мы проанализировали изменения характеристик земной и космической погоды в дни с резким увеличением случаев ИБС в Санкт-Петербурге, противопоставив им дни полного отсутствия таких событий. Этот материал был предоставлен нам врачами, которые заинтересованы в исследовании обстоятельств сердечнососудистых катастроф в городе.

Входными медицинскими данными является ежедневное количество случаев ИБС в одном из районов Санкт-Петербурга (из журналов регистрации вызовов врачей). Мы проанализировали экологические обстоятельства двух альтернативных событий, за которые считали 1) дни с максимальным количеством случаев ИБС (Max в этой работе) и 2) дни отсутствия таких случаев (Nobody в этой работе). Максимумы мы рассчитали отдельно для случаев регистрации ИБС в разных гендерных группах, но Nobody означает пустые дни для этих событий вообще – никого не зарегистрировано в группе мужчин и то же самое для группы женщин. Временной интервал наблюдений: 19.12.2005–31.12.2009. Общее количество случаев ишемии – 15122.

Как и в других наших исследованиях [1–3] параметрами окружающей среды выбраны следующие: 1. Суточные индексы глобальных вариаций солнечной активности (СА) (интегральный радиопоток на волне длиной 10,7 см, число Вольфа, суточная сумма площадей всех наблюдаемых солнечных пятен на видимом диске, количество новых активных областей в сутки) [4]. 2. Суточные характеристики вспышечной компоненты СА в различных диапазонах электромагнитного спектра (оптический, радио, рентгеновский диапазоны) [4]. 3. Суточные вариации характеристик межпланетного пространства в окрестностях Земли (потоки электронов, протонов, альфа-частиц) [5]. 4. Суточные вариации геомагнитного поля (ГМП) (K-индексы на высоких земных широтах; K-индексы на средних широтах*; x-, y-* и *z*-компоненты ГМП на широте Санкт-Петербурга) [7]. 5. Ионосферные явления (внезапные ионосферные возмущения) [6]. 6. Параметры атмосферы (атмосферное давление, облачность, скорость ветра, влажность, температура воздуха, температура точки росы и содержание кислорода в воздухе) (Санкт-Петербургская метеорологическая станция, № 26063, (59°58 ' 30°18'E)). Рассмотрены не только значения всех величин, но и их суточная статистика.

В результате исследования определены конкретные параметры окружающей среды, которые существенно отличаются при соответствии различным событиям (Nobody – Max). Все изменения значимых параметров начинаются еще до опасных медицинских событий. Определены дни, когда эти параметры начинают менять свое состояние перед событием Max. Этот факт имеет прогностическую ценность, и мы пометили его как «заблаговременность прогноза». В табл. показаны эти параметры окружающей среды и указывается принадлежность их к конкретному слою природной среды.

Таблица

Параметры Космической Погоды (околоземное пространство), существенно различавшиеся при соответствии различным медицинским событиям (Max – Nobody)

Экологический параметр	Заблаговременность прогноза
Давление потока плазмы – суточный коэффициент вариации	4–3 дня до медицинского события «Max»
Скорость потока плазмы – суточная медиана	4–3 дня до медицинского события «Max»
Поток протонов с энергией E > 100 МэВ – суммарный за сутки	3 дня до медицинского события «Max»
Долготный угол потока плазмы в солнечном ветре (геоцентрическая система координат) – суточный максимум	1 день до медицинского события «Max»
Напряженность z-компоненты геомагнитного поля (геоцентрическая системакоординат (GSE)) – суточный максимум	1 день до медицинского события «Max»
Напряженность геомагнитного поля (среднее арифметическое абсолютной величины $\|B\| = (1/N)*\sum\|B\|$,N=колво точек дискретизации) – суточный коэффициент осцилляции	2–3 дня до медицинского события «Max»
Температура воздуха – суточный максимум	1 день до медицинского события «Max»
Температура воздуха – суточная медиана	1 день до медицинского события «Max»
Температура воздуха – суточный минимум	1 день до медицинского события «Max»
Температура точки росы – суточный максимум	1 день до медицинского события «Max»
Температура точки росы – суточное среднее	1 день до медицинского события «Max»

Обнаруженная последовательность возможного влияния состояния метеорологических и гелиогеофизических характеристик окружающей среды на организм человека дает возможность разработки прогноза земной и космической погоды, формирующей опасные ситуации.

При этом надо понимать, что каждая из пяти физиологических цепей организма человека может не одинаково адаптироваться к изменению земной и космической погоды. Поэтому *необходим мониторинг метеорологических и гелиогеофизических опасных для организма характеристик в разных регионах России.* Кроме того, безусловно, следует учитывать и состояния атмосферы с точки зрения формирования в ней условий, благоприятных для скопления в ней примесей, патологических для организма людей.

Так, оценка корреляции загрязнения атмосферы с изменением заболеваемости отдельных районов Санкт-Петербурга даже по среднегодовым значениям всех величин показывает значительное влияние состава атмосферы на заболеваемость бронхолегочной этиологии (рис. 1). Поэтому для прогноза погоды для медицинских целей необходимо учитывать многофакторность состояния нижней атмосферы. Исследования показали, что для оценки биометеорологического режима атмосферы необходимо учитывать термодинамические характеристики воздуха, которые определяют степень устойчивости атмосферы.

Таким образом, результаты наших исследований показывают действительное влияние метеорологических и гелиогеофизических факторов на здоровье населения и показывают временную последовательность этого влияния, что требует при составлении методик прогноза погоды для медицинских целей необходимость учета роли космической погоды на формирование состояния нижней атмосферы.

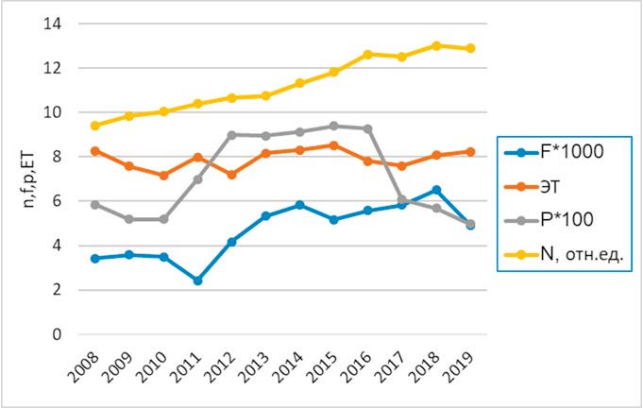


Рис. 1. Изменение среднегодовых значений эффективной температуры (ЭТ), весового содержания формальдегида (F, мг/м3) и взвешенного вещества (P, мг/м3) и заболеваемость бронхолегочной этиологии населения, N, в отдельных районах г. Санкт-Петербург, за период с 2008 по 2019 г.

*Следующей задачей наших исследований стало изучение одновременной изменчивости космической и земной погоды для оценки возможной их связи***.** В частности, мы рассмотрели соответствие космической погоды атмосферным циркуляционным процессам.

Для решения поставленной задачи мы оценили характеристики космической погоды при началах разных по длительности периодов сохранения конкретных типов циркуляции атмосферы: 1. Период в 5–7 дней (условное название периода «Естественный Синоптический Период, ЕСП); 2. Период дольше 10 дней (Долгий Период, ДП). Анализ факторов формирования ДП макроциркуляции, возможно, даст материал для создания основы прогноза Долгоживущих Барических Систем (ДБС) циклонического и антициклонического характера. Для исследования выбраны районы с разными климатическими характеристиками: Санкт-Петербург (59º 57’ N), и Тамбов (52º 43’ N), в двух различных по земной широте географических точках. Массив данных сформирован за период с 1.01.2007 по 31.12.2013. Исследуемый период времени относится ко времени падения 23 цикла солнечной активности, минимума и стадии роста 24 цикла солнечной активности (рис. 2).

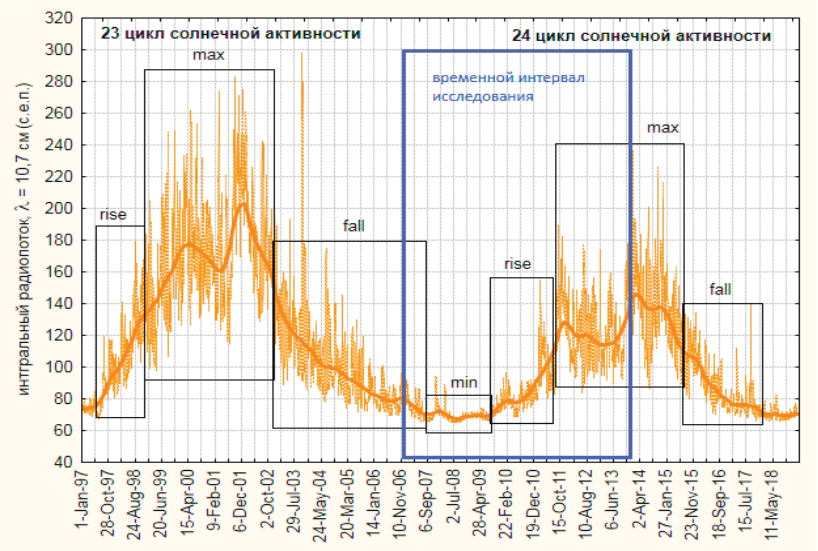


Рис. 2. Изменение интегрального радиопотока за рассматриваемый период времени

Проблемы выбора конкретного фактора космической погоды, способного вызвать изменения в атмосфере Земли заключаются в том, что изучаемое явление в атмосфере, и воздействующая на него среда (космическая погода) сами по себе являются сложными системами, взаимодействие их не может быть сведено к примитивному влиянию какого-то одного определенного внешнего фактора на целостное состояние изучаемого объекта (земной атмосферы), как и на происходящие в нем явления. Следует учесть и взаимное влияние космических процессов, а также их возможность воздействовать на земные процессы как комплексно, так и последовательно.

Для оценки влияния изменчивости космической погоды на динамический режим атмосферы существуют радиационно-конвективные и фотохимические модели. Однако многофакторность только явлений солнечной активности и разнообразие циклов их изменения затрудняют при моделировании учитывать все составляющие космической погоды. Поэтому для исследований мы выбрали статистические методы анализа одновременной изменчивости земной и космической погоды.

Целью нашей работы является изучение состояния космической погоды (КП) в моменты начала развития различных макроскопических процессов в атмосфере Земли. Исследуемый временной интервал: 1.01.2007 – 31.12.2013. Выполнен анализ условий формирования долгоживущих барических систем циклонического и антициклонического характера в двух, различных по широте географических точках 1. Санкт-Петербург (59º 57’ N, 30º 19’ E), 2. Тамбов (52º43’ N, 41º27’ E).

Для исследования междисциплинарная база данных была дополнена ежедневной информацией о форме барических образований в атмосфере и формами атмосферной циркуляции по Вангенгейму (W,C,E). В исследование включены следующие характеристики КП: 1) Характеристики Солнечной активности-а.индексы глобальных вариаций СА (интегральный радио поток, λ=10,7см, числа Вольфа, суммарная площадь пятен на диске, количество новых Активных Образований), b. Характеристики вспышечной компоненты СА в разных диапазонах спектра электромагнитного излучения(оптическом, радио, рентгеновском);2)Характеристики межпланетного пространства в окрестностях Земли 9 потоки e, ρ. α , к–частицы; 3)Характеристики геомагнитного поля (полный вектор магнитного поля на высоте геостационарной орбиты, к-индексы на высоких земных широтах, к-индексы на средних земных широтах): 4)Явления в ионосфере (внезапные ионосферные возмущения).

В работе изучались характеристики КП при началах двух разных по длительности периодов сохранения конкретных типов циркуляции: период 5–7 дней (Естественный Синоптический Период, ЕСП) и период больше 10 дней (Долгий Период, ДП). Период ДП выбран в связи с тем, что все неблагоприятные медицинские события наблюдались именно при таких состояниях циркуляции атмосферы.

Результаты работы показали, что

- В один и тот же календарный сезон конкретного года при одной и той же фазы цикла солнечной активности в 76 % случаев ДП наблюдаются при W форма циркуляции атмосферы и в 30 % ДП – при форме циркуляции Е.
- Для форм циркуляции W и Е характер отношения полного комплекса характеристик к их сезонной медиане для категорий ДП и ЕСП различен на всем продолжении дней интервала наложенных эпох (±5–10 дней, «0» день – день начала ДП или ЕСП).
- Дни максимального различия КП-комплексов на интервале наложенных эпох по-разному распределены для разных форм макроциркуляции: при форме W мода распределения в интервале от (–10) – дня до (5) дня; При Е-форме мода распределения в интервале от (0) – дня до (+5) дня.

Таким образом, дальнейшие исследования могут помочь найти конкретные характеристики КП, которые наиболее активно участвуют в формировании неблагоприятной для организма человека земной погоды. Это позволит заблаговременно прогнозировать состояние атмосферы опасной для жизнедеятельности человека.

Понимание оценки влияния космической погоды на земную даст возможность корректировать синоптический прогноз с учетом солнечной и магнитной активности. Долгоживущие синоптические процессы обостряют возможность усиления формирования неблагоприятной для здоровья человека биометеорологической обстановки. Поэтому так важен мониторинг метеорологических и гелиогеофизических факторов, и также медицинских показателей в различных регионах РФ.Усиление неустойчивости атмосферы в последние годы делают актуальным обострение внимания к проблемам изменчивости биометеорологического режима атмосферы.

Список литературы

1. *Stupishina O. M., Golovina E. G.* Proc. V Int. Conf. Atmosphere, Ionosphere, Safety / eds. I. V. Karpov, O. P. Borchevkina. Kaliningrad : Immanuil Kant Baltic Federal University Press., 2016. Vol. 1. P. 263–268.
2. *Stupishina O. M., Golovina E. G.* VI Int. Conf. Atmosphere, Ionosphere, Safety / ed. I. V. Karpov, O. P. Borchevkina. Kaliningrad : Immanuil Kant Baltic Federal University Press., 2018. Vol. 2. P. 218–235.
3. *Stupishina O. M. Golovina E. G. Noskov S. N.* The relation of the human cardiac-events to the environmental complex variations // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2021. Vol. 853 . 012029.
4. Условия космической погоды. URL: https://www.swpc.noaa.gov/ (дата обращения: 15.07.2020).
1. URL: https://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes/data/avg/ (дата обращения: 23.08.2021).
2. URL: https://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/ionospheric-data/sids/reports (дата обращения: 08.09.2021).
3. URL: www.intermagnet.org (дата обращения: 15.08.2021).

УДК 551.578.46 + 551.345

Численный метод для оценки глубины промерзания грунта на основе данных о толщине снежного покрова и температуре воздуха

Д. М. Фролов (denisfrolovm@mail.ru)

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва

Аннотация. Приведено краткое описание численного метода для оценки глубины промерзания грунта на основе данных о толщине снежного покрова и температуре воздуха. Рассмотрены примеры его использования.

Ключевые слова: численный метод, глубина промерзания, толщина снежного покрова, температура воздуха.

Нестабильность скальных пород в высокогорных районах является важным фактором риска для человека и инфраструктуры, особенно в контексте изменения климата. Присутствие воды в породе приводит к явному увеличению прочности породы, эффект усиливается при более низких температурах и более высокой степени насыщения. Поскольку снижение прочности породы из-за фазового перехода из мерзлого состояния в талое имеет большое влияние на прочность и устойчивость грунта, в работе предлагается модель и численный метод для оценки глубины промерзания грунта на основе данных о толщине снежного покрова и температуре воздуха.

Расчетная схема строилась на основе задачи теплопроводности трехслойной среды (снег, мерзлый и талый грунт) с фазовым переходом на границе мерзлого и талого грунта. Уравнение теплового баланса включало энергию фазового перехода, приток тепла из талого грунта и отток в мерзлый грунт и при наличии снежного покрова через него в атмосферу. Поток тепла рассчитывался по закону Фурье, как произведение теплопроводности и градиента температуры. Предполагалось, что температура в каждой из сред изменяется линейно (например, [4]).

Для снежного покрова и мерзлого грунта использовалась формула теплопроводности двухслойной среды.

Расчет промерзания грунта на основе данных о температуре воздуха и толщине и теплопроводности снежного покрова в течение зимнего периода позволял оценить интенсивность движения фронта промерзания в этот период времени. Зависимость скорости движения фронта промерзания находилась по расчетной схеме. Схема учитывала намерзание грунта снизу на массиве мерзлого грунта в зимний период на основе данных о ежедневной температуре воздуха (и толщине и теплопроводности снежного покрова).

Уравнение теплового баланса записывалось как $F_1=cLV+F_2$ или как:

$$dh_{мг}/d\tau = V = (F_1 - F_2)/cL, \quad (1)$$

где F_1 – отток тепла через замерзший грунт (и снежный покров) от фронта промерзания (Вт/м^2) в атмосферу; $c\ L\ V = c\ L\ dh_{мг}/d\tau$ – расход тепла на фазовый переход, с влагосодержанием грунта (1–4 кг/(см·м^2)), (последнее значение соответствует полному заполнению пор водой у легкой глины с плотностью 2000 кг/м^3 и коэффициентом пористости 0,617 [1]); L – энергия фазового перехода (335 кДж/кг); $V = dh_{мг}/d\tau$ – скорость движения фронта промерзания (см/с); F_2 – отток тепла на охлаждение талого грунта перед фронтом промерзания (Вт/м^2).

Тепловой поток выражался по закону Фурье: $F = -\lambda\ \mathrm{grad}\ T$. Тепловой поток через замерзший грунт от фронта промерзания в атмосферу в случае наличия снежного покрова выражался через теплопроводность и тепловой поток комбинации из двух сред (снежный покров и мерзлый грунт) согласно данным справочника [2] как:

$$F_1 = -\lambda\frac{\Delta T}{\Delta x} = -\frac{\Delta T}{\frac{\Delta x_c}{\lambda_c}+\frac{\Delta x_{мг}}{\lambda_{мг}}} = \frac{-T_{возд}}{\frac{h_c}{\lambda_c}+\frac{h_{мг}}{\lambda_{мг}}}, \quad (2)$$

Здесь $T_{возд}$ – температура воздуха, h_c и $h_{мг}$ – толщина снега и глубина промерзания, а λ_c и $\lambda_{мг}$ – теплопроводность снега и мерзлого грунта.

Предполагалось, что на глубине 10 м в грунте находится точка нулевых годовых колебаний температуры T_0 со среднегодовым значением около 2,42 °С. Поэтому:

$$F_2 = -\lambda_{тг}\frac{\Delta T}{\Delta x} = \lambda_{тг}\frac{T_0}{10 - h_{мг}}, \quad (3)$$

Здесь $\lambda_{тг}$ – теплопроводность талого грунта. Вычисления производились с шагом в один день. На первый момент предполагалось, что толщина мерзлого грунта $h_{мг}$ равнялась 0,5 см. На каждом шаге по времени (каждый день) вычислялась (рассчитывалась) скорость промерзания V и значение толщины мерзлого грунта $h_{мг}$ для следующего дня (шага по времени). Согласно [1], средняя теплопроводность талого и мерзлого глинистого грунта могла быть взята как 1,4 и 1,8 Вт/(м·°С). Средняя теплопроводность снега λ_c рассчитывалась относительно

плотности по формуле А. В. Павлова [3] и бралась равной 0,18 Вт/(м·°С). В работе для выведенного дифференциального уравнения по времени первого порядка для изменения глубины промерзания грунта была построена разностная схема посредством аппроксимации этого дифференциального уравнения явным методом Эйлера: $h_{мг}(t_{n+1}) = h_{мг}(t_n) + \Delta t\, V(t_n)$.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания «Опасность и риск природных процессов и явлений» (121051300175-4).

Список литературы

1. Грунтоведение / под ред. В. Т. Трофимова. М. : Изд-во МГУ : Наука, 2005. 1024 с.
2. *Михеев М. А., Михеева И. М.* Основы теплопередачи. Изд. 2-е. М. : Энергия, 1977. 344 с.
3. *Павлов А. В.* Теплофизика ландшафтов. Новосибирск : Наука, 1979. 284 с.
4. *DeGaetano A. T., Cameron M. D., Wilks D. S.* Physical simulation of maximum seasonal soil freezing depth in the united states using routine weather observation // Journal of Applied Meteorology. 2001. Vol. 40, N 3. P. 546–555.

Секция

МОНИТОРИНГ, МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

УДК 504.064

Выявление стадий цветения вредоносной водоросли Karenia осенью 2020 г. у Камчатки по спутниковым данным

М. Г. Алексанина (margeo@mail.ru)

Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток

Аннотация. Анализируются спутниковые биооптические параметры вредоносной водоросли Karenia в разные периоды своего цветения в сентябре – октябре 2020 г. в трех заливах Камчатки – Камчатском, Кроноцком и Авачинском. На основе проведенного анализа получены соотношения, которые позволят своевременно обнаружить опасную водоросль *Karenia* по спутниковым данным, не прибегая к дорогостоящим морским экспедициям.

Ключевые слова: вредоносное цветение водорослей, спутниковые данные, биооптические параметры.

Осенью 2020 г. в акватории полуострова Камчатка произошла экологическая катастрофа. Причины этой экологической катастрофы, вызванной вредоносным цветением микроводорослей рода Karenia (фитопланктон), рассмотрены в работе [1]. Ключевыми датами экологической катастрофы на Камчатке являются 19, 20 и 21 сентября 2020 г. 19 сентября был шторм с доминирующим северо-западным ветром, вызвавший сильный апвеллинг. Возникла неустойчивая стратификация воды, которая удерживалась ветром. 21 сентября наступил почти полный штиль, что привело к даунвеллингу, который обычно собирает продукты жизнедеятельности фитопланктона у побережья [2; 3]. Окончание цветения сопровождается массовым отмиранием клеток. Стратификация быстро восстановилась: холодная вода ушла в океан, перемещаясь в нижних слоях, а теплая вода двинулась на ее место, перемещаясь в верхнем приповерхностном слое. Теплая вода опускалась вниз, а все, что было легче воды и плавало на поверхности, собиралось и концентрировалось вблизи побережья. Это гниющая биомасса, продукты жизнедеятельности фитопланктона (растворенное органическое вещество и метаболиты, возможно, являющиеся токсинами). 21 сентября концентрация водорослей рода Karenia была значительной. В октябре ее было еще больше, но катастрофических воздействий на окружающую среду в октябре не было, так как не было повышения концентрации продуктов жизнедеятельности фитопланктона у побережья за счет внешних факторов.

Целью данной работы является анализ спутниковых биооптических параметров для оценки по ним стадий цветения вредоносной водоросли Karenia в указанный период времени (сентябрь – октябрь 2020 г.).

Данные и методы

Основными используемыми данными были изображения радиометра MODIS спутника AQUA (пространственное разрешение 1 км). Для анализа рассматривались следующие продукты обработки спутниковых данных (использовалась нестандартная коррекция атмосферы MUMM; стандартная коррекция NIR при низких углах солнца дает ошибки в сотни процентов):

1. Концентрация хлорофилла-а. Требуется для оценки масштабов цветения и состояния фитопланктона.

2. Емкость фотосинтеза – отношение флюоресценции (flh – высота линии флюоресценции на длине волны 680 нм) к концентрации хлорофилла-а (chl-a). Флюоресценция – это собственное излучение фитопланктона, которое оказалось невостребованным при фотосинтезе. Требуется для оценки размножения фитопланктона. Чем больше уровень флюоресценции на единицу концентрации хлорофилла-а, тем меньше фотонов идет на фотосинтез. Большие величины емкости говорят о недостатке питательных веществ, малые – об интенсивном росте фитопланктона.

3. Мутность в форме параметра ослабления света Kd490 на длине волны 490нм. Уменьшение концентрации chl-a при постоянной мутности говорит о стадии отмирания клеток.

4. Прогиб спектра яркости моря, необходимый для идентификации видов водорослей *Karenia*:

$$F\lambda = (Rrs(\lambda 2)*(\lambda-\lambda 1) + Rrs(\lambda 1)*(\lambda 2-\lambda))/(\lambda 2-\lambda 1))/ Rrs(\lambda), \quad (1)$$

где $Rrs(\lambda i)$ – яркость моря на длине волны λi. Поскольку предполагалось цветение водорослей рода Karenia, то для нее λ = 488 нм, $\lambda 1$ = 412 нм, $\lambda 2$ = 555 нм. Данный параметр уверенно выделяет на изображениях водоросли этого рода, когда превышает величину 1.1.

Разные стадии жизнедеятельности фитопланктона

Обычно предполагают, что цикл цветения водоросли проходит следующие стадии: начало цветения, выход на пик цветения и отмирание основной массы водоросли. Отмирание сопровождается разложением массы органики, что может приводить к гипоксии и замору рыб и донных гидробионтов. При борьбе за еду с целью подавления конкурентов водоросли выделяют вредоносные вещества, обычно они выделяют их много тогда, когда наблюдается нехватка питательных веществ.

Рассматривались стадии развития водоросли рода Karenia в трех заливах полуострова Камчатки (рис. 1 и 2): Камчатском – самый северный, Кроноцком – средний и Авачинском – южный. В открытых водах океана (светло-зеленый цвет рис.1) фитопланктон находится в стагнации, емкость фотосинтеза лежит в диапазоне 0,08–0,15. В начале месяца в заливах Камчатки она существенно меньше,

особенно в прибрежных частях заливов. 3-го октября в Камчатском заливе продолжался рост биомассы, в Кроноцком стагнация, а в Авачинском фитопланктон «голодал». Здесь наблюдалась нехватка биогенов, и в таких условиях водоросли выделяют массово метоболиты (вредоносные вещества) для подавления конкурентов. Емкость фотосинтеза с 5 сентября по 12 октября менялась от 0,025 до 0,24 едниц, а концентрация хлорофилла от 1 до 6 мг/м^3.

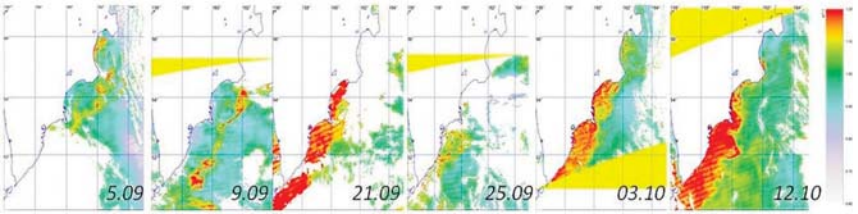


Рис. 1. Прогиб спектра яркости моря F488 в диапазоне величин, соответствующем присутствию водорослей рода Karenia, за 5.09, 9.09, 21.09, 25.09, 03.10, 12.10 2020 г. Радиометр MODIS/AQUA

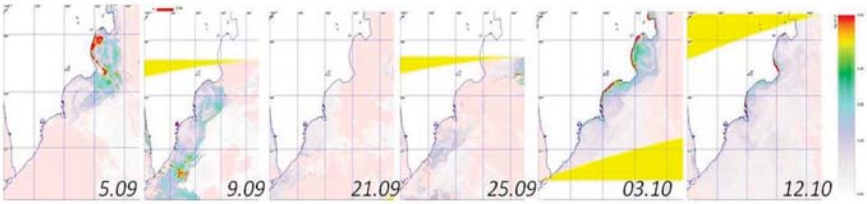


Рис. 2. Концентрация хлорофилла за 5.09, 9.09, 21.09, 25.09, 03.10, 12.10 2020 г. Радиометр MODIS/AQUA

Применяемый подход состоял в том, что на участках, соответствующих цветению водоросли Karenia, т. е. там, где параметр прогиб был равен или больше 1,1, строились и анализировались значения на разрезах или профилях четырех параметров – концентрации хлорофилла, мутности, емкости фотосинтеза (ФС), прогиба. Также рассматривались еще два соотношения – отношение концентрации хлорофилла к мутности и отношение прогибак мутности в зависимости от концентрации хлорофилла и емкости фотосинтеза. Рассматривались средние значения биопараметров, полученных на разрезах.

Результаты

Анализировались различные зависимости биопараметров друг от друга и строились соответствующие графики. Выделяется 3 стадии жизнедеятельности микроводоросли – сытость, стагнация и голод, которые характеризуются емкостью фотосинтеза: 0–0,08 сытость; 0,08–0,142стагнация; >0,15 – голод. Из интересных закономерностей были получены следующие. Были получены удельные плотности концентрации хлорофилла и величины прогиба в зависимости от кон-

центрации хлорофилла. Удельная плотность рассчитывалась относительно мутности Kd-490. Поскольку разрезы были сделан вдали от выноса рек, то показатель мутности можно рассматривать как оценку плотности органического вещества в воде.

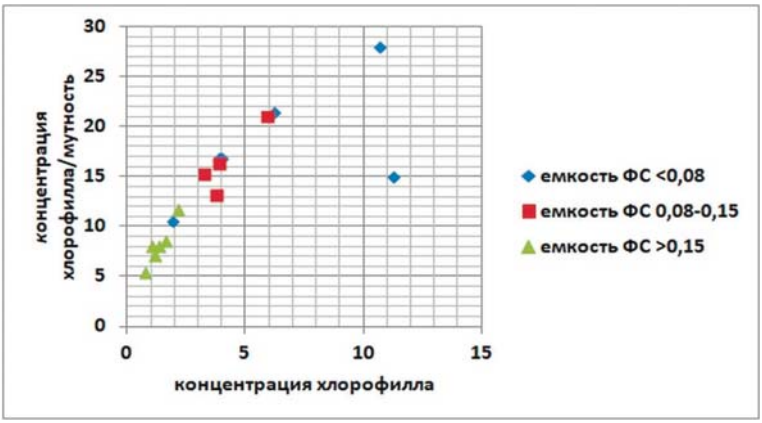


Рис. 3. Удельная плотность концентрации хлорофилла в зависимост и от концентрации хлорофилла

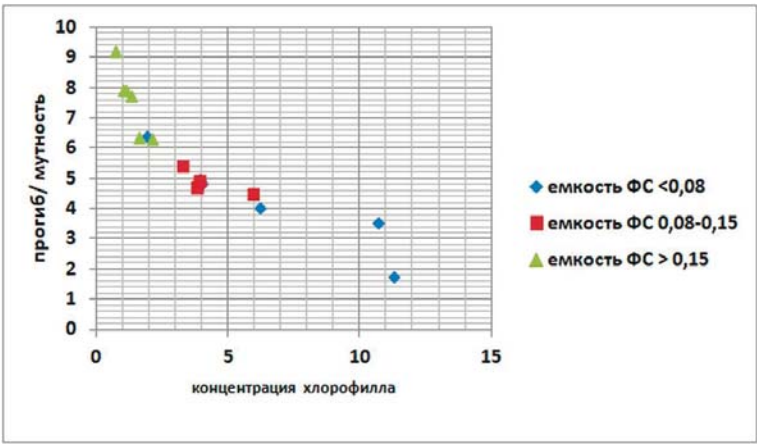


Рис. 4. Удельная плотность прогиба в зависимости от концентрации хлорофилла

На рис. 3 наблюдается значительный рост удельной плотности концентрации хлорофилла с ростом концентрации хлорофилла, что довольно неожиданно, поскольку ожидалось постоянство этого параметра. И особенно высокие удельные плотности наблюдаются тогда, когда водоросли находятся в стадии сытости. График на рис. 4 показывает падение удельной плотности прогиба с ростом концентрации хлорофилла. Важно то, что максимальные удельные концентрации

прогиба получаются при состоянии голода, что подтверждает естественное предположениео доминировании одного вида водоросли при жесткой борьбе за питание. Такую зависимость можно использовать при поиске зон цветения водорослей, находящихся в стадии генерации вредоносных веществ.

Список литературы

1. *Алексанин А. И., Алексанина М. Г., Левин В. А.* Развитие спутникового мониторинга в ИАПУ ДВО РАН // Вестник ДВО РАН. 2021. № 4 (218). С. 129–138.

2. Evaluation and optimization of remote sensing techniques for detection of Karenia brevis blooms on the West Florida Shelf / I. M. Soto, J. Cannizzaro, F. E. Muller-Karger, C. Hu, J. Wolny, D. Goldgo // Remote Sens. Environ. 2015. Vol. 170. P. 239–254.

3. A mechanism for offshore initiation of harmful algal blooms in the coastal Gulf of Maine / D. J. McGillicuddy, R. P. Signell, C. A. Stock, B. A. Keafer, M. D. Keller, R. D. Hetland, D. M. Anderson // J. Plankton Res. 2003. Vol. 25. P. 1131–1138.

УДК 504.03:711.4(556)

Критерии оценки водоохранных зон

О. А. Бархатова, Е. В. Потапова (e.v.potapova.isu@mail.ru)

Иркутский государственный университет, Иркутск

Аннотация. Отмечена роль водных объектов, преимущественные проблемы содержания и поддержания их качества в контексте занятости водоохранных зон. Указаны некоторые факторы усложняющие полевые исследования территорий, прилегающих к береговым линиям. Предложено семь групп критериев оценки для сбора информации о водном объекте.

Ключевые слова: водный фонд, реки, озера, моря, категория земель, оценка состояния.

Вода, водные объекты занимают на Земле больше территории, чем суша. Они составляют основу жизни и существования не только человечества, но и большинства живых организмов, а также являются причинами многих стихийных бедствий.

Существующие схемы комплексного использования и охраны водных объектов, разработанные в целях изучения допустимой антропогенной нагрузки, определения потребностей в водных ресурсах в перспективе, обеспечения охраны водных объектов и указания основных направлений деятельности по предотвращению негативного воздействия вод для формирования инструментария принятия управленческих решений по достижению устанавливаемых к определенному сроку целевых показателей качества воды водных объектов конкретного речного бассейна и уменьшения негативных последствий наводнений и других видов опасного воздействия вод.

По данным Государственного доклада о состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2019 году только на территории РФ протекает свыше 2,5 млн рек. Большинство из них (94,9 %) имеют длину 25 км и менее, число средних рек, длиной от 101 до 500 км, составляет 2833 (0,1 %), а число больших – 214 (0,008 %). Насчитывается более 2,7 млн озер с суммарной площа-

дью водной поверхности около 408,9 тыс. км. Большинство озер (98 %) – небольшие (менее 1 км^2), наиболее крупные озера – Ладожское, Онежское, Байкал и Ханка [1]. Ширина водоохранных зон, зависящая от длины водотока, составляет от 50 до 500 м, как следствие огромные площади, находящиеся под той или иной формой антропогенного воздействия и сложность анализа их состояния.

Землями водного фонда являются земли, на которых находятся поверхностные водные объекты. Порядок эксплуатации и охраны этих земельных участков, определяется не только по Земельному, но и по Водному кодексу России. Однако водоохранные зоны не относятся к землям водного фонда и не выделяются в самостоятельную категорию, несмотря на их безусловную значимость для сохранения качества вод и поддержания состояния водного объекта. Именно с этим моментом законодательства связаны основные проблемы содержания и эксплуатации водоохранных зон и прибрежных защитных полос.

Несмотря на то что вокруг водных объектов устанавливается зона специального ограниченного использования, которая должна быть покрыта насаждениями, сопредельные земельные участки бывают заняты [2]:

1. Землями сельскохозяйственного назначения.
2. Землями лесного фонда.
3. Населенными пунктами. Например, по берегам р. Волги расположено около 90 только крупных населенных пункта, на Эльбе– 36, на Днепре – 19, на Оби – 11, на Ангаре 7.
4. Землям транспорта, в том числе мостовыми переходами различного назначения. Например, в Гамбурге более 2300 мостов, в Амстердаме – 1200, в Венеции – 400.
5. Землями энергетики, если прилегают к водному объекту и заняты гидроэлектростанциями. Только на Верхней Миссисипи расположено 42 плотины из них 14 для получения энергии, а на Волге их – 9, 4 – на р. Ангаре.
6. Инфраструктурами портов, причалами, пристанями и другими объектами, необходимыми для эксплуатации, содержания, строительства, реконструкции, ремонта наземных и подземных зданий, сооружений, устройств и других объектов морского, внутреннего водного транспорта.
7. Землями обороны и промышленными объектами, построенными до введения в действие Водного кодекса РФ или в нарушении его.
8. Участками, подвергшимися самовольному захвату.

Проблемы актуальной структурно-компонентной организации территорий, от береговой линии водного объекта, представляют еще одну неразрешимую задачу для управления и ученых.

Оценка состояния территорий, прилегающих к водным объектам, представляет собой известную сложность еще по ряду факторов:

- Обычно они имеют значительную протяженность и площадь изучения. Для определения всех причин настоящего состояния необходимо обследование всей территории и знание исторической составляющей. Для большинства стран и объектов актуальным может быть и стихийное, незаконное загрязнение, изменение русла, использование в запрещенных целях (например, слива не просто загрязненных, но ядовитых стоков).

• На берегах располагаются разные по назначению объекты хозяйственной и иной деятельности, главные из которых отмечены выше, в том числе брошенные, неэксплуатирующиеся многие годы и пустующие населенные пункты.

• Зарегулирование водных объектов (плотины, мосты и др.) приводит к изменениям в компонентной структуре их водоохранных зон.

• Объекты различного назначения, построенные до принятия водного законодательства, в настоящее время противоречащие ему по нескольким статьям.

Все это позволяет говорить о наличии большого комплекса проблем, которые могут быть решены путем создания, преимущественно на региональном уровне, адекватной нормативно-правовой, методологической и информационно-аналитической основы оценки состояния водоохранных зон.

Восстановление водных объектов для европейских стран – это часть стратегии устойчивого управления водными ресурсами национальной и региональной политики и основа для реализации Рамочной Водной директивы 2000/60/ЕС и Директивы по наводнениям 2007/60/ЕС Европейского парламента и Совета Европейского Союза. В целях практической реализации этих документов продолжаются работы по созданию общеевропейской информационно-аналитической системы WISE (Water Information System for Europe), созданной в рамках партнерства Европейской комиссии (институты DG Environment, Joint Research Centre and Eurostat) и Европейского экологического агентства [3]. WISE объединяет информационные данные профильных ведомств, в вопросах рационального использования водных объектов.

Для сбора научно обоснованной информации, обеспечивающей всех заинтересованных лиц сведениями о водных объектах и их водоохранных зонах, для дополнения кадастров, необходим стандартизированный перечень показателей изучения – критериев оценки.

Во-первых, это отнесение земель, прилегающим к береговой линии к определяемым Земельным кодексом категориям, в первую очередь для определения незаконного использования водоохранных зон. В пределах водоохранных зон и прибрежных защитных полос, независимо от формы реализации прав на земельные участки и их существующего функционального использования, строго исполнять запреты на указанные в законодательстве виды деятельности.

Во-вторых, указание всех правовых норм, в том числе региональных и местных, в отношении водного объекта. Границы водоохранных зон водных объектов и их прибрежных защитных полос являются так же линиями градостроительного регулирования. Территории в пределах минимальных водоохранных зон не подлежат освоению иначе как в соответствии с градостроительной документацией, имеющей положительное заключение Государственной экологической экспертизы.

В-третьих, определение гидрологических характеристик водного объекта, как основы безопасности и выявления рисков, связанных с этой категорией.

Четвертый параметр – гидрохимические показатели объекта как на существующих створах, так и в специально обозначенных местах, усиления влияния.

Пятая группа – экологические показатели, отдельно для качества вод и окружающих земель и территорий. Здесь необходимо отметить существующие объекты озеленения и перспективы размещения насаждений и опасные объекты, которые могут повлиять на ухудшение экологической ситуации объекта.

Шестая группа – группа социальных показателей (численности и групп населения), которые используют конкретные территории, перспективные назначения и наилучшие варианты развития.

Седьмая группа включает экономические показатели водного объекта, стабилизационные фонды, в том числе на случай аварий, возможные страховые выплаты, затратную и доходную части, с учетом вариантов использования, необходимости восстановления, переселения населений, реконструкции объектов и ревитализации пространств.

При ведении кадастра водных объектов необходимо учитывать все эти характеристики.

В границах поселений границы водоохранных зон необходимо устанавливать с учетом экологической ситуации и архитектурно-планировочной организации территории: размещения поверхностей с твердым покрытием, условий отведения и очистки поверхностного стока, расположения дорожно-транспортной сети, рекреационного значения территории и других условий. Роль всех водных объектов страны необходимо оценить и повысить. Определить природную ценность прилегающих территорий, принять во внимание социальную ценность и сделать все возможное для сохранения и рационализации использования каждого водного объекта в стране.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Иркутской области в рамках научного проекта № 20-45-380032.

Список литературы

1. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации. URL: https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/o_sostoyanii_i_ob_okhrane_okruzhayushchey_sredy_rossiyskoy_federatsii/ (дата обращения: 01.10.2021).

2. Публичная кадастровая карта. URL: https://rosreestr-doc.ru/ (дата обращения: 01.10.2021).

3. Water Information System for Europe. URL: https://www.eea.europa.eu/media/news-releases/drought-and-water-overuse-in-europe/wise-water-information-system-for-europe. (дата обращения: 01.10.2021).

УДК 528.88

Использование дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) для мониторинга состояния водоемов

Е. В. Болданова (boldanova@mail.ru)

Байкальский государственный университет, Иркутск

Аннотация. Рассмотрены существующие модели расчета границ водоемов, мутности, прозрачности, концентрации хлорофилла-а, растворенного кислорода, нитратов, фосфатов, фикоцианина. Обобщен зарубежный и отечественный опыт разработки таких моделей. Проведена систематизация моделей по используемым спектральным каналам и формам зависимости. Перечислены способы визуализации полученных результатов. Сделаны прогнозы по стандартизации моделей.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, мониторинг, водоемы, мутность, прозрачность, хлорофилл-а, спектральные каналы.

Полевые исследования водоемов in situ обладают высокой точностью, но проводятся фрагментарно, чаще всего нерегулярно и с низкой оперативностью, требуют высоких затрат, связанных с привлечением высококвалифицированных специалистов. Внедрение автоматических наземных станций сбора информации о водоемах в какой-то мере решает эти проблемы, но глобальный охват остается недоступным [1].

Проблемы исследования экологического состояния водоемов в нашей стране рассматривались с 40-х гг. прошлого столетия в работах Кринова (1947); Аванесов и Снеткова (1981), эксперименты по оценке прозрачности вод пресноводных водоемов по данным ДЗЗ в спектрах видимого диапазона описаны Егоровым и Тарнопольским (1977). Кроме того, у нас в стране и за рубежом велись работы по оценке концентраций взвесей и фитопланктона, например, Han (1997).

За последние несколько десятилетий дистанционное зондирование и геоинформационные технологии (ГИС) успешно использовались в исследованиях по мониторингу качества поверхностных вод. Датчики, установленные на спутниках и самолетах, измеряют количество излучения на различных длинах волн, отраженного от поверхности водных объектов, которое затем преобразуется в различные показатели качества воды. Благодаря достижениям в области дистанционного зондирования такие параметры, как концентрация взвесей (TSS), хлорофилла-а (chl-a), мутность и прозрачность по диску Секки (SDD), отслеживаются достаточно хорошо.

Аэрофотоснимки, собранные во время дистанционного зондирования, являются аналоговыми изображениями, тогда как спутниковые снимки являются цифровыми, т. е. состоят из пикселей. Интенсивность пикселя записывается как цифровое число (DN), принимающее среднее значение для всей области пикселя. Точный диапазон DN датчика зависит от его радиометрического разрешения (0–63, 0–255 или 0–2047). Спутниковые изображения подвергаются обработке, т. е. преобразованию необработанных цифровых чисел в значимое значение спектральной яркости. Используя калибровочную кривую отношения DN к яркости,

подготовленную операторами спутников, DN преобразуется в спектральную яркость L, как показано в уравнении (1). Например, для преобразования 8-битных (DN в диапазоне 0–255) снимков Landsat необходимо значение усиления и смещения датчика в каждой полосе:

$$L = смещение + (усиление * DN), \quad (1)$$

где L обозначает спектральную яркость; DN – интенсивность пикселя как цифровое число.

В то время как градиент калибровки дает усиление, смещение получается, как спектральная яркость датчика для нулевого значения DN.

Значения спектральной яркости различных элементов затем преобразуются коэффициенты спектральной яркости (КСЯ), или коэффициенты спектрального отражения (КСО).

Затем применяются алгоритмы атмосферной коррекции, так что эффекты затухания, вызванные рассеянием аэрозолей и поглощением водяным паром, озоном, кислородом и углекислым газом, удаляются из результатов восстановления отражательной способности поверхности (Martins et al., 2017).

В начале 1970-х гг. в ходе исследований были разработаны статистические взаимосвязи между спектральными характеристиками датчиков и параметрами качества воды (Ritchie et al., 1974, 2003). Эти эмпирические уравнения имели форму, заданную уравнениями (3) и (4):

$$Y = A + B * X, \quad (2)$$

$$Y = A * BX, \quad (3)$$

где Y – это дистанционно измеренная яркость / отражательная способность, а X – параметр качества воды, такой как chl-a или взвешенные отложения. A и B в этом уравнении являются факторами, полученными эмпирическим путем. Простым примером применения значений коэффициента отражения в исследованиях качества воды является оценка нормализованного разностного вегетационного индекса (NDVI).

Алгоритмы, используемые для мониторинга качества воды, можно резюмировать как:

1) эмпирические модели (Tassan, 1993),

2) физические модели, основанные на теории переноса излучения (Doertfer and Fischer, 1994),

3) и полуаналитические модели, сочетающие физику со статистическими методами [Zhang et al., 2016].

Наиболее проработан вопрос оценки границ водоемов. Чаще всего для этой цели используются вегетационные индексы NDVI и NDWI.

NDVI – нормализованный разностный вегетационный индекс:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}, \quad (5)$$

где NIR – ближний инфракрасный спектр; RED – красный (видимый) спектр.

Для воды данный индекс принимает значения от –1 до 0.

NDWI – нормализованный разностный водный индекс по Макфитерсу (1996):

$$NDWI = \frac{GREEN - NIR}{GREEN + NIR}, \quad (6)$$

где GREEN – зеленый (видимый) спектр; NIR – ближний инфракрасный спектр.

Для воды данный индекс принимает значения свыше 0,3. Для улучшения обнаружения открытой воды была предложена модификация нормализованного разностного индекса воды (MNDWI) путем замены спектрального диапазона NIR на SWIR.

Помимо указанных индексов для идентификации водоемов, паводковых зон, заболоченных участков могут использоваться и другие индексы: CEDEX, RE-NDWI, B_BLUE, AWEI(SH), AWEI(NSH).

Для оценки степени эвтрофирования в большинстве случаев используется индекс хлорофилла-а.

Для выявления массового развития фитопланктона и высших растений используют индекс мутности и цветности.

Индекс цветности в общем виде характеризует присутствие в воде окрашенных органических веществ (чаще всего гуминовых и фульвовых кислот), соединений железа и других металлов, а также загрязнение стоками. Индекс цветности по [1] в самом простом виде представляет отношение GREEN/BLUE либо (BLUE – RED)/(BLUE + RED).

Мутность определяется рассеянием света, вызванным взвешенными веществами в воде, что является противоположностью прозрачности и обычно получается с помощью мутномера. Индекс мутности (Turbidity) в общем виде [1] – отношение BLUE/(BLUE+GREEN+RED). Y. Sakuno et al. [9] рассмотрены другие подходы:

$$T1 = 10{,}613*R814 + 22{,}281; \quad (6)$$

$$T2 = 6834{,}7*R821/R763 - 6632{,}2; \quad (7)$$

$$T3 = 114{,}642*(R810 - (R730+R770)/2 + 361{,}95. \quad (8)$$

У J. Delegido et al. [5] мутность оценивается в NTU (Nephelometric Tur-bidity Unit):

$$Turb = 15{,}073* (SD)^{-1.276}, \quad (9)$$

где SD – глубина прозрачности, м.

В данном источнике глубина прозрачности по диску Секки (SD) рассчитывается следующим образом:

$$SD = 4{,}7134 *(R490/R560)^{2{,}5569}. \quad (10)$$

Другой подход к расчету прозрачности изложен у M. Bonansea et al. [3]:

$$SDT = 1{,}79 - 134{,}15 * Band_{RE1} + 157{,}72 * Band_{NIR} + 0{,}53 * \left(\frac{Band_{RE3}}{Band_{NIRn}} \right), \quad (11)$$

где BandRE1, BandNIR, BandRE3, BandNIR – спектральные каналы MSI/Sentinel-2, прошедшие атмосферную корректировку.

Индекс концентрации хлорофилла-а – отношение (BLUE-RED)/GREEN. Содержание хлорофилла-а также можно оценить с помощью уравнения [Harding et al., 1995]:

$$\lg(\text{Chl-a}) = a - b*\lg(R_{490}{}^2 / \{R_{460} * R_{520}\}), \quad (12)$$

где a и b – эмпирические константы, полученные на основе полевых измерений;

R460, R490, R520 – КСЯ соответствующих спектральных каналов.

Другой способ расчета концентрации хлорофилла-а у K. Ismail et al. [8]:

$$\text{Chl-a} = 0{,}0023*B03 - 0{,}0084*B04 + 0{,}010*B05 - 0{,}0036*B06 + 0{,}903, \quad (13)$$

где B03, B04, B05, B06 – значения КСЯ соответствующих каналов Sentinel-2.

Для эвтрофированных водоемов предложено рассчитывать концентрацию хлорофилла-а по следующему уравнению Y. Sakuno et al. [9]:

$$\text{Chl-a} = 1/R670 - R740/R710 \quad (14)$$

и

$$\text{Chl-a} = (1/R670 - 1/R710)/(1/R750 - R740). \quad (15)$$

По модели Gilerson et al. (2010) [7] предлагается вести расчет концентрации хлорофилла-а по степенной зависимости:

$$\text{Chla} = \left(\left(35{,}75 * \frac{B05}{B04}\right) - 19{,}3\right)^{1{,}124}, \quad (16)$$

где B04 и B05 – соответствующие спектральные каналы Sentinel-2.

Модель Gitelson et al. (2011) [8]:

$$\text{Chla} = \left(\left(\frac{1}{B04} - \frac{1}{B05}\right) * B06\right), \quad (17)$$

где B04, B05 и B06 – соответствующие спектральные каналы Sentinel-2.

Одна из проблем в оценке концентрации хлорофилла-а – широкий диапазон этих значений в оптически сложных водах и трудности с точностью определения. Поэтому C. Cairo et al. [4] предложен гибридный алгоритм для разных классов концентраций и эвтрофирования водоемов. На основе дерева решений выделено 3 класса и разработаны уравнения:

1) класс 1 – 2,89–22,83 мг/м^3

$$\text{Chl-a} = 74{,}35*(1/B04 - 1/B05)*B06) + 13{,}31, \quad (18)$$

что является продолжением модели Gitelson et al. [7]

2) класс 1 – 19,51-87,63 мг/м^3

$$\text{Chla} = 30{,}67 * e^{5682{,}47*\frac{B05-B04}{B05+B04}}; \quad (19)$$

3) класс 3 – до 600 мг/м^3:

$$\text{Chla}=4,66*e^{3,53*\frac{B05}{B03}} \quad (20)$$

– до 1000 мг/м^3:

$$\text{Chla}=-157,72*\left(\frac{\text{B06}}{\text{B03}}\right)^2+\left(810,11*\frac{\text{B06}}{\text{B03}}\right)-199,10. \quad (21)$$

Данные космических снимков позволяют оценивать уровень растворенного кислорода, нитратов, фосфатов, фикоцианина (индикатор цианобактерий), отмечено в обзорной работе Т. И. Кутявиной и др. [1].

Индекс концентрации фикоцианина, мг/л, рассмотрен в работе Sòria-Perpinyà X. et al. [10]:

$$PC=e^{2.6151*R740/R665-3.6369}. \quad (22)$$

Оценка растворенного кислорода в работе K. Ismail et al. [8]:

$$\text{Dissolved Oxygen}=-0,0167*\text{B08}+0,0067*\text{B09}+0,0162*\text{B10}+0,0083*\text{B11}+9,577. \quad (23)$$

Нитратов:

$$\text{Nitrate}=0,095*\text{B01}-0,014*\text{B02}-0,0262*\text{B03}-0,0126*\text{B09}-66,442. \quad (24)$$

Фосфатов:

$$\text{Phosphate}=0,010*\text{B01}-0,006*\text{B03}-0,022*\text{B04}+0,0388*\text{B05}-0,0105*\text{B8A}-\\-0,0155*\text{B10}-8,507. \quad (25)$$

В российской практике широко используются индексы NDWI и MNDWI для определения границ и площадей водоемов, анализируется динамика песчаных наносов в русле рек, проводится мониторинг оледенения водохранилищ.

Оценка хлорофилла-а проводилась, например на Иваньковском водохранилище О. А. Тихомировым и др. [2]:

$$\text{Chl-a} = -106,33 * (\text{B02} - \text{B04})/\text{B03} + 37,91, \text{ мкг/л}. \quad (26)$$

Там же оценивалась мутность воды:

$$\text{Мутность} = 1037,14 * (\text{B03}/(\text{B02} + \text{B03} + \text{B04})) - 335,33, \text{ TNU}. \quad (27)$$

Цветность воды измерялась в градусах (0–45º):

$$\text{Цветность} = -354,67*((\text{B02} - \text{B04})/(\text{B02} + \text{B04})) + 67,74, \text{ град}. \quad (28)$$

Для дальнейшего анализа нам понадобится информация о том, какие спектральные каналы Sentinel-2 используются для тех или иных индексов и какие формы зависимостей. Сведем полученную информацию в итоговую таблицу (табл.).

Для визуализации результатов анализа используются различные комбинации цветов. Представление космоснимка в естественных цветах помогает с в понимании и расшифровке снимков в ложных и псевдоцветах. Истинные цвета означают, что в качестве комбинации RGB используются соответственно каналы в красном, зеленом и синем спектрах, поэтому растительность видится зеленой, водоемы – синими.

Таблица

Спектральные каналы в индексах оценки водоемов

Индекс	Каналы	Форма зависимости
Индексы для определения границ водоемов		
NDVI	B04, B08	нормализация разности
NDWI	B03, B08	нормализация разности
MNDWI	B03, B11	нормализация разности
CEDEX	B04, B05, B11	линейная
RE_NDWI	B03, B05	нормализация разности
B_BLUE	B02, B08	нормализация разности
AWEI(SH)	B02, B03, B08, B11	линейная
AWEI(NSH)	B02, B08, B11, B12	линейная
Индексы для определения мутности воды		
Turbidity	B02, B03, B04, B05, B06, B07, B08	линейная, нормализация
Индексы для определения прозрачности воды		
SD	B02, B03	степенная
SDT	B05, B07, B08, B8A	линейная
Индексы для определения хлорофилла-а		
Chl-a	B02, B03, B04, B05, B06	линейная, логарифмическая, экспоненциальная, степенная, полиномиальная
PC (фикоцианин)	B04, B06	экспоненциальная
Цветность	B02, B03, B04	нормализация разности
Растворенный кислород	B08, B09, B10, B11	линейная
Нитраты	B01, B02, B03, B09	линейная
Фосфаты	B01, B03, B04, B05, B8A, B10	линейная

При этом надо понимать, что абсолютная цветопередача невозможна. Это связано и с различиями спектральной чувствительности человеческого глаза и сканирующего устройства, и с различиями спектрального излучения воспроизводящих устройств (монитора, например). Есть возможность управления яркостью, контрастностью, насыщенностью для решения задачи дешифрования изображения.

Представление снимков в ложных, или искусственных, цветах позволяет облегчить обнаружение характерных особенностей изучаемых объектов, которые трудно различить на снимке в естественных цветах.

Человеческий глаз воспринимает три спектральных диапазона. Поэтому для представления снимка в ложных цветах тоже обычно используют 3 спектральных диапазона, но соотношение RGB→RGB меняется, например, GBR→RGB или NRG→RGB, где «N» – это NIR, ближний инфракрасный диапазон. При NRG→RGB получается снимок, где растительность представлена в красном цвете.

Псевдоцветное изображение получается из полутонового изображения одного канала данных на основе градиента разных цветов в зависимости от значения интенсивности оттенков серого в соответствии с заданными критериями. Псевдоцвета позволяют более четко воспринять разницу в цветовом пространстве, чем между отдельными полутонами серого. Выбор вида градиента цвета связан с объектом исследования. Обычно более темный оттенок соответствует более высокому значению исследуемого показателя (большей концентрации,

например), оттенки цвета подбираются ближе к типовому восприятию объектов (глубины водоемов – синий цвет, чрезмерное развитие негативных явлений – красный цвет и т. д.).

Кроме того, может использоваться нарезка по плотности, что является разновидностью псевдоцвета. Нарезка по плотности делит изображение на несколько цветных полос путем деления на интервалы диапазона уровней градаций серого. В отличие от псевдоцвета, здесь используется не непрерывная цветовая шкала, а дискретная. Такой подход может быть полезным при расшифровке результатов расчетов индексов при оценке водоемов.

Анализ развития программного обеспечения в других сферах подсказывает, что развитие будет идти по пути унификации и создания единой платформы, адаптируемой под конкретный регион, район, водоем с помощью изменяемой конфигурации. Подобное уже происходит в лесном деле. В настоящее время идет создание ГИС для отдельных регионов, в дальнейшем будет рассматриваться вопрос их масштабирования на федеральном уровне.

Список литературы

1. Использование космических снимков для определения границ водоемов и изучения процессов эвтрофикации / Т. И. Кутявина, В. В. Рутман, Т. Я. Ашихмина, В. П. Савиных // Теоретическая и прикладная экология. 2019. № 3. С. 28–33.

2. Использование данных сенсора Landsat 8 (OLI) для оценки показателей мутности, цветности и содержания хлорофилла в воде Иваньковского водохранилища / О. А. Тихомиров, А. В. Бочаров, А. Б. Комиссаров, С. Д. Хижняк, П. М. Пахомов // Вестник Тверского государственного университета. Серия: Химия. 2016. № 2. С. 230–244.

3. Evaluating the feasibility of using Sentinel-2 imagery for water clarity assessment in a reservoir / M. Bonansea, M. Ledesma, R. Bazán, A. Ferral, A. German, P. O'Mill, C. Rodriguez, L. Pinotti // Journal of South American Earth Sciences, 95. 2019. P. 102–265.

4. Hybrid chlorophyll-a algorithm for assessing trophic states of a tropical Brazilian reservoir based on MSI/Sentinel-2 data / C. Cairo, C. Barbosa, F. Lobo, E. Novo, F. Carlos, D. Maciel, R. Flores Júnior, E. Silva, V. Curtarelli // Remote Sens. 2020. Vol. 12. P. 40.

5. Turbidez y profundidad de disco de Secchi con Sentinel-2 en embalses con diferente estado tróficoen la Comunidad Valenciana / J. Delegido, E. P. Urrego, E. Vicente, X. S. Perpinyà, J. M. Soria, M. P. Sandoval, A. Ruiz-Verdú, R. Peña, J. Moreno // Revista de Teledetección. 2019. P. 15–24.

6. Algorithms for remote sensing of chlorophyll-a in coastal and inland waters using red and near infrared bands / A. Gilerson, A. Gitelson, J. Zhou, D. Gulrin, W. Moses, I. Ioannou, S. Ahmed // Opt. Express, 2010. Vol. 18, N 23. P. 24109–24125. https://doi.org/10.1364/OE.18.024109

7. Estimation of chlorophyll-a concentration in productive turbid waters using a hyperspectral imager for the coastal ocean: The Azov Sea case study / A. B. Gitelson, C. Gao, R. R. Li, S. Berdnikov, V. Saprygin // Environ. Res. Lett., 2011. Vol. 6, N 2. P. 1–6. https://doi.org/10.1088/1748-9326/6/2/024023

8. Evaluating the potential of Sentinel-2 satellite images for water quality characterization of artificial reservoirs: The Bin El Ouidane Reservoir case study (Morocco) / K. Ismail, A. Boudhar, A. Abdelkrim, H. Mohammed, S. Mouatassime, A. Kamal, E. Driss, E. Idrissi, W. Nouaim // Meteorol. Hydrol. Water Manag. 2019. Vol. 7. P. 31–39.

9. Evaluation of Unified Algorithms for Remote Sensing of Chlorophyll-a and Turbidity in Lake Shinji and Lake Nakaumi of Japan and the Vaal Dam Reservoir of South Africa under Eutrophic and Ultra-Turbid Conditions / Y. Sakuno, H. Yajima, Y. Yoshioka, S. Sugahara, M. Abd Elbasit, E. Adam, J. Chirima // Water. 2018. Vol. 10. P. 618.

10.Remote sensing of cyanobacterial blooms in a hypertrophic lagoon (Albufera of València, Eastern Iberian Peninsula) using multitemporal Sentinel-2 images / X. Sòria-Perpinyà, E. Vicente, P. Urrego, M. Pereira-Sandoval, A. Ruíz-Verdú, J. Delegido, J. M. Soria, J. Moreno // Science of the Total Environment. 2020. Vol. 698. P. 134305.

УДК 556.5

Оценка гидрологических последствий изменения климата в АЗРФ с учетом таяния мерзлых грунтов

Е. В. Гайдукова (oderiut@mail.ru), М. Ю. Коновалов (mr.konovalov.maksim@gmail.com), И. О. Винокуров (vinig@rshu.ru)

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург

Аннотация. Рассмотрена методика учета таяния мерзлых грунтов при оценке последствий изменения климата для речных водосборов Арктики. Проведена апробация методики на некоторых водосборах, подверженных антропогенному воздействию. Сделана текущая и сценарная оценка водного режима выбранных водосборов. Выявлено, что изменение климата скажется на водном режиме рек в случае увеличения нормы температуры приземного воздуха хотя бы на один градус.

Ключевые слова: изменение климата, мерзлые грунты, Арктика, сценарная оценка.

Введение

В последнее время актуальным является вопрос об изменении климата. Особое внимание уделяется Арктическим и Антарктическим территориям с многолетней мерзлотой. В Российской Федерации большие по площади территории занимают зоны многолетней мерзлоты и прилегающие к ним участки. За последние 10–15 лет наблюдаются последствия от изменения климата в Арктической зоне РФ в виде оттаивания мерзлых пород, что сказывается на многих сферах деятельности человека (см., например, [1]).

Тематика климатических изменений в Арктике интересует как с гидрологической точки зрения, так и геологической. Ведь многие полезные ископаемые (энергетические, благородные металлы и драгоценные камни) добываются именно в зонах многолетней мерзлоты или на территориях, прилегающих к ним. При освоении северных территорий РФ были построены несколько атомных станций, а на крупных реках и водотоках различные гидротехнические сооружения. В связи с оттаиванием многолетнемерзлотных грунтов появилась необходимость гидрологических оценок и прогнозов для территорий, на которых находятся эти и другие гидротехнические сооружения.

Цель данного исследования заключается в оценке современного и сценарного гидрологического режима в районах крайнего севера с учетом таяния многолетней мерзлоты.

Исходные данные

В качестве района для апробации методики оценки последствий изменения климата с учетом таяния многолетней мерзлоты были выбраны три района: один вблизи г. Билибино, второй район – г. Норильск и третий – в Архангельской области. Недалеко от г. Норильска, в свое время, были открыты и сейчас разрабатываются месторождения Ni, Pd и Pt. А вблизи г. Билибино находится атомная и гидроэлектростанция. На северо-востоке от г. Архангельска находятся месторождения алмазов. Для первых двух районов было выбрано 2 реки с зональными площадями водосборов с 3 постами (рис. 1). Для района г. Архангельск были выбраны 4 реки.

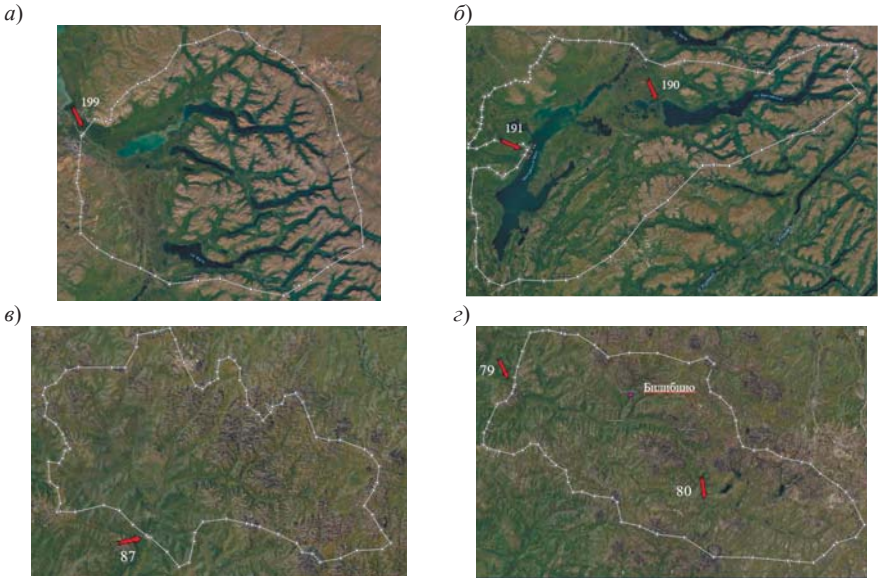


Рис. 1. Карта речных водосборов:
199 – р. Норилка – пос. Валек (а); 190 – р. Хантайка – исток, 191 – р. Хантайка – р. п. Снежногорск (б); 87 – р. Погынден – устье р. Инкуливеема (в); 79 – Малый Анюй – пос. Илирней, 80 – Малый Анюй – пос. Островное (г)

Была сделана статистическая обработка рядов, включающая проверку на однородность по критериям Фишера и Стьюдента (все ряды однородны), построение разностно-интегральных кривых, вычисление статистических характеристик и их погрешностей. Все основные гидрологические характеристики для текущего режима показаны в табл. 1.

Таблица 1

Оценка текущего гидрологического режима

Река – пункт	Число лет наблюдений, годы	Гидрологические характеристики			Относительные ошибки, %	
		$Q_{ср.}$, м^3/с	Cv	Cs	ε_Q	ε_{Cv}
Малый Анюй – пос. Илирней	42	60,5	0,24	0,46	3,74	11,2
Малый Анюй – пос. Островное	37	175	0,25	0,55	4,08	11,9
Погынден – устье р. Инкуливеема	35	59,0	0,31	0,21	5,32	12,4
Норилка – пос. Валек	45	435	0,15	–0,96	2,32	10,5
Хантайка – исток	29	273	0,17	1,01	3,10	13,3
Хантайка – п. Снежногорск	37	583	0,18	0,04	3,04	11,8
Золотница – д. Верхняя Золотница	40	22,8	0,23	0,011	3,64	11,4
Сояна – д. Сояна	41	52,1	0,14	0,37	2,15	11,1
Кулой – д. Кулой	61	33,4	0,19	0,43	2,37	9,19
Немнюга – д. Совполье	27	24,6	0,16	0,005	3,04	13,7

Методика оценки последствий изменения климата

Существуют различные методы определения содержания незамерзшей воды в мерзлотном грунте. Для рассматриваемых территорий подходит калориметрический метод, основанный на измерении теплового эффекта, возникающего при оттаивании мерзлого грунта. Определить расход воды при оттаивании грунта можно по следующей формуле [3]:

$$Q_{\text{отт}} = H_{\text{отт}}(W - W_t)\sigma,$$

$H_{\text{отт}}$ – глубина оттаивания грунта; W – влажность грунта; W_t – влажность грунта на границе текучести; σ – напряжение, зависящее от типа грунта (например, для суглинка σ = 1,75 т/м^3).

Необходимо знание влажности грунта на разных глубинах. Влажность грунта можно определить по выражению:

$$W = k_w W_p,$$

где k_w – коэффициент, принимающий значения в зависимости от числа пластичности и температуры грунта; W_p – влажность грунта на границе пластичности.

Влажность грунтов не измеряют на гидрометеорологической сети. Это осложняет использование метода. Но при необходимости можно приводить целенаправленное измерение этой характеристики для отдельных экономически важных водосборов.

Расход воды при оттаивании грунта включается в методику оценки последствий изменения климата, которая основана на решении системы дифференциальных уравнений для начальных статистических моментов [2]:

$$\begin{aligned} -\bar{c}m_1 + \bar{X} &= 0, \\ -2\bar{c}m_2 + 2\bar{N}m_1 + G_{\tilde{N}} &= 0, \end{aligned} \qquad (1)$$

где m_1, m_2 – первый и второй начальные моменты, характеризующие среднее значение и дисперсию величин; $\bar{X}$ и $G_{\tilde{N}}$ – норма осадков и характеристика скорости изменения дисперсии этих осадков; $\bar{c}$ – коэффициент обратный коэффициенту стока k, который можно связать с нормами температуры приземного воздуха и осадков, которые входят в расчетные формулы испарения. Апробированы на ретроспективном материале наиболее распространенные формулы для испарения, представленные в табл. 2.

Для месторождения алмазов была применена формула Ольдекопа–Тюрка, а для района г. Билибино применена формула Шрайбера–Тюрка. Для остальных трех выбранных водосборов, не удалось подобрать единой формулы, потому что они располагаются в разных географических зонах. Результаты применения формул при поверочных прогнозах по системе (1), когда дается прогноз с одной части ряда на другую и эти части максимально неоднородны относительно друг друга по норме стока, показаны в табл. 3 (где Δ = (факт. – расчет.)/факт. 100 %). Видно, что для некоторых водосборов не удалось получить удовлетворительных результатов, например, для водосбора р. Золотница, который находится под серьезной антропогенной нагрузкой (добыча алмазов).

Таблица 2

Используемые формулы для расчета испарения

Автор	Расчетная формула	
	испарение	испаряемость
П. Шрайбер	$E = P\left(1 - \ell^{-E_0/P}\right)$	–
Э. М. Ольдекоп	$E = E_0 \text{th}\left(\frac{P}{E_0}\right)$	–
М. И. Будыко	$E = \sqrt{E_0 \text{th}\left(\frac{P}{E_0}\right) P\left(1 - \ell^{-E_0/P}\right)}$	–
Л. Тюрк	–	$E_0 = 300 + 25T^2 + 0{,}05T^3$
А. Н. Постников	–	$E_0 = (350 + 5{,}5T)\, e^{0{,}07T}$
E – норма испарения, мм; P – норма осадков, мм; E_0 – испаряемость, мм		

Таблица 3

Результаты подбора формулы для расчета испарения

Река – пункт	Поверочный прогноз с первой части ряда на вторую		Поверочный прогноз со второй части ряда на первую	
	ΔQ, %	ΔCv, %	ΔQ, %	ΔCv, %
Золотница – д. Верхняя Золотница	70	–88	65	–64
Сояна – д. Сояна	30	–4	22	–30
Малый Анюй – п. Илирней	–28	8	–10	8
Малый Анюй – п. Островное	–13	–1	2	6

Изменяя в соответствии с выбранным климатическим сценарием прогнозные (сценарные) значения норм осадков и температуры воздуха, можно получить оценку будущего гидрологического режима рассматриваемой территории. Но самое главное то, что учет нормы температуры приведет к изменению коэффициенту стока, а значит, и к косвенному учету таяния многолетней мерзлоты.

Результаты исследования

Было выпущено две серии имитационных сценарных прогнозов: 1 – норма температуры увеличена на 0,5 °С и 1,0 °С, норма осадков оставлена неизменной; 2 – норма температуры увеличена на 0,5 °С и 1,0 °С, осадки увеличены на 20 %.

Учет нормы температуры приведет к изменению коэффициенту стока, а значит, и к учету таяния многолетней мерзлоты. Коэффициент стока тоже был изменен с учетом таяния мерзлоты. Результаты в отклонениях фактических значений от сценарных (Δ = (факт. – сцен.)/факт. 100 %) представлены в табл. 4 и 5.

Из табл. 4 видно, что территория вблизи г. Билибино, почувствует изменение климата, если произойдет значительное увеличение температуры. Район водосбора р. Хантайка реагирует меньше на изменения климата нежели район р. Норилка – пос. Валек, вблизи которого располагаются месторождения благородных и цветных металлов. Территория, на которой расположено месторождение

алмазов им. М. В. Ломоносова, почувствует изменение климата, если произойдет увеличение температуры хотя бы на 1 °С. и, как следствие изменение коэффициента стока.

Таблица 4

Первая оценка сценарного гидрологического режима

Река – пункт	Температура увеличена на 0,5 °С		Температура увеличена на 1,0 °С	
	Δ*Q*, %	Δ *Cv*, %	Δ*Q*, %	Δ*Cv*, %
Малый Анюй – пос. Илирней	20	–12	13	–7
Малый Анюй – пос. Островное	79	–118	75	–102
Погынден – устье р. Инкуливеема	39	–28	31	–20
Норилка – пос. Валек	41	–30	38	–27
Хантайка – исток	30	–20	28	–17
Хантайка – п. Снежногорск	6	–3	2	–1
Золотница – д. Верхняя Золотница	55	–49	57	–53
Сояна – д. Сояна	36	–25	39	–28
Кулой – д. Кулой	22	–13	25	–15

Как можно увидеть в табл. 5, при увеличении нормы осадков изменения климата произойдут примерно по такому же сценарию, как показано в табл. 4, но более мягче, исключение составляет водосбор р. Хантайка – п. Снежногорск, которое можно связать с влиянием Хантайского водохранилища. Для месторождений алмазов им. М. В. Ломоносова произойдет изменение климата, если увеличится температура и норма осадков.

Таблица 5

Вторая оценка сценарного гидрологического режима

Река – пункт	Температура увеличена на 0,5 °С, осадки увеличены на 20 %		Температура увеличена на 1,0 °С, осадки увеличены на 20 %	
	Δ*Q*, %	Δ *Cv*, %	Δ*Q*, %	Δ*Cv*, %
Малый Анюй – пос. Илирней	–4	11	–13	14
Малый Анюй – пос. Островное	66	–56	61	–47
Погынден – устье р. Инкуливеема	17	0	8	5
Норилка – пос. Валек	29	–8	26	–6
Хантайка – исток	16	0	13	2
Хантайка – п. Снежногорск	–11	14	–15	15
Золотница – д. Верхняя Золотница	49	–27	51	–30
Сояна – д. Сояна	27	–7	30	–9
Кулой – д. Кулой	14	2	16	0
Немнюга – д. Совполье	–18	16	–14	15

Выводы

Сделано первое приближение к разработке методики учета таяния многолетней мерзлоты при оценке гидрологических последствий изменения климата. Получены результаты имитационной сценарной оценки для речных бассейнов, окружающих г. Норильск и г. Билибино, а также месторождение алмазов им. М. В. Ломоносова.

Анализ полученных результатов показал, что реакция на изменения климата в двух первых регионах будет мало отличаться друг от друга. На территории водосборов рек Золотница и Сояна последствия изменения климата могут быть более значимыми.

Планируется разработка региональных формул связи коэффициента стока с климатическими характеристиками.

Исследование реализовано при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования, грант № FSZU-2020-0009.

Список литературы

1. *Долгополова Е. Н.* Роль многолетнемерзлых пород в формировании гидролого-морфологического режима устьев рек водосбора Северного Ледовитого океана // Арктика: экология и экономика, № 4 (32), 2018. https://doi.org/10.25283/2223-4594-2018-4-70-85

2. Методические рекомендации по оценке обеспеченных расходов проектируемых гидротехнических сооружений при неустановившемся климате / под ред. В. В. Коваленко. СПб. : РГГМУ, 2010. 50 с.

3. СНиП 2.02.04-88. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. URL: http://docs.cntd.ru/document/9056423 (дата обращения: 30.01.2020).

УДК 556.5:551.579(571.65)

К защите Уссурийска от наводнений

С. А. Гавриков (sergeigavrikov@mail.ru)

АО «Дальневосточный научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации» (АО «ДальНИИГиМ»), Владивосток

Аннотация. Кратко освещаются гидрометеорологические условия катастрофических наводнений в городе Уссурийск Приморского края. Показывается, что без соответствующей инженерной защиты Уссурийск обречен на такие наводнения. Обосновывается наиболее рациональный способ избавления Уссурийска от наводнений.

Ключевые слова: дождевые паводки, катастрофические наводнения, обводной канал, водоотводный канал, дамбы, водохранилища.

Введение

Для рек южной части Дальнего Востока России характерен дождевой паводочный режим на протяжении всего периода открытого русла: с апреля по октябрь. Но чаще всего дождевые паводки бывают в июле – сентябре. Они часто достигают большой высоты и в результате подъема уровня воды в реке вызывают наводнения – затопления водой сельскохозяйственных угодий, населенных пунктов и промышленных предприятий, расположенных выше ежегодно затапливаемой поймы в пределах речной долины.

Довольно часто, повторяемостью примерно один раз в десять лет для данной местности, подверженной наводнениям, бывают и катастрофические наводнения – когда происходит значительное или полное затопление населенных пунктов, сельскохозяйственных угодий и промышленных предприятий с их повреждением или полным разрушением.

Гидрометеорологические условия наводнений

Наводнения в южных и юго-восточных районах Приморского края обусловлены главным образом выпадением дождей при прохождении западных и юго-западных циклонов, а также тропических циклонов (тайфунов), которые перемещаются с Желтого моря на Японское море, захватывая приморские материковые районы.

Подвергается наводнениям, в том числе катастрофическим, и город Уссурийск, расположенный на южной окраине Западно-Приморской равнины. За последние 70 лет наиболее разрушительные катастрофические наводнения в Уссурийске были в 1943, 1950, 1965, 2015, 2017, 2018 гг.

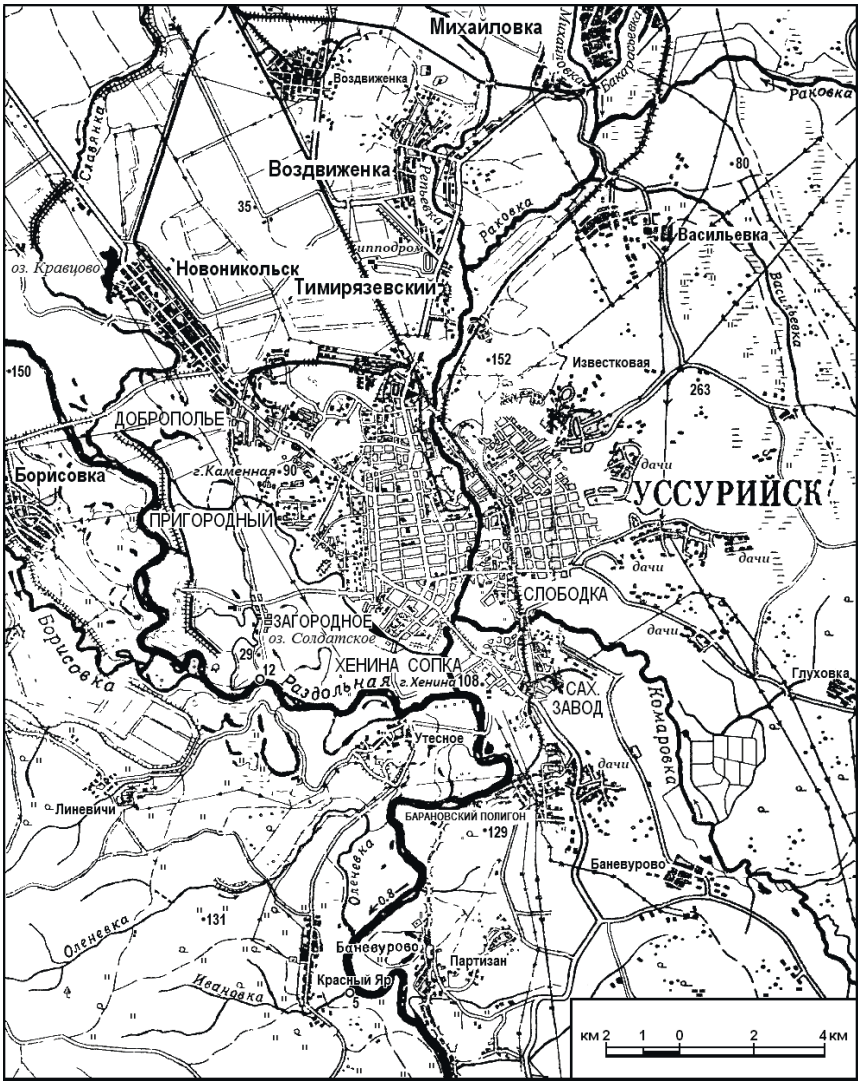
Рельеф территории Уссурийска преимущественно равнинный. Вдоль южной окраины Уссурийска течет р. Раздольная с очень большой для данного района площадью водосбора – 16 800 км^2. Здесь же, на южной окраине Уссурийска, в Раздольную впадает с севера р. Комаровка (площадь водосбора 1490 км^2), которая за три километра до своего впадения в Раздольную принимает справа (с севера), так же на территории города, в южном его районе, реку Раковку площадью водосбора 812 км^2 (рис. 1).

При таких физико-географических условиях территории с учетом того, что дожди циклонического происхождения, как правило, продолжительные и обложные (охватывают большие по площади территории), и поэтому формируют на реках очень большие паводки, город Уссурийск обречен на наводнения.

Схема затопления Уссурийска в периоды прохождения летних циклонов предельно проста, как это отчетливо показывается в статье корреспондента газеты «Владивосток» Сергея Кожина «Обуздать большую воду» [3], подготовленной по материалам статьи [1], предоставленным автором настоящего доклада, гидрологом, кандидатом технических наук Сергеем Гавриковым, ведущим научным сотрудником АО «ДальНИИГиМ».

В сильный обложной дождь воды, собираемые реками Комаровкой и Раковкой с их водосборных площадей, перемещаются вниз по равнине к р. Раздольной. Но и у Раздольной уровень воды к тому времени из-за дождя уже высоко поднялся (до 7 м и более): площадь ее водосбора (13 400 км^2) сравнительно очень большая – в 16 раз больше, чем у Раковки. Поэтому переполненная р. Раздольная не может свободно принять в свое русло паводковый сток еще двух рек – Комаровки и Раковки. В результате воды всех трех рек выходят не только из берегов, но и далеко за пределы поймы, затопляя большие по площади территории города.

Река Раковка, протекающая через Уссурийск в направлении с севера на юг, вносит очень большой вклад в затопление территории города во время наводнений. Кроме того, также в большой мере это является следствием концентрации дождевого паводочного стока в русле этой реки в 4,0–11,6 км выше северной окраины Уссурийска. Здесь на этом сравнительно очень коротком семикилометровом участке Раковки в нее впадают с разных сторон последовательно четыре реки: Бакарасьевка, Михайловка, Васильевка и Репьевка.



Топографическая основа по карте масштаба 1: 200 000. Состояние местности на 1987 г.

Рис. 1. Речная сеть в районе Уссурийска

Поэтому не случайно при катастрофическом наводнении 1943 г. максимальный расход воды р. Раковки был 1050 м^3/с (30 августа). Для сравнения: на р. Амуре в Хабаровске у железнодорожного моста расход воды в период открытого русла в среднем составляет около 10 000 м^3/с. Образно говоря, 30 августа 1943 г. через г. Уссурийск с севера на юг шла десятая часть Амура. Но к этому потоку воды Раковки надо еще добавить паводковый сток Комаровки, расход

воды которой перед впадением в нее Раковки в этот день составлял 406 м^3/с. А по р. Раздольной в это время как раз проходил паводок с расходом воды 5780 м^3/с (образно, шла половина Амура).

Материалы и методы

Приведенные сведения будут полезны для проработки различных вариантов защиты Уссурийска от наводнений. В этой связи заметим, что разрабатывавшийся в 1980-х гг. проектно-изыскательским институтом «Союздальгипрорис» и частично реализованный вариант защиты Уссурийска от наводнений с помощью одних только дамб имеет недостатки. Для достижения достаточной эффективности такой защиты необходимо построить три дамбы, окружающие междуречья шести рек: Раздольной и Раковки, Раковки и Комаровки, Комаровки и Раздольной. Но, во-первых, высота этих дамб должна быть высотой не менее 7 м! А во-вторых, внутри образующихся замкнутых пространств будет накапливаться дождевой сток с огромных ограждаемых территорий. Откачивать эти очень быстро накапливающиеся воды предлагалось мощными насосами, устанавливаемыми на дамбах в общей сложности в количестве 10–12 станций, со сбросом откачиваемой воды за пределы ограждаемых территорий. Реализовать этот вариант оказалось технологически сложно и экономически нецелесообразно. Прежде всего, потому что для насосных станций требуется много электроэнергии, а также соответствующий уход для поддержания их в обязательно исправном состоянии на протяжении всего паводочного летне-осеннего периода каждого года.

Еще один вариант защиты Уссурийска – путем строительства обводного канала для р. Раковки вдоль северной и северо-западной окраины города со сбросом ее вод непосредственно в реку Раздольную выше Уссурийска не был принят из-за дороговизны и недостаточной эффективности при его осуществлении как единственного защитного мероприятия.

По мнению ряда специалистов, в том числе и автора доклада, оптимальный проект спасения Уссурийска от наводнений предложен в конце 1980-х гг. бывшим директором ДальНИИГиМ Анатолием Степановым. Он заключается в отводе р. Раздольной от Уссурийска путем устранения ее петли у южной окраины Уссурийска (см. рис. 1). Для этого надо построить спрямляющий водоотводный канал от створа у села Утесное (выше села) к створу у села Красный Яр (выше села). Длина канала составит примерно 7 км, а падение реки на этом участке – 7 м. При этом р. Комаровка с впадающей в нее Раковкой потечет по освободившемуся широкому руслу р. Раздольной, которое свободно примет паводковый сток Комаровки и Раковки.

Устройство спрямляющего водоотводного канала предлагалось осуществлять в комплексе с устройством водохранилищ комплексного, в том числе противопаводкового, назначения на притоках Раковки, впадающих в нее ниже существующего Раковского водохранилища, а также с устройством дамб на отдельных участках Раковки, Комаровки и Раздольной.

В спрямляющем канале увеличится общий уклон водной поверхности р. Раздольной и, как следствие, увеличатся скорости течения. Для уменьшения затрат на крепление береговых откосов канала в целях защиты их от размывов можно предусмотреть строительство гидроэлектростанции на канале.

Автор доклада участвовал в разработке этого проекта как гидролог. Идея его реализации уже начала приобретать реальные черты, но осуществить ее помешали наступившие в стране на рубеже 1980–1990-х гг. социально-политические и экономические изменения и, как следствие, отсутствие необходимого финансирования. С тех пор ничего нового по защите Уссурийска от наводнений не предлагалось. А город продолжает подвергаться катастрофическим наводнениям.

Выводы

1. Назначение водохранилищ для борьбы с наводнениями обычно стараются совместить с другим водохозяйственным их назначением (водоснабжение, орошение, энергетическое водопользование). Поэтому разработка мероприятий по защите населенных пунктов и сельхозугодий от наводнений осуществляется при составлении бассейновых схем комплексного использования водных ресурсов.

2. Проблема защиты от наводнений должна решаться на основе методов управления максимальным стоком с точки зрения оптимизирования максимальных расходов воды. Следует достигать не полного исключения из режима рек паводков, которые выполняют ряд функций, полезных в экологическом отношении (например, санитарная промывка русла), а предотвращения концентрации паводковых вод свыше определенного их объема, превышение которого сопровождается наводнением.

В этой связи целесообразно отводить от Уссурийска по спрямляющему водоотводному каналу только часть стока р. Раздольной, включая большие паводки, обусловливающие наводнения в городе. Технически это достигается путем устройства вододелительного узла в голове водоотводного канала.

3. Основные гидрологические характеристики, необходимые для проработки вариантов строительства спрямляющего водоотводного канала, приведены в работе автора [1]. Чтобы использовать их в качестве расчетных в настоящее время, они должны быть уточнены путем дополнительного использования данных гидрометеорологических наблюдений на постах гидрометеорологической службы (Росгидромета) и других ведомств за последние годы, в соответствии с требованиями СП 33-101-2003 [4].

4. Для определения водохозяйственных параметров водохранилищ по югу Дальнего Востока (Средний и Нижний Амур, Приморье) автором разработаны практические способы определения требующихся расчетных гидрологических характеристик: годового стока, его внутригодового распределения, минимального стока при отсутствии или недостаточности (а для внутригодового распределения стока – и при наличии) данных гидрометрических наблюдений в заданном створе [2]. Их главные преимущества перед существующими аналогами основываются на значительно большем объеме гидрометрической информации, обобщенной по всей территории юга Дальнего Востока и одновременно по всем вышеуказанным характеристикам стока, что повышает надежность выводов.

Список литературы

1. *Гавриков С. А., Головин В. Л.* Гидрометеорологические условия наводнений в г. Уссурийске // Экологические и экономические проблемы мелиорации и водного хозяйства на Дальнем Востоке России : сб. науч. тр. ДальНИИГиМ. Владивосток : ДВО ДОП РАН, 2001. Вып. 14. С. 192–202.

2. *Гавриков С. А.* Научные инженерно-гидрологические основы использования речного стока и защиты от наводнений на юге Дальнего Востока России // Проблемы мелиорации и водного хозяйства на Дальнем Востоке России : сб. науч. тр. ДальНИИГиМ. Владивосток : Дальнаука, 2017. Вып. 19. С. 47–79.

3. *Кожин С.* Обуздать большую воду. Владивосток, 1916. С. 5.

4. СП 33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. М. : Госстрой России, 2004. 120 с.

УДК 504.455+504.064.36:574

Эмиссия метана с разнотипных водохранилищ

М. Г. Гречушникова (allavis@ mail.ru)[1,2], И. А. Репина (repina@ifaran.ru)[1,2],
Д. В. Ломова (florainter@mail.ru)[3], В. А. Ломов (lomson620@mail.ru)[1]

[1]*Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва*
[2]*Институт физики атмосферы РАН, Москва*
[3]*Институт водных проблем РАН, Москва*

Аннотация. Приведены результаты квазисинхронных измерений удельного потока метана с поверхности разнотипных водохранилищ на ЕТР. Выявлены основные факторы различий удельного потока метана, оценена эмиссия с поверхности каждого водоема.

Ключевые слова: метан, растворенный кислород, первичная продукция, донные отложения.

Выделение в атмосферу продуктов разложения органического вещества в донных отложениях искусственных водоемов является одним из видов антропогенного вклада в увеличение содержания парниковых газов в атмосфере. Изучение и количественная оценка этого вклада представляется весьма актуальной.

В работе [5] приведена база данных, содержащая сведения об удельном потоке метана с разнотипных водохранилищ мира. Однако, если изучить первоисточники, то следует, что имеющиеся данные зачастую являются результатами единичных съемок, а не регулярного мониторинга. Исследование потоков метана на Можайском водохранилище показало значительную пространственно временную изменчивость его величины. При этом наибольшее значение удельного потока эмиссии метана приходилось на период перед разрушением прямой стратификации, когда из-за продолжительного наличия бескислородных условий, большой продуктивности и повышения температуры придонной воды к концу лета образование метана было наиболее интенсивным и его концентрация в придонном слое достигала нескольких тысяч мкл/л [1].

Данная работа посвящена сравнению результатов изучения содержания и эмиссии метана разнотипных водохранилищ на основе полевых данных, полученных в августе 2021 г.

Объекты и методы исследования

Иваньковское водохранилище создано в 1937 г., имеет среднегодовой коэффициент водообмена (Кв) 7,9 год$^{-1}$. Водоем используется для подачи воды в столицу по каналу имени Москвы (в среднем 1,5 км^3/год), для охлаждения систем Конаковской ГРЭС, что сказывается на тепловом режиме водоема ниже по течению, а также для судоходства, добычи строительного материала, рекреационных целей и т. д. Водохранилище относится к водохранилищам долинного типа и имеет сложную конфигурацию. Полный объем при НПУ − 1 120 млн м^3, полезный − 813 млн м^3, площадь водного зеркала при НПУ 327 км^2, длина 134 км, средняя глубина 3,4 м, максимальная у плотины – 19 м Морфологические особенности его плесов обусловливают их эколого-биологические различия [2]. *Цимлянское водохранилище* – один из крупнейших искусственных водоемов юга России, созданный в 1952 г. в нижней части бассейна р. Дон, осуществляет многолетнее регулирование с Кв 0,8 год$^{-1}$ [3]. Его водохозяйственный комплекс включает в себя объекты питьевого, сельскохозяйственного и технического водоснабжения, атомной и гидроэнергетики (Цимлянской ГЭС и Ростовской АЭС), рекреационной сферы. Цимлянское водохранилище представляет собой водоем руслового типа, площадь водохранилища 2700 км², объем 23,7 км³, длина 180 км, максимальная ширина 30 км, средняя глубина 8,8 м. Летом Цимлянское водохранилище «цветет» из-за высокого содержания в воде азота и фосфора за счет сбросов органических стоков, применения на полях минеральных удобрений и притока с водосбора большой площади. Интенсивное размножение сине-зеленых водорослей приводит к накоплению в воде органических веществ, которые в свою очередь приводят к расходованию кислорода и заморным явлениям. *Чиркейское котловинно-долинное водохранилище* − крупнейшее в Дагестане из каскада водохранилищ на р. Сулак, строительство плотины и заполнение водоема происходило в 1970−1974 гг. Площадь водной поверхности − 42,4 км², объем − 2,78 км³, полезный объем − 1,32 км³, наибольшая глубина − 220 м (в настоящее время водоем заилен, наибольшие глубины уменьшились до 120 м), изменение уровня при сработке от НПУ − 40 м, Кв 7,9 год$^{-1}$. Грунтообразовательный процесс в водохранилище осуществляется в основном за счет размыва береговой линии. В придонном слое глубоководной части водохранилища сезонные колебания температуры воды прослеживаются слабо, их размах составляет всего 2,5 °С при средней температуре воды 7,2 °С. Термоклин разрушается в холодный период года, но водохранилище не замерзает. Чиркейское водохранилище по видовому составу биоты и количеству живых организмов относится к малопродуктивным (олиготрофным) водоемам [6].

Гидролого-гидрохимические съемки водохранилищ были проведены в 2021 г. 4–5 августа на Иваньковском, 9–10 августа на Цимлянском и 25 августа на Чиркейском водохранилище. Содержание метана в отобранных пробах определялось на газовом хроматографе с пламенно-ионизационным детектором Хроматэк-Кристалл 5000.2. Расчет концентрации метана в пробах воды производился методом headspace. На станциях (рис.) проводилось измерение удельного потока метана в атмосферу методом плавучих камер [4]. По ходу движения судна

отбирались пробы воды для определения интенсивности продукционно-деструкционных процессов скляночным методом в кислородной. Светлая и темная склянки экспонировались на борту судна в течение 3–4 ч, величины валовой продукции и деструкции определялись в пересчете на 1 ч. На станциях производилось зондирование водной толщи для определения вертикального профиля температуры, электропроводности и растворенного кислорода приборами YSI. Определение содержания органического вещества в грунтах дна определялось по потере веса при прокаливании (за исключением Чиркейского водохранилища, где не удалось отобрать пробы грунта дночерпателем Экмана-Бэрджа).

Рис. Схема расположения станций на акватории водохранилищ

Результаты измерений

В августе во всех исследованных объектах наблюдалась прямая стратификафия: в Иваньковском водохранилище разность поверхностной и придонной температуры воды составила 1–2,7 ºС (наибольшая разность в приплотинном районе, станции 4 и 5); в Цимлянском водохранилище – 0,7–7,2 ºС (минимальные значения для мелководных станций 1 и 4, наибольшие для глубоководных станций 3 и 5). В Чиркейском водохранилище наблюдалось два слоя скачка: синоптический на горизонтах 9–12 м с уменьшением температуры воды с 25–26 ºС до 21 ºС и сезонный с уменьшением температуры воды с 18 до 11 ºС. Ниже горизонта 60 м температура воды не превышала 10,7 ºС. В Иваньковском водохранилище содержание растворенного кислорода в поверхностном слое составило 9,5–10,7 мг/л, минимальное содержание 2,5 мг/л измерено в придонном слое на ст.4. В поверхностном слое Цимлянского водохранилища содержание растворен-

ного кислорода составило 9,2–12,9 мг/л, на глубоководных станциях 3 и 5 кислород отсутствовал ниже горизонтов 12 и 15 м соответственно. Содержание растворенного кислорода в поверхностном слое Чиркейского водохранилища было наиболее низким (8,4–8,9 мг/л), что связано с наименьшей продукционной активностью этого водоема. В придонных горизонтах бескислородные условия не зафиксированы, содержание кислорода было не менее 4,5 мг/л даже на самых глубоководных станциях (табл. 1).

Наибольшей продуктивность в исследуемый период отличалось Цимлянское водохранилище (0,7–1,5 мгO_2/(л·час). На Иваньковском водохранилище минимальные значения валовой продукции измерены в русловой части на ст.1 (0,17 мгO_2/(л·час), а максимальные на ст. 2 – мелководном продуктивном Шошинском плесе (0,63 мгO_2/(л·час). В Чиркейском водохранилище величина валовой продукции составила 0,06 мгO_2/(л·час), т. е. на 1–2 порядка меньше, чем в первых двух водоемах.

Наибольшим содержанием органического вещества (ОВ) отличались грунты Цимлянского водохранилища (26–29 %) из-за его наибольшей продуктивности. На ст. 5 снижение содержание ОВ может быть обусловлено близостью высокого берега и увеличением доли терригенного материала при абразии. На мелководных станциях 2 и 4 грунт песчаный. Содержание ОВ в грунтах Иваньковского водохранилища на ст. 2–5 составило 12–17 %, на ст. 1 грунт песчаный.

Во всех трех водоемах наблюдалось увеличение содержания метана от поверхности к придонному слою. В Иваньковском водохранилище у дна и у поверхности содержание метана возрастало от верховьев к плотине, достигая наибольших величин на ст. 5 (14,1 и 132,3 мкл/л соответственно). В Цимлянском водохранилище в придонных слоях глубоководных станций содержание метана было больше на порядок (до 1700–2300 мкл/л), что обусловлено его меньшей проточностью и бескислородными условиями в гиполимнионе, несмотря на то что придонная температура воды на глубоководных станциях ниже, чем в Иваньковском водохранилище (19,2–20,6 ºС и 21,5–22 ºС соответственно). Минимальное содержанием метана характерно для Чиркейского водохранилища (не более 5 мкл/л), что обусловлено низкими значениями температуры придонного слоя, значительной глубиной и хорошей аэрацией водной толщи.

Наибольшая величина удельного потока метана (более 300 мгС/($м^2$·сут) измерена на Иваньковком водохранилище в относительно мелководном Шошинском плесе. На станциях 3–5 величина удельного потока меньше на порядок из-за большей глубины. Достаточно большое значение потока на ст. 4 может быть связано с наличием пятна цветения сине-зеленых водорослей. Для Цимлянского водохранилища минимальные значения потока метана (13–22 мгС/($м^2$·сут) характерны для мелководных станций с песчаным грунтом (ст. 1 и 4). Для глубоководных станций величина потока составила порядка 60–180 мгС/($м^2$·сут). Станции 3 и 5 были очень схожи по условиям и гидрологическим характеристикам, но из-за большей глубины поток на ст. 5 меньше.

Таблица 1

Результаты полевых измерений

Станция	Горизонт	CH_4, мкл/л	мгС/($м^2$·сут)	d %	ОВ %	O_2, мг/л
Иваньковское водохранилище 5–6 августа 2021						
И1	0 м	4,7	10,5			9
И1	10,4 м	4,6				3,9
И2	0 м	10,8	334	5,5	12,3	10,5
И2	9,5 м	17,2				3,5
И3	0 м	9,9	31,9	7,2	15,9	10,4
И3	13,5 м	16,0				2,9
И4	0 м	7,8	223,8	6,5	14,5	10,7
И4	14,5 м	68,5				2,5
И5	0 м	14,1	68,9	8,0	17,1	9,5
И5	17 м	132,3				6
Цимлянское водохранилище 9–10 августа 2021						
Ц1 0 м	0 м	16,6	13–13,9			12
Ц1 2 м	2 м	12,2				9,5
Ц2 0 м	0 м	0,6	45,8–47,2	6	26,1	7,7
Ц2 12 м	12 м	59,7				0,4
Ц3 0 м	0 м	4,7	118,6–123,7	6,9	29,9	10,1
Ц3 11 м	11 м	6,3				4,9
Ц3 13 м	13 м	698,2				0,4
Ц3 18 м	18 м	1702,2				0,3
Ц4 0 м	0 м	3,2	16,6–22,3			12,9
Ц4 4 м	4 м	5,0				5,9
Ц5 0 м	0 м	5,0	68,1–76,9	2,8	11,4	9,2
Ц5 14 м	14 м	5,40				6,7
Ц5 17 м	17 м	1214,8				0,3
Ц5 20 м	20 м	2300,3				0,3
Ц6 0 м	0 м	8,7	63,3–183,3			10,3
Ц6 7 м	7 м	7,7				7,6
Чиркейское водохранилище 25 августа 2021						
Ч1 0 м	0 м	0,37	0–0,85			8,9
Ч1 50 м	50 м	1,06				6,4
Ч1 100 м	100 м	0,42		нд	нд	5,1
Ч2 пов	0 м	0,18	0			8,8
Ч2 30 м	30 м	1,35		нд	нд	6,5
Ч3 0 м	0 м	0,60	0–0,1			8,4
Ч3 15 м	15 м	2,33				6,9
Ч3 40 м	40 м	1,66		нд	нд	6,4
Ч4 0 м	0 м	0,29	0–0,82			8,4
Ч4 10 м	10 м	1,82				8,7
ч4 14 м	14 м	2,68				7,7
ч4 100 м	100 м	0,80		нд	нд	4,7
Ч5 0 м	0 м	0,30	0,64–1,31			8,6
Ч5 10 м	10 м	0,94				8,7
Ч5 16 м	16 м	3,02				7,5
Ч5 40 м	40 м	1,76		нд	нд	6,8
Ч6 0 м	0 м	0,32	0,15–0,97			8,7
Ч6 12 м	12 м	2,02				8,9
Ч6 18 м	18 м	3,13		нд	нд	7,6
Ч7 пов	0 м	0,68	1,13–1,77			8,7
Ч7 16 м	16 м	0,79				8,1
Ч7 30 м	30 м	4,43		нд	нд	7,6

Удельный поток метана с поверхности Чиркейского водохранилища не превысил 1,8 мгС/(м^2·сут), что соизмеримо с точностью метода. Столь низкие значения потока метана связаны с олиготрофным статусом водоема и большими темпами заиления минеральной взвесью, которая поступает с притоком и при абразии берегов. Также стоит отметить, что выше водохранилища его правый приток зарегулирован, и загрязнения от поселков в долине Аварского Койсу и его притоков аккумулируются в каскадах водохранилищ. Андийское Койсу пока находится в естественном состоянии.

Для оценки и сравнения величины эмиссии метана с поверхности изученных водохранилищ по результатам наблюдений предложена следующая параметризация (табл. 2). С учетом батиграфических кривых водоемов наибольшая эмиссия характерна для Цимлянского водохранилища (270 274 кгС/сут) как из-за его наибольшей площади, так и наибольшего удельного потока. Выход метана из Иваньковского водохранилища на 2 порядка меньше (6295 кгС/сут) из-за меньшей площади. Эмиссия метана с Чиркейского водохранилища оценивается всего в 24 кгС/сут. Следует отметить, что данные значения относятся только к исследованному периоду, в другие сезоны года удельный поток с Иваньковского и Цимлянского водохранилищ может быть существенно меньше из-за низкой температуры воды и хорошей аэрации водной толщи. Например, по данным полевых работ в апреле 2021 г. удельный поток в припротинной части Цимлянского водохранилища не превышал 1,3 мгС/(м^2·сут), а это значит, что в период весенней конвекции общая эмиссия с этого водоема не более 3500 кгС/сут.

Таблица 2

Параметризация удельного потока метана

Водохранилище	Горизонты	Удельный поток, мгС/(м^2·сут)	Площадь, км^2	Эмиссия, кгС/сут	Эмиссия с водоема, кгС/сут
Иваньковское	0–12	10,5	427,6	4490	6295
	12–15	32	10,4	334	
	15–20	210	7,0	1471	
Цимлянское	0–2	13,5	78	1053	270 274
	2–4	19	271	5149	
	4–18	120	1972	236 640	
	18–20	72	381	27 432	
Чиркейское	0–30	0	18,6	0	24
	30–125	1	24	24	

Выводы

Удельный поток метана имеет значительную пространственную неоднородность в пределах относительно неглубоких стратифицированных водохранилищ. Наиболее велик он в эвтрофных водоемах. Наименьшие значения удельного потока выявлены в глубоководном горном олиготрофном водохранилище. Помимо пространственной изменчивости удельный поток метана может значительно отличаться в различные фазы гидрологического режима, поэтому данных одной съемки недостаточно для расчета годовой эмиссии метана с поверхности искcственных водоемов.

Исследования проведены в рамках договора с ПАО Русгидро 1010-416-2021.

Список литературы

1. Пространственно-временные изменения содержания и эмиссии метана в водохранилищах с различным коэффициентом водообмена / М. Г. Гречушникова [и др.] // Известия РГО. 2018. Т. 150, вып. 5. С. 14–33.

2. *Никаноров Ю. И.* Иваньковское водохранилище // Известия ГосНИОРХ. 1975. Т. 102. С. 5–25.

3. *Эдельштейн К. К.* Водохранилища России: экологические проблемы, пути их решения. М. : ГЕОС, 1998. 277 с.

4. Methane emissions from lakes: Dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate / D. Bastviken, J. Cole, M. Pace, L. Tranvik // Global Biochemical Cycles. 2004. Vol. 18. 12 p.

5. Greenhouse Gas Emissions from Reservoir Water Surfaces: A New Global Synthesis / B. Deemer, A. Harrison, S. Li, J. Beaulieu, T. Delsontro // Springer. BioScience. 2016. Vol. 66, N 11. P. 949–964.

6. Вода России. Чиркейское водохранилище. URL: https://water-rf.ru/Водные_объекты/1300/Чиркейское_водохранилище (дата обращения: 21.09.2021).

УДК 556.535.3

Многолетняя изменчивость стока притоков юго-западного побережья оз. Байкал

Р. П. Дичёва (raya.dicheva18@mail.ru)

Иркутский государственный университет, Иркутск

Аннотация. По многолетним данным изучены внутригодовая и межгодовая изменчивость стока рек Бугульдейка, Анга, Голоустная, являющихся притоками оз. Байкал.

Ключевые слова: притоки оз. Байкал, расход воды, внутридодовое распределение стока.

Объектами исследования в данной работе являются притоки юго-западного побережья оз. Байкал – реки Бугульдейка, Анга, Голоустная, стекающие с Приморского хребта, который служит водоразделом между притоками Байкала и реками Ангарской и Ленской систем [1; 3]. Ряд работ [4; 5] демонстрирует изменение стока других притоков оз. Байкал и показывает, что на фоне происходящих климатических изменений и возрастающего антропогенного влияния параметры стока рек Байкальского региона не остаются неизменными. Изменчивость стока притоков Байкала в свою очередь ведет к изменению уровенного режима озера [4] и обусловливает актуальность подобного рода исследований.

Измерения стока, производимые на реках в течение длительного времени, показывают, что его величина подвержена значительным колебаниям. При этом расход воды в реке изменяется как в течение календарного года, так и из года в год [2]. Поэтому внимание в работе уделено, как многолетней изменчивости внутригодового распределения стока, так и межгодовой изменчивости среднегодовых расходов исследуемых водотоков.

Многолетняя изменчивость среднегодовых расходов рек Бугульдейка и Голоустная за период наблюдения с 1974 по 2019 г. и р. Анги за период с 1960 по 2019 г. показана на рис. 1–3 соответственно.

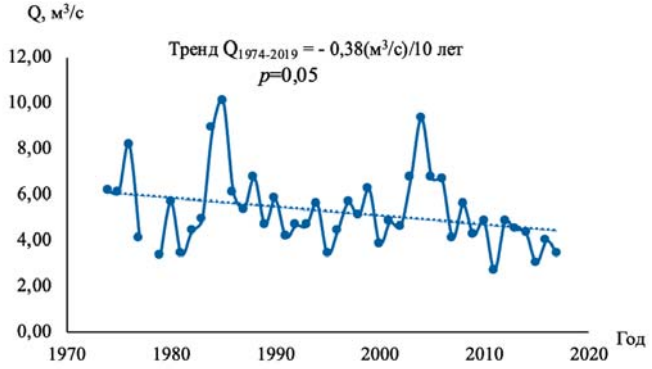


Рис. 1. Изменчивость среднегодовых расходов р. Бугульдейка в 1974–2019 гг.

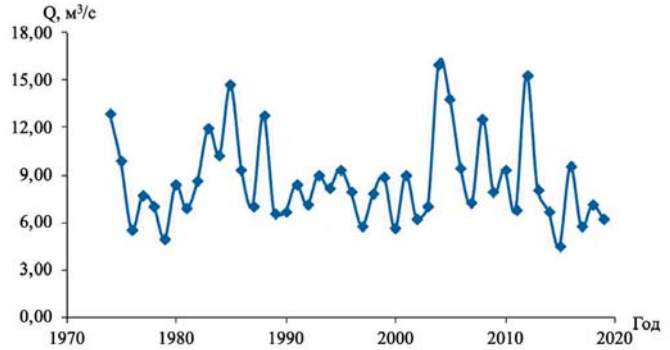


Рис. 2. Изменчивость среднегодовых расходов р. Голоустная в 1974–2019 гг.

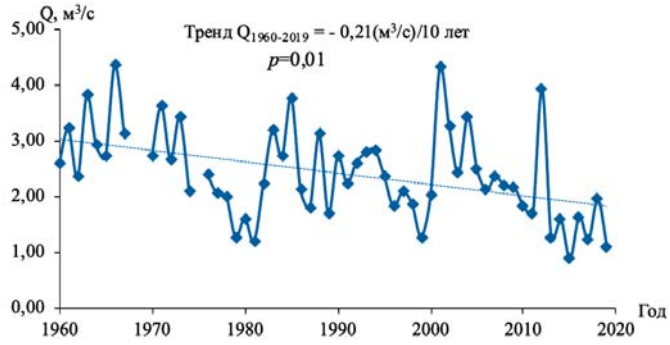


Рис. 3. Изменчивость среднегодовых расходов р. Анга в 1960–2019 гг.

Отчетливо прослеживаются тенденции к снижению среднегодовых расходов рек Бугульдейка и Анга со статистически значимыми трендами, составляющим соответственно –0,38 (м^3/с)/10 лет и –0,21 (м^3/с)/10 лет. На р. Голоустная значимых трендов в межгодовом изменении среднегодовых расходов не наблюдается. При этом на всех исследуемых водотоках видна цикличность стока со сменой периодов многоводных и маловодных лет. В последний, из наблюдаемых на водотоках циклов водности, произошло снижение величины среднемноголетнего расхода по сравнению с предыдущими циклами на 17,7 % на р. Анге и на 11,3 % на р. Бугульдейке. На р. Голоустной величина среднего многолетнего расхода практически не поменялась. Таким образом, можно видеть, что из трех находящихся в схожих климатических условиях водотоков наиболее выраженные изменения коснулись стока рек с меньшими величинами расходов и водосборных площадей. С другой стороны, необходимо дополнительное изучение влияния бассейновых факторов для более обоснованных выводов о роли площади водосбора и величины стока в подверженности влиянию климатических изменений на примере данных рек.

На рис. 4–6 показано изменение распределения внутригодового стока рек Бугульдейки, Анги, Голоустной, осредненного за различные периоды: с 1974 по 1996 г. и с 1997 по 2019 г.

Наименьшие различия во внутригодовом распределении стока в разные периоды наблюдается на р. Голоустной. На реках Анга и Бугульдейка наблюдается существенное снижение расходов в мае, июне и июле и увеличение расходов в апреле в более позднем периоде. Это может являться эффектом увеличения температуры воздуха и связанным с этим более ранним таянием снега весной и большими потерями на испарение, а, возможно, и полив летом. Однако выяснение влияния климатических и бассейновых факторов на сток является темой отдельного исследования, которое будет выполнено автором в дальнейшем.

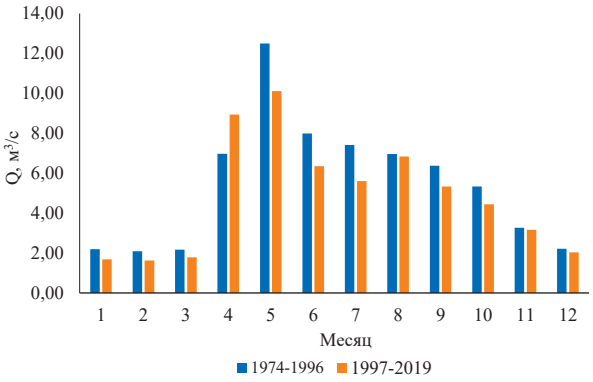


Рис. 4. Внутригодовое распределение стока р. Бугульдейки

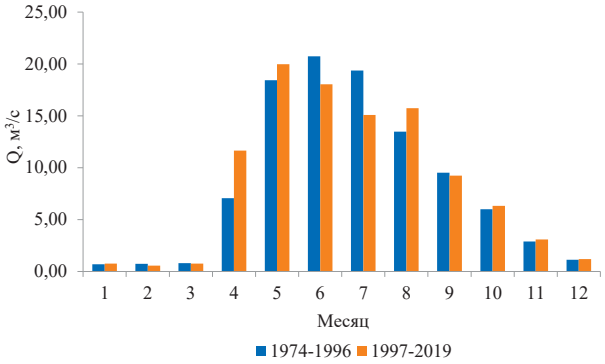


Рис. 5. Внутригодовое распределение стока р. Голоустной

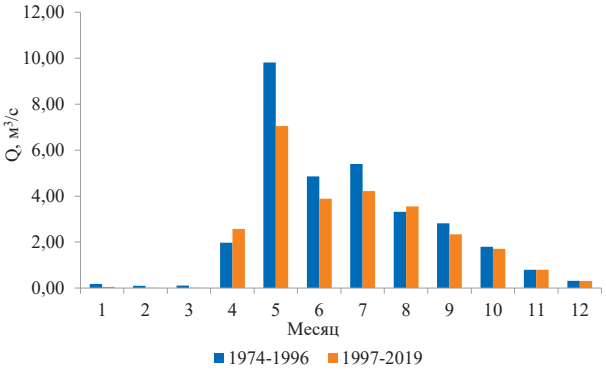


Рис. 6. Внутригодовое распределение стока на р. Анги

Список литературы

1. *Беркин Н. С., Макаров А. А., Русинек О. Т.* Байкаловедение : учеб. пособие. Иркутск : Изд-во Ирк. гос. ун-та, 2009. 291 с.

2. *Михайлов В. Н., Добровольский А. Д., Добролюбов С. А.* Гидрология. М. : Высш. шк., 1991. 368 с.

3. Приморский хребет. URL: http://irkipedia.ru/content/primorskiy_hrebet (дата обращения: 25.06.2021).

4. *Сутырина Е. Н.* Реакция стока р. Селенги на изменение интенсивности осадков и состояния водосборного бассейна // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле. 2015. Т. 13. С. 120–130.

5. *Potemkina T., Potemkin V., Sutyrina E.* Changing of The Riverine Sediment Load Supply into Lake Baikal: The Natural and Anthropogenic Causes (Russia) // Quaternary International. 2019. Vol. 524. P. 57–66.

УДК 556.535.8(282.256.16)

Уродство створок диатомовой водоросли *Nitzschia Palea* как показатель загрязнения поверхностных вод водотоков бассейна верхнего Иртыша

А. А. Евсеева (annaeco@mail.ru)

Ханты-Мансийский отдел Тюменский филиал ФГБНУ «ВНИРО» («Госрыбцентр»), Ханты-Мансийск

Аннотация. Приведены результаты исследования и анализа данных о распространении уродливых форм *Nitzschia palea* в бассейне верхнего Иртыша, выявлены зоны локального загрязнения, где были отмечены аномальные морфологические изменения диатомовой водоросли.

Ключевые слова: диатомовые водоросли, *Nitzschia palea*, биоиндикация, Иртыш.

В настоящее время проблема изучения степени загрязнения различных водных объектов является весьма актуальной. Чрезмерная эксплуатация водоемов и водотоков вызывает изменения их гидрологических характеристик, что приводит к деградации естественных экосистем. Водорослям принадлежит ведущая роль в индикации качества воды. Изучение качественных и количественных характеристик альгофлоры позволяет установить закономерности формирования и функционирования гидробиоценозов, осуществить мониторинг экологического состояния водных объектов и определить возможные направления их использования и охраны.

Река Иртыш с его многоводными правобережными притоками (реки Бухтарма, Ульба, Уба) занимает центральное место в гидрографической сети Восточного Казахстана. Исследуемые реки являются водотоками рыбохозяйственного назначения и относятся к первой категории водопользования.

Исторически и из-за технологической необходимости сложилось так, что все объекты горно-обогатительного и металлургического производств, а также предприятия теплоэнергетики сконцентрированы на берегах рек. Именно поэтому наиболее существенной проблемой водотоков бассейна верхнего Иртыша является их загрязнение сточными промышленными и шахтными водами. Загрязнение приводит к существенным изменениям физико-химических свойств воды, отражающихся на состоянии гидробионтов водоема. Это в свою очередь ведет к деградации водных экосистем, наиболее выраженной в малых и средних реках, к которым относятся правобережные притоки р. Иртыш

В качестве характеристики загрязнения вод взяты донные обрастания (перифитон). Организмы перифитона используются в качестве индикаторов благополучия или загрязнения водоемов. Качественный и количественный состав водорослей отражает состояние водоема, тенденции их развития при усиливающемся загрязнении воды.

Диатомовые водоросли – надежные биологические индикаторы состояния окружающей среды [5]. Ответные реакции водорослей на действие антропогенных факторов оказываются наиболее быстрыми, вследствие чего структурные характеристики перифитона могут служить репрезентативными показателями

состояния водных экосистем. Водоросли могут служить биологическими маркерами долговременных токсичных эффектов и их регистрируемые отклики позволяют активно вмешиваться в ситуации до наступления необратимых процессов в водных экосистемах [2].

Особое место в биоиндикации занимает водоросль *Nitzschia palea*, которая реагирует на загрязнение водотока морфологической изменчивостью [1]. Вид *N. palea* отличается очень большой экологической амплитудой и высоким полиморфизмом [5]. Он широко распространен в фитобентосе пресноводных водоемов практически на всех континентах.

Изменение химического состава воды водных объектов в условиях воздействия предприятий цветной металлургии не проходит бесследно для гидробионтов, что связано с негативной ролью тяжелых металлов и взвешенных веществ. Свой вклад в трансформацию экосистем вносит также повышенное содержание биогенных элементов и органических соединений. Однако до настоящего времени проблема перестройки структуры сообществ одного из важнейших компонентов водных экосистем – водорослей – остается слабо разработанной.

Материал и методика

Материалом для данной работы послужили результаты исследований 2010–2011 гг. (322 альгологических пробы). Пробы перифитона отбирали на 8 водотоках на 23 створах. Станции отбора расположены с учетом населенных пунктов и источников загрязнения (выше и ниже участков с различной антропогенной нагрузкой):

1) р. Иртыш – И1 (г. Усть-Каменогорск, 0,8 км ниже плотины У-КаГЭС); И0,1 (г. Усть-Каменогорск, 0,5 км ниже сбросов Титано-магниевого комбината (ТМК) (левый берег); И0,9 (г. Усть-Каменогорск, 0,5 км ниже сбросов Титано-магниевого комбината (ТМК) (правый берег); И4 (п. Прапорщиково, 15 км ниже впадения ручья Бражный); И5 (п. Предгорное, у переправы);

2) р. Бухтарма – Б1 (г. Зыряновск, 0,1 км выше впадения р. Хамир); Б2 (г. Зыряновск, 0,3 км ниже впадения р. Березовки);

3) р. Ульба – УУ1 (г. Усть-Каменогорск, в черте п. Каменный Карьер, 0,3 км ниже впадения р. Малая Ульба); У0,1 (г. Усть-Каменогорск, 1,45 км выше устья (левый берег); У0,9 (г. Усть-Каменогорск, 1,45 км выше устья (правый берег); У1 (1,75 км ниже слияния рек Громотуха и Тихая, 50 м выше сброса шахтных вод рудника Тишинский); У2 (4,8 км ниже сброса шахтных вод рудника Тишинский, у автодорожного моста);

4) р. Глубочанка – Г1 (п. Белоусовка, 0,5 км выше сбросов х/б сточных вод руд. Белоусовка); Г2 (2 км ниже пос. Белоусовка, у а/д моста); Г3 (п. Глубокое, 0,175 км ниже сбросов Медьзавода);

5) р. Красноярка – К1 (п. Предгорное, 1,5 км выше сброса х/б сточных вод рудн. Иртышский); К2 (п. Предгорное, 2 км ниже впадения р. Березовки);

6) р. Уба – У1 (0,3 км выше г. Шемонаиха); У2 (г. Шемонаиха, 4,1 км ниже впадения р. Таловка);

7) р. Тихая – Т1 (0,1 км ниже слияния рек Брекса и Журавлиха); Т2 (0,5 км ниже г. Риддера);

8) р. Брекса – Бр1 (6,8 км выше г. Риддера); Бр2 (в черте г. Риддера, 0,6 км ниже сброса дренажных вод свинцового завода).

Гидрохимический режим исследуемых водотоков

По гидрохимическим показателям наиболее загрязненными притоками р. Ертис являются реки Брекса, Тихая, Ульба, Глубочанка, Красноярка, расположенные в районе г. Риддера, рудника Тишинского, с. Белоусовка и Предгорное. По данным Комплексной лаборатории «Казгидромет по Восточно-Казахстанской области» качество поверхностных вод оценивалось 4–5-м классом, что соответствовало категории – загрязненные, грязные. Река Красноярка на протяжении многих лет относится к наиболее грязному притоку р. Иртыш. Качество воды р. Красноярка за 2010–2011 гг. соответствовало 7-му классу качества – чрезвычайно грязная. В водах этой реки за период 2010–2011 гг. неоднократно регистрировались случаи ВЗ (высокое загрязнение) ионами цинка. Превышение ПДК для тяжелых металлов, наблюдаемое на станциях исследования, связано с деятельностью промышленных предприятий, т. е. загрязнение носит локальный характер и приурочено к местам сброса сточных вод промышленных предприятий горно-металлургического комплекса. Качество поверхностных вод р. Уба и Бухтарма соответствовало 2–3 классу – чистые – умеренно загрязненные.

Пространственно-временная характеристика распространения уродливых форм *N. palea* в правобережных притоках верхнего Иртыша

Совокупность абиотических и антропогенных факторов в значительной степени определяет условия формирования сообществ альгоценозов исследуемых водотоков. В ответ на изменяющиеся условия существования донные сообщества водорослей отвечают изменением своей структуры в пространственно-временном аспекте [1].

Диатомовая водоросль *N. palea* в водотоках бассейна верхнего Иртыша имеет широкое распространение. Высокая частота встречаемости в просматриваемых камерах отмечена в 70% проб перифитона, отобранных в 2010–2011 гг. Исключение составляют створы на р. Уба, где *N. palea* была зарегистрирована единично.

В течение вегетационного периода с апреля по октябрь 2010 г. уродливые формы *N. palea* полностью отсутствовали на 9 створах исследований, в том числе: 2 створа на р. Иртыш (И1, И0,1), 2 створа на р. Буктырма (Б1 и Б2), фоновый створ на р. Брекса (Бр1), замыкающий створ на р. Глубочанка (Г3), фоновый створ на р. Красноярка (К1), 2 створа на р. Уба (У1 и У2). Наибольшая частота встречаемости уродливых форм *N. palea* (71 %) была отмечена в р. Ульби (створ «в черте г. Усть-Каменогорска, 1,45 км выше устья р. Ульба непосредственно у автодорожного моста (0,1), левый берег») и р. Красноярка («п. Предгорное, 2,0 км ниже впадения р. Березовки»). В течение вегетационного периода с апреля по октябрь 2011 г. уродливые формы *N. palea* полностью отсутствовали на 7 створах исследований, в том числе: 1 створ на р. Ертис (И0,1), 2 створа на р. Бухтарма (Б1 и Б2), фоновый створ на р. Брекса (Бр1), 2 створа на р. Глубочанка

(Г1 и Г3), фоновый створ на р. Красноярка (К1). Наибольшая частота встречаемости уродливых форм *N. palea* (86 %) была отмечена в р. Ульба (УУ0,1) и р. Красноярка (К2).

Уродливость диатомовой водоросли *N. palea* заключалась в деформации створок. Пример таких аномалий, обнаруженных при обработке проб перифитона представлены на рис. 1.

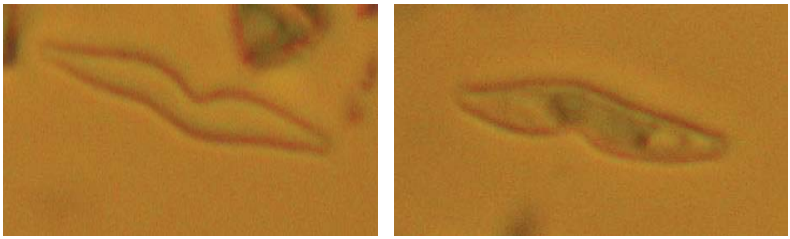


Рис. 1. Уродливые формы Nitzschia palea, обнаруженные в пробах р. Ульба

Анализ динамики встречаемости уродливых форм *N. palea* показал, что морфологические изменения водорослей отмечены на загрязненных участках рек Иртыш, Ульба, Глубочанка, Красноярка, Тихая. Наибольшая частота встречаемости зарегистрирована на створах р. Ульба в зоне влияния рудника Тишинского (71 %) и в черте г. Усть-Каменогорска (86 %), а также на створе р. Красноярка, расположенном ниже сбросов сточных вод (86 %) (рис. 2).

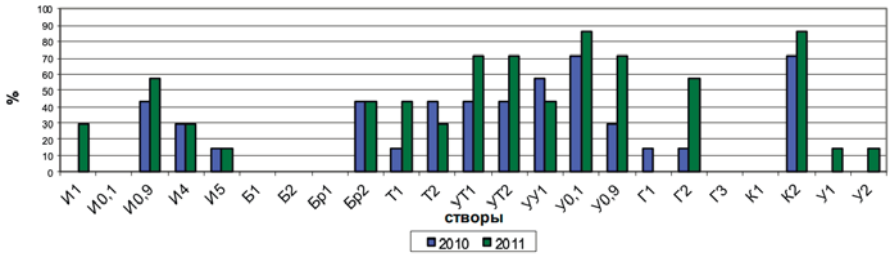


Рис. 2. Частота встречаемости уродливой формы N. palea на водотоках бассейна верхнего Иртыша в 2010–2011 гг.

На р. Иртыш наиболее часто уродливые формы регистрировали на створе И0,1. Эта станция расположена ниже впадения р. Ульба, что указывает на транзитное загрязнение р. Иртыш загрязненными водами ее правобережного притока р. Ульба. В р. Бухтарма в течение двух лет исследований уродливые формы не обнаружены, что позволяет сделать вывод, что вода в данном водотоке не подвергается значительной антропогенной нагрузке.

Статистический анализ влияния загрязняющих веществ в поверхностных водах на встречаемость уродливых форм *N. Palea*

Анализ парных корреляций между встречаемостью уродливых форм *N. palea* и гидрохимическими показателями исследуемых рек показал наличие значимой отрицательной корреляции с концентрациями тяжелых металлов, хлоридами и сульфатами. Выявлена связь присутствия уродливых форм водоросли *N. palea* с $БПК_5$, углекислым газом, бихроматной окисляемостью, концентрацией азота нитритного и нитратного (табл.). Положительная зависимость отмечена от концентрации калия, кальция, магния.

Таблица

Усредненные коэффициенты корреляции встречаемости уродливых форм Nitzschia palea и концентраций химических веществ

Показатель	Коэффициент корреляции	Показатель	Коэффициент корреляции
Водородный показатель, ед. pH	0,50	Медь, мкг/л	–0,49
Растворенный кислород (O_2), мг/л	–0,19	Цинк, мкг/л	–0,62
БПК5, мг/л	0,15	Кадмий, мкг/л	–0,34
Углекислый газ (CO_2), мг/л	–0,62	Никель, мкг/л	–0,29
ХПК, мг/л	–0,67	Нефтепродукты, мг/л	0,49
Аммонийный азот, мг/л	–0,44	Кальций, мг/л	0,66
Нитритный азот, мг/л	0,10	Натрий, мг/л	0,58
Нитратный азот, мг/л	0,07	Калий,мг/л	0,24
Хлориды, мг/л	0,27	Магний, мг/л	–0,58
Сульфаты, мг/л	0,60	Минерализация, мг/л	0,63
Железо общее, мг/л	–0,53	Жесткость , мг-экв/л	0,67
Марганец, мкг/л	–0,21		

Выявлена отрицательная корреляция в парах признаков, связанных с минерализацией. Так, в паре «минерализация воды – встречаемость уродливых форм» коэффициент корреляции для створов на р. Ульба $r = –0,99$, для створов на р. Красноярка и Глубочанка $r = –0,80$. Аналогичная тенденция выявлена для пары «нефтепродукты – встречаемость уродливых форм» – $r = –0,75$. Установлено высоко достоверное влияние концентраций металлов (железо, цинк, марганец, кадмий, никель) на распространение уродливых форм диатомовой водоросли *N. palea* – 94 %, тогда как влияние азота аммонийного было в пределах 60 %. Таким образом, изменения в гидробиоценозах были связаны с кислородным режимом, скоростью процессов окисления, $БПК_5$, концентрациями тяжелых металлов.

В целом состояние поверхностных вод исследуемых водотоков бассейна верхнего Иртыша можно считать неудовлетворительным. Концентрации большинства определяемых веществ выше пределов ПДК для рыбохозяйственных водоемов. На участках, расположенных ниже сбросов наблюдается деградация донных сообществ, здесь в пробах частота встречаемости уродства створок *N. palea* значительно выше.

Результаты проведенных исследований могут послужить основой для дальнейших более глубоких научных исследований в данной области, для прогнозирования качества водотоков бассейна верхнего Иртыша, в целях охраны чистоты поверхностных вод. Полученные данные могут послужить основой для дальнейшего экологического мониторинга, проводимого различными контролирующими органами, а также в экспертной работе.

Кроме того, апробированная методика по подсчету уродливых форм водорослей может быть дополнительно использована для оценки качества водотоков бассейна верхнего Иртыша наравне с другими общепринятыми методиками. Альгофлора рек служит хорошим индикатором состояния экосистемы и позволяет определять допустимые уровни антропогенной нагрузки [4]. Наиболее перспективной в этом отношении группой являются бентосные диатомовые водоросли, по сообществу которых разработан и успешно внедрен в прикладную систему мониторинга ряд индексов оценки качества вод [3].

Список литературы

1. *Дмитриева А. Г., Ипатова В. И., Прохоцкая В. Ю.* Роль водорослей в биотестировании и биоиндикации качества воды // Современные фундаментальные проблемы гидрохимии и мониторинга качества поверхностных вод России : материалы науч.-практ. конф. с междунар. участием. Ч. 2. Азов, 8–10 июня 2009 г. Ростов на/Д, 2009. С. 167–169.

2. *Капков В. И.* Водоросли как биомаркеры загрязнения тяжелыми металлами морских прибрежных экосистем : дис. ... д-ра биол. наук : 03.00.18. М., 2003. 342 с.

3. *Хазанова К. П.* Диатомовый микрофитобентос реки Москвы: структура сообщества и использование в оценке качества воды : автореф. дис. … канд. биол. наук. М., 2015.

4. *Ector L., Rımet F.* Using bioindicators to assess rivers in Europe: An Overview // Modelling community structure in freshwater ecosystems / eds: S Lek, M Scardi, PFM Verdonschot, Jp Descy, & YS Park. Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2005. P. 7–19.

5. . Morphological, genetic and mating diversity within the widespread bioindicator Nitzschia palea (Bacillariophyceae) / R. Trobajo [et al.] // Phycologia. 2009. Vol. 48, N 6. P. 443–459.

УДК 556.51

Региональная модель расчета нормы стока рек бассейна верхней Оки

М. В. Захарова (ZaharovaMV@tksu.ru)
Калужский государственный университет им. К. Э. Циолковского, Калуга

Аннотация. На примере верхней части бассейна Оки с замыкающим створом в г. Калуге рассматривается построение регрессионной модели определения нормы стока в зависимости от физико-географических и гидрографических факторов. Для построения модели использованы величины слоя стока с 28 водосборов, приведенные к многолетнему периоду за 1882–2010 гг. В результате получено региональное уравнение регрессии с оптимальными предикторами (лесистость и широта) и статистически значимыми коэффициентами. Установлена адекватность модели, которая на 76 % объясняется за счет вариации факторных признаков, которые в нее включены. Оценка эффективности модели осуществлялась как на зависимом, так и независимом материале. Определено, что остатки не коррелируют между собой и их распределение не отличается от нормального. Погрешность определения нормы стока по региональной зависимости составляет порядка 30 %.

Ключевые слова: норма стока, гидрографические факторы, регрессионное уравнение, региональная модель, корреляция, остатки.

Актуальность исследования

Одной из важных проблем гидрологических расчетов, связанных с определением основных гидрологических характеристик, остается недостаточная гидрологическая изученность речных бассейнов. В то же время известно, что эти характеристики очень часто необходимы для проектирования и последующего строительства различных хозяйственных объектов в тех створах гидрографической сети, где данные непосредственных гидрологических наблюдений отсутствуют.

Следует отметить, что на территории бассейна р. Ока с замыкающим створом в г. Калуге, площадь которого составляет 54 800 км^2, в современное время значительно сокращена гидрологическая сеть, обеспечивающая все заинтересованные отрасли данными гидрометрических наблюдений. Если по состоянию на 60-е гг. прошлого столетия здесь действовало порядка 60 гидрологических постов, то на данный момент их насчитывается около 20, что свидетельствует о недостаточности данных фактических наблюдений.

В соответствии с п. 7.1 нормативного документа СП 33-101-2003 [8] для получения расчетных гидрологических характеристик рекомендуется использовать региональные методы, которые основываются на результатах обобщения данных гидрометеорологических наблюдений, приведенных в официальных изданиях Росгидромета, или неопубликованных данных инженерно-гидрометеорологических изысканий в районе проектирования.

Материалы и методы исследования

Алгоритм построения региональных моделей включает две основные части: определение расчетных гидрологических характеристик на гидрологических постах и построение региональных зависимостей между гидрологическими

характеристиками и физико-географическими и гидрографическими факторами, а также оценку их эффективности [5; 8].

Основные этапы построения региональных зависимостей, приведены в [8] и включают следующие пункты:

– выбор оптимальных предикторов из числа физико-географических и гидрографических характеристик для района исследования;

– анализ однофакторных зависимостей гидрологических характеристик от выбранных факторов;

– описание общей структуры региональной зависимости на основе генетического анализа и условий формирования стока;

– формально-логическое представление региональных зависимостей и оценка их эффективности.

Определение нормы стока для водосборов рек исследуемого бассейна, которые не имеют данных непосредственных гидрометрических наблюдений, предлагается осуществлять с использованием метода множественной линейной регрессии с выбором оптимальных предикторов. Полученное уравнение будет иметь аддитивную структуру в виде суммы аргументов с соответствующими коэффициентами.

Для построения модели отобраны 28 гидрологических поста, имеющие длительные ряды наблюдений и расположенные в верхней части бассейна р. Оки с площадями водосборов от 15 км^2 (р. Нугрь – в/п д. Андросово) до 54 800 км^2 (р. Ока – в/п г. Калуга).

Величины среднего слоя стока (Y, мм), приведенные к многолетнему периоду за 1882–2010 гг. взяты из научно-прикладного справочника «Основные гидрологические характеристики рек бассейна Верхней Волги» [6].

Основными физико-географическими и гидрографическими факторами, принятыми для построения региональной зависимости, являются следующие:

– широта центра тяжести φ, °; долгота центра тяжести λ, °; площадь бассейна F, км^2; средняя высота водосбора, H, м; расстояние от истока, L, м; озерность $f_{оз}$, %; заболоченность $f_б$, %; лесистость $f_л$, %, которые приняты уточненными согласно данным Приложения А.2 научно-прикладного справочника [6];

– средневзвешенный уклон реки $I_р$, ‰; средний уклон склонов водосбора $I_{ск}$, ‰; густота речной сети водосбора $\rho_р$, км/км^2, которые приняты по материалам государственного водного кадастра «Основные гидрологические характеристики» [2] и монографии «Ресурсы поверхностных вод СССР» [7].

Результаты исследования

Известно, что при использовании методов множественной линейной регрессии для получения надежных расчетных характеристик необходимо выполнение ряда требований к исходной информации [4].

Проверка рядов наблюдений на однородность и репрезентативность, а также оценка степени линейности и тесноты связей между ними, является одним из таких требований. Применение данного требования к перечисленным выше характеристикам привело, во-первых, к необходимости линеаризации некоторых

связей между исследуемыми переменными, например, к представлению площади водосбора в виде ее десятичного логарифма lg *F*.

Во-вторых, к исключению дублирующих предикторов на основании анализа корреляционной матрицы, которая показала, что мало коррелируют с предиктантом площадь водосбора (r = 0,04), длина реки (r = 0,08), средняя высота водосбора (r = 0,16), густота речной сети (r = 0,14), средневзвешенный уклон реки (r = –0,04), озерность (r = –0,18).

В-третьих, к исключению части исходных параметров для того, чтобы получить надежные оценки параметров уравнения регрессии (долгота, заболоченность и уклон склонов водосбора), поскольку по рекомендациям [3] число предикторов при объеме исходной выборки до 30 должно составлять не более 2. Нормативные требования, прописанные в СП 33-101-2003 также рекомендуют включать в региональные зависимости не более 4–5 основных физико-географических факторов. Проверка требований на нормальность распределения и отсутствие внутрирядных связей применительно к исследуемым рядам показала, что во многих случаях они не выполняются (озерность, заболоченность, длина и уклон реки).

Таким образом, выполняя минимально необходимые требования к подбору исходной информации для построения региональной зависимости нормы стока от физико-географических и гидрографических характеристик, приняты две независимые переменные – широта φ и лесистость $f_л$, которые мало коррелируют между собой (r = 0,64) и хорошо коррелируют (r = 0,86 и 0,71) с предиктантом (нормой стока Y).

При выполнении процедуры регрессионного анализа рассчитывались следующие регрессионные статистики: коэффициент множественной корреляции, оценивающий степень влияния широты φ и лесистости $f_л$ на норму стока *Y*, который оказался равен R =0,88 и коэффициент детерминации, описывающий точность полученной регрессионной модели – R^2 = 0,76.

Проверка коэффициента множественной корреляции R на значимость при заданном уровне значимости α = 0,05, показала, что он значим ($T_{набл}$ = 9,47 больше $t_{крит.}$ = 2,06), следовательно, между нормой стока Y и совокупностью факторных признаков (широта φ и лесистость $f_л$), которые включены в регрессионную модель, наблюдается тесная связь.

Коэффициент детерминации $R^2 > 0,5$, что позволяет сделать вывод о том, что модель хорошо описывает данные. Также можно считать, что полученная модель адекватна описываемому явлению, поскольку вариация нормы стока Y в среднем на 76 % объясняется за счет вариации факторных признаков, которые включены в модель, т. е. лесистостью $f_л$ и широтой φ.

Следующим этапом процедуры регрессионного анализа на базе процессора Excel является дисперсионный анализ (табл. 1), в котором сравнивается доля межгрупповой (систематической) и внутригрупповой (случайной) изменчивости на заданном уровне значимости.

Таблица 1

Дисперсионный анализ

	Число степеней свободы	Сумма квадратов отклонений	Дисперсия	*F*-статистика	Значимость *F*
Регрессия	2	21 734,7	10 867,4	44,8	$5{,}39 \cdot 10^{-09}$
Остаток	25	6060,5	242,4		
Итого	27	27 795,2			

Значение вычисленного уровня значимости (значимость F практически равна нулю) значительно меньше заданного уровня значимости $\alpha = 0{,}05$, что свидетельствует о достоверности полученной многофакторной регрессионной модели.

На заключительном этапе вычисляются значения коэффициентов и свободного члена уравнения регрессии (табл. 2).

Таблица 2

Коэффициенты уравнения регрессии

Переменные	Коэффициенты	Стандартная ошибка	*t*-статистика	*p*-значение
Свободный член	–478,5	286,6	–1,67	0,107
Лесистость, %	0,90	0,16	5,68	$6{,}41 \cdot 10^{-06}$
Широта, °	11,7	5,39	2,17	0,04

Значения уровня значимости (*p*-значение), вычисленные для коэффициентов уравнения регрессии, меньше заданного уровня значимости $\alpha = 0{,}05$, что свидетельствует о значимом влиянии предикторов (лесистости $f_л$ и широты φ) на значение предиктанта (норму стока *Y*).

Таким образом, используя аддитивную структуру модели, можно составить следующее региональное уравнение регрессии с оптимальными предикторами и статистически значимыми коэффициентами:

$$Y = 0{,}90 f_л + 11{,}7\varphi - 478{,}5 . \quad (1)$$

Для того чтобы оценить какой из факторов оказывается наибольшее влияние на норму стока, уравнение (1) можно представить в стандартизированном виде:

$$Y = 5{,}27 f_л + 103\varphi . \quad (2)$$

Сравнение коэффициентов уравнения (2), позволяет сделать вывод о том, что наибольшее влияние на норму стока оказывает широта местности.

В соответствии с [1] для оценки качества расчетной методики используется отношение ее стандартной ошибки (*S*) к среднему квадратическому отклонению (σ) ряда-предиктанта. Описываемая методика может считаться хорошей, поскольку отношение $S / \sigma = 0{,}5$.

Важной составляющей оценки эффективности построенного регионального уравнения является анализ остатков (ε), которые представляют собой разность между фактическими значениями стока и рассчитанными по уравнению регрессии, полученные на зависимой от расчетов информации.

Достаточно информативным в этих целях является графическое представление зависимости остатков от каждого фактора (лесистости $f_л$ и широты φ), а также зависимость между расчетными ($Y_р$) и фактическими ($Y_ф$) значениями нормы стока, которая проходит под углом 45° (рис. 1).

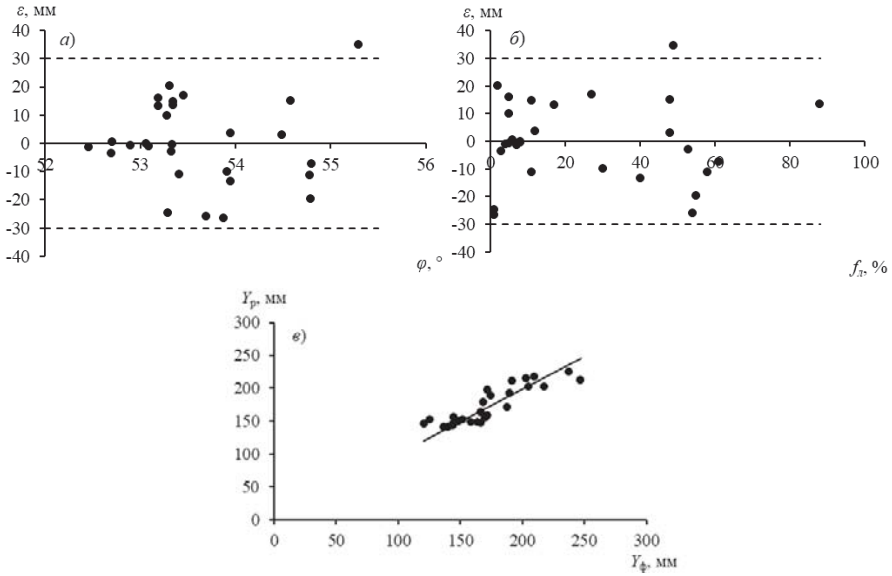


Рис. 1. Графики анализа остатков (ε) региональной зависимости (1) на зависимых данных: а – зависимость от широты (φ), б – зависимость от лесистости ($f_л$), в – связь между расчетными ($Y_р$) и фактическими ($Y_ф$) значениями нормы стока

Проведенный анализ остатков построенной зависимости (рис. 1) показывает, что остатки попадают в горизонтальную полосу с центром по оси абсцисс, следовательно, предлагаемую методику расчета нормы стока можно рассматривать как адекватную.

Для проверки независимости остатков использована статистика Дарбина-Уотсона (d), которая является стандартным методом проверки гипотезы о том, что остатки построенной регрессионной модели не коррелируют между собой, против обратной гипотезы об их автокоррелированности [4].

Сравнение значений статистики Дарбина-Уотсона $d = 1{,}73$ с критическими точками $DW_1 = 1{,}25$ и $DW_2 = 1{,}56$ при числе наблюдений $n = 28$ и предикторов $k = 2$ на уровне значимости $\alpha = 0{,}05$ демонстрирует отсутствие значимых внутрирядных связей в ряде остатков.

Кроме того, визуально по гистограмме, нормальному вероятностному графику и теоретическому критерию Шапиро-Уилкса, как наиболее предпочтительному при небольшой выборке данных [4], ряд остатков проверялся на соответствие нормальному закону распределения. Уровень значимости, вычисленный для ряда остатков по критерию Шапиро-Уилкса ($\alpha = 0{,}60$), оказался больше критического ($\alpha = 0{,}05$), что позволяет сделать вывод о том, что анализируемое распределение не отличается от нормального.

Для оценки экстраполяционных свойств полученного уравнения регрессии в статье определены величины нормы стока на независимом материале девяти контрольных водосборов, не вошедших в обучающую выборку, с площадями водосборов от 96 км^2 (р. Орлица – в/п д. Большой Рог) до 4900 км^2 (р. Ока – в/п д. Костомарово).

Детальный анализ остатков, полученных при независимой проверке показан на рис. 2, на котором представлены зависимости остатков от лесистости ($f_л$) и широты (φ), а также сопоставление расчетных ($Y_р$) и фактических ($Y_ф$) значений нормы стока.

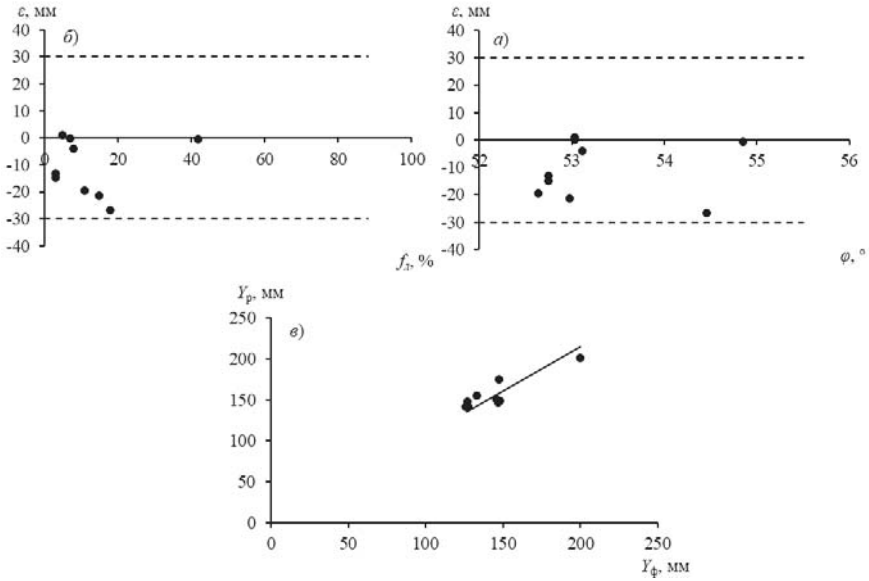


Рис. 2. Графики анализа остатков (ε) региональной зависимости (1) *на независимых данных: а – зависимость от широты (φ), б – зависимость от лесистости ($f_л$), в – связь между расчетными ($Y_р$) и фактическими ($Y_ф$) значениями нормы стока*

Графики остатков демонстрируют, что полосы остатков остаются горизонтальными, однако, видно, что они смещены в область отрицательных значений, что явно связано с недостаточным количеством независимого материала. Однако между нормами стока, рассчитанными на независимых данных ($Y_р$) и фактическими ($Y_ф$) существует достаточно тесная зависимость, имеющая коэффициент корреляции r = 0,9, что позволяет говорить о наличии удовлетворительной сходимости, но требует более тщательного анализа остатков.

Поскольку, коэффициент детерминации R^2 характеризует долю объясненной неопределенности полученного уравнения, то в соответствии с [5], его отклонение от 1 характеризует стандартную погрешность расчета по региональной зависимости, которая в данном случае составляет порядка 30 %.

Выводы

Подводя итог исследованию, посвященному построению региональной модели расчета нормы стока в зависимости от физико-географических и гидрографических факторов установлено, что эффективность модели обусловливается следующими значимыми аспектами:

– 76 % объясненной вариации нормы стока приходится на лесистость и широту, которые установлены оптимальными предикторами уравнения;

– коэффициент множественной корреляции между ними и нормой стока составляет более 0,8 и является значимым;

– достоверность многофакторной регрессионной модели объясняется результатами дисперсионного анализа, который показал, что значение вычисленного уровня значимости значительно меньше заданного;

– отношение стандартной ошибки уравнения к среднему квадратическому отклонению ряда-предиктанта составляет 0,5, что свидетельствует о хорошем качестве модели;

– адекватность модели подтверждается графическим анализом остатков, который демонстрирует уверенное попадание остатков в горизонтальную полосу;

– отсутствие значимых внутрирядных связей в ряде остатков подтверждается значением статистики Дарбина-Уотсона на заданном уровне значимости;

– анализируемое распределение остатков не отличается от нормального, поскольку уровень значимости, вычисленный по теоретическому критерию Шапиро-Уилкса, оказался больше заданного;

– экстраполяционные свойства полученного уравнения, проверенные на независимом материале, указывают на удовлетворительную сходимость рассчитанных и фактических значений нормы стока;

– погрешность расчета нормы стока по региональной зависимости на независимой информации будет составлять порядка 30 %.

Таким образом, изложенное выше дает основание считать полученную региональную зависимость пригодной для расчета нормы стока мало изученных в гидрологическом отношении речных водосборов исследуемого района.

Список литературы

1. *Бефани Н. Ф., Калинин Г. П.* Упражнения и методические разработки по гидрологическим прогнозам. Л. : Гидрометеоиздат, 1983. 390 с.

2. Государственный водный кадастр. Основные гидрологические характеристики (за 1970–1975 гг. и весь период наблюдений). Л. : Гидрометеоиздат, 1979. Т. 10 : Верхне-Волжский район. 178 с.

3. *Дружинин В. С., Сикан А. В.* Методы статистической обработки гидрометеорологической информации. СПб. : Изд-во РГМУ, 2001. 168 с.

4. *Дубровская Л. И., Князев Г. Б.* Компьютерная обработка естественно-научных данных методами многомерной прикладной статистики : учеб. пособие. Томск : ТМЛ-Пресс, 2011. 120 с.

5. *Лобанов В. А., Никитин В. Н.* Региональные модели определения характеристик максимального стока в зависимости от гидрографических факторов // Метеорология и гидрология. 2006. № 11. С. 60–69.

6. Научно-прикладной справочник: Основные гидрологические характеристики рек бассейна Верхней Волги. URL: http://www.hydrology.ru/ru/content/osnovnye-gidrologicheskie-harakteristiki-rek-basseyna-verhney-volgi (дата обращения: 27.05.2021).

7. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 10. Верхне-Волжский район. Кн. 1. М. : Гидрометеоиздат, 1973. 476 с.

8. СП 33-101-2003. Свод правил по проектированию и строительству. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. М. : Госстрой, 2004. 73 с.

УДК 551.34+556

Междисциплинарные научные стационары Магаданской области: прошлое, настоящее и будущее

А. А. Землянскова (anastasiazemlanskova@gmail.com)[1,3], О. М. Макарьева (omakarieva@gmail.com)[2,3], Н. В. Нестерова (nnesterova1994@gmail.com)[1], А. А. Осташов (andrey.ostashov@gmail.com)[1]

[1]*Северо-Восточная научно-исследовательская мерзлотная станция ИМЗ СО РАН, Магадан*
[2]*Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, Якутск*
[3]*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург*

Аннотация. Обозначено, что климатическое потепление приводит к разнонаправленным изменениям геокриологических условий в бассейнах рек зоны многолетней мерзлоты. Рассмотрены перспективы обновления научной базы Северо-Востока России, сформированной в советский период, с целью проведения междисциплинарных исследований, направленных на изучение механизмов взаимодействия поверхностных и подземных вод в зоне распространения многолетней мерзлоты в условиях меняющегося климата. В качестве опорных стационаров выбрана Колымская водно-балансовая станция (КВБС) и полигон Анмангындинская наледь (Магаданская область), для которых имеются длительные ряды наблюдений в XX в. Территория, на которой находятся стационары, репрезентативна для большей части Северо-Востока России. Сделан вывод, что скоординированные междисциплинарные усилия в области изучения процессов водообмена необходимы для разработки методов адаптации всех сфер жизнедеятельности человека к климатическим изменениям.

Ключевые слова: криолитозона, наледи, подземные воды, исторические данные, процессы водообмена, многолетняя мерзлота, дистанционное зондирование, мониторинг, изменение климата, Северо-Восток России.

Северо-восток является ресурсной базой стратегического значения и согласно планам развития РФ в ближайшем будущем должен стать одним из наиболее динамично развивающихся регионов России в зоне мерзлоты. В прогнозе долгосрочного социально-экономического развития РФ на период до 2030 г. изменения климата указаны в качестве одного из основных внешних вызовов. В связи с этим актуальным становится изучение реакции всех компонентов природной среды на климатическое и антропогенное воздействие.

По результатам многих исследователей [11] изменение климата способствует усилению природных и техногенных рисков, которые оказывают влияние на безопасное и эффективное развитие инфраструктуры и социально-экономические процессы в криолитозоне. В России в течение последних десятилетий наблюдается увеличение температуры многолетнемерзлых пород и мощности сезонно-талого слоя [7; 10]. Это приводит к изменению процессов водообмена, которые, в настоящее время, недостаточно изучены.

Скоординированные междисциплинарные усилия в области мониторинга, изучения процессов в различных масштабах и развития методов моделирования процессов водообмена необходимы для научно-обоснованных прогнозов будущих изменений в криолитозоне и заблаговременной разработке методов адаптации всех сфер жизнедеятельности человека к таким изменениям.

На территории Магаданской области находятся уникальные научные стационары: Колымская водно-балансовая станция (КВБС) в наличием наблюдений за всеми элементами водного баланса за период 1948–1997 гг. и научный полигон Анмангындинская наледь, на котором наблюдения за взаимодействием поверхностных и подземных вод велись с 1962 по 1992 г. Мониторинг гидрологических и криогенных процессов, проводившийся на этих стационарах на протяжении десятилетий, является уникальным, так как таких стационаров с длительными рядами наблюдений нет ни в одной другой северной стране мира. В настоящей работе представлен обзор наблюдений, который проводился на стационарах КВБС и Анмангындинская наледь, а также перспективы возобновления исследований на данных объектах.

Колымская водно-балансовая станция (КВБС)

В верховьях р. Колымы в зоне сплошной вечной мерзлоты расположена Колымская водно-балансовая станция (КВБС). Территория (площадь 21,2 км^2, перепад высот 830–1690 м) репрезентативна для большей части Верхней Колымы и прилегающих регионов Северо-Востока России. Основная часть водосбора покрыта гольцами, зарослями кедрового стланика и лиственничным редколесьем. Средняя годовая температура воздуха составляет примерно –12 °С, количество осадков колеблется от 250 до 440 мм в год, мощность многолетней мерзлоты достигает 400 м. В заболоченных низинах глубина СТС достигает 20 см, в зоне гольцов – 3 м.

Целью проведения наблюдений на Колымской водно-балансовой станции было изучение процессов формирования стока малых рек в условиях горно-таежного ландшафта и распространения многолетнемерзлых пород, характерных

для Северо-Востока СССР. На станции действовало десять гидрологических постов (площадь водосборов от 0,27 км^2 до 21,2 км^2), две метеорологические площадки (одна в низине, другая в верховье); 55 осадкомерных пунктов, более 20 мерзлотомеров, водобалансовые, стоковые и испарительные площадки; несколько гидрогеологических скважин (изучался температурный режим грунта, уровень воды), а также проводились регулярные снегомерные съемки и экспериментальные исследования частных гидрологических и мерзлотных процессов [2; 3; 6] (рис. 1). Все данные, полученные на водно-балансовой станции, систематизированы и описаны в работе [9].

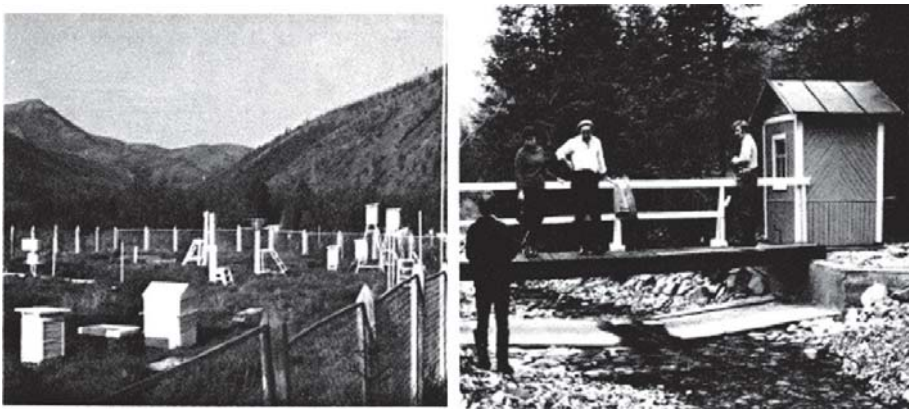


Рис. 1. Исторические фотографии Колымской водно-балансовой станции (авторы – В. Н. Михайлов, С. И. Сущанский)

Программа наблюдений на станции с начала 90-х гг. постепенно начала сокращаться, а с 1997 г. водно-балансовые наблюдения на КВБС законсервированы. До 2013 г. функционировало пять гидрологических постов и одна метеорологическая станция. Сильный паводок того года разрушил четыре гидрологических поста. На сегодняшний день продолжаются стандартные наблюдения на метеорологической площадке и на одном гидрологическом посту Контактовый – Нижний.

В настоящее время в криолитозоне России нет ни одного постоянно действующего гидрологического стационара, на котором целенаправленно проводятся исследования гидрологических процессов на водосборах, находящихся в зоне распространения многолетней мерзлоты. Возобновление наблюдений на КВБС могли бы продолжить ряд исторических данных и стать ценным индикатором влияния изменения климата на состояние мерзлоты и процессы водообмена в этом регионе.

В 2020 г. начата работа по восстановлению режимных наблюдений на территории КВБС. Выполнена установка нового оборудования для проведения комплексного мониторинга состояния мерзлоты, подземных и поверхностных вод. В мае 2021 г. установлены логгеры уровня и температуры воды на постах руч.

Южный, Северный, Контактовый. Также установлены осадкомеры на водосборах руч. Северный, Южный и Морозова. Получены данные об уровне и расходах воды в замыкающем створе руч. Контактовый, руч. Встреча, руч. Северный и Южный, данные о количестве и интенсивности жидких осадков, температуре воздуха в различных частях КВБС на малых водосборах.

С октября 2020 г. ведется отбор проб жидких и твердых осадков на изотопный состав. Отбор проб речной воды на гидрохимию и изотопы ведется во время полевых выездов, а также сотрудниками станции с периодичностью один раз в десять дней.

В июне 2021 г. выполнена ландшафтная съемка водосбора руч. Контактового. Ландшафтное разнообразие в пределах КВБС определялось по материалам полевых исследований с применением данных космических снимков из интернет-ресурсов с выделением дешифровочных признаков. Полученные материалы с применением полевых данных позволили составить ландшафтную карту масштаба 1:10 000 (рис. 2).

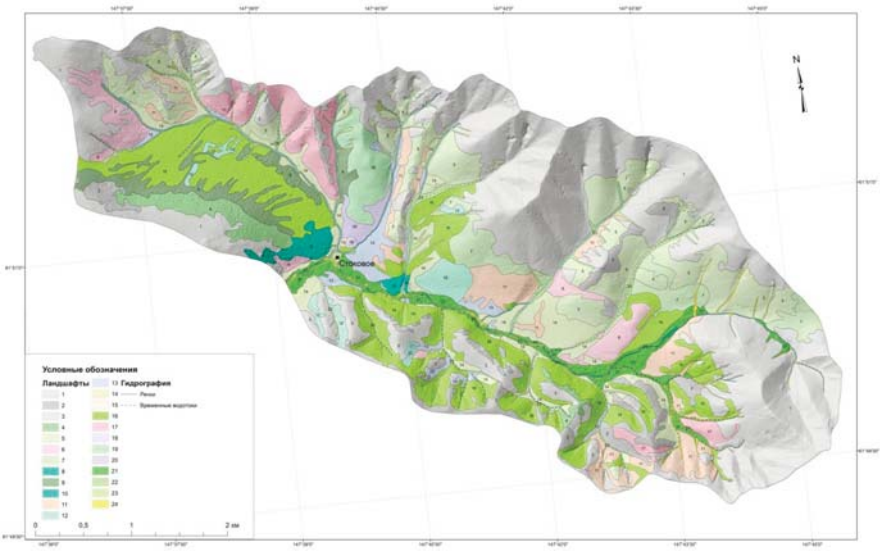


Рис. 2. Ландшафтная карта территории КВБС масштаба 1:10 000

Анмангындинская наледь

Наледи являются элементами водной системы криолитозоны, характерными для многих рек Северо-Востока и не только. Наледь – представляет собой лед, образовавшийся в результате послойного замерзания поверхностных или подземных вод, излившихся на поверхность земли или льда. В речном стоке наледи выполняют функцию перераспределения стока с зимнего периода на весенне-летний.

Анмангындинская наледь расположена в бассейне р. Анмангында (площадь водосбора 376 км^2) на 151–159 км Тенькинской трассы (Магаданская область), в 30 км к юго-востоку от пос. Усть-Омчуг (рис. 3). Перепад высот водораздела колеблется от 700 до 1850 м. Средняя температура воздуха в июле и январе по м/с Усть-Омчуг составляет +10,7 °С и –27,7 °С соответственно (1966–2012 гг.), район характеризуется суровой зимой и коротким летом. Абсолютный минимум достигает –58 °С. Среднее годовое количество осадков составляет 375 мм (м/с Усть-Омчуг). Район находится в зоне сплошной вечной мерзлоты, иногда прерываемой таликами. Мощность многолетнемерзлых пород достигает 200 м, на участках водораздела мощность увеличивается, а в речных долинах уменьшается. На территории стационара формируется особый микроклимат отличный от условий в пос. Усть-Омчуг. Растительность представлена видами характерными для зон тундры и лесотундры, на наледной поляне произрастают карликовая береза, голубика, моховая подстилка. Склоны долины представляют собой лиственничный лес на мохово-лишайниковой подстилке [4].

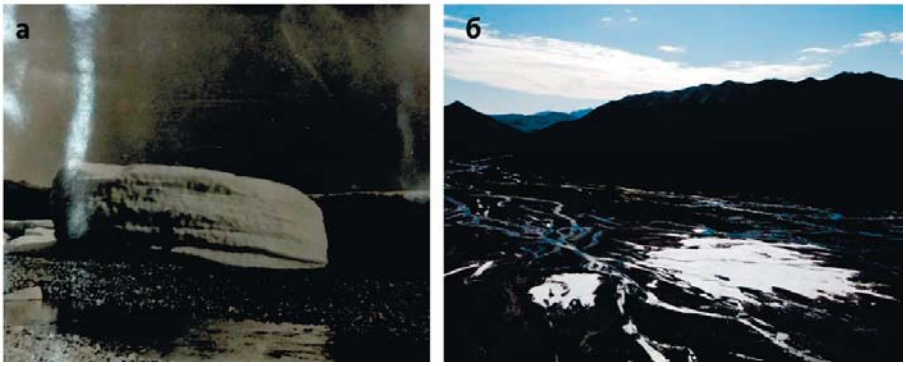


Рис. 3. а) Блоковое разрушение Анмангындинской наледи, фото сделано после спада половодья в 1964 г. б) Анмангындинская наледь с высоты птичьего полета в период активного разрушения. Фото А. А. Землянскова, август 2021 г.

В 1962 г. на базе Колымского УГМС были организованы стационарные исследования режима наледи в бассейне р. Анмангында с целью изучения вопросов регулирования запасов и стока наледных вод. Основными задачами программы были: измерение стока с бассейна, изучение динамики роста и таяния наледного тела, изучение характера влияния климатических факторов на процессы образования, роста и разрушения наледи [4; 5]. Эти и другие виды работ проводились на стационаре около 30 лет, что делает его единственным наледным объектом в мире, на котором велись долгосрочные наблюдения.

Возобновление наблюдений на территории Анмангындинской наледи за состоянием мерзлоты и гидрологических процессов было начато в июле 2020 г. и продолжается по настоящее время. За 2020–2021 гг. были восстановлены ре-

жимные наблюдения за динамикой мощности наледи с применением GNSS оборудования, гидрометеорологические и водно-балансовые наблюдения (оборудование гидропостов, автоматических метеостанций, отбор проб воды и льда и гидрохимический и изотопный состав), проводятся регулярные аэросъемки для оценки площадей, объемов наледного тела, фиксации процессов и явлений на наледи и наледной поляне. Результаты съемок позволили определить максимальную толщину льда, которая составила 4,2 м (рис. 4), образовавшегося за сезон 2020–2021 гг.

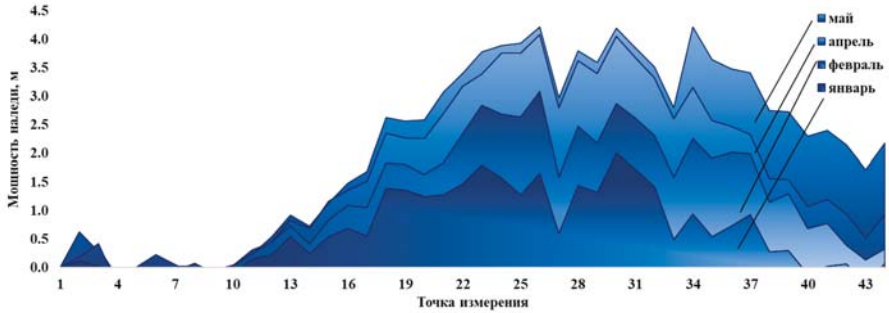


Рис. 4. Изменение мощности наледи за 2020–2021 гг.

Для определения мощности и объема наледи также использовался метод георадарной съемки, всего на участке работ выполнено 28 параллельных профилей (пример, рис. 5) через каждые 200 м, результаты показали, что общий объем наледи составляет 3 562 393 м^3. Стоит отметить, что фактический объем наледи может быть чуть больше, в связи с тем, что профиля могли охватить не всю площадь поверхности наледи. А также снизу наледи прослеживается некая граница, возможно являющаяся кровлей талика.

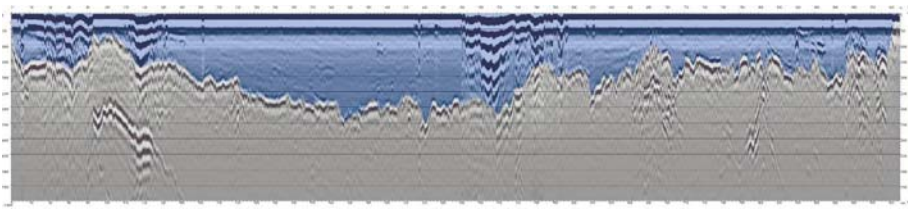


Рис. 5. Пример результата георадарной съемки, апрель 2021 г.

В период с 29.03.2021 по 20.04.2021 на наледи проводились измерения методом ЗСБ. Цель исследований состояла в том, чтобы с помощью метода ЗСБ определить места разгрузки подземный вод, которыми предположительно питается наледь, и определить геоэлектрическое строение среды под наледью и ее ближайшими окрестностями до глубин 500 м. В пределах участка исследований

были выполнены профильные зондирования методом ЗСБ, вдоль 8 профилей различной длины, которые пересекают саму наледь и русло р. Анмангынды выше и ниже по течению (рис. 6). Также был сделан профиль вдоль русла ручья в пределах наледи.

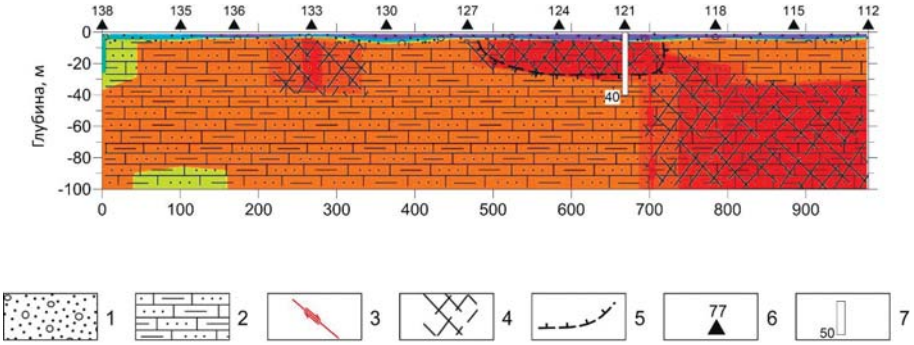


Рис. 6. Результаты съемки наледной поляны методом ЗСБ

1 – четвертичные песчано-галечниковые отложения; 2 – триасовые песчано-глинистые сланцы и алевролиты; 3 – разлом; 4 – зона трещиноватости; 5 – граница ММП; 6 – пункт ЗСБ и его номер; 7 – рекомендуемая скважина и ее глубина.

Предварительная обработка полученных данных показала следующее. Выше наледи фиксируются высокоомные породы, которые скорее всего связаны с многолетнемерзлыми породами, которые имеют сплошное распространение до глубин 400 м и выше. К краям наледи сопротивление разреза резко понижается (на порядок и больше) и разрез становится проводящим, что можно связать с наличием сквозных таликов в мерзлоте, появляющихся из-за тепла, которое приносит вода от реки. Также такие сквозные талики наблюдаются ниже по течению реки, а выше по течению реки эти талики пропадают.

В августе 2021 г. организован мониторинг за распределением температуры в почве в различных частях водосбора: в зоне таликов и в зоне распространения мерзлоты. Это достигнуто путем бурения скважин глубиной от 5 до 15 м в различных частях водосбора р. Анмангында, а также на наледной поляне. Скважины оборудованы термическими косами, а также логгерами уровня воды.

В настоящее время такие междисциплинарные наблюдения за процессами наледеобразования практически отсутствуют не только в России, но и в мире, исключением является изучение отдельных наледей в Центральной и Южной Якутии [8]. Комплекс научных исследований на Анмангындинской наледи позволит проследить взаимодействие поверхностных и подземных вод, уточнить при каких условиях образуется и разрушается наледь, установить ее генезис. Результаты работ будут сопоставлены с историческими данными для анализа влияния изменения климата на данную территорию.

Заключение

Впервые за последние 30 лет на Северо-Востоке реализуется программа по комплексному мониторингу состояния мерзлоты и процессов водообмена. Исследования проводятся на Колымской водно-балансовой станции и стационаре Анмангындинская наледь, которые действовали в 40–90-х гг. XX в. Данные, полученные на этих объектах, считаются репрезентативными для большей части Северо-Востока России и будут актуальны для других регионов криолитозоны.

На основе наблюдений на стационарах будут даны количественные оценки доли подземного питания в стоке рек в различные фазы водного режима на основе результатов изотопной геохимии и разработанной модели водообмена. Для региона Северо-Востока будет разработан прогноз изменений режима и геохимического состава природных вод как следствие трансформации структуры водообмена в результате потепления климата и деятельности человека.

Использование геофизических методов на стационаре Анмангындинская наледь покажет связи между типами и структурой гидрографической сети местоположением подрусловых таликов. Это даст возможность оценить интенсивность и трансформацию водообменных процессов при изменении природной среды и климата.

По результатам изотопного анализа проб воды будет получена оценка соотношения различных типов природных вод в структуре речного стока. Продолжительный ряд наблюдений позволит проследить динамику, возникшую в результате влияния различных факторов (климатических и антропогенных).

Актуальность изучения гидрологического цикла зоны мерзлоты в условиях изменения климата признается во всем мире. На данный момент в Канаде, на Аляске и в Северной Европе действуют не менее двух десятков научно-исследовательских водосборов. В инструментальных исследованиях процессов гидрологического цикла в холодных регионах Россия значительно отстала за последние 20–30 лет от других северных стран. С учетом слабой изученности региона данные объекты могут стать востребованными на международном уровне комплексными стационарами по изучению процессов формирования стока в зоне мерзлоты.

Работа выполнена при поддержке грантов РГО «Атлас гигантских наледей-тарынов Северо-Востока России (продолжение)», «Водные ресурсы Северо-Востока России в условиях глобальных и региональных изменений», РФФИ (номера проектов 19-55-80028, 20-05-00666), и Санкт-Петербургского государственного университета (проект 75295776).

Список литературы

1. Наледи-тарыны – сезонное оледенение Сибири / В. Р. Алексеев, О. М. Макарьева, Н. В. Нестерова, А. Н. Шихов, А. А. Осташов, А. А. Землянскова // Наука и техника в Якутии. Институт мерзлотоведения СО РАН, 2021. № 1 (40). С. 3–13.

2. *Банцекина Т. В.* Температурный режим и динамика льдистости крупнообломочных склоновых отложений без заполнителя в весенне-летнее время (на примере руч. Контактовый) // Колыма. 2002. № 4. С. 9–13.

3. *Бояринцев Е. Л., Сербов Н. Г., Попова Н. И.* Формирование водного баланса весеннего половодья малых горных водосборов Верхней Колымы (по материалам Колымской водно-балансовой станции) // Вестник Северо-восточного научного центра ДВО РАН. 2006. № 4. С. 12–19.

4. *Букаев Н. А.* Основные закономерности режима гигантских наледей в верховьях р. Колыма (на примере Анмангындинской наледи) // Колыма. 1966. № 4. С. 9–12.

5. *Лебедев В. М., Ипатьева А. И.* Анмангындинская наледь, ее режим и роль в водном балансе речного бассейна : труды ДВНИГМИ // Гидрологические исследования и прогнозы. 1980. № 84. С. 86–93.

6. *Сущанский С. И.* История создания, методы, объекты и некоторые результаты исследований Колымской водно-балансовой станции // Факторы формирования общего стока малых горных рек в Субарктике (по материалам Колымской водно-балансовой станции). Магадан : СВКНИИ ДВО РАН, 2002. С. 18–35.

7. *Шерстюков Б. Г., Шерстюков А. Б.* Лесные пожары на территории России при потеплении климата в XXI веке // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем / Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН. М., 2013. Т. 25. С. 300–313.

8. Morphometric analysis of groundwater icings: Intercomparison of estimation techniques / L. Gagarin, W. Qingbai, A. Melnikov, N. Volgusheva, N. Tananaev, H. Jin, Z. Zhang, V. Zhizhin // Remote Sensing. 2020. Vol. 12, N 4. P. 692. https://doi.org/10.3390/rs12040692

9. Water balance and hydrology research in a mountainous permafrost watershed in upland streams of the Kolyma River, Russia: a database from the Kolyma Water-Balance Station, 1948–1997 / O. Makarieva, N. Nesterova, L. Lebedeva, S. Sushansky // Earth Syst. Sci. Data. 2018. Vol. 10. P. 689–710. https://doi.org/10.5194/essd-10-689-2018

10. *Romanovsky V., Smith S., Christiansen H.* Permafrost thermal state in the polar Northern Hemisphere during the International Polar Year 2007-2009: A synthesis // Permafrost Periglacial Process. Published online in Wiley InterScience, 2010. N 21. P. 106–116. https://doi.org/10.1002/ppp.689

11. *Streletskiy D., Shiklomanov, N., Hatleberg E.* Infrastructure and a Changing Climate in the Russian Arctic: A Geographic Impact Assessment // Proceedings of the 10th International Conference on Permafrost. 2012. N 1. P. 407–412.

УДК 556.5.06

Оценка изменения гидрологического режима Торейских озер в результате антропогенных воздействий

М. А. Кашницкая (Marina-Sosnina1993@yandex.ru)[1], М. В. Болгов (bolgomv@mail.ru)[2]

[1]*НИЦ «Планета», Москва*
[2]*Институт водных проблем РАН, Москва*

Аннотация. На основе предложенной модели водного баланса Торейских озер за период 1965–2018 гг. дана оценка вероятных изменений гидрологического режима Торейских озер при строительстве гидротехнического сооружения на трансграничной р. Ульдза в Монгольской части водосбора. Проанализировано изменение гидрологического режима Торейских озер с учетом строительства данного водохранилища, а также при сокращении притока воды на 10 и 20 %. Рассмотрены возможные экологические последствия для региона Торейских озер при строительстве гидротехнического сооружения на реке.

Ключевые слова: гидрологический режим, Торейские озера, антропогенное воздействие.

Торейские озера – Барун-Торей и Зун-Торей, расположены в юго-восточной части Забайкалья на границе с Монгольской Народной Республикой (МНР). Данные озера являются основой государственного природного биосферного заповедника «Даурский», через который проходит один из важнейших путей миграции большого числа видов перелетных птиц, а также входят в состав российско-монгольского объекта Всемирного наследия ЮНЕСКО – «Ландшафты

Даурии» [2]. Торейские озера являются водно-болотным угодьем, имеющим международное значение в соответствии с Рамсарской конвенцией [12].

Озеро Барун-Торей представляет собой бессточный водоем неправильной формы, вытянутой с севера на юг. На восточном берегу оз. Барун-Торей соединяется протокой с оз. Зун-Торей. Поступление воды из оз. Барун-Торей в Зун-Торей начинается при уровне воды в Барун-Торее 596,1 м БС. Глубина оз. Барун-Торей относительно небольшая – около 4 м, длина 50,5 км, средняя ширина 11,1 км, площадь водной поверхности достигает 600 км^2. Озеро Зун-Торей имеет меньшие размеры, но при этом более глубокое: максимальная глубина оз. Зун-Торей составляет около 7 м, длина озера – 22,6 км, средняя ширина 13 км при площади водной поверхности – 300 км^2. В озеро Барун-Торей впадают трансграничные реки Ималка и Ульдза со среднегодовыми расходами 0,43 и 5,46 м3/с, соответственно (рис. 1). Река Ульдза (Улдз) берет начало в восточных отрогах хребта Хэнтэй и протекает преимущественно по степным равнинам северо-восточной части МНР, впадает в оз. Барун-Торей, образовывая обширную дельту, на территории Российской Федерации в Забайкальском крае. Длина реки составляет 425 км, из них 409 км расположены в МНР. В Российской Федерации находится лишь устьевая часть реки длиной 16 км. Площадь водосбора – 26 900 км^2, 95 % из которых приходится на МНР. Река Ульдза имеет определяющее значение в водном балансе Торейских озер и природы всего Даурского степного экологического региона в целом.

Торейские озера имеют непостоянный гидрологический режим, обусловленный циклическими изменениями климата. За последние 200–220 лет озера неоднократно высыхали и наполнялись с периодичностью около 30 лет [8]. Озера и нижнее течение р. Ульдза расположены в зоне «рассеивания» стока [1], в которой потери воды на фильтрацию из русел и испарение существенно превышают местный сток. Поэтому, по сравнению с соседними водосборами, маловодные периоды в притоке к озеру носят более выраженный, затяжной характер, что также отражается на водном балансе самого озера, увеличивая потери на фильтрацию при росте уровня воды.

По спутниковым изображениям Земли на территории МНР в июле 2020 г. обнаружено начало строительства гидротехнического сооружения на р. Ульдза в 15 км от н. п. Наранбулаг. Строительство началось без согласования с российской стороной. По предварительным оценкам строительство данного сооружения может вызвать существенное изменение составляющих гидрологического цикла реки, а в дальнейшем Торейских озер, что может привести к потере статуса Торейских озер как объекта Всемирного наследия (рис. 1).

По информации, находящейся в открытом доступе, известно, что строительство гидротехнического сооружения на р. Ульдза ведется в рамках реализации проекта «План управления бассейном реки Ульдза-Гол», в результате которого планируется создание водохранилищ в бассейне реки, регулирующих ее сток. Данный проект является составной частью монгольской программы «Хух морь». Программа предусматривает перераспределение стока наиболее полноводных северомонгольских рек, трансграничных с Россией, на засушливый юг и

юго-восток МНР (регион Гоби). Кроме того, предусмотрена их стыковка с водными ресурсами Автономной Внутренней Монголии – сопредельного с МНР обширного региона Китая [7]. На официальном сайте о государственных закупках в техническом задании, размещенном в проектной документации к тендеру заявлены следующие характеристики возводимого водохранилища на р. Ульдза: высота – 12 м, длина около 700 м, объем 27 млн м3, площадь до 10 км^2, функция – экологическое восстановление реки путем стабилизации стока [10].

Рис. 1. Схема расположения Торейских озер и проектируемого водохранилища

Создание водохранилища, впоследствии изъятие воды из реки, необходимого для его заполнения, а также испарение с его водной поверхности, приведет к увеличению продолжительности маловодных периодов и сокращению многоводных, а также в целом к более низким отметкам уровня воды в Торейских озерах. Нарушение гидрологических циклов водности реки и озер приведет к неблагоприятным экологическим последствиям. Возможные последствия создания плотины приведены в материалах [9]: затруднение миграции водных организмов и реколонизация пересыхающих водоемов; сокращение стока наносов, изменение режимов накопления и выветривания солей (изменение продуктивности водоемов); вторичные локальные, региональные и континентальные экологические и водохозяйственные последствия (например, изменение миграционных потоков и мест гнездования птиц с волнообразным сокращением их численности).

Для оценки возможных последствий гидротехнического строительства необходимо оценить влияние сокращения притока на гидрологический режим Торейских озер на основе восстановления и моделирования водного баланса озер, что возможно сделать с использованием данных дистанционного зондирования Земли.

Материалы и методы исследования

Гидрологические наблюдения за оз. Барун-Торей проводилось в период 1965–1978 гг. Вследствие интенсивного уменьшения акватории озера в 1979–1980 гг., а в 1981–1982 гг. пересыхания обширной прибрежной зоны озера (до 8–15 км) наблюдения за уровнем и температурой воды были прекращены. Поэтому основным источником информации на сегодняшний день являются спутниковые данные.

Данные наблюдений на оз. Барун-Торей позволили В. А. Обязову рассчитать водный баланс за период 1965–1980 гг., а в дальнейшем с коллективом авторов, используя данные эпизодических измерений, выполнить расчет изменения уровня воды в озере до 2009 г. [11].

Авторами настоящей статьи в работе [4] было предложено решение уравнения водного баланса Торейских озер с использованием материалов наблюдательной сети Росгидромета (оз. Барун-Торей – с. Кулусутай (1965–1978 гг.), р. Ульдза – с. Соловьевск (1965–2018 гг.), р. Ималка – н.п. Красная Ималка (1965–2018 гг.), с. Соловьевск (1965–2019 гг.)) и данных дистанционного зондирования Земли космических аппаратов серий Landsat и Sentinel-2, с пространственным разрешением 30 и 10 м, соответственно (1989–2020 гг.).

Калибровка модели водного баланса Торейских озер проведена по результатам работ В. А. Обязова, а также на основе представлений о возможных потерях воды в разные циклы водности.

Достоверность полученной модели водного баланса подтверждается совместным анализом графиков изменения уровня оз. Барун-Торей, построенных по данным наземных гидрологических измерений и по данным спутникового мониторинга. На основе полученных данных появилась возможность оценить изменения гидрологического режима Торейских озер с учетом строительства гидротехнического сооружения на р. Ульдза.

Основные результаты и выводы

По данным предложенной модели водного баланса в многолетнем изменении уровня Торейских озер прослеживается цикличность. В 1965 г. отмечался максимальный уровень озер. В последующие годы происходило уменьшение уровня воды с достижением минимальных значений в 1982–1983 гг. После наблюдалось наполнение озер. Максимальное значение уровня в Барун-Торее было в 1999 г., а в Зун-Торее в 1998 г. Затем на озерах отмечалось уменьшение уровня воды, которое происходит до настоящего времени. Отметим, что по спутниковым данным в период 2009–2020 гг. регулярно отмечалось практически полное высыхание котловины оз. Барун-Торей, а с 2017 – оз. Зун-Торей. Информация, получаемая с космических аппаратов, позволяет отслеживать наполнение котловины озер, обусловленное выпадением атмосферных осадков. Относительно стабильное наполнение оз. Барун-Торей началось в сентябре 2020 г.

Для оценки влияния проектируемого водохранилища на р. Ульдза на гидрологический режим Торейских озер были проведены расчеты с уменьшением

притока на величину испарения с акватории водохранилища. Для выявления допустимых изъятий из притока в Торейские озера проведены расчеты с сокращением притока на 10 и 20 % [5] (рис. 2).

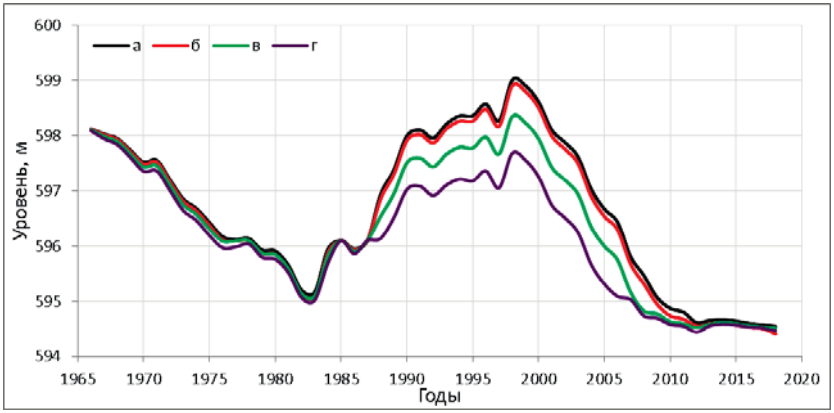


Рис. 2. Многолетнее изменение уровенного режима оз. Барун-Торей, полученного методами: а – водного баланса; б – водного баланса, с учетом строительства водохранилища, в – водного баланса, сокращенные на 10 %, г – водного баланса, сокращенные на 20 %.

Результаты расчетов водного баланса Торейских озер с учетом строительства водохранилища показывают снижение уровня в озере в среднем на 0,07 м за период с 1965 по 2018 г. Существенных изменений в циклах водности озер не происходит. При сокращении притока, поступающего из р. Ульдза на 10 и 20 % наблюдается снижение уровня воды в озерах в среднем на 0,3 и 0,5 м, максимальное снижение уровня отмечается в период повышенной водности и составляет 0,6 и 1,1 м соответственно. При этом при сокращении притока на 10 % сохраняются годы начала периодов максимального и минимального наполнения озер и его высыхания. При сокращении притока на 20 % наблюдается более длительный период с низким уровнем воды в годы наполнения озер, а высыхание озер начинается на 2 года ранее.

Изменение и смещение во времени гидрологических циклов Торейских озер, а также уменьшение их водности, способно привести к неблагоприятным последствиям для всего экологического региона Торейских озер. В период маловодной фазы (высыхание озер) сотрудниками Даурского заповедника отмечалась гибель водных организмов. Другим следствием уменьшения водности озер является изменение видового состава водоплавающих и околоводных птиц, а впоследствии – их существенное снижение [6].

Увеличение продолжительности маловодной фазы гидрологического цикла Торейских озер способно привести к изменению миграционных путей водоплавающих птиц. Например, в период 1999–2009 гг. численность уток в степ-

ной зоне Забайкальского края, в том числе в регионе Торейских озер, сократилась в 59 раз, когда миграционный путь сместился на восток к Предгорью Большого Хингана и на запад – в район Хэнтэя [3].

Список литературы

1. *Болгов М. В.* Дождевые паводки водотоков Монгольской Народной Республики // Метеорология и гидрология. 1985. № 8. С. 83–88.

2. *Буторин А. А.* Ландшафты Даурии – новый российский объект Всемирного наследия // Вестник Комиссии РФ по делам ЮНЕСКО. 2017. № 32. С. 116–143.

3. *Горошко О. А.* Влияние многолетних климатических циклов на орнитокомплексы Даурии : материалы науч. Конф. «Эволюция биогеохимических систем (факторы, процессы, закономерности) и проблемы природопользования» и симп. «Геоэкологические, экономические и социальные проблемы природопользования» посв. 30-летию ИПРЭК СО РАН. 27–30 сент. 2011 г., Чита, Россия. Чита : Изд-во ЗабГПУ. С. 141–143.

4. *Кашницкая М. А., Болгов М. В.* Бессточные Торейские озера: можно ли дать прогноз изменений гидрологического режима // Метеорология и гидрология. 2021. № 5. С. 95–98.

5. *Кашницкая М. А., Болгов М. В.* Оценка влияния строительства гидротехнического сооружения на трансграничной реке Ульдза (Российская Федерация и Монгольская Народная Республика) // Трансграничные водные объекты: использование, управление, охрана : материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Сочи, 20–25 сент. 2021 г. Новочеркасск : Лик, 2021.

6. *Кирилюк О. К., Симонов Е. А.* Проблемы адаптации к изменению климата в бассейнах рек Даурии: экологические и водохозяйственные аспекты. 2012 : сб. науч. тр. Государственного природного биосферного заповедника «Даурский». Вып. 5 / под ред.: О. К. Кирилюк, Е. А. Симонова Чита : Экспресс-издательство. 80 с.

7. На российско-монгольской границе может возникнуть зона экологического бедствия. URL: http://www.igras.ru/news/2864 (дата обращения: 15.05.2021).

8. *Обязов В. А.* Закономерности увлажнения степной зоны Забайкалья и их проявления в режиме озер (на примере Торейских озер) : автореф. дис. … канд. геогр. наук. Чита, 1996. 21 с.

9. *Симонов Е. А., Кирилюк В. Е.* Ход «Синим конем»: трансграничные риски стратегий климатической адаптации и «климатических обязательств» на примере Монголии // Трансграничное водное сотрудничество в странах ВЕКЦА: извлеченные уроки и направления будущего развития : материалы Междунар. конф. СВО ВЕКЦА. Видеоконференция, 2–3 марта, 2021 г.

10. Улз голын урсцыг нэмэгдүүлэх «Онон-Улз». URL: https://www.tender.gov.mn/en/invitation/detail/1570643029346 (дата обращения: 15.05.2021).

11. Influence of climate change on vegetation and wildlife in the Daurian Eco-region. – Eurasian steppes. Ecological problems and livelihoods in a changing world / V. E. Kirilyuk, V. A. Obyazov, T. E. Tkachuk, O. K. Kirilyuk. Springer, Dordrecht, 2012. P. 397–424.

12. Torey Lakes. URL: https://rsis.ramsar.org/ris/683 (дата обращения:16.04.2021).

УДК543.383.2: 543.51:543.544.5.068.7

Установление компонентного состава нефтепродуктов и возможныхисточников их поступления в воду р. Волги в районе г. Волгограда

В. Е. Котова (Valentina.E.Kotova@gmail.com), Ю. А. Андреев (y.andreev@gidrohim.com), О. А. Михайленко (o.mikhayllenko@gmail.com), И. А. Рязанцева (ladamx@mail.ru)

Гидрохимический институт, Ростов-на-Дону

Аннотация. Работа посвящена изучению загрязнения нефтепродуктами р. Волги. Для этой цели были отобраны пробы воды в г. Волгограде и его окрестностях в июне 2021 г. Для определения массовых концентраций нефтепродуктов, включая отдельно полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) и алифатические углеводороды, а также содержания органических веществ (по ХПК) применяли ИК-спектрометрические, хроматографические (ВЭЖХ и ГХ-МС) и титриметрический методы анализа. Массовые концентрации нефтепродуктов составили 0,17–0,73 мг/л, суммы приоритетных ПАУ – 25,8–57,3 нг/л, ХПК – 14,1–21,4 мг/л. Для идентификации источников происхождения компонентов нефтепродуктов использованы результаты определения ПАУ и алифатических углеводородов.

Ключевые слова: нефтепродукты, полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), алифатические углеводороды, химическое потребление кислорода (ХПК), вода, Волга.

Введение

Важность изучения нефтепродуктов (НП) в водных объектах обусловлена повсеместным распространением веществ этой группы, их высокой токсичностью, активным участием в протекающих физических, химических, биохимических процессах, взаимодействием с биотой.

Нефтепродукты – это интегральный показатель, отражающий суммарное содержание неполярных или малополярных углеводородов. В водных объектах нефтепродукты представляют собой чрезвычайно сложную, непостоянную и разнообразную смесь веществ, основной группой которой являются углеводороды, составляющие преобладающую (до 90 %) часть [2]. Помимо нефтяных компонентов в результаты определения содержания нефтепродуктов могут быть включены и природные углеводороды в виде рассеянного органического вещества и специфических органических веществ растительного происхождения [7].

Волга – одна из крупнейших рек на Земле – является центральной водной артерией России. Среди множества городов, расположенных на ее берегах, Волгоград – один из мощных индустриальных центров со значительным промышленным и транспортным потенциалом. Большое количество промышленных предприятий, интенсивный рост автотранспорта обусловливают наличие в городе целого комплекса острых экологических проблем, одна из которых загрязнение р. Волги.

Цель данной работы – оценка уровня загрязненности нефтепродуктами воды р. Волги, изучение их компонентного состава и идентификация возможных источников поступления углеводородов.

Для характеристики загрязненности воды определяли массовые концентрации НП; 15 приоритетных полициклических ароматических углеводородов (ПАУ): нафталин (Naph), аценафтен (Ace), флуорен (Fl), фенантрен (Phe), антрацен (An), флуорантен (Flu), пирен (Py), бензо[a]антрацен (B[a]A), хризен (Chry), бензо[b]флуорантен (B[b]F), бензо[k]флуорантен (B[k]F), бензо[a]пирен (B[a]P), дибензо[a,h]антрацен (DB[a,h]A), бензо[g,h,i]перилен (B[g,h,i]P), индено[1,2,3-cd]пирен (In[cd]P); алифатических углеводородов (АУ) $C_{10}H_{22}$-$C_{33}H_{68}$ (C_{10}-C_{33}) и химическое потребление кислорода (ХПК) как интегральный показатель содержания всех органических веществ.

Для некоторых показателей установлены нормативы качества (предельно-допустимые концентрации – ПДК) для воды разных водных объектов (табл. 1) [3; 6]:

По показателю ХПК значения не должны превышать 15 мг/л для воды поверхностных водоисточников, используемых для рекреационного водопользования, а также в черте населенных мест [3].

Таблица 1

Предельно-допустимые концентрации компонентов нефтепродуктов в водах различного типа [3; 6]

Показатель	Предельно-допустимая концентрация для вод			
	подземных и поверхностных водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования		рыбохозяйственного значения	
	значение, мг/л	класс опасности*	значение, мг/л	Класс опасности
Нафталин	0,01	4	0,004	3
Бензо[a]пирен	0,00001 (к)	1	–	–
Нефть, в том числе многосернистая	0,3 0,1	4	–	–
Нефть и нефтепродукты в растворенном и эмульгированном состоянии	–	–	0,05	3
*Класс опасности вещества: 1 класс – чрезвычайно опасные; 3 класс – умеренно опасные; 4 класс – малоопасные, к – канцероген				

Материалы и методы исследования

В качестве объектов исследования использовали пробы воды, отобранные в июне 2021 г. из нескольких районов р. Волги: за пределами и в черте Волгограда. Схема мест отбора проб приведена на рис. 1. Вода в пробах, отобранных выше г. Волгограда, характеризовалась присутствием значительного количества взвеси глинистых частиц, в черте города – без взвеси, прозрачная.

Способ определения НП в воде заключается в экстракции проб четыреххлористым углеродом, хроматографическом выделении группы углеводородов и измерении интенсивности их поглощения в ИК-области [4]. Способ подготовки проб воды для определения групп ПАУ и АУ основан на экстракционном извлечении смесью органических растворителей при высаливании; разделении сконцентрированных экстрактов на фракции изучаемых групп методом колоночной хроматографии на силикагеле [1] и хроматографическом анализе. Определение

ПАУ в воде проводили методом высокоэффективной жидкостной хроматографии со спектрофлуориметрическим детектированием, а АУ – методом газовой хроматографии с масс-спектрометрическим детектированием. Для определения ХПК использовали титриметрический метод после предварительной минерализации проб воды в термореакторе [5].

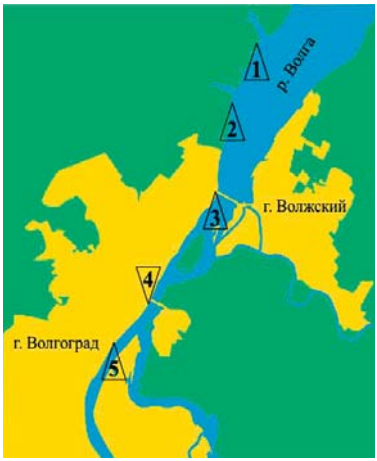


Рис. 1. Точки отбора проб воды в р. Волга
1 – с. Пичуга, ниже впадения р. Пичуга; 2 – х. Овражье, ниже залива Ерзовка;
3 – г. Волгоград, район Волжской ГЭС выше моста через реку; 4 – г. Волгоград, набережная, ниже Волгоградского моста; 5 – г. Волгоград, пристань Тулака

Для определения источников поступления углеводородов в воду Волги выбран способ оценивания отношений маркерных ПАУ. Данный подход заключается в следующем: по измеренным массовым концентрациям веществ этой группы в исследованных водных объектах рассчитывают значения отношений концентраций маркерных соединений, которые в дальнейшем сопоставляют с критериями, представленными в табл. 2.

Таблица 2

Характеристики источников поступления ПАУ [9]

Отношение ПАУ	Петрогенный источник	Смешанный источник	Пирогенный источник	
			Горение нефтепродуктов	Горение древесины, угля, травы
Flu/(Flu+Py)	< 0,4	–	0,4–0,5	> 0,5
B[a]A/(B[a]A+Chry)	< 0,2	0,2–0,35	> 0,35	
Flu/Py	< 0,4	–	> 0,4	
(Flu+Py)/(Chry+Phe)	< 0,5	–	> 0,5	

Результаты и их обсуждение

Результаты определения показателей в изучаемых объектах представлены на рис. 2.

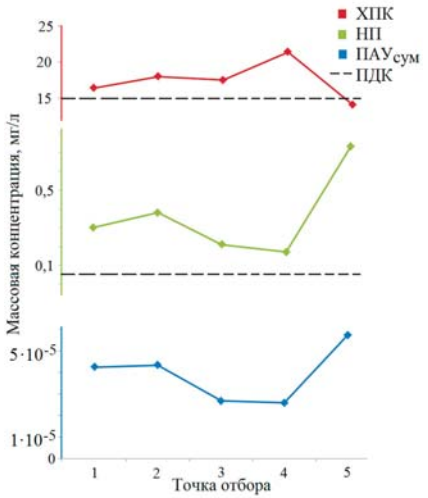


Рис. 2. Точки отбора проб воды в р. Волге:
1 – с. Пичуга, ниже впадения р. Пичуга; 2 – х. Овражье, ниже залива Ерзовка;
3 – г. Волгоград, район Волжской ГЭС выше моста через реку; 4 – г. Волгоград, набережная, ниже Волгоградского моста; 5 – г. Волгоград, пристань Тулака

Значения ХПК на протяжении р. Волга от с. Пичуга до района Волгоградского моста увеличивались незначительно, от 1,1 ПДК до максимального значения – 1,4 ПДК, в районе пристани Тулака зафиксировано минимальное, не превышающее ПДК значение ХПК.

Превышение ПДК по показателю НП отмечено для всех районов реки: от 3,4 ПДК (в районе Волгоградского моста) до 14,6 ПДК (в районе пристани Тулака).

Распределение суммарных концентраций приоритетных ПАУ в воде р. Волга в целом схоже с изменением концентрации НП: некоторое увеличение от с. Пичуга до х. Овражье, затем уменьшение концентраций до минимального значения в районе Волгоградского моста и достижение максимального значения на изученном отрезке реки, превышающее в 2,2 раза предыдущее значение. На рис. 3а представлены хроматограммы фракций ПАУ, выделенных из проб воды р. Волги.

Концентрация бензо[а]пирена и нафталина не превышали приведенных выше значений ПДК. Концентрации нафталина сохранялись на одном уровне на представленном участке реки – 8,5–10 нг/л. Концентрация бензо[а]пирена уменьшалась от 1,5 нг/л в районе с. Пичуга до минимального значения, найденного в районе Волгоградского моста – 0,4 нг/л; затем резко увеличилась (в 6 раз) в районе пристани Тулака и достигла максимального значения – 2,4 нг/л.

Концентрации алифатических углеводородов были ниже пределов обнаружения использованной методики, однако для каждой пробы были получены хроматограммы, внешний вид которых позволяет судить о происхождении веществ

данной фракции. По этой причине наряду с использованием критериев отношений маркерных ПАУ (табл. 2) для идентификации источников происхождения углеводородов использованы результаты определения АУ.

На рисунке (рис. 3, *б*–3, *г*) представлены хроматограммы, имеющие наиболее отличающиеся формы распределения пиков АУ. Хроматограмма (рис. 3, *б*) получена для экстракта пробы воды, отобранной в районе с. Пичуга (место отбора находилось в сельской местности, недалеко от пастбища скота). Она отличается присутствием двух распределений пиков (соизмеримой интенсивности): равномерным в низкомолекулярной (с максимальным пиком C_{17}) и более интенсивным для нечетных представителей в высокомолекулярной (с максимальными пиками C_{25} и C_{27}) областях. Пики нечетных АУ в низкомолекулярной области обусловлены присутствием фитопланктона, а, в свою очередь, четных АУ – бактериальной трансформацией органического вещества [8]. Более интенсивные пики нечетных АУ в высокомолекулярной области хроматограммы могут быть продуктами разложения высших растений, а также свидетельствовать о некотором хроническом нефтяном загрязнении тяжелыми фракциями нефтепродуктов. Идентификация происхождения углеводородов по фракции ПАУ показала преобладающий пирогенный источник поступления – продукты горения травы, древесины, угля (рис. 4).

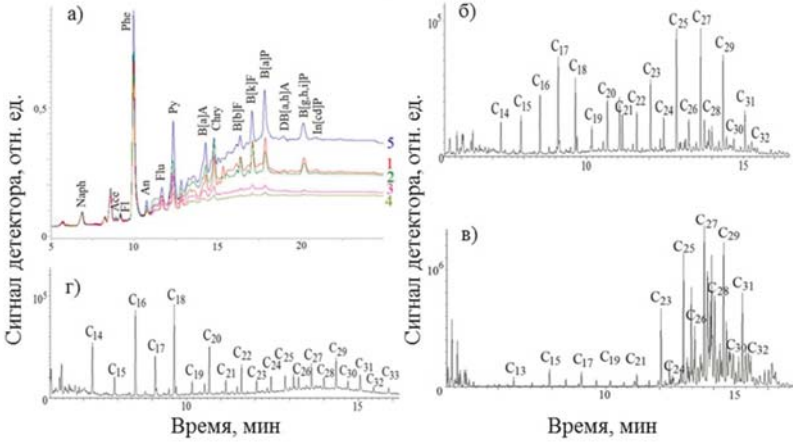


Рис. 3. Хроматограммы углеводородных фракций проб воды р. Волги: а – объединенная хроматограмма фракции ПАУ для проб воды 1–5; б – хроматограмма фракции алифатических углеводородов пробы воды 1; в – хроматограмма фракции алифатических углеводородов пробы воды 2; г – хроматограмма фракции алифатических углеводородов пробы воды 5

Наибольший интерес в данном исследовании представляют результаты анализа пробы воды, отобранной в районе х. Овражье – дачного поселка с установленной на берегу реки насосной станцией. Хроматограмма экстракта данной

пробы воды (рис. 3, *в*) характеризуется наличием двух распределений: с доминированием нечетных АУ над четными в низкомолекулярной области (с максимальным пиком C_{15}) и очень высоким содержанием АУ в высокомолекулярной области (с максимальным пиком C_{27}) на фоне «горба» неразделенной нафтеново-ароматической фракции. Для данного участка реки можно выявить те же источники поступления АУ, что и для выше рассмотренного, но с более выраженным хроническим нефтяным загрязнением. Преобладание петрогенного источника происхождения углеводородов также подтверждается и идентификацией по фракции ПАУ – получена практически полная согласованность для большинства критериев.

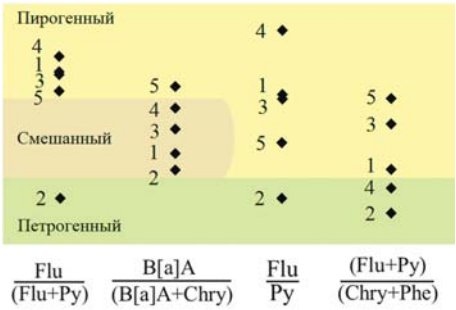


Рис. 4. Результаты идентификации источников поступления углеводородов с использованием критериев отношений маркерных ПАУ
1 – с. Пичуга, ниже впадения р. Пичуга; 2 – х. Овражье, ниже залива Ерзовка; 3 – г. Волгоград, район Волжской ГЭС выше моста через реку; 4 – г. Волгоград, набережная, ниже Волгоградского моста; 5 – г. Волгоград, пристань Тулака

Для всех проб воды, отобранных в черте г. Волгоград, получены хроматограммы схожего вида (рис. 3, *г*): более интенсивные пики в низкомолекулярной области с доминированием четных АУ, в высокомолекулярной – незначительное преобладание нечетных АУ над четными. Преобладающий вклад в углеводородную фракцию данного района реки вносят продукты бактериальной трансформации органического вещества, дополнительное поступление которого можно объяснить сточными и ливневыми водами. Однако идентификация с использованием критериев отношений маркерных ПАУ не выявила единый источник загрязнения. На участках реки около Волжской ГЭС и у пристани Тулака выявлено преимущественно пирогенное поступление углеводородов, а в районе Волгоградского моста – смешанное, что говорит о значительном привнесении ПАУ из выхлопных газов транспорта.

В результате исследования показано, что наиболее загрязненными из изученных участков реки по показателям НП, суммарная концентрация ПАУ и бензо[а]пирен являются районы с. Овражье и пристани Тулака.

Использование отдельных интегральных показателей (таких как нефтепродукты и ХПК) может представлять интерес при оценке общей загрязненности

водных объектов. Однако дополнительное изучение компонентов, входящих в состав этих показателей (например, групп ПАУ и алифатических углеводородов), является более информативным в вопросах идентификации источников поступления данных веществ.

Список литературы

1. *Котова В. Е., Андреев Ю. А.* Патент 2646402 Российская Федерация. Способ подготовки проб для определения алифатических и полициклических ароматических углеводородов в донных отложениях / заявитель ФГБУ «Гидрохимический институт»; приоритет 28.02.2017. 17 с.

2. *Никаноров А. М., Страдомская А. Г.* Проблемы нефтяного загрязнения пресноводных экосистем : монография. Ростов на/Д. : НОК, 2008. 222 с.

3. Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения : приказ Минсельхоза России от 13 дек. 2016 г. № 552. М. : ВНИРО, 2017. 214 с.

4. РД 52.24.476-2007. Массовая концентрация нефтепродуктов в водах. Методика выполнения измерений ИК-фотометрическим методом. Ростов на/Д, 2007. 27 с.

5. РД 52.24.531-2016. Химическое потребление кислорода в водах. Методика измерений титриметрическим методом с минерализацией проб в термореакторе. Ростов на/Д, 2016. 24 с.

6. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. Зарег. в Минюсте РФ 29.01.2021 г. № 62296.

7. Identification of endogenous and anthropogenic hydrocarbons in bottom deposits of peat lakes and evaluation of their contribution to the «hydrocarbon index» / E. S. Brodskii, A. A. Shelepchikov, E. Y. Mir-Kadyrova, G. A. Kalinkevich // J. Anal. Chem. Springer, 2017. Vol. 72, N 12. P. 1255–1262.

8. *Nishimura M., Baker E.* Possible origin of n-alkanes with a remarkable even-to-odd predominance in recent marine sediments // Geochim. Cosmochim. Acta. Elsevier, 1986. Vol. 50, N 2. P. 299–305.

9. PAHs in the Fraser River basin: a critical appraisal of PAH ratios as indicators of PAH source and composition / M. B. Yunker [et al.] // Organic Geochemistry. Elsevier, 2002. Vol. 33. P. 489–515.

УДК 556.5

Актуальные проблемы гидрологических расчетов в зоне распространения многолетнемерзлых пород

Н. В. Нестерова (nnesterova1994@gmail.com)[1, 2, 3], О. М. Макарьева (omakarieva@gmail.com) [1,2,] А. А. Осташов (andrey.ostashov@gmail.com)[1], А. А. Землянскова (anastasiazemlanskova@gmail.com)[1]

[1] *Северо-Восточная научно-исследовательская мерзлотная станция, Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, Магадан*
[2] *Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург*
[3] *Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург*

Аннотация. Обсуждаются научно-практические проблемы гидрологических расчетов при инженерном проектировании в зоне распространения многолетней мерзлоты, характеризующейся крайней ограниченностью и низким качеством данных наблюдений, а также отсутствием ресурсов для развития полноценной наблюдательной гидрометрической сети наблюдений. Основными проблемами являются необоснованность использования стандартных методов расчета, основанных на применении методов статистической обработки рядов данных, полученных в исторический период, для оценки гидрологических характеристик в современных условиях изменения климата, а также острый дефицит квалифицированных специалистов,

потеря опыта организации и проведения комплексных гидрологических исследований, отставание в разработке современных гидрометеорологических приборов отечественного производства. Констатируется срочная необходимость развития государственной программы, направленной на восстановление ранее действовавших и организацию новых комплексных научно-исследовательских стационаров, а также разработку методов определения основных гидрологических характеристик для решения задач инженерно-изыскательских работ и проектирования на основе современных методов математического моделирования.

Ключевые слова: мерзлота, гидрологические расчеты, изменение климата, научные стационары, математическое моделирование, Свод Правил.

Согласно IPCC, в последние десятилетия глобальное потепление оказало воздействие на природные и антропогенные системы на всех континентах и в мировом океане. Во многих регионах России и мира наблюдается изменение динамики и количества атмосферных осадков, влажностного и температурного режима почвы, снежного и ледяного покрова и т. д. Зона распространения многолетней мерзлоты претерпевает наиболее выраженные климатические изменения, которые влияют на все компоненты окружающей среды, включая водный баланс и гидрологический режим речных бассейнов [6].

Несмотря на наблюдаемые изменения, именно на территории распространения многолетней мерзлоты планируется широкомасштабное развитие социально-экономической инфраструктуры, позволяющей добывать, перерабатывать и транспортировать природные ресурсы [7]. Учитывая высокую стоимость строительных проектов, запланированная программа развития требует научно-обоснованных методов расчета характеристик стока рек, прогноза и оценки риска наводнений для проектируемой и уже действующей промышленной и социальной инфраструктуры.

Целью статьи является анализ обеспеченности зоны мерзлоты Российской Федерации данными гидрологических наблюдений, необходимыми для проведения инженерных изысканий и расчетов, а также формирование общих предложений по развитию научно-исследовательской гидрологической сети и созданию новых методов расчета характеристик стока на основе математического моделирования.

Гидрологические процессы в зоне многолетнемерзлых пород в условиях нестационарности климата

Потепление климата и деградация многолетней мерзлоты вызывают трансформацию гидрологического цикла, в том числе изменения динамики влажности почво-грунтов, интенсификацию связи подземных и поверхностных вод, сезонное перераспределение элементов водного баланса [9].

Многочисленные исследования показывают увеличение общего стока воды крупных арктических рек во второй половине XX в. [1], смещение сроков половодий на более раннее время и существенные изменения во внутригодовом распределении стока [8].

Сложность взаимодействия процессов тепло- и влагопереноса в мерзлотных ландшафтах обусловливают нелинейность реакции гидрологического цикла

на климатические изменения, наблюдаемые в настоящее время. Неопределенность прогнозов характера гидрологических изменений в будущем связана, в первую очередь, с неизученностью механизмов, которые приводят к наблюдаемым изменениям речного стока в зоне распространения многолетней мерзлоты [3].

Проблема сокращения стандартной гидрометеорологической сети наблюдений

Прогноз и оценка изменений гидрологических режима и характеристик стока осложняется также стремительным сокращением сети наблюдений. Несмотря на возрастающий интерес к ресурсам зоны мерзлоты, она до сих пор является наименее обеспеченной данными стандартных гидрометеорологических измерений.

Расход воды различной обеспеченности является основной инженерной характеристикой стока. В 2008 г. количество гидрологических постов, на которых производились наблюдения за расходом воды на территории российского бассейна Северного Ледовитого океана (СЛО), составило 944 поста. В 1980 г. общее количество расходных постов на той же территории составляло 1476 поста. Таким образом, за последние 30 лет плотность сети сократилась более чем в полтора раза. С очень малыми реками (площадь водосбора < 200 км^2) ситуация еще острее – количество пунктов наблюдений за стоком сократилось в три раза. На малых реках (площадь водосбора < 2000 км^2) сокращение составило около 40 % [5].

Современные методы расчета инженерных характеристик стока

В настоящее время рекомендованным к использованию является расчетный Свод Правил СП 33-101-2003 (далее СП), основанный на применении методов статистической обработки многолетних рядов наблюдений за стоком и регламентирующий порядок гидрологических расчетов. СП является актуализированной редакцией документа СНиП 2.01.14-83, выпущенного в 1983 г., и принципиально ничем не отличается от своего предшественника в вопросах методик расчета характеристик стока.

Предыдущая редакция издания базировалась на предположении о том, что гидрологические процессы являются статистически стационарными, а, следовательно, ретроспективные наблюдения могут считаться репрезентативными для представления режима стока на период эксплуатации проектируемого объекта. Авторами доклада на основе рекомендаций СП 33-101-2003 проведен расчет характеристик максимального стока для рек в зоне распространения многолетней мерзлоты. Рассчитанные характеристики максимального стока половодья и паводков сравнивались с величинами расходов воды, определенных по кривым обеспеченности, построенным на основе наблюденных данных. В районах исследования выбор рек-аналогов, обеспеченных данными наблюдений за последние 20–25 лет, ограничен 2–3 вариантами водотоков, не имеющими альтернативы для территорий площадью до нескольких сотен тысяч квадратных километров. С этим связана практическая невозможность выполнения требований СП 33-101-2003 по уточнению параметров расчетных формул на основании современных

фактических материалов наблюдений. Рассчитанные величины расходов половодья и паводков различной обеспеченности могут отличаться в разы при использовании нескольких рек-аналогов, одновременно соответствующих требованиям СП 33-101-2003 [4].

В настоящее время все чаще для получения глобальных и региональных оценок изменения среднегодового стока, его внутригодового распределения и расчета наводнений редкой повторяемости используются сценарии изменения климата. Авторы СП признают климатические изменения и требуют использования современной гидрометеорологической информации при проведении расчетов, а также уточнения параметров расчетных формул, основанного на обобщении современных данных по стоку. В последнее десятилетие был также выпущен ряд Методических рекомендаций, которые дополняют СП 33-101-2003, в том числе в части оценок расчетных значений по неоднородным рядам наблюдений. Однако такие рекомендации не предлагают путей учета влияния климата на режимные характеристики основных видов многолетнего стока. Дальнейшее развитие указанных методов для районов мерзлоты невозможно ввиду отсутствия каких-либо перспектив расширения существующей гидрометеорологической сети [4].

Методы математического моделирования как альтернатива традиционным методам расчета инженерных характеристик стока

В условиях зоны распространения многолетнемерзлых пород, где сеть гидрометеорологических наблюдений либо очень редка, либо вообще отсутствует, представляется, что будущее любых гидрологических расчетов и прогнозов связано с использованием математических моделей формирования стока, например, детерминированных или детерминировано-стохастических.

Детерминированные гидрологические модели позволяют рассчитывать непрерывные гидрографы стока воды в замыкающем створе речных бассейнов разных размеров. На основе результатов моделирования могут быть построены кривые распределения любых характеристик стока (годовых, месячных, суточных, максимальных и минимальных расходов), а также рассчитаны объемы стока половодья и паводков и пр. Дополнительно могут быть получены характеристики элементов водного баланса, переменных состояний почвенного и снежного покрова. Метод детерминировано-стохастического (ДС) моделирования основан на совместном использовании двух моделей: детерминированной гидрологической модели и стохастической модели погоды. Он позволяет делать вероятностные оценки любых характеристик стока (например, экстремальных) или переменных состояний водосбора для прошлых, настоящих и будущих условий и ситуаций в бассейне, в том числе и с учетом прогнозных сценариев изменений климата и ландшафтов [2].

Зона мерзлоты предъявляет повышенные требования к гидрологическим моделям. Подавляющая часть гидрологических моделей, хорошо себя зарекомендовавших на территориях с умеренным климатом, не могут быть использованы для расчета стока воды в зоне мерзлоты. Динамика формирования деятель-

ного слоя является одним из основных факторов, определяющих характер протекания гидрологических процессов на данной территории, поэтому моделирование процессов формирования стока должно проводиться с учетом энергетического баланса не только поверхности водосборов, но и толщи почвогрунтов. Основными требованиями являются физическая обоснованность моделей природным процессам, их универсальность в плане использования, как в различных ландшафтах, так и пространственных и временных масштабах, и главное, возможность оценки параметров модели на основе измеряемых свойств ландшафтов. Важно также, чтобы моделирование могло проводиться в условиях дефицита данных наблюдений, характерного для большей части зоны мерзлоты, как России, так и мира.

Специальные наблюдения за стоком в зоне мерзлоты

Для совершенствования и возможности применения методов математического моделирования в гидрологии необходимо изучение физических механизмов процессов тепло- и влагообмена в бассейнах рек. Одним их важнейших препятствий для таких исследований является сложность получения натурных данных специальных и экспериментальных наблюдений.

Стационарные наблюдения на малых исследовательских водосборах являются главным источником информации о физических механизмах формирования стока и происходящих изменениях гидрологического цикла. Поэтому в Канаде и США (Аляска) низкая плотность стандартной сети наблюдений компенсируется развитием сети научно-исследовательских водосборов. Например, в Канаде существует более 20 научно-исследовательских водосборов площадью от 10 до 200 км^2, расположенных от южной границы страны до Канадского Арктического архипелага в различных условиях климата, растительности, рельефа и мерзлотных характеристик. Исследования на водосборах в Канаде объединены в научные программы и сопровождаются обработкой и анализом данных, а также разработкой и применением методов математического моделирования.

Дополнением к наблюдениям на научно-исследовательских стационарах может являться реализация концепции нестационарных репрезентативных водосборов и полигонов, метода «мобильного стационара». Проведение кратковременных интенсивных наблюдений на специально подобранных репрезентативных водосборах, несмотря на свою отрывочность, позволяют составить общее представление об условиях формирования стока и гидрологических явлениях рассматриваемой территории, и главное произвести приближенную количественную оценку параметров математических моделей гидрологических процессов [2].

Выводы

Большую часть территорий распространения многолетней мерзлоты можно отнести к категории гидрологически неизученных. В настоящее время расчеты характеристик стока ведутся на основе использования региональных параметров, уточнение которых не производилось последние 30–40 лет.

Итак, стоят серьезные научно-практические проблемы – как в условиях крайней ограниченности и низкого качества данных наблюдений, а также отсутствия ресурсов для восстановления полноценной наблюдательной гидрометрической сети наблюдений: 1) рассчитывать характеристики стока в задачах инженерно-изыскательских работ и проектирования; 2) оценивать величину и повторяемость катастрофических паводков, заблаговременно прогнозировать их прохождение; 3) прогнозировать приток воды в водохранилища для нужд гидроэнергетики и водного транспорта.

Решение поставленных задач может быть достигнуто только на государственном уровне и должно осуществляться в трех направлениях.

Создание государственной программы по организации (восстановлению) сети репрезентативных водосборов в различных климатических зонах страны для комплексного мониторинга за основными компонентами водного баланса и гидрологическими процессами с применением современного оборудования с высоким временным разрешением, внедрением новых методов исследований. Также необходимо рассмотреть целесообразность восстановления исторических стационаров с продолжительными рядами наблюдений, например, Колымской водно-балансовой станции.

Государственный заказ на разработку методов определения основных гидрологических характеристик для решения задач инженерно-изыскательских работ и проектирования на основе методов математического моделирования. Создание и развитие комплексных гидрологических моделирующих систем и методов их параметризации для использования в основных ландшафтах, характерных для территорий зоны мерзлоты, позволит изучать, рассчитывать и прогнозировать процессы формирования стока и их изменения в будущем.

Совершенствование и расширение стандартной гидрологической сети наблюдений, в том числе на основе современных методов моделирования и дистанционного зондирования.

На пути решения поставленных задач встанут многие проблемы, которые потребуют изменения сложившейся в российской гидрологии ситуации. Среди них – острый дефицит квалифицированных специалистов в области гидрометеорологии (от наблюдателей до научных сотрудников), потеря опыта организации и проведения комплексных гидрологических исследований, отставание в разработке современных гидрометеорологических приборов отечественного производства, финансирование отрасли по остаточному принципу и т. п.

Благодарности. *Работа проведена при поддержке РФФИ – проект № 19-55-80028, РГО – проект «Атлас водных ресурсов Магаданской области», Санкт-Петербургского государственного университета (проект id 75295776).*

Список литературы

1. *Алексеевский Н. И., Магрицкий Д. В., Михайлов В. Н.* Антропогенные и естественные изменения гидрологических ограничений для природопользования в дельтах рек Российской Арктики // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2015. № 1. С. 14–31.

2. *Виноградов Ю. Б., Виноградова Т. А.* Математическое моделирование в гидрологии. М. : Академия, 2010. 298 с.

3. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2016 год. М. : Росгидромет, 2017. 70 с.

4. К вопросу об обоснованности рекомендаций СП 33-101-2003 для расчетов характеристик максимального стока малых рек в зоне распространения многолетней мерзлоты (в порядке дискуссии) / О. М. Макарьева, И. Н. Бельдиман, Л. С. Лебедева, Т. А. Виноградова, Н. В. Нестерова // Инженерные Изыскания. 2017. № 6–7. С. 50–63. URL: http://www.engineeringsurvey.ru/jour/article/view/430

5. Актуальные проблемы гидрологических расчетов в арктической зоне Российской Федерации и сопредельных территориях распространения многолетней мерзлоты / О. М. Макарьева, Н. В. Нестерова, И. Н. Бельдиман, Л. С. Лебедева // Проблемы Арктики и Антарктики. 2018. Т. 64, № 1 (115). С. 101–118.

6. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Т. 2. Последствия изменений климата. М., 2008. 290 с.

7. Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации» : постановление Правительства РФ от 30 марта 2021 г. № 484.

8. Siberian Lena River hydrologic regime and recent change / D. Yang, D. L. Kane, L. Hinzman, X. Zhang, T. Zhang, H. Ye // J. Geophys. Res. 2002. 107(D23). 4694. https://doi.org/10.1029/2002JD002542.

9. *Walvoord M. A., Kurylyk B. L.* Hydrologic Impacts of Thawing Permafrost – A Review // Vadose Zo. J. 2016. Vol. 15. P. 6.

УДК 504.03:711.4(556)

Сити-логистика при развитии водоохранных зон

Е. В. Потапова (e.v.potapova.isu@mail.ru)

Иркутский государственный университет, Иркутск

Аннотация. Обозначены роль, цели и задачи сити-логистики в решении вопросов содержания водоохранных зон. Указаны основные нормативные акты в контексте исследования. Решение задач сити-логистики в отношении водных объектов необходимо для планирования и реализации водохозяйственных и водоохранных мероприятий.

Ключевые слова: населенные пункты, водоохранные зоны, логистика, безопасность, озеленение.

Сегодня, когда рыночные, экономические составляющие устойчивого развития начинают уступать место экологическим и социальным, особое значение в пространственном проектировании развития населенных пунктов занимает логистическое решение.

Логистика – комплекс организационных, управленческих, технологических и производственно-хозяйственных процессов по оптимизации эффективного обеспечения различных систем хозяйственной и иной деятельности всеми видами ресурсов. Локальной формой локализации региональной логистики является логистика городских населенных пунктов, или сити-логистика [1]. Она ориентируется на решение социальных задач жизнеобеспечения мест поселения, от поставки товаров в торговые точки, снабжения различных учреждений, территориального размещения объектов обслуживания населения, до формирования структуры зеленого и здорового населенного пункта с целью удобства администрирования и проживания. Чем разнообразнее виды деятельности, развивающиеся в границах объекта поселения, тем сложнее логистические решения его

функционирования и развития. Монофункциональные города концентрируются около одной отрасли экономики, градообразующей – промышленности, транспортных услуг (города-порты), оздоровительных учреждений (курортный город) и т. п. Некоторые города обслуживают только одно предприятие (оборонный завод, рудник, электростанцию, морской порт и т. д.). Гораздо более распространенными являются многофункциональные города, которые одновременно концентрируют торговлю, финансы, учреждения образования, здравоохранения, культуры, науки, управления, промышленность, строительство, транспорт, и др. Каждый тип и объект поселения имеет свои характеристики и возможности для экологизации пространства.

Важными элементами структуры городов являются комплексы ручьев, рек, каналов, озер, прудов и водохранилищ, берега которых, несмотря на запреты Водоохранного кодекса активно осваиваются и застраиваются. Например, гидрографическая сеть в пределах границ города Москвы включает 440 крупных водоемов, общей площадью более 1034 га, 141 водоток, протяженностью около 600 км, в том числе открытых русел – более 320 км [2]. Фактически каждый населенный пункт России, расположенный на берегу водного объекта, сталкивается с проблемой его переэксплуатации и загрязнения, как в результате неэффективной организации пространства прибрежных территорий, сбросов сточных вод, так и по причине неконтролируемых смывов с окружающей территории и преступной халатности. Роль водоохранной зоны в защите поверхностных водоемов от загрязнения и истощения трудно переоценить и катастрофичность их состояния на значительных участках не вызывает сомнений.

Порядок использования и охраны земель водного фонда определяют: Конституция РФ. Земельный кодекс, Водный кодекс, Градостроительный кодекс (когда водные объекты находятся в границах населенных пунктов), Гражданский кодекс РФ, специальные указы Президента РФ, подзаконные нормативные акты министерств и ведомств. В России есть трансграничные водные объекты с 12 государствами, обеспеченные двусторонними соглашениями и международными договорами. На многих водных объектах в стране располагаются водозаборы, защищенные специальным санитарным законодательством и повышенными запретительными нормами на хозяйственную и иную деятельность к окружающей территории.

На территории РФ обязательно ведение водного реестра (в соответствии с Водным кодексом РФ, постановлением Правительства РФ от 28.04.2007 № 253). Реестр представляет собой систематизированный свод документированных сведений: о водных объектах, находящихся в федеральной, региональной, муниципальной собственности, в собственности образований, физических и юридических лиц, индивидуальных предпринимателей; об использовании водных объектов; о речных бассейнах и бассейновых округах. Ведение реестра осуществляется Федеральным агентством водных ресурсов в соответствии с водным законодательством и законодательством России об информации, информационных технологиях и о защите информации.

Земли водного фонда отграничиваются от других категорий земель береговой линией. Установление береговой линии водного объекта – важный юридический факт, необходимый для: предоставления власти водных объектов или их частей в пользование, отграничения земель водного фонда от других категорий земель, определения водоохранной зоны водного объекта. Местоположение береговой линии считается определенным со дня внесения сведений о нем в Государственном кадастре недвижимости (приказ Минэкономразвития России от 23.03.2016 № 164) Приказ Минэкономразвития России от 23.03.2016 № 164 «Об утверждении требований к описанию местоположения береговой линии (границы водного объекта)» [3; 4].

Водоохранными зонами являются территории, которые примыкают к береговой линии (границам водного объекта) морей, рек, ручьев, каналов, озер, водохранилищ и на которых устанавливается специальный режим осуществления хозяйственной и иной деятельности в целях предотвращения загрязнения, засорения, заиления указанных водных объектов и истощения их вод, а также сохранения среды обитания водных биологических ресурсов и других объектов животного и растительного мира. Они служат базовой частью системы озеленения и природного комплекса населенных пунктов.

С территориями, прилегающими к водным объектам в вопросах сити-логистики решаются следующие цели и задачи:

1. Учета водохозяйственной обстановки объекта в границах соответствующих речных бассейнов.

2. Определение современного статуса водного объекта, в том числе с учетом перспектив и исторического аспекта.

3. Выявление всех форм актуального влияния на объект, особенно для решения задач логистики в границах города, но с обязательным информированным учетом положения водного объекта по всей длине/площади.

4. Определение классов состояния вод до и после актуализированных объектов влияния, например объектов промышленности, транспортных узлов, поселений. Этот пункт считать максимально важным, для определения и поддержания качества водного объекта по всему протяжению и/или площади.

5. Описание вариантов разрешенного использования (первостепенной необходимо считать рекреацию и организацию озелененных территорий общего пользования, или охраняемых территорий, зон санитарной охраны), исключительно в соответствии с учетом экологического состояния.

6. Обеспечение рационального использования ландшафтно-рекреационного и градостроительного потенциала водных объектов и прилегающих территорий для повышения уровня благоустройства городских территорий и комфортности условий проживания.

7. Выявление точек риска и факторов риска, преимущественно для сохранения качественных характеристик водного объекта, но и безопасности населения. Возможных опасных явлений природного и техногенного характера.

8. Указание мест и вариантов перспективного улучшения качества вод и содержания водоохранных зон.

9. Разработка схем комплексного использования, реконструкции, восстановления и других методов реабилитации территорий, с учетом требований Водного законодательства и Целей устойчивого развития.

Сити-логистика для водоохранных зон имеет значительный потенциал:

✓ В составе управленческих мер утверждено более 10 нормативных правовых акта, в том числе международного значения.

✓ Организационные меры представлены, как Генеральными планами развития населенного пункта, так и специальными схемами развития.

✓ Технологические меры распределяют варианты решения всех экологических, социальных и экономических проблем водного объекта для оптимизации его содержания.

✓ Производственно-хозяйственные меры относятся к разработке специальных программ и мер по оборудованию существующих, действующих объектов промышленности, транспорта, энергетики и т. д. средствами и возможностями потенциального снижения негативного влияния на водный объект.

Решение задач сити-логистики в отношении водных объектов необходимо для планирования и реализации водохозяйственных и водоохранных мероприятий в рамках федеральных, региональных, ведомственных, целевых и инвестиционных программ, разработки региональных и муниципальных планов водохозяйственных и водоохранных мероприятий; подготовки предложений по установлению и/ или пересмотру ставок платы за водопользование; регулирования пользования водными объектами, в том числе определения объемов допустимого забора (изъятия) водных ресурсов, объемов допустимого сброса сточных вод и/ или дренажных вод, др.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Иркутской области в рамках научного проекта № 20-45-380032.

Список литературы

1. *Жемалдинов Ф. Ф.* Сити-логистика: концепции, критерии, возможности // Логистик. 2007. № 1.

2. О Городской целевой среднесрочной программе по реабилитации малых рек и водоемов на территории города Москвы на 2009–2011 годы (с изм. на 4 мая 2011 г.). URL: https://docs.cntd.ru/ document/3693794/titles/3HA46KE (дата обращения: 01.10.2021).

3. *Сиваков Д. О.* Правовая охрана вод в свете Водной стратегии России. URL: http://www.justicemaker.ru/view-article.php?id=24&art=312. (дата обращения: 01.10.2021).

4. *Коренева И. Б.* Методические указания о порядке составления и реализации программ восстановления и охраны водных ресурсов малых рек Российской Федерации. 2000. URL: http://www.koreneva.com. (дата обращения: 01.10.2021).

УДК 556.5.06

Применение гидрологической модели HBV для прогноза притока в Астанинское водохранилище на основе различных климатических сценариев

Н. Т.Серикбай (serikbai_n@meteo.kz)[1,2], Т. А. Тиллакарим (tillakarim_t@meteo.kz)[1,2], Н. Н. Абаев (abayev_n@meteo.kz)[1], Л. М. Биримбаева (birimbayeva_l@meteo.kz)[1], Б. Б. Айтымова (aitymova_b@meteo.kz)[1], А. С. Пшенчинова (pshenchinova_a@meteo.kz)[1,2]

[1]РГП «Казгидромет», Нур-Султан, Казахстан;

[2]Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

Аннотация. Приведены результаты моделирования расхода воды до 2100 г. по рекам Есиль и Мойылды которые в сумме составляют приток в Астанинское водохранилище с применением модели HBV-light. На основе сценарных прогнозов GFDL CM3 был сформирован прогноз стока на 2021–2100 гг. Вычисления производились на основе прогнозных сценариев изменений температуры воздуха и атмосферных осадков для «мягкого» (RCP2.6), «умеренно жесткого» (RCP4.5) и для «жесткого» (RCP8.5). Суммарный сток рек Есиль и Мойылды на перспективу в период 2021–2100 гг. по сценарию изменения климата RCP2.6 не имеет выраженного тренда и, относительно среднего стока за период 1975–2020 гг. уменьшится на 2 %. По сценариям изменения климата RCP4.5, а также RCP8.5 имеется устойчивый положительный тренд и, относительно среднего стока за период 1975–2020 гг., суммарный сток реки увеличится на 4 и 41 % соответственно.

Ключевые слова: объем стока половодья, метод распознавания образов, температура воздуха, атмосферные осадки, запасы воды в снежном покрове, река Есиль, река Мойылды.

Введение

Обеспечение чистой питьевой водой является первостепенной стратегической задачей, решение которой напрямую влияет на улучшение качества жизни населения. На сегодняшний день доступ к централизованному водоснабжению составляет в городах Республики Казахстан (РК) – 97,2 %, в селах – 86,4 % [9]. Совершенствование методов управления водными ресурсами для оптимизации водопользования, а также защиты населения и объектов экономики от наводнений в существенной степени зависит от возможностей повышения точности и заблаговременности долгосрочных прогнозов характеристик притока воды в водохранилища. В том числе усиление требований к экономической эффективности и безопасности эксплуатации гидротехнических сооружений обусловливает необходимость привлечения дополнительных, к существующим, источников прогностической информации о характеристиках водного режима. Одним из возможных решений проблемы совершенствования методов долгосрочного прогнозирования с целью повышения его качества, надежности, увеличения информативности прогнозов может быть использование гидрологических моделей прогноза притока с использованием доступных данных метеорологических наблюдений [1].

В данном исследовании авторами проведена работа по сверхдолгосрочному прогнозированию притока важного для региона хозяйственно-питьевого назначения объекта – Астанинское водохранилище, с применением модели

HBV-light. Астанинское водохранилище (площадь 60,9 км^2, емкость 411 млн м^3) – гидротехнический объект многолетнего регулирования, расположена на р. Есиль и в том числе обеспечивает питьевой водой столицу РК – г. Нур-Султан (рис. 1). Основными притоками в водохранилище являются реки Есиль и Мойылды.

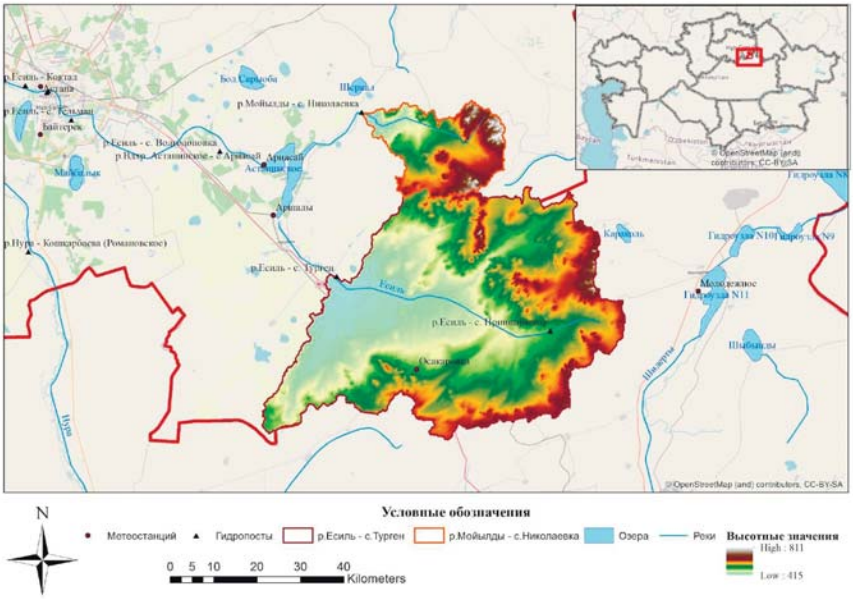


Рис. 1. Расположение объектов исследования

Перенос столицы в 1997 г. из Алматы в Нур-Султан (Акмола) в значительной степени увеличил водопотребление р. Есиль. Более 40 % от ежегодно забираемых водных ресурсов в бассейне р. Есиль в пределах Казахстана приходится на г. Нур-Султан. Наибольший объем потребляемой воды по отраслям экономики приходится на хозяйственно-питьевые нужды. В условиях интенсивной застройки города и роста населения соответственно наблюдается постепенный рост забора воды на хозяйственно-питьевые нужды из Астанинского (Вячеславского) водохранилища. Современная потребность города Нур-Султан и всего промышленного сектора экономики составляют соответственно 70 и 100 млн м^3 в год, и с учетом ее развития ожидается дальнейший рост водопотребления [7]. Помимо прогнозируемому повышению водопотребления в долгосрочной перспективе также возможно наложение ожидаемых изменений климатических характеристик в регионе с последствиями изменения водных ресурсов и водного режима рек [5]. Следовательно, в целях эффективного управления водными ресурсами в регионе, а также для обеспечения бесперебойного водоснабжения и

экологической устойчивости, удовлетворения нынешних и будущих потребностей долгосрочная оценка притока в Астанинское водохранилище по рекам Есиль и Мойылды является важной и необходимой задачей.

Исходные данные и методы исследования

HBV-light представляет собой концептуальную модель водосбора, описывающий общий баланс воды следующим образом:

$$P - E - Q = \text{ddtSP+SM+UZ+LZ+VL}, \quad (1)$$

где P – осадки; E – суммарное испарение; Q – сток; SP – снежный покров; SM – влажность почвы; UZ – верхняя зона подземных вод; LZ – нижняя зона подземных вод и VL – объем озер. Схема строения моделя приведена на рис. 2.

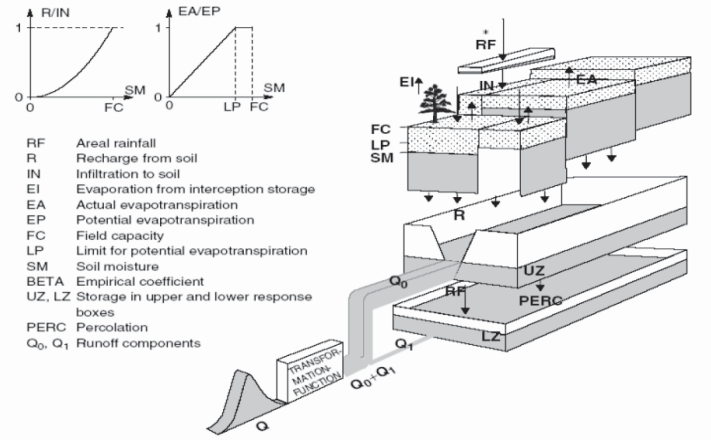


Рис. 2. Схематическая структура модели HBV-light [13]

Легкое архитектурное строение модели, а также простота процедуры калибровки и прогнозирования несомненно является его достоинством, что также показаны применением данного инструмента другими исследователями [11; 14]. Также имеются работы ряда авторов [2; 6], которые успешно применили данную модель для отдельных рек РК, в том числе для прогнозирования стока горных рек на долгосрочную перспективу [12].

В исследовании использованы данные наблюдений о среднегодовых расходах воды гидрологических постов р. Есиль – с. Турген и р. Мойылды – с. Николаевка из гидрологических ежегодников за период с 1975 по 2019 г., за 2020 г. приняты оперативные данные наблюдений.

По суммарному значению стока двух рек за период 1975–2020 гг., с использованием общепринятых методов анализа, были определены статистические характеристики стока (табл. 1). Согласно расчетам, средний многолетний приток в Астанинское водохранилище составляет 5,36 м^3/с. Максимальный среднегодовой приток воды наблюдался в 2015 г. количестве 16,2 м^3/с.

Таблица 1

Параметры кривой обеспеченности

Период	Обеспеченность, %											
	0,01	0,1	1	3	5	10	25	50	75	80	90	95
Q_0 = 5,36 м^3/с, C_v = 0,65, C_s = 1,30												
1975–2020	28,5	22,6	16,5	13,5	12,0	10,0	7,19	4,63	2,78	2,43	1,67	1,18

На сегодняшний день имеются достаточное количество прогностических данных на перспективу. Однако подбор наилучшей моделей, описывающие климат региона, производился калиброванием модели используя исторические данные и сравнением моделированных и наблюденных данных стока. В результате лучшую корреляцию показал модель национального управления океанических и атмосферных исследований США – GFDL CM3. GFDL ориентирована на всесторонние долгосрочные исследования, которые имеют фундаментальное значение для продвижения научного понимания физических, динамических, химических и биогеохимических процессов, определяющих поведение компонентов атмосферы, океанов, суши и льда и их взаимодействия с экосистемой. GFDL играет центральную роль в каждой оценке Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) с 1990 г. Одна из новых климатических моделей предлагает улучшенную физику и химию атмосферы (CM3) [15].

Калибрование модели производилось автоматическим методом, основанным на большом количестве ручных калибровок (10 тыс. генераций случайных чисел), в ходе которого соответствующие значения параметров изменяются до тех пор, пока не будет получена наилучшая связь с наблюдёнными данными [2].

Обычно для калибрования требуются синхронные ряды стока и метеорологических данных за 3–5 или 5–10 лет. Период калибровки должен включать различные гидрологические годы как многоводный, так и маловодный. В данной работе калибрование модели выполнено по двум рекам (Есиль, Мойылды) с использованием алгоритма оптимизации GAP optimization. В результате автоматического калибрования модели HBV для каждого водного объекта определены наилучшие наборы параметров, в зависимости от климатических, гидрологических и геологических условий. Результаты калибрования для ежедневных расходов воды по историческим данным модели GFDL CM3 для обеих рек показали, что моделирование суточных данных имеют слабую корреляционную связь около 0,6, но связь среднегодовых значение показал тесную связь выше 0,8.

Далее в табл. 2 приведены прогнозные их значения, смоделированные на перспективу до 2100 г.

Результаты исследования

На рис. 3 представлен ход вероятных изменений температуры воздуха на основе климатических данных модели GFDL CM3, осредненных по десятилетиям для территории водосборов исследуемых рек.

Таблица 2

Прогнозируемый приток в Астанинское водохранилище по модели HBV-light на перспективу до 2100 г.

Период	Приток по сценарию, м³/с			Изменение от среднего многолетнего притока (1975–2020 гг.), %		
	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
2021–2030	4,83	5,32	6,56	–9,5	–0,5	23
2031–2040	4,99	5,80	7,54	–6,5	8,7	41
2041–2050	6,62	4,30	6,67	24	–19	25
2051–2060	5,20	5,64	6,85	–2,7	5,6	28
2061–2070	5,74	4,18	6,38	7,4	–22	20
2071–2080	4,68	5,49	7,96	–12	2,9	49
2081–2090	5,15	8,04	8,94	–3,5	51	67
2091–2100	4,96	6,08	9,70	–7,2	14	82

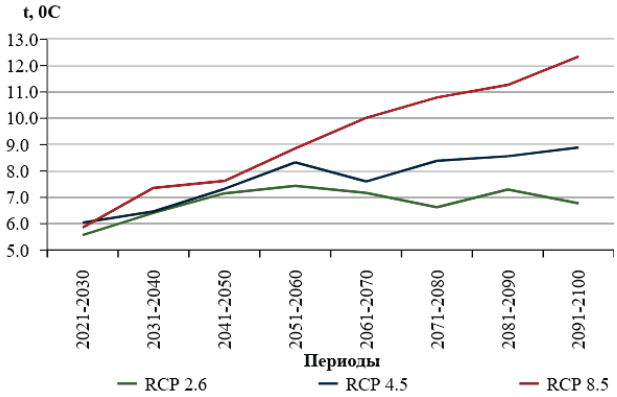


Рис. 3. Динамика изменения температуры воздуха осредненная по десятилетиям на перспективу до 2100 г.

Для бассейнов рек Есиль и Мойылды во всех периодах по сценариям RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5 следует ожидать повышение температуры воздуха, наиболее значимое из которых приходится на жесткий сценарий. По сценариям RCP 4.5, RCP 8.5 максимумы повышения температуры воздуха приходятся на конец текущего столетия, по мягкому сценарию (RCP 2.6) до 2060-х гг. ожидается интенсивный рост, далее прогноз показал понижение температура воздуха.

Также приведены (рис. 4) ожидаемые изменения годовых сумм осадков, осредненных по десятилетиям на рассматриваемой территории.

В целом до 2070-х гг. по сценариям RCP 2.6 и RCP 8.5 значительной динамики роста осадков не ожидается, по сценарию RCP 4.5 возможно сокращение осадков в период 2050–2070 гг. Далее наблюдается картина интенсивного роста атмосферных осадков сценариям RCP 4.5, RCP 8.5, исключение составляет лишь мягкий сценарий, который к концу XXI столетия показал динамику уменьшения осадков.

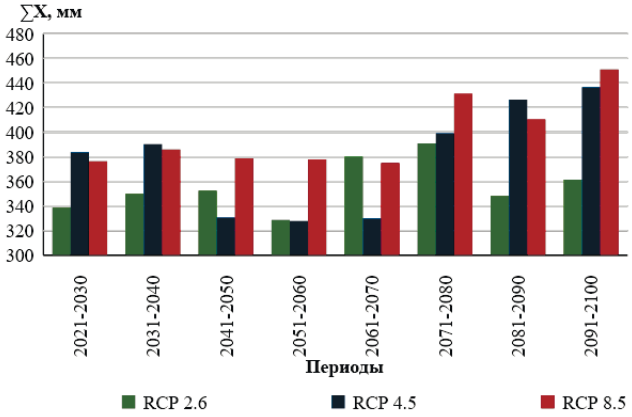


Рис. 4. Динамика изменения сумм осадков по десятилетиям на перспективу до 2100 г.

Используя входные данные среднесуточных температур воздуха и суммарных суточных осадков смоделированы средние суточные расходы воды рек Есиль и Мойылды осреднены по десятилетиям на перспективу до 2100 г., сумма которых принята за приток в Астатинское водохранилище.

Согласно полученным результатам, смоделированные изменения, полученные по всем рассмотренным сценариям (RCP2.6, RCP4.5 и RCP8.5) различаются и по значению, и по знаку. Также можно отметить следующие основные черты в прогнозных изменениях притока в Астанинское водохранилище: по мягкому сценарию (RCP2.6) в основном на протяжении всего столетия ожидается сокращение притока до 12 % относительно среднего многолетнего притока, исключение составляют лишь периоды 2041–2050 гг. и 2061–2070 гг., когда приток увеличится на 24 и 7,4 % соответственно. По сценарию RCP4.5 ожидается сокращение притока на 19 % в период 2041–2050 гг. и 22 % в период 2061–2070 гг., в остальные периоды прогнозируется увеличение стока, максимум которого придется на период 2081–2090 гг. (на 51 %). По сценарию RCP8.5 прогнозируется достаточно значительное увеличение среднего многолетнего притока на протяжении всего столетия в пределах от 20 до 82 %, максимальное увеличение которого приходится на последнее десятилетие XXI в.

Ниже представлена совмещенная динамика изменения притока в Астанинское водохранилище за многолетний период 1975–2020 гг. и на перспективу до 2100 г. по различным сценариям (рис. 5).

По сценариям RCP 4.5 и RCP 8.5 до конца XXI в. ожидаются тенденции к увеличению притока в Астанинское водохранилище, с наиболее интенсивным ростом по жесткому сценарию. Увеличение прогнозируется за счет значительного увеличения количества осадков в период 2071–2100 гг. По сценарию RCP 2.6, наоборот, ожидается тенденция к снижению притока синхронно с уменьшением количества осадков в последнее двадцатилетие века.

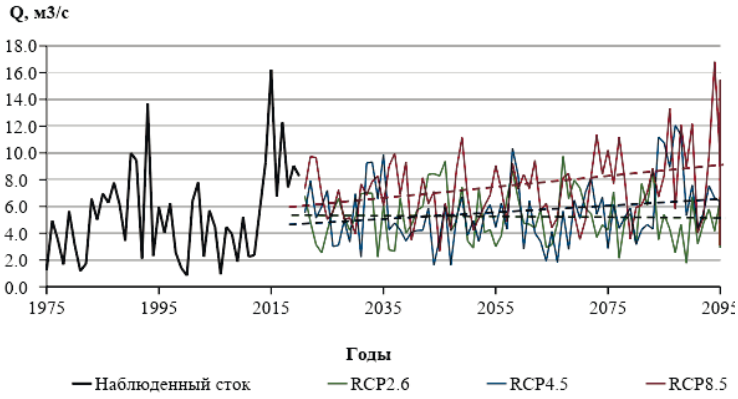


Рис. 5. Динамика изменения притока в Астанинское водохранилище на перспективу до 2100 г.

Заключение

Таким образом, смоделированные изменения притока в Астанинское водохранилище, представляющего стратегически важное значение для экономического развития столицы на основе трех наиболее хорошо исследованных сценариев будущих изменений климата: RCP2.6 – «мягкого» сценария, RCP4.5 – умеренного и достаточно вероятного сценария и RCP8.5 – самого худшего сценария роста концентрации парниковых газов, показали разную динамику изменения.

Согласно результатам прогноза, средний суммарный сток рек Есиль и Мойылды на перспективу в период 2021–2100 гг. по сценарию изменения климата RCP2.6 не имеет выраженного тренда и, относительно среднего стока за период 1975–2020 гг. уменьшится на 2 %. По сценариям изменения климата RCP4.5, а также RCP8.5 имеется устойчивый положительный тренд и, относительно среднего стока за период 1975–2020 гг., суммарный сток реки увеличится на 4 и 41 % соответственно.

Список литературы

1. Долгосрочный ансамблевый прогноз весеннего притока воды в Чебоксарское водохранилище на основе гидрологической модели: результаты проверочных и оперативных испытаний / С. В. Борщ, А. Н. Гельфан, В. М. Морейдо, Ю. Г. Мотовилов, Ю. А. Симонов // Труды Гидрометцентра России. М., 2017. Вып. 366. С. 68–86.

2. Результаты калибрования гидрологической модели HBV для горных рек Казахстана / А. А. Болатова, Т. А. Тілләкәрім, М. Н. Раимжанова, Н. Т. Серікбай, Б. Е. Багитова, К. М. Болатов // Гидрометеорология и экология. Алматы, 2018. Вып. 3. С. 110–125.

3. Временные рекомендации по составлению месячных водных балансов Вячеславского водохранилища. Алма-Ата : АГМО, 1975. 30 с.

4. *Дауталиева М. Е.* Динамика водопотребления в бассейнах рек Северного Казахстана // Вестник ВГУ. Серия: География. Геоэкология. 2018. № 4. С. 39–42.

5. Изменение климата, 2014 г.: Обобщающий доклад. Вклад Рабочих групп I, II и III в Пятый оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата. МГЭИК. Женева, 2014. 163 с.

6. *Кишкимбаева А. А., Болатова А. А.* Применение модели HBV-light для моделирования стока реки Шарын // Гидрометеорология и экология. 2015. Вып. 4. С. 141–144.
7. *Тюменев С. Д.* Водные ресурсы и водообеспеченность территории Казахстана : учебник. Алматы : Казах. нац. техн. ун-т, 2008. 267 с.
8. Climate Data Store. URL: https://cds.climate. copernicus.eu/cdsapp#!/home (дата обращения: 20.10.2021).
9. URL: https://www.primeminister.kz/ru/news/voprosy-obespecheniya-naseleniya-chistoy-pitevoy-vodoy-strategicheskaya-zadacha-pravitelstva-2795036 (дата обращения: 20.10.2021).
10. *Jan Seibert.* Multi-criteria calibration of a conceptual runoff model using a genetic algorithm // Hydrology and Earth System Sciences. 2000. N 4(2). 215 p.
11. Manual on Flood Forecasting and Warning // WMO. Geneva, 2011. N 1072. 138 p.
12. Emptying Water Towers? Impacts of Future Climate and Glacier Change on River Discharge in the Northern Tien Shan, Central Asia / M. Shahgedanova, M. Afzal, W. Hagg, V. Kapitsa, N. Kasatkin, E. Mayr, O. Rybak, Z. Saidaliyeva, I. Severskiy, Z. Usmanova, A. Wade, N. Yaitskaya, D. Zhumabayev // Water. 2020. N 12(3). 31.
13. *Nash J. E., Sutcliffe J. V.* River flow forecasting through conceptual models, part 1-a discussion of principles // Journal of Hydrology. 1970. N 10. P. 282–290.
14. *Richard G. Allen, Luis S. Pereira, Dirk Raes, Martin Smith*. FAO Irrigation and Drainage Paper N 56. Crop Evapotranspiration. (guidelines for computing crop water requirements). 300 p.
15. Модели GFDL. URL: https://www.gfdl.noaa.gov/about-models/ (дата обращения: 01.11.2021).

УДК 556.535.8

Мониторинг состояния реки Лихоборки в пределах урбанизированного водосбора г. Москвы

А. Н. Словягина (ecologymos@yandex.ru), Т. Б. Фащевская (tf.ugatu@yandex.ru), В. О. Полянин (vlad_polianin@mail.ru), А. В. Алгушаева (gold.na@rambler.ru)
Институт водных проблем РАН, Москва

Аннотация. Приведены результаты мониторинга малой реки, протекающей в пределах урбанизированного водосбора. Получены количественные оценки состояния реки и установлены особенности ее гидрохимического режима, отличающие городские водотоки от природных водных объектов. Проведена оценка пригодности качества речной воды для различных видов водопользования. Определены вероятности превышения значений ПДК загрязняющих веществ и наступления случаев высоких уровней загрязнения реки.

Ключевые слова: малая река, урбанизированный водосбор, точечные и диффузные источники загрязнения, гидрохимический режим, качество воды.

Река Лихоборка, как и другие малые реки в условиях г. Москвы, почти утратила характерные для природных водных объектов черты: естественные русла сильно трансформированы или заключены в коллекторы [1; 8], доля водонепроницаемых поверхностей в пределах водосборов близка к критической [6; 14], а поступление загрязняющих веществ от точечных и диффузных источников превышает потенциал самоочищающей способности рек [2–5]. Цель данной работы – получение количественных оценок состояния р. Лихоборки, исследование особенностей ее гидрохимического режима и факторов формирования качества воды с учетом специфики хозяйственной деятельности на водосборе.

Река Лихоборка является притоком р. Москвы 2-го порядка и протекает по территории Северного и Северо-Восточного административных округов г. Москвы (рис. 1). Река берет начало в северной части г. Долгопрудный Московской области и до слияния с ручьем Коровий враг называется р. Бусинкой [9]. Общая длина р. Лихоборки составляет 17 км, из которых 7 км заключены в коллектор. Оставшаяся часть представляет собой условно естественное русло, местами в виде открытых каналов с искусственно укрепленными берегами [12]. Площадь водосбора реки составляет 58 км^2, средний расход воды ~0,5 м^3/с [13].

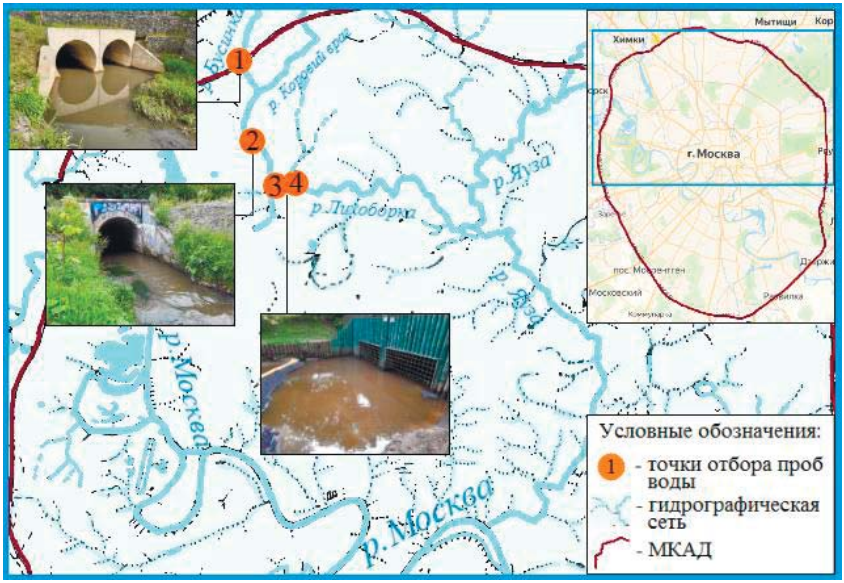


Рис. 1. Расположение р. Лихоборки и точек отбора проб воды на карте г. Москвы

Исследуется верхняя часть водосбора р. Лихоборки, на котором расположены объекты, негативно влияющие как на экологическую обстановку города в целом, так и на качество речной воды. В верховье река протекает вдоль двух крупных полигонов ТБО Долгопрудненского и Левобережного. Далее река протекает по промзоне «Коровино», в пределах которой в реку поступают сточные воды ТЭЦ-21, сток с территории рыбного завода «Меридиан», сток со снегосплавного пункта на ул. Ижорской и др. Затем река более чем на 3 км уходит в подземный коллектор, который принимает поверхностный и дренажный сток с промзоны «Автомоторная» (на которой расположены автобазы, склады, растворно-бетонные узлы), со строительных площадок, а также с территорий жилых районов Ховрино, Головинского и Левобережного. На своем пути река несколько раз пересекает крупные объекты городской транспортной инфраструктуры: автодорожную развязку МКАД (в районе 79 км) и Северо-Восточную хорду (СВХ), а также железнодорожные пути (Октябрьской железной дороги).

Материалы и методы

Для оценки состояния р. Лихоборки проведен мониторинг качества ее воды в период с июня 2020 г. по август 2021 г. в четырех точках (водовыпусках) (рис. 1). Описание точек гидрохимического мониторинга приведено в табл. 1. Ежеквартально в каждой точке отбиралось по две пробы воды с интервалом в полчаса. Всего на каждом водовыпуске за исследуемый период отобрано свыше 80 проб воды. Анализировались следующие физико-химические показатели качества воды: взвешенные вещества, нефтепродукты, хлориды, сульфаты, $БПК_5$, ХПК, азот аммонийный, значение pH.

Таблица 1

Описание точек гидрохимического мониторинга р. Лихоборки

Точки мониторинга	Название и местоположение (соответственно рис. 1)	Краткая характеристика водосбора и объектов хозяйственной деятельности – источников загрязнения реки
1	р. Бусинка, МКАД 79 км (внешняя сторона); расстояние от истока реки до точки **1** – 2,37 км	Исток реки в лесопарке в северной части г. Долгопрудный; протекает вдоль двух полигонов ТБО – Долгопрудненского и Левобережного; вытекает из двух перепускных труб под автодорожной развязкой с внешней стороны МКАД
2	р. Лихоборка, Зеленоградская, 23; расстояние от истока реки до точки **2** – 5,04 км	В пределах частного водосбора река пересекает МКАД, принимает сбросную воду с ТЭЦ-21, сток с рыбзавода «Меридиан», ССП «Ижорский», со строительных площадок, авторемонтных мастерских и др.; сливается с ручьем Коровий враг, оба водных объекта протекают по промзоне «Коровино»; вытекает из перепускной трубы после железнодорожных путей
3	р. Лихоборка, Лихоборская набережная, 5 (левая труба); расстояние от истока реки до точки **3** – 8,17 км	В пределах частного водосбора расположены промзона «Автомоторная», строительные площадки, жилые районы Ховрино и Головинский (частично), проходит СВХ; выходит из коллектора через двойной оголовок (левый водовыпуск)
4	р. Лихоборка, Лихоборская набережная, 5 (правая труба); расстояние от истока реки до точки **4** – 8,17 км	В пределах частного водосбора расположены промзона «Автомоторная», строительные площадки, жилые районы Головинский (частично) и Левобережный; выходит из коллектора через двойной оголовок (правый водовыпуск)

В процессе отбора проб воды были зафиксированы случаи несанкционированных залповых сбросов в реку сточных вод. Для примера на рис. 2 приведены фотографии загрязнения реки (точка мониторинга 3) химическими веществами, опасными для гидробионтов, неустановленного происхождения. Ни в одном случае по прибытии на предполагаемое место слива загрязнителей их источник (нарушитель) не был обнаружен.

Выполнена оценка внутригодовой динамики показателей качества воды р. Лихоборки в различные фазы водного режима естественных водотоков, протекающих в аналогичных физико-географических условиях. Для этого были рассчитаны средние значения показателей за период половодья (апрель, май), летне-осенний период (июнь – ноябрь), зимнюю межень (декабрь – март). Результаты расчетов приведены в табл. 2.

(а) (б)

Рис. 2. Загрязнение р. Лихоборки в результате несанкционированных залповых сбросов сточных вод: (а) – сброс нефтепродуктов 08.10.2020, наблюдается гибель рыбы; (б) – сброс белой жидкости с резким химическим запахом растворителя 29.03.2021, гибель рыбы

Таблица 2

Результаты наблюдений за изменением показателей качества воды р. Лихоборки

Точки мониторинга	Диапазон измеренных значений	Среднегодовое значение	Среднее значение за фазу водного режима		
			половодье	летне-осенний период	зимнюю межень
Взвешенные вещества, мг/л					
1	6,4– 242	47,0	30,9	46,7	55,4
2	5,2–624	50,2	82,5	21,2	92,1
3	5,6–611	51,1	70,3	29,5	84,9
4	3,0–782	46,3	66,1	26,0	77,1
Нефтепродукты, мг/л					
1	0,16–2,52	0,59	0,39	0,54	0,78
2	0,12–12,9	0,64	0,65	0,34	1,23
3	0,12–33,8	1,75	0,90	1,25	3,17
4	0,09–17,2	0,79	1,00	0,40	1,48
Хлориды, мг/л					
1	93,0–1232	250	228	160	434
2	24,3–3215	302	168	140	693
3	32,0–2928	305	187	190	596
4	31,3–2249	300	239	233	465
Сульфаты, мг/л					
1	20,7–121	48,3	53,4	46,4	49,2
2	5,65–134	44,3	52,9	38,2	52,2
3	18,3–1586	63,3	59,5	40,9	110
4	18,1–92,4	48,3	62,6	44,9	47,9
$БПК_5$, мгO_2/л					
1	3,12–61,6	16,7	8,69	12,0	29,6
2	3,08–97,0	8,91	16,0	5,52	12,2
3	2,81–180	12,7	14,3	8,00	21,3
4	2,36–53,0	6,40	10,8	4,78	7,45
ХПК, мгО/л					
1	30,3–340	100	61,8	92,5	133
2	21,4–337	51,3	66,8	47,0	52,1
3	22,1–1782	87,0	65,9	49,8	172
4	21,1–144	43,5	50,2	43,8	39,5

Окончание табл. 2

Точки мониторинга	Диапазон измеренных значений	Среднегодовое значение	Среднее значение за фазу водного режима		
			половодье	летне-осенний период	зимнюю межень
Азот аммонийный, мг/л					
1	2,53–38,6	13,7	7,28	13,7	17,1
2	0,45–12,4	2,05	3,00	1,76	2,16
3	0,46–8,43	1,84	2,52	1,53	2,13
4	0,26–5,99	1,67	2,35	1,51	1,65
pH					
1	6,9–8,1	7,5	7,6	7,6	7,4
2	7,5–8,9	8,1	8,0	8,1	8,1
3	7,5–9,3	8,1	7,9	8,0	8,2
4	7,4–8,4	7,9	7,8	7,9	8,0

Выполнено сравнение результатов наблюдений с предельно допустимыми концентрациями загрязняющих веществ, установленными для водных объектов рыбохозяйственного ($ПДК_{рх}$) и культурно-бытового ($ПДК_{кб}$) водопользования. Определены вероятности превышения значений ПДК и наступления случаев высоких уровней загрязнения реки: высокого загрязнения (ВЗ) и экстремально высокого загрязнения (ЭВЗ) [10; 11]. Для этого были построены 32 эмпирические кривые обеспеченности измеренных значений показателей качества воды [7]. Для примера на рис. 3 приведена схема определения искомых значений, а в табл. 3 его результаты.

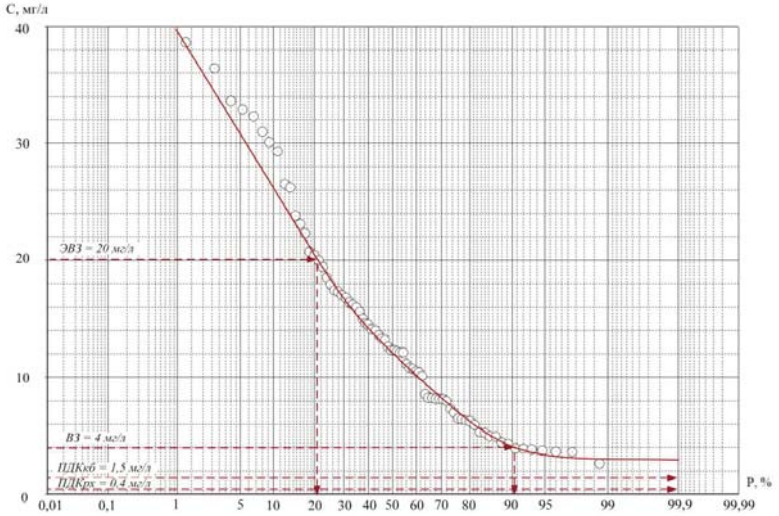


Рис. 3. Пример определения вероятностей превышения значений $ПДК_{рх}$, $ПДК_{кб}$, ВЗ и ЭВЗ по кривой обеспеченности концентраций азота аммонийного в воде р. Лихоборки (точка 1)

Результаты работы

На основе проведенного анализа результатов мониторинга установлено, что концентрации *взвешенных веществ* во всех точках варьируют в диапазоне 3,0–782 мг/л, что соответственно составляет 0,3–73 $ПДК_{рх}$ (принятой для р. Лихоборки 10,75 мг/л). Вероятность превышения значений ПДК достигает 90 %, уровня ВЗ – варьирует в диапазоне 2,5 (точка 4) – 10 % (точка 1). Среднегодовое содержание взвешенных веществ по длине реки изменяется незначительно и составляет 46,3–51,1 мг/л.

Внутригодовое изменение содержания взвешенных веществ в естественных водотоках характеризуется его увеличением в половодье и уменьшением в зимний период [7]. В р. Лихоборке наибольшие концентрации взвешенных веществ отмечаются в зимний период, наименьшие – в летне-осенний (точки 2–4) и половодье (точка 1).

Измеренные концентрации *нефтепродуктов* в речной воде всегда превышают уровень ПДКрх и варьируют в диапазоне 0,09–33,8 мг/л, что соответственно составляет 1,8–676 $ПДК_{рх}$. Вероятность превышения $ПДК_{кб}$ в точках мониторинга варьирует в диапазоне 46–82 %, уровня ВЗ – в диапазоне 1,4–14 %. Вероятность экстремально высокого загрязнения р. Лихоборки нефтепродуктами достигает 7% (табл. 3). Наибольшие концентрации нефтепродуктов в речной воде отмечаются в зимнюю межень, наименьшие – в половодье (точки 1, 3) или летне-осенний период (точки 2, 4). Среднегодовые концентрации нефтепродуктов в точках мониторинга существенно различаются и изменяются от 0,59 мг/л до 1,75 мг/л.

Таблица 3

Вероятности превышения значений $ПДК_{рх}$, $ПДК_{кб}$, ВЗ и ЭВЗ в воде р. Лихоборки, %

Точки мониторинга	Вероятность достижения и превышения уровня			
	$ПДК_{рх}$	$ПДК_{кб}$	ВЗ	ЭВЗ
Нефтепродукты				
1	99,9	82	1,4	<0,1
2	99,9	46	3,5	1
3	99,9	56	14	7
4	99,9	50	6	2,5
ХПК				
1	99,9	98	12	-
2	99,9	80	2,5	-
3	99,9	80	8	0,6
4	99,9	60	1	-
Азот аммонийный				
1	99,9	99,9	91	21
2	99,9	52	9	-
3	99,9	50	8	-
4	99,1	44	4,2	-

Между содержанием в речной воде нефтепродуктов и взвешенных веществ установлены корреляционные зависимости, характеризующиеся значениями коэффициента корреляции (R) в диапазоне 0,43–0,96 (рис. 4). Это может указывать

на то, что транспортируемые с водосбора в водный объект нефтепродукты: находятся в сорбированном на взвешенных органических и минеральных частицах виде; представляют собой мелкодисперсные взвешенные частицы, являющиеся результатом разрушения асфальтобетонных дорожных покрытий или продуктов истирания автомобильных шин.

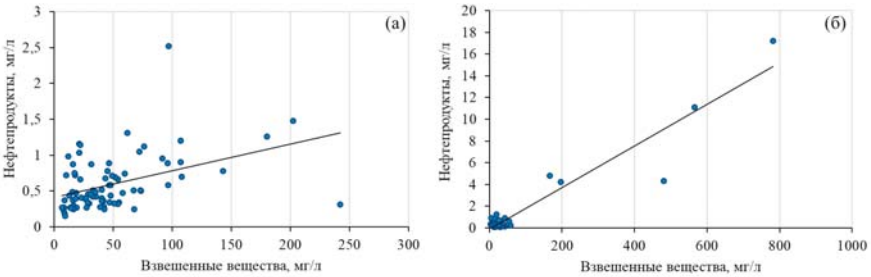


Рис. 4. Графики связи между содержанием в воде р. Лихоборки нефтепродуктов и взвешенных веществ в точках мониторинга: (а) – точка 1 (R = 0,43); (б) – точка 4 (R = 0,96)

Содержание в р. Лихоборке главных ионов (*хлоридов* и *сульфатов*) и его внутригодовое изменение отличаются от естественных водотоков. Концентрации главных ионов варьируют в очень широком диапазоне: хлоридов – от 24,3 до 3215 мг/л, сульфатов – от 5,65 до 1586 мг/л. Существует вероятность превышения значений ПДК: с вероятностью 15–26 % содержание хлоридов превышает $ПДК_{рх}$ и $ПДК_{кб}$, с вероятностью 0,2–1% содержание сульфатов превышает $ПДК_{рх}$. Существует незначительная (0,5 %) вероятность высокого загрязнения р. Лихоборки хлоридами.

В естественных водотоках со снеговым типом питания внутригодовое изменение содержания главных ионов характеризуется их увеличением в зимний период и уменьшением в период половодья. В количественном соотношении в течение года сульфаты преобладают над хлоридами. В р. Лихоборке наибольшие концентрации хлоридов отмечаются в зимнюю межень (табл. 2), максимальные – в феврале и марте (рис. 5). Минимальные концентрации хлоридов наблюдаются в летне-осенний период (точки 1, 2, 4) или в половодье (точка 3). Наибольшие концентрации в р. Лихоборке сульфатов отмечаются в половодье (точки 1,2,4) или зимнюю межень (точка 3), максимальные – в апреле, мае (точки 1, 2, 4) или декабре (точка 3) месяце. Минимальные концентрации сульфатов во всех точках мониторинга наблюдаются в летне-осенний период. Среднемесячное содержание хлоридных ионов превышает содержание сульфатных ионов в 1,2–28 раз (рис. 5).

Несинхронность внутригодового изменения содержания в речной воде хлоридов и сульфатов, а также значительное количественное превышение во все месяцы года хлоридных ионов над сульфатными свидетельствует не только о вы-

соком уровне загрязнения р. Лихоборки, но также и о мощном антропогенно обусловленном изменении химического состава речной воды и его преобразовании по морскому типу.

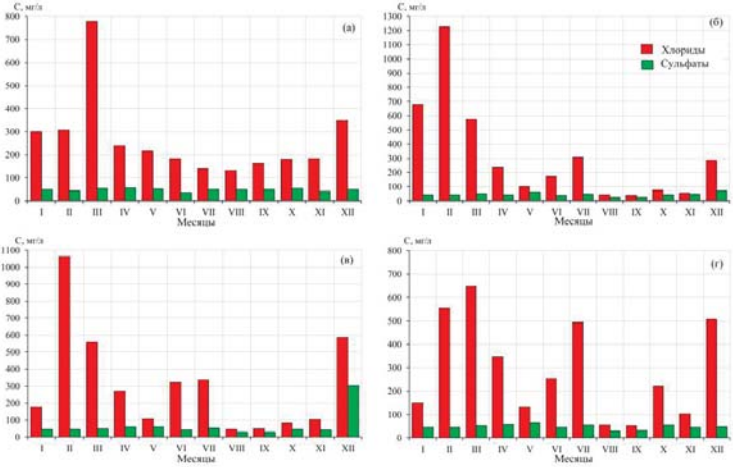


Рис. 5. Внутригодовые изменения содержания хлоридов и сульфатов в воде р. Лихоборки в точках мониторинга:
(а) – точка 1, (б) – точка 2, (в) – точка 3, (г) – точка 4

В естественных условиях сезонные изменения $БПК_5$ зависят от температуры, исходной концентрации растворенного в речной воде кислорода и жизненных циклов гидробионтов. Поэтому величина окисляемости обычно минимальна в зимнее время, когда в воде минимальное количество органических веществ, а их поступление с водосборной площади ограничено. Летом, когда температура воды максимальна, скорость окисления органических веществ повышается и величина биохимического потребления кислорода достигает максимальных значений. Содержание загрязняющих веществ, оцениваемых по показателю *ХПК*, увеличивается в периоды половодья и дождевых паводков, что связано с увеличением водного стока и поступлением органических веществ естественного и антропогенного происхождения с водосбора.

Сезонные изменения содержания загрязняющих веществ, оцениваемых по показателям $БПК_5$ и ХПК, в р. Лихоборке подобны: наибольшие значения отмечаются в зимний период (точки 1,3) или в половодье (точки 2,4), наименьшие – в летне-осенний период (точки 2,3) и половодье (точка 1). Значения показателей всегда превышают $ПДК_{рх}$ и варьируют в диапазоне: величина $БПК_5$ – от 2,4 до 180 мг/л, величина ХПК – от 21,1 до 1782 мг/л. Вероятность превышения значений $ПДК_{кб}$ в точках мониторинга варьирует: в диапазоне 50–97 % для $БПК_5$; в диапазоне 60–98 % для ХПК (табл. 3). Вероятность превышения уровня ВЗ в точках мониторинга варьирует: в диапазоне 2–28 % для $БПК_5$; в диапазоне 1–12 % для ХПК.

Наибольшее среднегодовое содержание загрязняющих веществ, оцениваемых по показателям $БПК_5$ и ХПК отмечается в точке 1, расположенной под автодорожной развязкой МКАД.

Содержание *азота аммонийного* в точках мониторинга превышает значение $ПДК_{рх}$ и варьирует в диапазоне 0,26–38,6 мг/л. Вероятность превышения значения $ПДК_{кб}$ в точках мониторинга достигает 44–99,9 %. Вероятность превышения уровня ВЗ варьирует в диапазоне 4,2–91 %. Вероятность превышения уровня ЭВЗ в точке 1 достигает 21 % (табл. 3).

Характерным для большинства речных вод является повышение концентрации азота аммонийного, в основном, в весенне-летне-осенний период из-за смывов с водосборной территории. В зимний сезон в условиях пониженного водного стока высокие концентрации аммонийного азота в речных водах обычно связаны с поступлением хозяйственно-бытовых сточных вод [7]. Внутригодовое изменение содержания азота аммонийного в р. Лихоборке характеризуется наибольшими значениями в половодье (точки 2–4) или зимнюю межень (точка 1), наименьшими – в летне-осенний период (точки 2–4) или половодье (точка 1). Подобное внутригодовое распределение содержания азота аммонийного и значительное превышение среднегодовой его концентрации в точке 1 над остальными точками мониторинга может указывать на поступление в реку значительного количества хозяйственно-бытовых сточных вод.

Выводы

Получены количественные оценки состояния р. Лихоборки по показателям качества воды: взвешенные вещества, нефтепродукты, хлориды, сульфаты, $БПК_5$, ХПК, азот аммонийный, значение pH. Установлены особенности гидрохимического режима реки, отличающие городские водотоки от природных водных объектов и обусловленные хозяйственной деятельностью на водосборе. В процессе мониторинга зафиксированы случаи несанкционированных залповых сбросов в р. Лихоборку загрязняющих веществ. Определены вероятности превышения значений ПДК загрязняющих веществ и наступления случаев высоких уровней загрязнения реки.

Список литературы

1. *Горюнова С. В.* Влияние антропогенного воздействия на экологическое состояние малой городской реки /// Вестник Московского городского педагогического университета. Серия: Естественные науки. 2010. № 2. С. 57–64.

2. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2016 году : государственный доклад Минприроды России. НИА-Природа. 2017.

3. О состоянии окружающей среды в городе Москве в 2014 году : доклад / под ред. А. О. Кульбачевского. ДПиООС ; НИА-Природа, 2015. 384 с.

4. О состоянии окружающей среды в городе Москве в 2016 году : доклад / под ред. А. О. Кульбачевского. ДПиООС ; НИиПИ ИГСП, 2017. 363 с.

5. Доклад о состоянии окружающей среды в Москве в 2009 году. ДПиООС, 2010. 238 с.

6. *Коронкевич Н. И., Мельник К. С.* Изменение стока на территории города Москвы в результате ландшафтных преобразований // Водное хозяйство России. 2014. № 6. С. 57–68.

7. *Красногорская Н. Н., Фащевская Т. Б., Рогозина Т. А.* Оценка качества водных объектов в условиях антропогенного воздействия. Уфа : Изд-во УГАТУ, 2006. 278 с.

8. *Лебедева Е. В., Михалев Д. В.* Водные объекты урбанизированных территорий: подходы и методы реабилитации (на примере Московского региона) // Территория и планирование. 2010. № 2. С. 62–68.

9. *Насимович Ю. А.* Реки, озера и пруды Москвы. URL: http://temnyjles.narod.ru/Reki3-36.htm (дата обращения: 15.10.2021).

10. О введении в действие порядка подготовки и представления информации общего назначения о загрязнении окружающей природной среды (с изм. на 30.12.2015) : приказ Росгидромета от 31.10.2000 № 156.

11. Р 52.24.756-2011 Рекомендации. Критерии оценки опасности токсического загрязнения поверхностных вод суши при чрезвычайных ситуациях (в случаях загрязнения).

12. *Словягина А. Н., Полянин В. О., Фащевская Т. Б.* Пространственно-временная динамика качества воды городского водотока (на примере р. Лихоборка) // Современные проблемы гидрохимии и мониторинга качества поверхностных вод: сборник статей, посвященный 100-летию со дня образования Гидрохимического института. Ч. 1. Ростов на/Д., 2020. С. 146–152.

13. *Товарищ Хэлл*. Подземные реки Москвы. М. : Издательские решения, 2019. 492 с.

14. Center for Watershed Protection, Watershed Protection Research Monograph No. 1: Impacts of Impervious Cover on Aquatic Systems. Ellicott City : Center for Watershed Protection, 2003.

УДК 556.53 (571.53)

Привлечение данных радарной топографической съемки для учета стока (на примере гидропоста р. Ия – г. Тулун)

Е. Н. Сутырина (ensut78@gmail.com), Т. И. Антонова

Иркутский государственный университет, Иркутск

Аннотация. Приводятся результаты экстраполяции кривой расходов для гидрологического поста р. Ия – г. Тулун различными методами с привлечением кривой площадей, восстановленной на основе данных радарной топографической съемки SRTM. Для каждого использованного в исследовании метода экстраполяции путем сопоставления с эталонной кривой расходов вычислены значения среднего вероятного отклонения.

Ключевые слова: данные SRTM, кривые расходов, кривые площадей, река Ия, экстраполяция вверх.

Учет речного стока заключается в определении по данным совокупностей непрерывных наблюдений за уровнем и эпизодических измерений расходов объемов воды, протекшей в створе гидропоста за отдельно взятые периоды времени. При учете стока в качестве первого приближения к значению расхода воды при фиксированном уровне принимается значение расхода воды, полученное по кривой расходов $Q = f(H)$ [4; 5]. При экстремально высоких уровнях воды не всегда удается выполнить инструментальные измерения расхода воды и возникает потребность экстраполяции вверх кривой расходов, при этом важно располагать кривой площадей, построенной до заданного экстремального значения уровня.

Цель работы – изучить возможность применения данных радарной топографической съемки для восстановления кривой площадей р. Ия на гидропосту в г. Тулуне и последующей экстраполяции кривых расходов на основе полученных морфометрических данных различными методами.

Объект исследования, р. Ия, стекает со склонов Востояного Саяна и продолжает течение по территории Иркутской области [1; 2]. На р. Ие многократно

происходили наводнения, в том числе в 1984, 2006 и 2019 гг. В 2019 г. наблюдалось беспрецендентное за инструментальный период измерения повышение уровня воды на посту р. Ия – г. Тулун до 1389 см при значении критической отметки в 700 см, в результате чего ограждающие дамбы не смогли защитить жилую застройку от затопления.

Для определения морфометрических характеристик (ширины реки, площади сечения, средней глубины и т. д.) в створе гидропоста р. Ия – г. Тулун в работе использована цифровая модель рельефа по данным радарной топографической съемки SRTM (Shuttle radar topographic mission), которая имеет потенциал для определения различных морфометрических параметров [6].

Дополнительно в ходе исследования использовались:

– крупномасштабные космоснимки из сервиса Google Планета Земля [8];

– полученные в ходе промеров морфометрические данные, приведенные в гидрологических ежегодниках [3],

– ежедневная информация об уровнях с ресурса AllRivers.info [7].

Для целей тестирования предлагаемой методики выбран ряд ретроспективных данных об измеренных расходах, позволяющий иммитировать неблагоприятные условия экстраполяции кривой расходов более, чем на 50 % амплитуды уровня.

Для восстановления кривой площадей в створе гидропоста р. Ия – г. Тулун по данным цифровой модели рельефа на основе SRTM были получены отметки в системе WGS84 (World Geodetic System 1984) и расстояния от заданной в работе условной точки отсчета в створе гидроплста. На основании этих данных вычислены значения ширины реки *B*.

По крупномасштабным космофотоснимкам из сервиса Google Планета Земля за определенные даты оценена ширина реки в створе заданного гидропоста и соотнесена со значениями уровней воды с ресурса AllRivers.info в эти даты.

По соотношению ширины в створе с отметками была получена *систематическая поправка* для данной территории для пересчета отметок из цифровой модели рельефа по данным SRTM в системе WGS84 в Балтийскую систему (БС), что позволило произвести перевод отметок из одной системы в другую, а затем и пересчитать в значения уровней *H*, см.

Данные о ширине реки по информации на основе SRTM после внесения систематической поправки хорошо соотносятся с шириной по крупномасштабным снимкам и с натурными измерениями ширины по данным промеров, что представлено на рис. 1.

По данным о ширине реки, полученным по материалам SRTM, при конкретных значениях высотных отметок/уровней рассчитана площадь поперечного сечения в гидрометрическом створе поста р. Ия – г. Тулун. С учетом того что при отметках до 452,00 м WGS84 точное определение ширины данной реки из-за специфики масштаба матрицы SRTM невозможно, при указанной отметке площадь сечения была получена по участку кривой площадей по данным промеров, а последующее приращение площади поперечного сечения реки определено на основании данных SRTM и представлено на рис. 2, *б*. Из графика (см. рис. 2, *б*)

видно, что кривые площадей по данным промеров и по данным радиолокационной топографической съеики SRTM хорошо соотносятся, при этом предложенный авторами метод демонстрирует относительную простоту применения и возможность с использованием цифровых моделей рельефа на основе SRTM восстановить кривую площадей до необходимых экстремальных отметок без проведения дополнительных полевых работ, что показывает перспективность проиллюстрированного подхода.

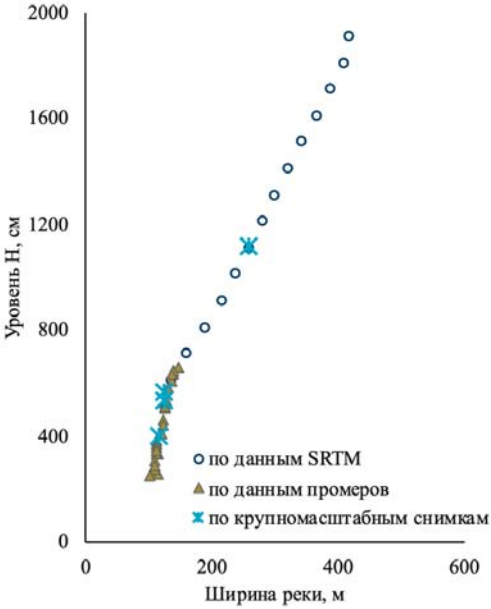


Рис. 1. Зависимость ширины реки Ии от уровня свободной поверхности

Восстановленной по данным съемки SRTM кривая площадей (рис. 2, *б*) используется далее для экстраполяции кривых расходов вверх различными способами: по элементам расхода, способом Стивенса-Великанова, по формуле Шези.

Способ экстраполяции по элементам расхода заключается в том, что сначала достраивается кривая площадей до высшего уровня. Площади при заданных уровнях *Н* в рамках данной работы определяются по кривой площадей (см. рис. 2, *б*).

Кривую средних скоростей (рис. 2, *в*) при данном способе экстраполировали до требуемых значений уровня по определенному методом наименьших квадратов (МНК) уравнению зависимости средней скорости от уровня. Расход воды определяется как произведение площади поперечного сечения и средней скорости при конкретном уровне *Н*.

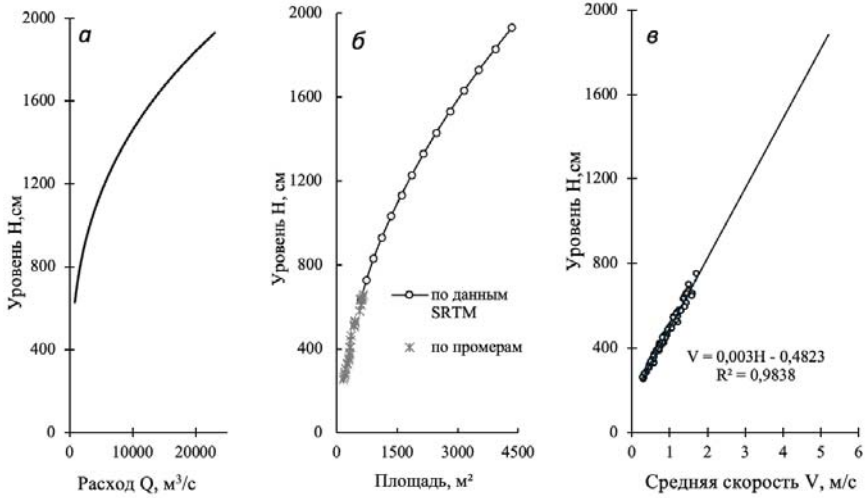


Рис. 2. Кривые расхода (а), площадей (б), средних скоростей (в) в створе гидропоста р. Ия – г. Тулун

Способ экстраполяции кривой расходов с помощью параметра M основан на применении уравнения Шези. Значения расхода при конкретном уровне H определяют как:

$$Q = \omega M\sqrt{h_{\text{ср}}}. \quad (1)$$

где Q – расход воды, м^3/с; ω – площадь поперечного сечения, м^2; $h_{\text{ср}}$ – средняя глубина, м; $M = V/\sqrt{h_{\text{ср}}}$; V – средняя скорость течения, м/с.

Параметр M вычисляют по данным измеренных расходов, далее экстраполируют до требуемых значений по определенному МНК уравнению (рис. 3). Среднюю глубину и площадь поперечного сечения в работе определяли по данным SRTM.

По методу Стивенсу-Великанова величина $B \cdot h_{\text{ср}}^{3/2}$ может быть определена по профилю водного сечения для любого уровня по данным, полученным по материалам SRTM. В пределах измеренных значений расходов определяется зависимость $Q = f(B \cdot h_{\text{ср}}^{3/2})$, которая в рамках работы была экстраполирована до требуемого уровня по линейному уравнению, полученному МНК. Таким образом, зная величину $B \cdot h_{\text{ср}}^{3/2}$ при заданном уровне H, можно по полученной линейной зависимости $Q = f(B \cdot h_{\text{ср}}^{3/2})$ определить величину расхода воды.

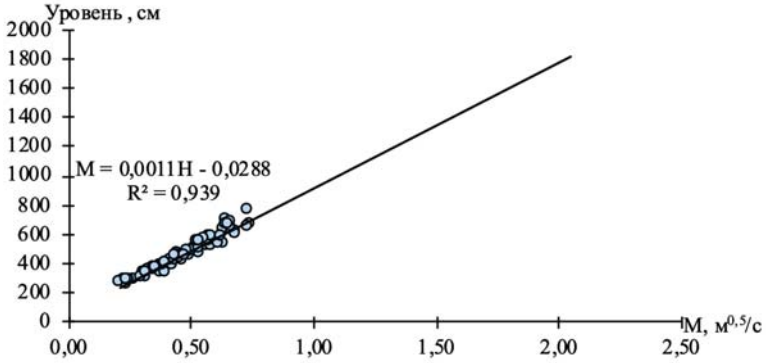


Рис. 3. График зависимости параметра М от уровня

Проверка полученных кривых расходов осуществлялась сопоставлением с используемой в исследовании в качестве эталона кривой расходов, составленной по многолетним данным в Иркутском УГМС (Иркутском управлении по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды) для данного гидроствора. На рис. 4 показано соотношение экстраполированных кривых расходов и кривой, составленной в Иркутском УГМС. В работе определены значения среднего вероятного отклонения от эталонной кривой расходов экстраполированных кривых. Кривая, полученная экстраполяцией по элементам расхода, имеет значение среднего вероятного отклонения равное 4,0 %. При экстраполяции по формуле Шези среднее вероятное отклонение равно 7,3 %, способом Стивенса-Великанова оно составило 13,5 %.

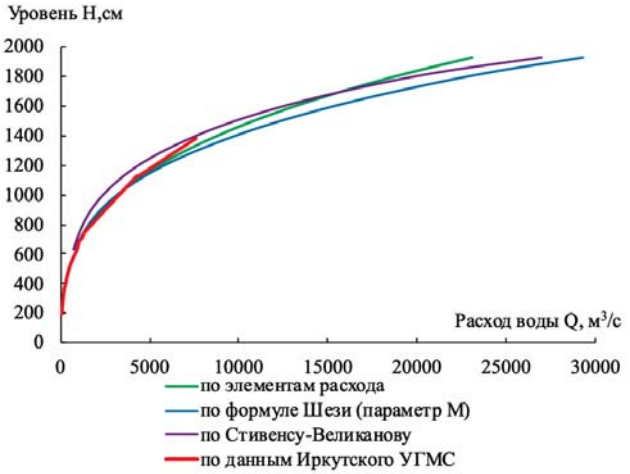


Рис. 4. Экстраполированные кривые расходов в соотношении с многолетней кривой Иркутского УГМС

Надежность кривой расходов $Q = f(H)$ для створа гидропоста р. Ия – г. Тулун, полученной экстраполяцией по элементам расхода, соответствует более жестким требованиям, предъявляемым к кривым расходов, освещенным измерениями. Это показывает практический потенциал использования данных радарной топографической съемки для целей восстановления кривых площадей и экстраполяции кривых расходов до требуемых отметок.

Список литературы

1. Иркутская область (природные условия административных районов) / Н. С. Беркин, С. А. Филиппова, В. М. Бояркин, А. М. Наумова, Г. В. Руденко. Иркутск : Изд-во Иркут. ун-та, 1993. 304 с.
2. Географическая энциклопедия Иркутской области. Общий очерк / ред. Л. М. Корытный. Иркутск : Изд-во Института географии им В. Б. Сочавы СО РАН, 2017. 336 с.
3. Гидрологический ежегодник. Л. : Гидрометеоиздат. 1957–1963. Т. 7. Вып 2–4.
4. *Карасев И. Ф.* Речная гидрометрия и учет водных ресурсов. Л. : Гидрометеоиздат, 1980. 310 с.
5. РД 52.08.872-2018. Оперативный учет стока на водотоках. Методы обработки наблюдений за уровнями и расходами воды. СПб., 2018. 107 с.
6. *Сутырина Е. Н.* Определение морфометрических характеристик проектируемых и строящихся водохранилищ Ангарского каскада ГЭС по данным дистанционного зондирования // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле. 2014. Т. 10. С. 101–114.
7. AllRivers.info. URL: https://allrivers.info (дата обращения: 10.06.2021).
8. Google Планета Земля. URL: https://www.google.com (дата обращения: 10.05.2021).

УДК 551.583+556.512

Оценка трансформации генетической структуры речного стока под влиянием климатических изменений

К. В. Сучкова (kseniyasuchkova@mail.ru)
Институт водных проблем РАН, Москва

Аннотация. Приведены результаты модельного подхода к оценке чувствительности генетической структуры речного стока к возможным климатическим изменениям осадков и температуры воздуха на примере бассейна р. Москвы.

Ключевые слова: изменения климата; речной, склоновый, почвенный и грунтовый сток; генетическая структура стока.

Введение

С помощью математического моделирования в гидрологических исследованиях можно решать широкий спектр теоретических и прикладных задач, в том числе появляется возможность оценки трансформации речного стока и его составляющих под влиянием климатических и антропогенных изменений. Водные ресурсы, формирующиеся поверхностными и подземными источниками питания, требуют совместного моделирования и анализа генетической структуры стока [2; 4]. Под генетической структурой речного стока понимается сочетание различных генетических типов вод – склоновых (поверхностных), почвенных, грунтовых, определяемое спецификой химического состава вмещающих горизонтов толщи почв и грунтов, дренируемых рекой. В данной работе приведены

результаты численных экспериментов анализа чувствительности режима стока для бассейна р. Москвы к возможным изменениям годового количества осадков и среднегодовой температуры воздуха (delta-change метод).

Материалы и методы исследования

Объектом исследования является верхняя часть бассейна реки Москвы. Водосбор верхней р. Москвы является основной частью водосбора Можайского водохранилища и обеспечивает большую часть его притока. Исследуемая территория бассейна располагается в центральной части Восточно-Европейской равнины в пределах Смоленско-Московской возвышенности. Можайское водохранилище является самым крупным из Москворецких водохранилищ с общей площадью водосбора 1360 км^2. Главными притоками являются реки Москва, Лусянка и Колочь. Для всей территории бассейна характерен равнинный рельеф с обилием холмов и понижений, хорошо выраженными речными долинами рек, балками и оврагами, где понижения большей частью заболочены. Климат умеренно-континентальный с резко выраженными сезонами года. По количеству выпадающих осадков территорию бассейна можно отнести к зоне достаточного увлажнения, средняя многолетняя сумма осадков в среднем составляет 650–750 мм. Притоки водохранилища относятся к типу рек, питающихся преимущественно талыми водами. Их водный режим характеризуется высоким весенним половодьем и низкой летней и зимней меженью.

Пространственно-распределенная модель формирования стока в речных бассейнах ECOMAG (ECOlogical Model for Applied Geophysics) [1; 3] описывает основные процессы гидрологического цикла суши в бассейнах рек со смешанным снеговым и дождевым питанием. Модель была адаптирована к условиям и информационному обеспечению в бассейне р. Москвы. Для модельной схематизации водосборной площади и речной сети водохранилища использовалась цифровая модель рельефа с разрешением 100×100 м, почвенная и ландшафтная карты масштаба 1: 500 000 и 1: 200 000, соответственно. Граничными условиями модели задавались многолетние ряды суточных сумм осадков, среднесуточных значений температуры и влажности воздуха с весовыми коэффициентами, полученные по данным наблюдений близлежащих от исследуемого объекта метеостанций. В качестве входящей гидрологической информации использовались данные наблюдений о расходах воды на гидрометрических постах Барсуки (р. Москва), Черники (р. Лусянка) и притоке воды к Можайскому водохранилищу. Расчетный период составляет 34 года (с 1982 по 2015 г.). Калибровка параметров модели ECOMAG проводилась по суточным гидрографам стока на гидропостах за период 1982–1992 гг., валидация осуществлялась для периода 1993–2015 гг. По результатам моделирования соответствие модельных и фактических гидрографов с использованием традиционных статистических критериев можно признать удовлетворительным.

Для исследуемого бассейна выполнены оценки влияния климатических изменений на изменение среднегодовых значений речного стока и его составляющих. Оценки проводились на основе анализа чувствительности модели форми-

рования речного стока к изменению климатических параметров с помощью метода delta-change, суть которого заключается в преобразовании наблюденных метеорологических рядов. Временные ряды суточных осадков и температуры воздуха за весь период наблюдений с 1982 по 2015 г. были преобразованы путем изменения каждого суточного значения для: осадков на $\Delta P \in [-10\ \%, +20\ \%]$, температуры воздуха на $\Delta T \in [-1{,}0\ °C, +2{,}0\ °C\ \%]$.

Результаты моделирования

Гидрографы суммарного речного стока и его генетических составляющих (поверхностной, почвенной и подземной) моделировались с использованием различных комбинаций искусственно измененных временных рядов осадков и температуры воздуха. Вариант модели формирования стока при $\Delta P = 0\%$ и $\Delta T = 0\ °C$ (т. е. без изменения осадков и температуры) использовался в качестве базового для оценки изменений генетических составляющих питания рек. Результаты численного эксперимента приведены в табл. 1–4.

Проведенные расчеты показали, что с изменением осадков при различных сценариях изменения температуры воздуха суммарный сток значительно растет, но в основном за счет изменения поверхностного стока и внутрипочвенного (рис. 1). Грунтовая составляющая меняется незначительно.

Таблица 1

Чувствительность (%) рассчитанного среднемноголетнего речного стока к изменениям климата (ΔT, ΔP) в бассейне Можайского водохранилища

ΔP, % \ ΔT, °C	0	+1	+2	–1
0%	0	–5	–10	6
+10%	17	12	6	24
+20%	36	30	24	43
–10%	–16	–21	–26	–11

Таблица 2

Чувствительность (%) рассчитанного среднемноголетнего поверхностного стока к изменениям климата (ΔT, ΔP) в бассейне Можайского водохранилища

ΔP, % \ ΔT, °C	0	+1	+2	–1
0 %	0	–10	–26	27
+10 %	22	12	–8	51
+20 %	43	35	12	75
–10 %	–17	–30	–41	2

Таблица 3

Чувствительность (%) рассчитанного среднемноголетнего почвенного стока к изменениям климата (ΔT, ΔP) в бассейне Можайского водохранилища

ΔP, % \ ΔT, °C	0	+1	+2	–1
0%	0	–5	–8	–1
+10%	26	20	18	26
+20%	56	48	46	56
–10%	–26	–29	–32	–25

Таблица 4

Чувствительность (%) рассчитанного среднемноголетнего грунтового стока к изменениям климата (ΔT, ΔP) в бассейне Можайского водохранилища

ΔP, % \ ΔT, °C	0	+1	+2	–1
0 %	0	–2	–4	1
+10 %	2	0	–2	2
+20 %	3	2	0	3
–10 %	–2	–4	–6	–1

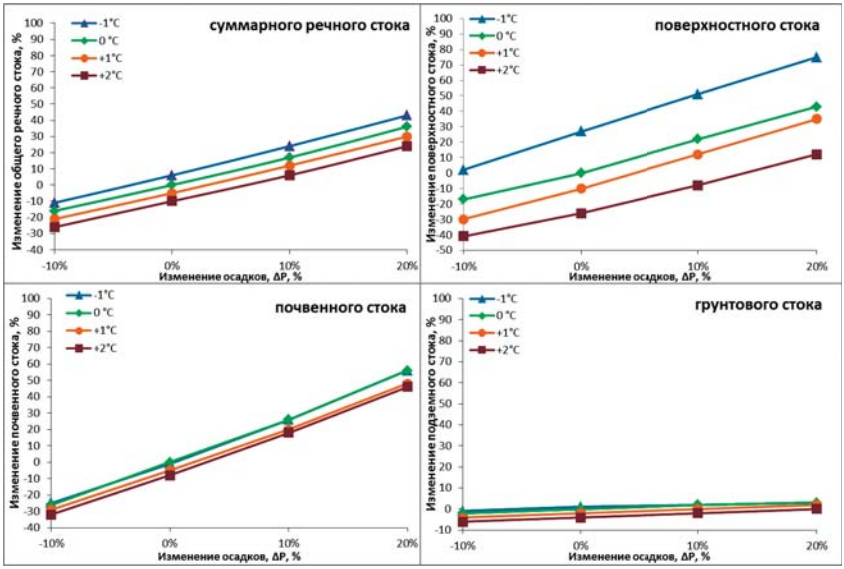


Рис. 1. Чувствительность (%) рассчитанного среднемноголетнего суммарного речного стока, поверхностного, почвенного и грунтового стока к изменениям климата (ΔT, ΔP)

Повышение температуры на один градус (без изменения осадков) приводит к уменьшению суммарного речного стока, а также его поверхностной, почвенной и грунтовой составляющих примерно на 2–10 %. Максимальное снижение отмечается для поверхностного стока (около 10 %) прежде всего за счет увеличения испарения. Десятипроцентное увеличение осадков при различных сценариях изменения температуры воздуха приводит к увеличению рассчитанного суммарного речного стока и его генетических составляющих в пределах от 2 до 26 %. Наибольший рост прослеживается для поверхностной и внутрипочвенной составляющих стока, грунтовый сток растет незначительно (1–2 %).

Наиболее заметные изменения стока наблюдаются при увеличении осадков на 20 % при любых изменениях температуры воздуха. Максимальное увеличение стока для этого варианта можно отметить для почвенной составляющей, в некоторых сочетаниях увеличение почвенного стока превышает более 50 %

(табл. 3). Наименее существенные отличия наблюдаются для подземного стока при любых комбинациях. При десятипроцентном уменьшении осадков во всех сочетаниях полученный годовой сток уменьшается до 26 %.

Проанализируем внутригодовое распределение стока и его генетических составляющих на основе возможных изменений климата. Для всех сочетаний изменения осадков и температуры были построены типовые гидрографы стока, осредненные за период расчета с 1982 по 2015 г. На рис. 2 показан типовой гидрограф стока для замыкающего створа Можайское вдхр. – п. Гидроузел для базового варианта, т. е. без изменений климата. Отмечается удовлетворительное соответствие расчетных и фактических типовых гидрографов. Типовой график процентного содержания поверхностной, почвенной и грунтовой составляющих за весь расчетный период показан на рис. 3. Из рисунка видно, что в большей части года преобладает грунтовая составляющая, среднее процентное содержание 58 %. Достаточно выдержано по процентному содержанию во все сезоны распространена почвенная составляющая (среднее значение 36 %). Поверхностная составляющая наблюдается преимущественно в период половодья и летне-осенних паводков (среднее значение 6 %).

Аналогичные типовые графики модельных и расчетных гидрографов и динамики генетических составляющих стока для вариантов с увеличением осадков без изменения температуры ($\Delta T = 0$, $\Delta P = 20$ %) и для варианта повышения температуры на два градуса и увеличения осадков на 10 % ($\Delta T = +2$ °C, $\Delta P = 10$ %) показаны на рис. 4–7.

Как было сказано выше, вариант с увеличением осадков на 20 % без изменения температуры показали наибольшее увеличение для почвенного стока (до 56 %). Общий годовой сток увеличился на 36 %. Однако динамика генетических составляющих практически повторяет внутригодовое распределение генетических составляющих стока как в базовом варианте, что связано с допущением о равномерности во все сезоны изменений температуры и осадков. Среднее процентное содержание за период с 1982 по 2015 г. для грунтовой, почвенной и поверхностной составляющей составляет 52, 42, 6 % соответственно.

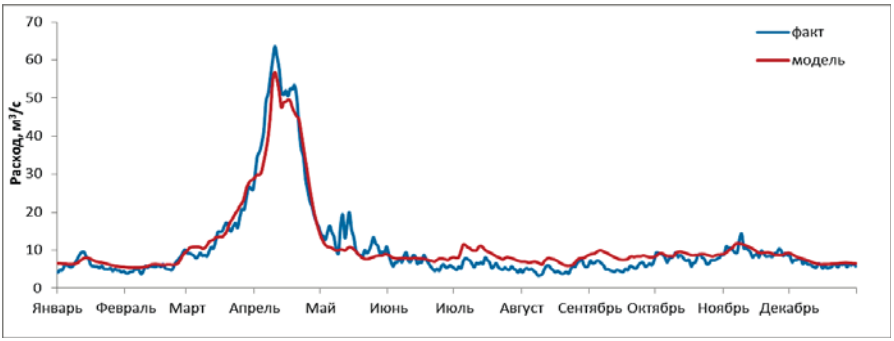


Рис. 2. Типовой гидрограф на замыкающем створе Можайское вдхр – п. Гидроузел за период 1982–2015 гг. (базовый вариант, без изменений климата)

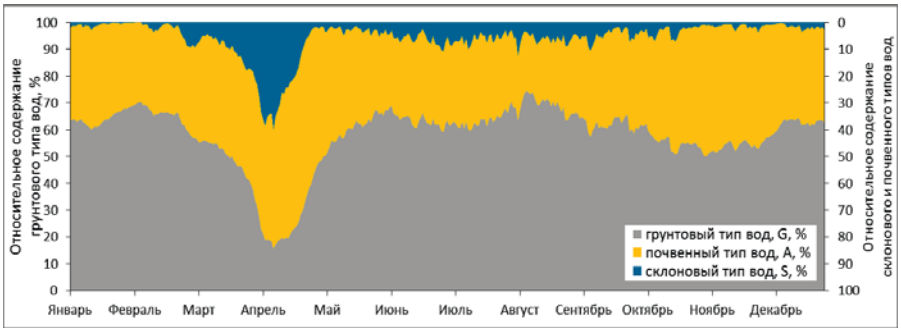


Рис. 3. Динамика генетических составляющих стока на замыкающем створе Можайское вдхр – п. Гидроузел за период 1982–2015 гг. (базовый вариант, без изменений климата)

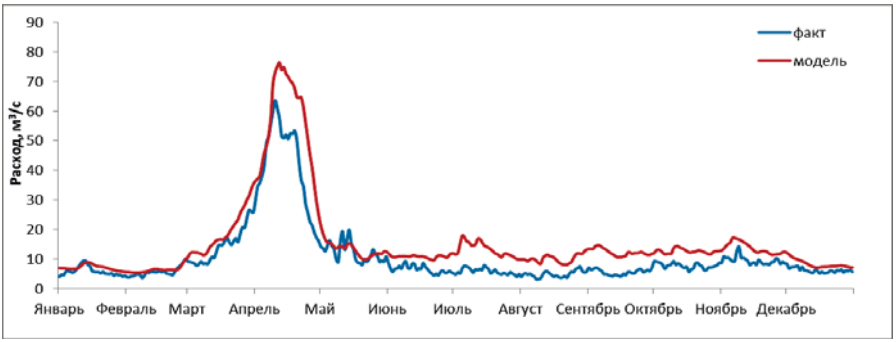


Рис. 4. Типовой гидрограф на замыкающем створе Можайское вдхр – п. Гидроузел за период 1982–2015 гг. (вариант ΔT = 0, ΔP = 20 %)

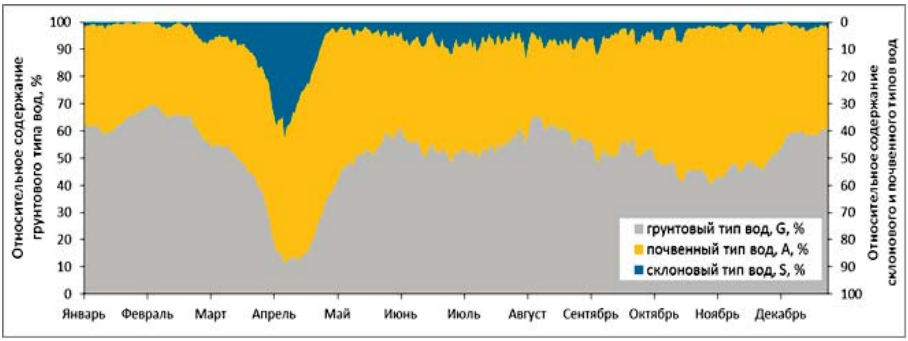


Рис. 5. Динамика генетических составляющих стока на замыкающем створе Можайское вдхр – п. Гидроузел за период 1982–2015 гг. (вариант ΔT = 0, ΔP = 20 %)

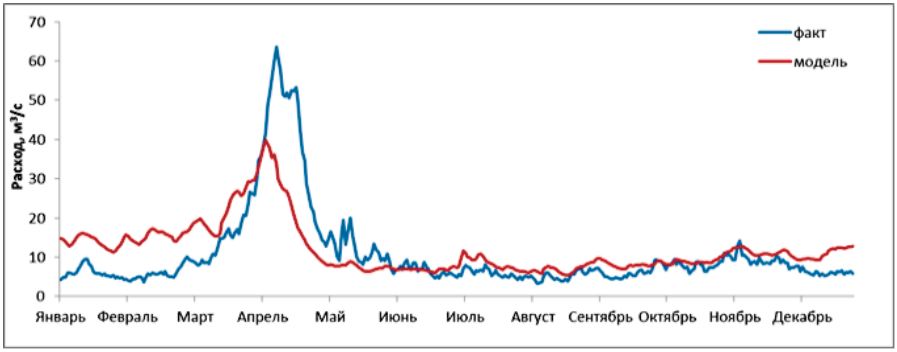


Рис. 6. Типовой гидрограф на замыкающем створе Можайское вдхр – п. Гидроузел за период 1982–2015 гг. (вариант ΔT = +2 °C, ΔP = 10 %)

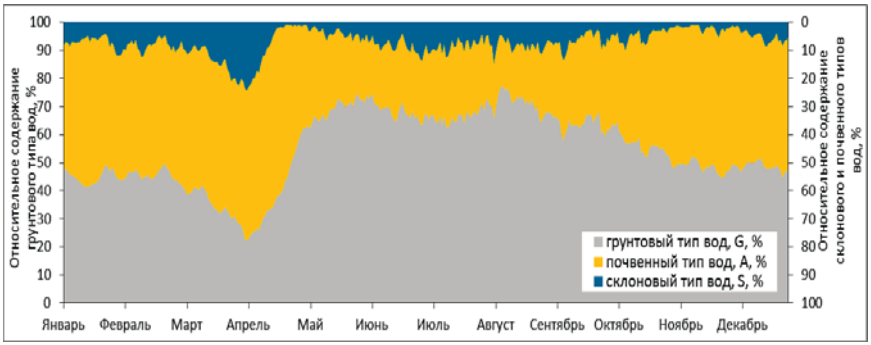


Рис. 7. Динамика генетических составляющих стока на замыкающем створе Можайское вдхр – п. Гидроузел за период 1982–2015 гг. (вариант ΔT = +2 °C, ΔP = 10 %)

Для варианта повышения температуры на два градуса и увеличения осадков на 10 % (ΔT = +2 °C, ΔP = 10 %) общий годовой сток увеличился на 6 %, но при этом речной сток перераспределился в течение года. Из рисунка 6 видно, что сток увеличился в 2 и более раз в период зимней межени. Вместе с тем в период половодья речной сток не такой высокий как в базовом варианте из-за повышения температуры и вследствие увеличения эвапотранспирации. Для динамики генетических составляющих стока для такого сочетания изменений климата (ΔT = +2 °C, ΔP = 10 %) также наблюдается внутригодовое перераспределение поверхностного, почвенного и грунтового стока (рис. 7). При увеличении температуры воздуха на 2 °C и увеличении осадков на 20 % доля грунтовой составляющей в период зимней межени убывает, а поверхностная увеличивается. За счет увеличения температуры воздуха на 2 °C, зимой происходят более частые оттепели, суммарный сток растет. Но растет сток в основном за счет внутрипочвенной и поверхностной долей. А в период половодья, наоборот, доля поверхностного стока уменьшается.

Выводы

Таким образом, модельный подход по изменению наблюдаемых временных рядов суточных температур и осадков показал, что изменение климатических характеристик слабо сказывается на изменении абсолютных значений грунтовой составляющей стока, однако вследствие значительного изменения поверхностной и внутрипочвенной составляющих генетическая структура речного стока (доли составляющих в процентном отношении) претерпевает значительные трансформации. Повышение температуры на один градус (без изменения осадков) приводит к уменьшению суммарного речного стока, а также его поверхностной, почвенной и грунтовой составляющих примерно на 2–10 %. Максимальное снижение отмечается для поверхностного стока прежде всего за счет увеличения испарения. Десятипроцентное увеличение осадков при различных сценариях изменения температуры воздуха приводит к увеличению рассчитанного суммарного речного стока и его генетических составляющих в пределах от 2 до 26 %.

Список литературы

1. *Мотовилов Ю. Г., Гельфан А. Н.* Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. М. : Изд-во РАН, 2019. 300 с.

2. *Эдельштейн К. К., Смахтина О. Ю.* Генетическая структура речного стока и химико-статистический метод выделения ее элементов // Водные ресурсы. 1991. № 5. С. 5–20.

3. ECOMAG – regional model of hydrological cycle. Application to the NOPEX region / Yu. G. Motovilov, L. Gottschalk, K. Engeland, A. Belokurov. Department of Geophysics, University of Oslo, Institute Report Series. N 105. May 1999a. 88 p.

4. Suchkova K. V., Motovilov Yu. G. Sensitivity Assessment of a Runoff Formation Model in the Mozhaisk Reservoir River Basin // Water Resources. 2019. Vol. 46, Suppl. 2. P. S40–S50.

УДК 504.03:711.4(556)

Общие рекомендации по анализу водоохранных зон

М. Теа, Е. В. Потапова (e.v.potapova.isu@mail.ru)

Иркутский государственный университет, Иркутск

Аннотация. Водные объекты выполняют основополагающие задачи жизнеобеспечения людей. Территории около них используются в хозяйственной и иной деятельности постоянно и повсеместно. Для решения задач сохранения необходимо создание и отработка в полевых условиях научно-обоснованной методологии анализа водоохранных зон.

Ключевые слова: роль воды, водные объекты, геоэкологический подход, водопользование, реабилитация.

Как любые объекты, водоохранные зоны – территории, примыкающие к береговой линии водного объекта, выполняющие значительное количество функции, необходимо изучать. Специальных методов для таких исследований не создано, поэтому любые наработки в этой области остаются актуальными.

Территории вокруг водных объектов в мире на протяжении эволюции Человечества использовались в первую очередь. Цивилизационная роль воды отмечена многими учеными [1]. Берега таких рек, как Тигр, Ефрат, Нил, Янцзы

заселены людьми тысячи лет. По берегам рек возделывается земля, строятся укрепления и города, возводятся плотины. Берега морей, особенно теплых, в настоящее время заселены на Земле плотнее всего [2]. В связи с особенностями развития, реки и речные долины не всегда органически включались в градостроительные структуры застройки и освоения территорий и зачастую представляют собой неблагоустроенные, неиспользуемые должным образом земли. Например, в настоящее время в ряде стран (Кот-д'Ивуар и др. африканские страны) размещение объектов, в том числе жилого фонда по берегам водоемов никак не контролируется. Происходит стихийное освоение.

Водные объекты можно разделит на линейные (реки, ручьи и др.) и площадные (моря, озера, и др.). Также можно говорить, о искусственных сооружениях в обеих группах – каналы и пруды. Важным является отличие структуры и содержания для участков в границах населенных пунктов и других особенных зон, например охраняемых территорий, зон санитарной охраны водозаборов или санитарно-защитных зон портов и других гидротехнических соображений, неразрывных с водным объектом. От принадлежности к той или иной группе зависят рекомендации по анализу структуры и состоянию водоохранных зон.

Для выполнения таких работ необходимо создание и отработка в полевых условиях научно-обоснованной методологии, которая позволит корректно описывать структуру и состояние водных объектов, проводить мониторинг их режимных характеристик, устанавливать очередность восстановительных мероприятий, указывая участки, например для первоочередной реабилитации, и определять выбор оптимальных для этого технологий. Рассмотрение такой совокупности аспектов возможно только с учетом различных геоэкологических подходов оценки безопасности и всестороннего анализа геоэкологических условий и рисков на территориях долин рек и прилегающих зон. Под геоэкологическими условиями, в контексте вопроса, понимается совокупность параметров, определяющих состояние и нарушение окружающей среды в пределах рассматриваемой территории. Среди них можно рассматривать климатические условия, фоновое загрязнение сред, в том числе атмосферы, а также источниками загрязнения, их статические и динамические характеристики, термический и акустический режим территории, инженерно-геологические и гидрогеологические условия территории, степень нарушенности и загрязнения почвенного покрова, состав и состояние растительного покрова, гидрологическая характеристика территории, включающая оценку гидрологического режима водотока, степени трансформации русла, уровень загрязнения воды в реке и расчет объемов с гидрохимическими показателями поверхностного стока в пределах водосбора. Существенными комплексными геоэкологическими факторами также являются характер ландшафтной структуры территории населенных пунктов, с учетом действующих и планируемых архитектурных и строительных решений [3].

Рационализация водо- и природопользования на территориях водоохранных зон способны в значительной степени минимизировать отрицательное воздействие на режим водного питания и состояние природных комплексов и, тем

самым, существенно замедлить процессы деградации экосистем водных объектов. В качестве основных рекомендаций к полевому анализу предлагаем оценивать следующие элементы:

1. Обозначение водного объекта, название. Принадлежность к бассейновому округу.

2. Месторасположение, учет территорий протекания, стран, областей, возможно климатических и географических зон.

3. Длина (от этого показателя, например по законодательству России, зависит ширина водоохранной зоны).

4. Основные гидрологические характеристики.

5. Конкретные обследованные участки с отметками о полевом изучении или по данным дистанционного зондирования Земли.

6. Схемы (карты-схемы), таблицы и матрицы компонентно-организационной структуры прилегающих к береговой линии территорий, распределенных по нескольким основным группам:

а) земли сельхозназначения (поля, сады, пастбища с указанием методов полива);

б) земли населенных пунктов, с указанием статуса поселения (город, деревня, улус и т. д.) и численности населения, длины участка береговой линии в границах поселения;

в) земли объектов промышленности, транспорта и т. п., как в границах населенных пунктов, так и за их пределами. Характеристики некоторых сооружений в границах водного объекта, имеющих непосредственное значение и/или влияние на водный объект;

г) земли, занятые лесами и искусственными насаждениями (последние описываются специально), как основа стабилизации и поддержания качества водного объекта;

д) земли, занятые болотами или переувлажненные, обычно затапливаемые участки.

7. Зоны отдыха, различных видов рекреации, специальное рекреационное использование, например, причалы не только маломерных судов, но гидроциклов и др.

8. Специальное описание участков, занятых насаждениями с отметками о их происхождении, возрасте. Описание должно содержать подробную информацию о структуре и составе растительного сообщества, площади и качестве покрытия ими водоохранной зоны и прибрежной защитной полосы. Отдельно отмечаются участки с разными вариантами покрытия древесными, кустарниковыми и травянистыми растениями и особенности их сочетания.

9. Отдельно отмечаются участки недоступные для прохождения, просмотра, непосредственного полевого изучения, особенно в границах прибрежной защитной полосы. Для РФ такое покрытие противоречит законодательству (допустимо лишь в редких случаях, например при сооружении портов) и легальность таких объектов должна проверяться на государственном уровне.

10. Отдельно составляются списки незаконного занятия и использования преимущественно прибрежных защитных полос.

Экологические конфликты, обусловленные неэффективным хозяйственным использованием водоохранных зон в городах, имеют все большее распространение, особенно в регионах с нехваткой чистой воды. Реальные и потенциальные конфликтные ситуации в населенных пунктах включают в себя наличие усадебной жилой застройки не оборудованной централизованной системой канализации, наличием сельскохозяйственных угодий, включая пашни, сенокосы и пастбища и садово-огородные участки, размещением промышленных и сельскохозяйственных предприятий, объектов обслуживания автотранспорта, являющихся интенсивными источниками загрязнения поверхностных вод, добычу полезных ископаемых, наличие территорий специального назначения (кладбища, скотомогильники, свалки и пр.). Экологическая реабилитация водных объектов должна быть основана и включать в методы сбора информации значительное число критериев, значимых для определения текущего состояния и реализации планов развития в контексте Целей устойчивого развития. Несмотря на существующее в России законодательное определение (ст. 1 Водного кодексаРФ): «охрана водных объектов – система мероприятий, направленных на сохранение и восстановление водных объектов», правовая охрана выражается в регулировании хозяйственной деятельности, установлении режимов водоохранных зон, санитарных округов, особо охраняемых водных объектов, стимулировании экологического восстановления водных объектов и нейтрализации накопленного экологического ущерба, методика таких работ фактически не определена и сводится к принятию программ различного уровня. Например, восстановление и экологическая реабилитация водных объектов обозначены в Федеральной целевой программе «Развитие водохозяйственного комплекса Российской Федерации в 2012–2020 годы»

Системы водных объектов населенных пунктов выполняя градообразующие, инженерные и экологические функции, формируют ландшафтный облик поселения, осуществляют отвод поверхностного и дренажного стока, обеспечивают население, особенно малоимущее и маломобильное местами доступной рекреации. Их состояние, использование, развитие, должно быть изучено, спланировано и спрогнозировано для стабилизации, оптимизации и сохранения возможности полноценного функционирования для будущих поколений. Интеграция эффективного пространственного планирования в будущее развитие, играет ключевую роль в обеспечении восстановления и улучшения качества водных объектов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Иркутской области в рамках научного проекта № 20-45-380032.

Список литературы

1. *Корытный Л. М.* Воды суши // Современная Россия: географическое описание нашего Отечества. Сибирь. М., 2020. С. 83–93.

2. RESTORE: encourages the restoration of European rivers towards a more natural state for increased ecological quality, flood risk reduction, and social and economic benefits. URL: http://www.restorerivers.eu (дата обращения: 01.10.2021).

3. *Винокуров Ю. И., Жерелина И. В, Красноярова Б. А.* Подходы к формированию стратегии устойчивого водопользования в бассейне реки Оби // Ползуновский вестник. 2004. № 2. С. 4–13.

УДК 556.535.4 (571.53/.55)

Оценка распределения температуры поверхности в оз. Гусиное (Республика Бурятия) по данным дистанционного зондирования

М. Ю. Токтонов (toktonov2014@mail.ru)
Иркутский государственный университет, Иркутск

Аннотация. Приводятся результаты изучения температурного режима оз. Гусиное, расположенного в Республике Бурятии по материалам спутниковых наблюдений в 2020 г. Рассматриваются серии картографических изображений температуры на поверхности озера и обсуждаются изменения температурных характеристик с июня по ноябрь 2020 г.

Ключевые слова: оз. Гусиное, температура поверхности воды, данные AVHRR.

Введение

Температуры воды является важным параметром состояния экосистемы озера [6], что и определяет цель данного исследования, которая состоит в определении температурных характеристик оз. Гусиное на примере 2020 г. с применением спутниковых данных.

Оз. Гусиное расположено в бассейне оз. Байкал, поэтому современное состояние оз. Гусиного отражает степень антропогенной нагрузки на бассейн оз. Байкал [1; 2]. Озеро подвержено значительному антропогенному воздействию. На северо-восточном побережье озера расположен город Гусиноозерск, на юго-западном – село Гусиное Озеро. Качество воды ухудшается прежде всего из-за работы Гусиноозерского промышленного узла и Холбольджинского угольного разреза. Озеро – единственный источник хозяйственно-питьевого и промышленного водоснабжения в районе [1; 3].

На качество воды оказывает влияние также сброс недостаточно очищенных бытовых и промышленных сточных вод г. Гусиноозерска. Недостаточно очищенные сточные воды с повышенной концентрацией нефтепродуктов и биогенных элементов сбрасываются в северо-западной оконечности озера на расстоянии около 5 км от водозаборных сооружений г. Гусиноозерска. На берегу озера расположена Гусиноозерская ГРЭС, использующая воду озера для охлаждения агрегатов при генерации электроэнергии. В процессе сброса теплых вод происходит поступление дополнительного тепла в водоем и, как следствие, изменение его температурного режима. Подобные изменения обусловливают нарушение естественной экологической обстановки в водоеме [1–3].

Использование Гусиного озера в качестве водоема-охладителя приводит к изменению не только температурного режима воды в зоне теплового воздействия, но и вызывает изменение гидрохимических показателей водоема, что потенциально может привести к развитию процессов эвтрофикации и водоем будет непригоден для хозяйственно-питьевого, культурно-бытового и рыбохозяйственного использования. [7]

Помимо антропогенного теплового загрязнения, на температурный режим озера влияние оказывают изменения климатических показателей, которые отмечаются в современный период в пределах бассейна р. Селенги [5], к которому и

относится оз. Гусиное. Эти изменения ведут к необходимости актуализации данных о распределении температуры на поверхности оз. Гусиного.

Материалы и методы исследования

В данной работе были использованы данные радиометра AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), установленного на борту метеорологических спутников серии NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) [4].

Основным достоинством спутников серии NOAA являются общедоступность информации и возможность регулярно ее получения. Каждый пользователь, имеющий соответствующие средства приема и обработки, может получать данные непосредственно с этих спутников и проводить самостоятельно весь необходимый ему анализ.

Технология спутникового мониторинга включает отбор малооблачных снимков, предварительную обработку космических снимков (радиометрическую калибровку, атмосферную коррекцию) и их автоматизированное дешифрирование (спектральные классификации, вычисление индексов, автоматическую векторизацию). Результаты дешифрирования оформляются в виде серий тематических карт с наложенной разработанной автором палитрой в системе RGB (Red, Green, Blue) на изображение озера.

Обсуждение результатов

В результате обработки спутников снимков AVHRR была получена серия картосхем распределения температуры воды на поверхности оз. Гусиное в 2020 г. (рис. 1).

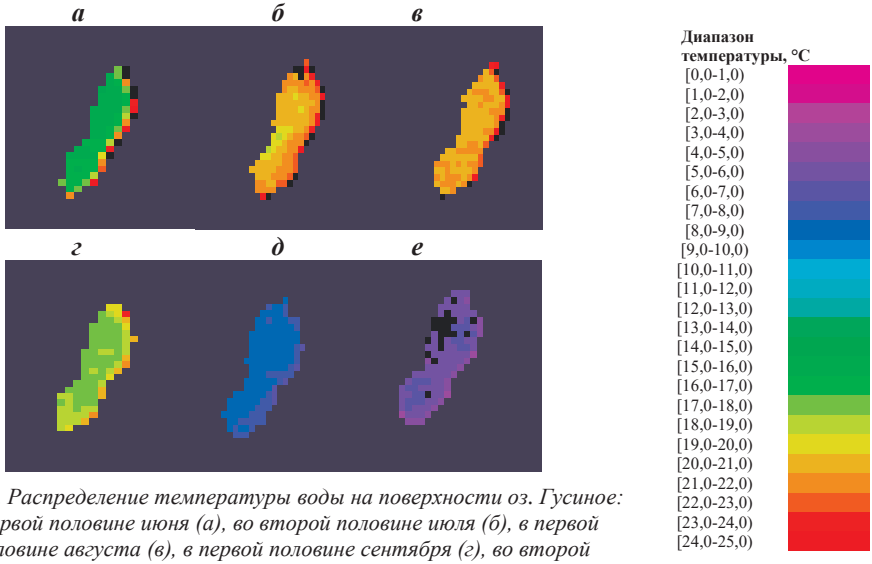


Рис. 1. Распределение температуры воды на поверхности оз. Гусиное: в первой половине июня (а), во второй половине июля (б), в первой половине августа (в), в первой половине сентября (г), во второй половине октября (д), в первой половине ноября (е) 2020 г.

На основе анализа спутниковых изображений были оценены средние значения и значения среднеквадратического отклонения (СКО) температуры на поверхности оз. Гусиное в различные дни съемки в 2020 г.

На рис. 2 графически отображен ход средних температур и значений СКО на поверхности оз. Гусиное в 2020 г. Зная среднее арифметическое элементов выборки и СКО, можно определить диапазон, к которому принадлежит основная масса значений температуры поверхности.

По средней величине температуры поверхности можно сопоставить разновременные снимки и определить, что наибольшее значение данного параметра для оз. Гусиное наблюдалось во второй половине июля и составило 20,4 °С в 2020 г.

В работе показано, что и минимальное значение СКО в 2020 г., равное 0,1 °С, наблюдалось в период гомотермии, максимальное, равное 0,5 °С, отмечалось в период наибольшего прогрева.

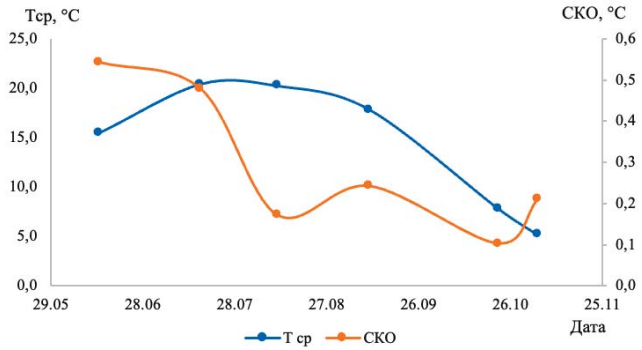


Рис. 2. Ход средних значений и среднеквадратического отклонения температуры воды на поверхности оз. Гусиное

Заключение

В ходе работы были определены характеристики температурного режима оз. Гусиное с применением данных дистанционного спутникового зондирования за 2020 г.

Показана наглядность получаемой выходной информации. В дальнейшем исследование будет продолжено и посвящено оценке межгодовой изменчивости параметров температурного режима оз. Гусиное.

Список литературы

1. *Вершинина Д. Г.* Пути снижения неблагоприятного воздействия ОАО «Гусиноозерская ГРЭС» на окружающую среду // Новые экологобезопасные технологии для устойчивого развития регионов Сибири : материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Улан-Удэ : Изд-во ВСГТУ, 2005. Т. 1. С. 3–8.

2. Водные объекты, Гусиное озеро. URL: https://water-rf.ru/Водные_объекты/116/Гусиное_озеро

3. Оценка влияния сброса теплых вод Гусиноозерской ГРЭС на динамику ледового режима озера Гусиное. URL: http://ej.kubagro.ru/2016/02/pdf/22.pdf

4. Спутники сери NOAA. URL: http://mapexpert.com.ua

5. *Сутырина Е. Н.* Реакция стока р. Селенги на изменение интенсивности осадков и состояния водосборного бассейна // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле. 2015. Т. 13. С. 120–130.

6. *Сутырина Е. Н.* Дистанционные методы оценки температуры поверхности воды оз. Байкал // Естественные и технические науки. 2006. № 5. С. 163.

7. Геоэкологическая оценка загрязнения озера Гусиного стойкими органическими загрязнителями / Г. С. Ширапова, В. Б. Батоев, А. И. Вялков, С. В. Морозов // Вестник Бурятского государственного университета. Спецвыпуск В. 2012. С. 280–283.

УДК 911.9

К вопросам изучения водно-эрозионных процессов рек криолитозоны

Т. В. Турутина (turutina.tatyana@yandex.ru)

ФГБУ «Государственный гидрологический институт», Санкт-Петербург

Аннотация. Рассматриваются вопросы эрозионных процессов рек Ямала в связи с ростом температуры воздуха и изменением ее внутригодового распределения в ЯНАО.

Ключевые слова: Ямал, средние реки, криолитозона, водно-эрозионные процессы, гранулометрия, донные отложения.

Введение

Изменение климата северных регионов, активное промышленное освоение территорий определяет актуальность исследования водно-эрозионных процессов рек, расположенных в криолитозоне [1–5]. Повышение температуры воздуха в целом и перераспределение таковой в течение года приводит к переменам в состоянии речных систем в центральной части полуострова Ямал. Углубление и расширения русла рек в результате русловых деформаций, а также усиление развития овражной эрозии на водосборах рек этого региона приводит к увеличению выноса в русло более крупного материала. Все это определяет изменения стока взвешенных наносов и изменению состава донных отложений [1–5].

Материалы

С 2004 г. в рамках договора о мониторинге на территории ЯНО, Бованенковского ГКМ ФГБУ «ГГИ» проводятся режимные метеорологические и гидрологические наблюдения. По программе полевых наблюдений осуществляется отбор проб донных отложений и взвешенных наносов. На рис. 1 приведены кривые гранулометрического состава донных отложений р. Се-Яха за период наблюдений 2004–2019–20 гг. В табл. 1 приведены параметры этих гранулометрических кривых: $D_{25\%}$, $D_{50\%}$, $D_{75\%}$ – квантили крупности донного отложений; D – межквартильный размах $D_{75\%}$–$D_{25\%}$. На рис. 2 приведены график температуры воздуха для двух климатических периодов 1961–1990 и 1991–2019 гг. для м/станции Новый Порт. На рис. 3 приведено внутригодовое распределение среднемесячной температуры воздуха для указанных климатических периодов.

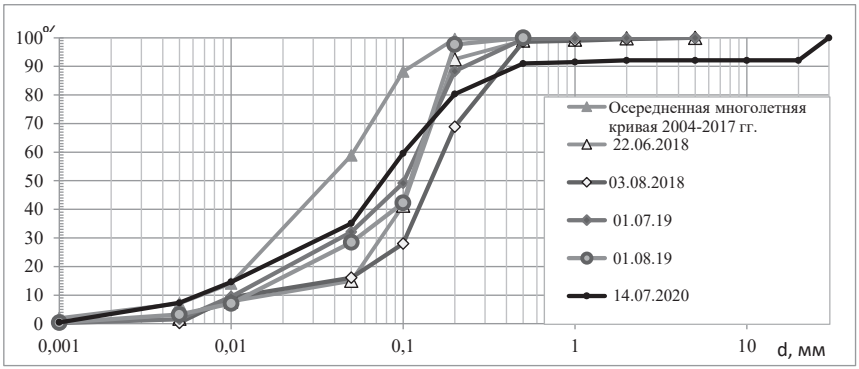


Рис. 1. Интегральные кривые гранулометрического состава проб донных отложений за период наблюдений с 2004 по 2020 г., р. Се-Яха, основной гидрологический пост

Таблица

Параметры гранулометрических кривых: $D_{25\%}$, $D_{50\%}$, $D_{75\%}$ – квантили крупности грунта; D – межквартильный размах $D_{75\%}–D_{25\%}$

Дата	25 %	50 %	75 %	75–25 %
Осредненная кривая	0,02	0,04	0,07	0,05
22.06.2018	0,07	0,11	0,17	0,10
03.08.2018	0,08	0,14	0,23	0,15
01.07.2019	0,03	0,10	0,18	0,15
01.08.2019	0,04	0,10	0,17	0,13
14.07.2020	0,02	0,08	0,18	0,16

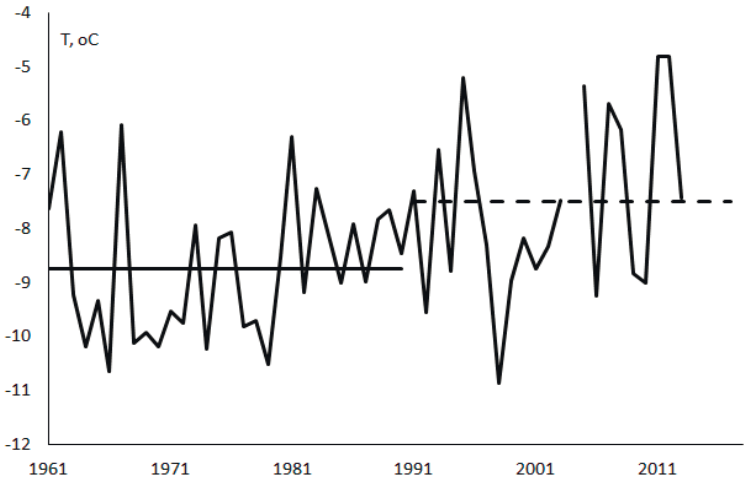


Рис. 2. Среднегодовая температура воздуха для двух климатических периодов 1961–1990 и 1991–2019 гг. для м/станции Новый Порт

Рис. 3. Внутригодовое распределение среднемесячной температуры воздуха для двух климатических периодов

Анализ

Из результатов наблюдений видно, что гранулометрический состав за прошедшие 3 года значительно укрупнился. С начала наблюдений и до 2017 преобладают фракции крупной пыли и песка с диаметром частиц от 0,05–0,01 и 0,1–0,05 мм. В 2018 г. акценты несколько смещаются в область укрупнения. В пробах донных отложений, отобранных на основном гидрологическом посту р. Се-Яха обнаружен гравий (диаметр составляет 1–2 мм для мелкого гравия и 2–5 для среднего) с процентным содержанием в пробах от 0,2 до 3–3,5 %. В 2020 г. в робах кроме мелкого и среднего гравия отмечено появление гальки размером 30×22×16 мм. Причем процентное содержание гальки уже около 8 % от веса пробы.

Хочется отметить, что при обследовании рек на территории средней части полуострова гранулометрический состав проб донных отложений был однородным, как по ширине, так и по длине водотоков. В отобранных пробах преобладали фракции пыли (диаметр частиц от 0,01 до 0,1 мм, процентное содержание до 85 %). Песок был представлен мелкой фракцией (диаметр частиц от 0,1–0,2 мм, содержанием до 15 %), реже средней фракцией с содержанием до 5 %. С 2018 г. процентное содержание песчаных фракций существенно увеличилось. Это свидетельствует о том, что идет усиление процессов деформации русла и различных форм эрозии. Согласно данным, приведенным в табл. 1, гранулометрический состав за 16 лет в среднем изменился на 0.07 мм. При этом в среднем, температура в ЯНАО увеличилась на 1,3 °С. При незначительном изменении среднемесячной температуры воздуха в летне-осенний период, для зимних и весенних месяцев увеличение температуры воздуха в среднем составило 2,26 °С. При этом потепление в период весенне-летнего половодья усиливает интенсификацию процессов механической эрозии на водосборе. Совместно с процессами протаивания русловых грунтов это приводит к принципиальному различию в гранулометрическом составе донных отложений.

Выводы

Существенное потепление в ЯНАО определяет изменение условий формирования стока наносов. Наряду с более интенсивными процессами почвенной

эрозией становятся более активными механизмы размыва русел рек, сложенных многолетнемерзлыми породами. Все это приводит к изменениям гранулометрического состава донных отложений. Увеличение среднегодовой температуры воздуха на 1,3 °С и перемены в распределении температуры воздуха в течение года привело к увеличению интенсивности процессов эрозии, как в русле, так и на водосборе, увеличиваются темпы развития эрозий разных видов, в том числе и процессы термоэрозии и солифлюкции.

Список литературы

1. *Губарьков А. А.* Взаимосвязь гидрологических и криогенных процессов в бассейнах малых рек и на побережье Карского региона : автореф. дис. … канд. техн. наук. Тюмень, 2009. 16 с.

2. *Зайцев А. А., Тананаев Н. И.* Многолетние переформирования сложно-разветвленного русла р. Лены в районе «Якутского разбоя» и влияние на них промерзания грунтов // Геоморфология. 2008. № 1. С. 25–35. https://doi.org/10.15356/0435-4281-2008-1-25-35

3. Сток наносов его изучение и географическое распределени : монография / под общ. ред. А. В. Караушева. Л. : Гидрометеоиздат, 1977.

4. *Зайцев А. А., Тананаев Н. И.* Многолетние переформирования сложно-разветвленного русла р. Лены в районе «Якутского разбоя» и влияние на них промерзания грунтов // Геоморфология. 2008. № 1. С. 25–35. https://doi.org/10.15356/0435-4281-2008-1-25-35

5. *Тананаев Н. И.* Влияние многолетнемерзлых грунтов на сток взвешенных наносов и русловые процессы // Динамика овражно-балочных форм и русловые процессы. М. : Изд-во МГУ, 2002. С. 107–111.

6. *Чалов Р.С.* Русловедение: теория, география, практика. Т. 1. Русловые процессы: факторы, механизмы, формы проявления и условия формирования речных русел. М. : Изд-во ЛКИ, 2008. 608 с.

УДК 556.535.8

Анализ изменений в наблюдательной сети Росгидромета за загрязнением поверхностных вод суши за 2016–2020 гг.

В. О. Хорошевская (vv.2z@yandex.ru), Н. П. Матвеева, М. А. Голубкина

Гидрохимический институт, Ростов-на-Дону

Аннотация. Исследуются изменения в государственной наблюдательной сети (ГНС) Росгидромета за загрязнением поверхностных вод суши (ПВС). Приводятся данные по закрытию и открытию пунктов наблюдений и створов, перевод пунктов наблюдений для работы по сниженной категории за последние пять лет. Рассматривается временная динамика и причины консервации пунктов наблюдений и их створов.

Ключевые слова: сеть наблюдений, загрязнение поверхностных вод суши, пункты наблюдений, створы.

В системе Росгидромета ФГБУ «Гидрохимический институт» (далее ГХИ) является научно-исследовательским, методическим и координационным центром по ведению мониторинга состояния и загрязнения ПВС, специализированным центром по сбору, обработке, хранению гидрохимической информации, получаемой ГНС, базовой организацией Росгидромета по метрологии и стандартизации в области методов и технических средств получения данных о химическом составе и загрязнении водных объектов.

Ежегодное подведение итогов деятельности сети в «Обзорах состояния работ сети наблюдений за загрязненностью поверхностных вод суши Российской Федерации (*по гидрохимическим показателям*)» показало, что в результате сокращения финансирования со второй половины 2013 г. произошло нарушение относительной стабильности работы сети. Особенно это проявилось к 2016 г., когда сеть начало «лихорадить» по составу и категориям пунктов наблюдений.

По данным ГХИ в 2016 г. в списочный состав сети режимных наблюдений за загрязнением ПВС входило 1192 водных объекта, включая 1038 водотоков (1003 реки, 12 проток, 17 рукавов, 4 канала и 2 ручья) и 154 водоема (по 77 озер и водохранилищ, в том числе 1 залив, 1 эстуарий и 2 водоема-охладителя). Численность расположенных на них пунктов и створов наблюдений составляла 1828 и 2499 соответственно [2]. Из-за преобразований, произошедших на сети в течение пяти последующих лет (динамика изменений в составе пунктов и створов представлена на рис. 1–4), в 2020 г. количество водных объектов уменьшилось на 12 рек, 2 озера и 1 водохранилище (на 1,3 %), пунктов наблюдений на 18 (1 %), створов на 11 (0,4 %) [6]. Изменения связаны с закрытием пунктов и створов и уменьшением количества водных объектов при закрытии на них пунктов. Основную долю в уменьшение списочного состава внесли ФГБУ «Камчатское УГМС» и ФГБУ «Среднесибирское УГМС» (далее УГМС), соответственно закрывшие 14 и 10 пунктов, при этом последнее частично компенсировало потери открытием пяти новых пунктов.

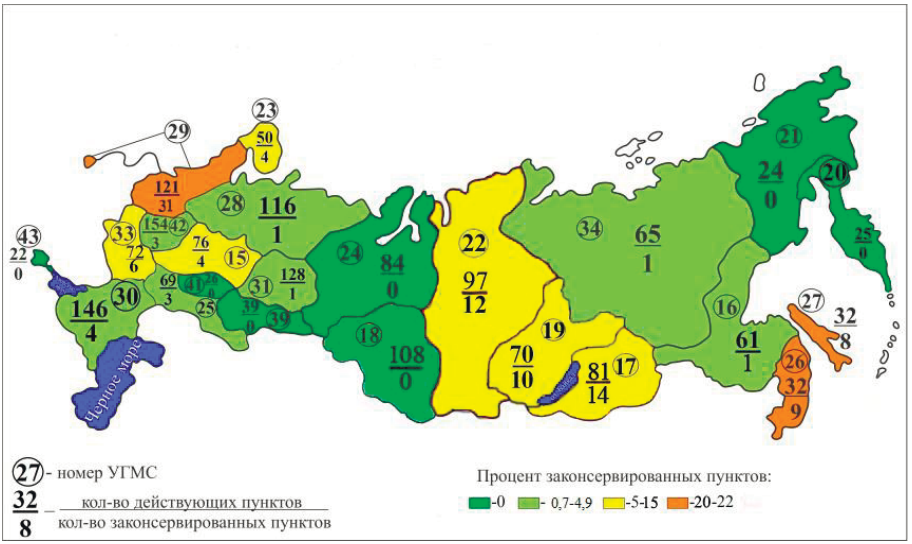


Рис. 1. Состояние сети пунктов наблюдений УГМС на 01.01.2021

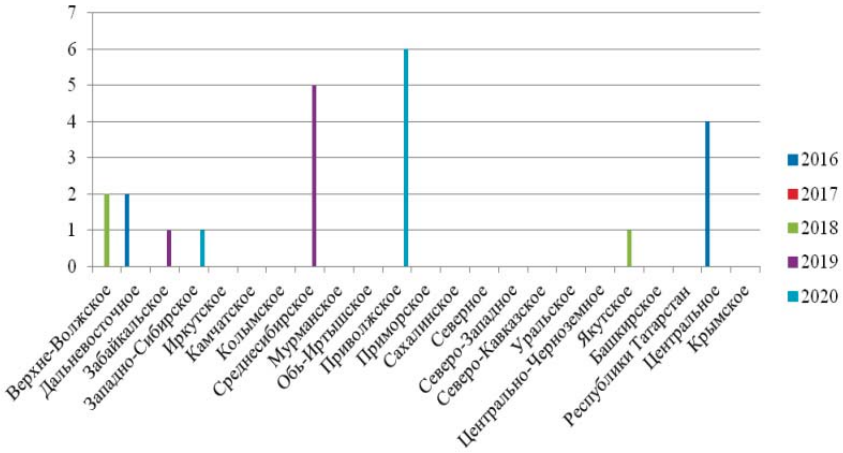


Рис. 2. Открытые пункты – створы наблюдений

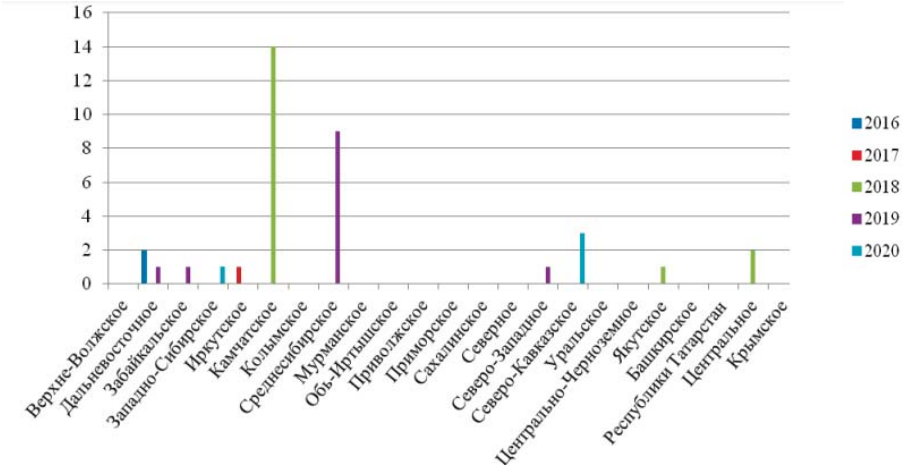


Рис. 3. Закрытые пункты

Всего за этот период некоторыми УГМС были организованы пункты наблюдений на семи новых водных объектах: в 2018 г. Верхне-Волжским 2, Якутским 1, возобновлены наблюдения в Центральном 2 в 2019 г., Среднесибирским 3, Дальневосточным 1 в 2020 г. Западно-Сибирским 1. В то же время были прекращены наблюдения на 22 водных объектах: в 2016 Среднесибирским 1, в 2018 г. Камчатским 14 и Центральным 1, в 2019 г. Среднесибирским 5, в 2020 г. Западно-Сибирским 1 [2–6].

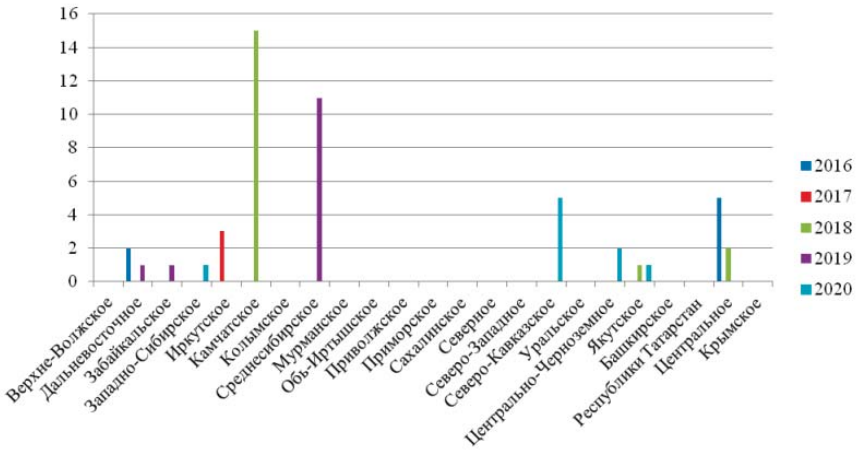


Рис. 4. Закрытые створы

Согласно списочному составу наблюдения проводились УГМС Камчатским, Колымским, Крымским, Обь-Иртышским, Башкирским и Республики Татарстан. В остальных 17 УГМС часть пунктов наблюдений была законсервирована. Динамика временной консервации пунктов представлена на рис. 5.

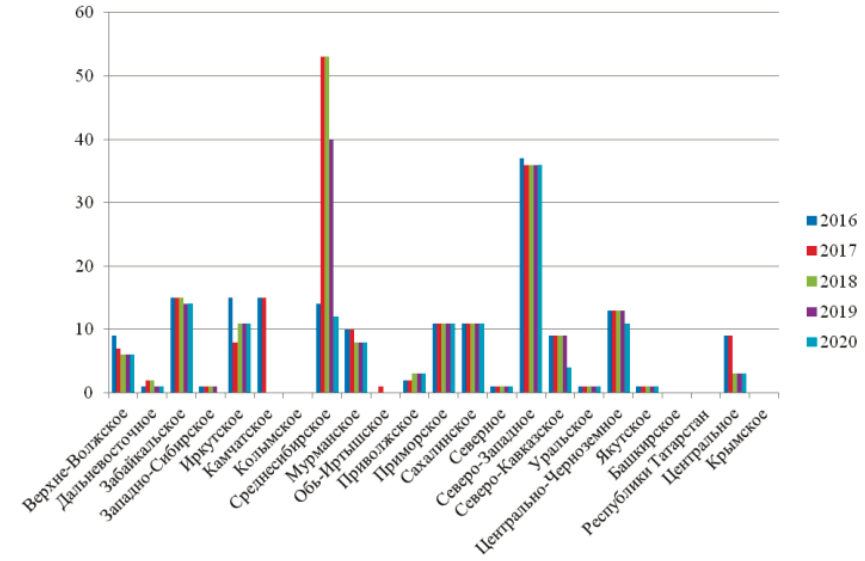


Рис. 5. Законсервированные пункты наблюдений

Из рис. 5 видно, что больше всего законсервированных пунктов было в Среднесибирском УГМС в 2017–2018 гг. и по настоящее время в Северо-Западном, причем, первое стало активно исправлять ситуацию и к 2020 г. их число значительно сократилось. Основной причиной консервации пунктов наблюдений было отсутствие организованного сброса сточных вод; отсутствие наблюдателей; отсутствие транспортного сообщения и почтовой связи для пересылки проб в лабораторию; закрытие гидропостов, наблюдатели которых проводили отбор проб воды. Не проводятся наблюдения в Северо-Западном УГМС на Ладожском и Онежском озерах из-за отсутствия судна, а в Приволжском и Центральном в трансграничных пунктах из-за прекращения финансирования по ФЦП-2012.

В целом по сети в 2020 г. по сравнению с 2016 г. количество законсервированных пунктов снизилось со 134 до 112, водных объектов с 85 до 69, пунктов, работающих по сниженной категории с 72 до 68.

Учитывая длительность отсутствия наблюдений на водных объектах, УГМС необходимо пересматривать свой состав наблюдательной сети и закрывать пункты наблюдений, утратившие первоначальную цель открытия, компенсируя организацией новых пунктов, открытие которых актуально в сегодняшних реалиях.

Распоряжение Росгидромета от 15.01.2015 № 5-р «В целях подготовки Плана мероприятий по оптимизации деятельности государственной наблюдательной сети, ее структуры, порядка открытия, переноса и закрытия наблюдательных подразделений в условиях сокращения объема бюджетных ассигнований» и рекомендации ГХИ разрешали УГМС временно работать ряду пунктов по сниженной категории (рис. 6). Больше всего пострадала сеть Башкирского УГМС, где все пункты категории 3 работают по программе пунктов категории 4. Большое количество пунктов, работающих по сниженной категории, есть в Верхне-Волжском и Уральском УГМС. По истечении пяти лет можно рекомендовать УГМС восстановить работу пунктов по ранее присвоенной категории, или официально перевести их в более низкую категорию [1].

С целью усиления государственного контроля за протекающими в поверхностных водах процессами и получения репрезентативной, своевременной и адресной информации о текущем состоянии водных объектов и тенденциях его изменения для начала следует провести ревизию законсервированных пунктов наблюдений с целью необходимости восстановления их работы, либо закрытия как утративших свое значение для мониторинга с одновременным открытием взамен новых с учетом источников загрязнения возникших в результате интенсификации антропогенной деятельности. Это позволит использовать полученную информацию для поддержания принятия решений в области охраны поверхностных вод, как на Федеральном, так и на территориальных и локальных уровнях управления.

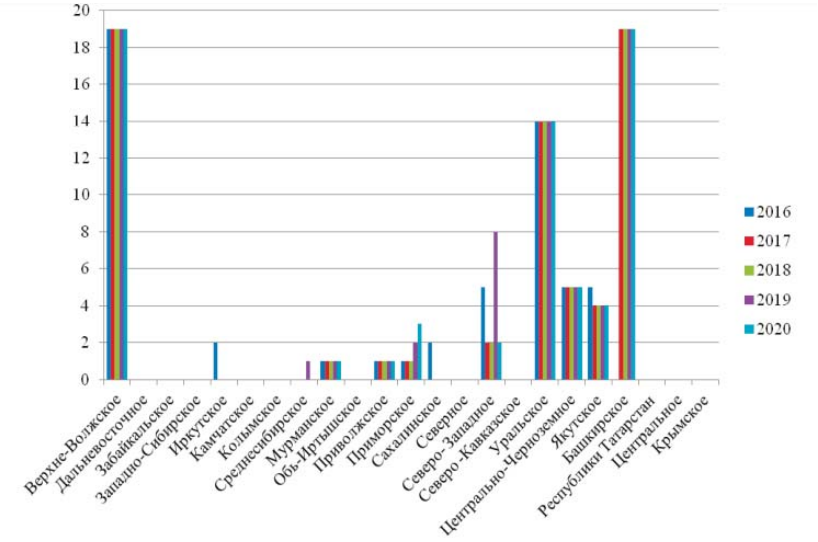


Рис. 6. Пункты наблюдений, работавшие по временно сниженной категории в 2016–2020 гг.

Список литературы

1. РД 52.24.309-2016. Организация и проведение режимных наблюдений за состоянием и загрязнением поверхностных вод суши, 2016 / Н. П. Матвеева [и др.]. Ростов н/Д : Гидрохим. ин-т, 2016. 100 с.

2. Обзор состояния работ сети наблюдений за загрязненностью поверхностных вод суши Российский федерации (*по гидрохимическим показателям*), 2016 / Н. П. Матвеева [и др.]. Ростов н/Д : Гидрохимический институт, 2017. 150 с.

3. Обзор состояния работ сети наблюдений за загрязненностью поверхностных вод суши Российский федерации (*по гидрохимическим показателям*), 2017 / Н. П. Матвеева [и др.]. Ростов н/Д : Гидрохим. ин-т,, 2018. 158 с.

4. Обзор состояния работ сети наблюдений за загрязненностью поверхностных вод суши Российский федерации *(по гидрохимическим показателям*), 2018 / Н. П. Матвеева [и др.]. Ростов н/Д : Гидрохим. ин-т,, 2019. 179 с.

5. Обзор состояния работ сети наблюдений за загрязненностью поверхностных вод суши Российский федерации (*по гидрохимическим показателям*), 2019 / Н. П. Матвеева [и др.]. Ростов н/Д : Гидрохим. ин-т,, 2020. 180 с.

6. Обзор состояния работ сети наблюдений за загрязненностью поверхностных вод суши Российский федерации (*по гидрохимическим показателям*), 2020 / Н. П. Матвеева [и др.]. Ростов н/Д : Гидрохим. ин-т, 2021. 176 с.

УДК 504.455

Динамика содержания металлов в воде Сургутского водохранилища

Е. А. Шорникова (capucin72@mail.ru)
Сургутский государственный университет, Сургут

Аннотация. Изучено содержание металлов в воде водохранилища-охладителя тепловых электростанций на севере Западной Сибири в прибрежной части акватории в 2016–2020 гг. Выявлено пространственное распределение и разногодичная динамика концентраций металлов. Отмечено антропогенное воздействие селитебных зон, прилегающих к водному объекту.

Ключевые слова: мониторинг, водные экосистемы, водоем-охладитель, гидрохимические показатели, антропогенная нагрузка, тепловое загрязнение, органические вещества, биогенные ионы, металлы, оценка качества воды, индикаторы антропогенной нагрузки.

Активное освоение Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции и сопутствующее развитие территории севера Западной Сибири во второй половине XX в. потребовало значительного количества электроэнергии. Для электроснабжения промышленной и городской инфраструктуры в окрестностях города Сургута были построены и последовательно запущены в эксплуатацию две крупные тепловые электростанции, работающие на попутном нефтяном газе – Сургутская ГРЭС-1 в 1972 г. и Сургутская ГРЭС-2 в 1985 г. Для охлаждения циркуляционной воды в системе водного хозяйства электростанций на расстоянии 8,5 км от устья р. Черная было сооружено объединенное водохранилище-охладитель. Площадь акватории водохранилища 35 км^2, емкость 14,5 млн м^3, средняя глубина 5 м, максимальная глубина 7 м [4; 7].

Основной характер антропогенного воздействия на экосистему водохранилища проявляется в тепловом загрязнении, которое обусловливает увеличение среднегодовой температуры воды и отсутствие ледостава, а следовательно, изменение гидродинамического и гидрохимического режима водного объекта. Кроме того, в границах площади водосбора реки Черная и в прибрежной зоне водохранилища расположены многочисленные садово-огороднические товарищества (СОТ) горожан, железная дорога, а также промышленные зоны других предприятий г. Сургута и Сургутского района.

Объектом исследования является объединенный водоем-охладитель (водохранилище) Сургутских ГРЭС-1 и ГРЭС-2, расположенный на территории города Сургута Ханты-Мансийского автономного округа – Югры. Фоновые наблюдения для оценки характера и интенсивности антропогенной нагрузки осуществлялись на р. Черной выше по течению от плотины ГРЭС. Река Черная – сравнительно небольшой правобережный приток р. Оби в среднем ее течении. Длина реки до устья составляет 93,0 км, площадь водосбора – 776 км^2 [3].

Отбор проб поверхностных вод осуществлялся в соответствии с ГОСТ 31861-2012 [2] в 15 контрольных створах в прибрежной зоне акватории водохранилища в период осенней межени 2016–2020 гг. Схема расположения точек от-

бора проб воды представлена на рис. 1. Пробы воды анализировались с использованием термометрического (температура), потенциометрического (pH, электропроводность) методов, концетрации металлов (Cu, Cr, Ni, Pb, Mn, Zn, Fe) определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии [5; 8]. Статистическая обработка полученных данных была выполнена в программе StatSoft Statistica v6.0 Rus. Полученные концентрации подвижных форм металлов сравнивались с нормативами ПДК$_{вр}$ [6].

Рис. 1. Схема расположения точек отбора проб воды

Результаты исследования физико-химических показателей и концентраций металлов в воде водохранилища представлены в табл. 1–2.

Вода водохранилища-охладителя в прибрежной зоне акватории характеризуется преимущественно как нейтральная, мало минерализованная. Отмечен переход pH в область щелочных значений, что не характерно для водных объектов данной территории.

Таблица 1

Значения температуры, pH, электропроводности воды (2016–2020 гг.)

Год исследования	Температура воды, °С	pH, отн. ед	Электропроводность, µS
2016	$\frac{4{,}70 - 23{,}5}{14{,}50 \pm 3{,}21}$	$\frac{6{,}67 - 8{,}10}{7{,}42 \pm 0{,}27}$	$\frac{84{,}00 - 180{,}00}{131{,}70 \pm 21{,}17}$
2018	$\frac{1{,}80 - 13{,}50}{4{,}90 \pm 2{,}19}$	$\frac{6{,}50 - 7{,}40}{6{,}97 \pm 0{,}12}$	$\frac{93{,}70 - 123{,}80}{108{,}00 \pm 4{,}77}$
2020	$\frac{4{,}00 - 18{,}00}{9{,}30 \pm 1{,}58}$	$\frac{6{,}79 - 7{,}35}{7{,}00 \pm 0{,}08}$	$\frac{19{,}00 - 123{,}00}{99{,}70 \pm 14{,}68}$

Примечание. В числителе – минимальные и максимальные значения; в знаменателе – средние значения по водохранилищу ± доверительный интервал.

Таблица 2

Содержание тяжелых металлов в водохранилище (2016–2020 гг.)

Металл	Концентрация в 2016 г. (мкг/дм^3)	Концентрация в 2018 г. (мкг/дм^3)	Концентрация в 2020 г. (мкг/дм^3)
Железо	н/д	2027,58–4499,48/3010,63	408,12–3383,83/1060,47
Марганец	1,31–9,23/2,70	1,41–22,27/2,85	8,82–163,46/36,14
Медь	0,63–0,96/0,78	1,05–7,04/2,72	0,002–4,34/0,3
Цинк	7,29–9,88/8,99	5,33–32,49/10,87	72,5–3733,44/151,04
Никель	0,61–2,58/0,86	0,14–12,7/2,45	1,05–7,12/2,44
Свинец	2,79–4,92/3,97	0,14*1,97/0,47	н/д
Хром	0,43–1,28/0,94±0,18	н/д	<0,0025

Примечание. В числителе – минимальные и максимальные значения; в знаменателе – средние значения по водохранилищу; н/д – нет данных.

Среди исследованных металлов можно выделить несколько типоморфных для данной ландшафтно-климатической зоны. В первую очередь это железо, концентрации которого превышают нормативы ПДК$_{вр}$ (100 мкг/дм^3) в 100 % отобранных проб воды с кратностью от 4 до 44 раз. К типоморфным элементам, имеющим природное происхождение, также относятся марганец, в некоторой степени медь и цинк. Природное происхождение металлов в водах бассейна Средней Оби обусловлено формированием подвижных форм поливалентных катионов металлов при кислых значениях pH в таежных ландшафтах с последующим вымыванием их из почв площади водосбора в водные объекты.

Отмечено превышение нормативов ПДК$_{вр}$ концентраций марганца (10 мкг/дм^3) в некоторых пробах до 2,2 раз в 2018 и до 16,3 раз в 2020 г. В 2020 г. средняя концентрация марганца также превышает нормативное значение.

Для меди отмечается превышение нормативной концентрации (1 мкг/дм^3) в пробах воды в 2018 и 2020 гг., причем в 2018 г. превышение норматива отмечено в 100 % проб, максимальная концентрация составила 7 ПДК$_{вр}$.

Для концентрации цинка наблюдается увеличение концентраций с 2016 к 2018 и 2020 гг. с аномально высокими значениями в 2020 г., когда даже средняя концентрация превышает норматив ПДК$_{вр}$ (10 мкг/дм^3) в 15,1 раз.

Никель, свинец и хром имеют в водохранилище техногенное происхождение. Подтверждением этому является обнаружение подвижных форм этих металлов на участке акватории с техногенным характером антропогенной нагрузки – в районе железнодорожного маста, а также ниже плотины ГРЭС. Случаи превышения нормативов ПДК$_{вр}$ отмечались разово только для никеля в 2018 г. Однако разброс значений концентраций металлов по участкам акватории значителен и составляет 85 раз для концентрации никеля и 14 раз для свинца в 2018 г. Такую неравномерность концентраций можно объяснить изменениями гидродинамического режима водохранилища под действием сброса нагретых циркуляционных вод. Так, в научной печати исследователи отмечают, что под действием тепловых сбросов в водоемах-охладителях возникают гидродинамические зоны транзитного потока направленного движения теплой и холодной воды, образуются водоворотные зоны циркуляции [1].

Средние концентрации металлов в воде водохранилища в разные годы изменялись в следующих рядах:

- 2016 г.: Zn > Pb > Mn > Ni > Cr > Cu.
- 2018 г.: Fe > Zn > Mn > Cu > Ni > Pb.
- 2020 г.: Fe > Zn > Mn > Ni > Cu > Cr > Cd.

Выявлены достоверные различия средних значений температуры воды, концентраций меди, свинца и никеля, марганца в разные годы. Достоверность различий средних значений концентраций этих металлов находит отражение и в рядах их распределения. Что подтверждает неравномерность поступления, циркуляции и пространственного распределения соединений металлов по акватории водохранилища.

Заключение

В пробах воды водохранилища-охладителя Сургутских ГРЭС отмечены закономерно высокие концентрации типоморфных для данной территории металлов: железа, марганца, меди, цинка с превышением (постоянным или эпизодически-локальным) нормативов $ПДК_{вр}$.

Результаты исследований за ряд последних лет показали увеличение средних концентраций марганца, никеля и цинка, массовая концентрация меди снизилась.

Статистический анализ полученных результатов позволил выявить индикаторы техногенной нагрузки от тепловой электростанции и сопутствующих антропогенных воздействий: высокая температура воды, переход pH в область слабощелочных значений, высокие концентрации свинца, никеля и хрома на участках акватории ниже плотины ГРЭС.

Список литературы

1. Назначение и особенности условий работы водоемов-охладителей тепловых и атомных электростанций / Л. Н.Антонова, Г. И.Канюк, Т. Е. Погонина, Д. М.Михайский, Л. Н.Омельченко, А. Н. Фокина // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2012. № 2/10 (56). С. 56–63.

2. ГОСТ 31861-2012. Вода. Общие требования к отбору проб.

3. *Лезин В. А.* Реки ХМАО. Справочное пособие. Тюмень : Вектор Бук, 1999. 160 с.

4. Обзор состояния окружающей среды города Сургута 1993–2003 гг. Сургут : Дефис, 2003. 148 с.

5. ПНД Ф 14.1:2.253-09. Методика выполнения измерений массовых концентраций Al, Ba, Be, V, Fe, Cd, Co, Li, Mn, Cu, Mo, As, Ni, Sn, Pb, Se, Sr, Ti, Cr, Zn в природных и сточных водах методом атомно-адсорбционной спектроскопии «МГА-915». М., 2009. 14 с.

6. Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения : приказ Минсельхоза России от 13.12.2016 № 552.

7. *Шорникова Е. А., Рыбчак Е. А.* Гидрохимическая характеристика прибрежных участков акватории Сургутского водохранилища // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2018. № 1. С. 88–101.

8. *Шорникова Е. А.* Методические рекомендации по планированию, организации и ведению мониторинга поверхностных водотоков: гидрохимические и микробиологические методы. Сургут : Дефис, 2007. 88 с.

Секция

ОПАСНЫЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ И ПРОЦЕССЫ

УДК 551.515.6, 551.510.522

О вихревых критериях прогнозирования полярных мезоциклонов

Н. В. Вазаева (vazaevanv@ifaran.ru)[1,2], О. Г. Чхетиани (ochkheti@gmail.com)[1]

[1]*Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН, Москва*
[2]*Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва*

Аннотация. На основе данных реанализа и модели WRF-ARW проанализированы случаи полярных мезоциклонов (ПМЦ) над Норвежским и Баренцевым морями в 2013 г. и в окрестностях Северной земли в 2015 г. Подобрана комбинация критериев, достаточных для идентификации ПМЦ и анализа их размера и интенсивности в удобной и понятной форме: оценки спиральности как интегральной характеристики, относящейся к целостным вихревым образованиям и кинематического числа завихренности.

Ключевые слова: полярные мезоциклоны, пограничный слой, численное моделирование, спиральность, кинематическое число завихренности.

Введение

Проблема поиска общепринятого универсального метода идентификации полярных мезоциклонов (ПМЦ) до настоящего времени окончательно не решена [1]. По данным Европейской рабочей группы по ПМЦ [2]: «Термин ПМЦ является общим термином для всех мезо-α и мезо-β циклонических вихрей, направленных к полюсу от главного полярного фронта. Термин «ПМЦ» следует использовать только для интенсивных морских полярных мезомасштабных циклонов с масштабом до 1000 км с приповерхностным ветром, превышающим 15 м/с». ПМЦ имеют относительно короткое время жизни – 3–36 ч [3] и часто возникают во время адвекции холодного воздуха в направлении относительно теплой воды. Скорость движения центра ПМЦ составляет примерно 50 км/ч. Проблема прогноза ПМЦ чрезвычайно актуальна, так как ПМЦ сопровождается сильным приземным ветром, суровой погодой и сильными осадками: снегопадами, порывами ветра, сильными океанским волнами, большим температурным градиентом между океаном и атмосферой.

ПМЦ в Северном полушарии формируются в основном в Арктическом регионе и Северной Атлантике и за период своего существования способны перемещаться на расстояния порядка 100–2000 км [4; 5]. По разным оценкам [6], в будущем прогнозируется снижение частоты ПМЦ в этой области на 10–15 % и уменьшение их интенсивности, но ближе к Скандинавии повысится риск возникновения ПМЦ и, соответственно, экстремальных климатических явлений.

Изначально ПМЦ были обнаружены при анализе карт погоды и данных метеостанций [7], а затем были получены по характеристикам облаков (спиралевидной или запятой), наблюдаемым на спутниковых снимках [8]. Данные реанализа, используемые повсеместно, тем не менее сами по себе неоднозначно идентифицируют ПМЦ, но могут быть использованы для запуска численных моделей [9]. Спутниковые изображения могут использоваться в качестве данных ассимиляции для повторного анализа и могут обозначить область интенсивных ПМЦ [5], но не имеют достаточного разрешения для точной идентификации ПМЦ. Кратковременный характер большинства ПМЦ и их возникновение в отдаленных от основной сети наблюдений районах может привести к неадекватной оценке количества, размера и интенсивности ПМЦ. Поэтому в последние годы большую популярность приобрели методы численного моделирования. Дополнительное использование метода spectral nudging для усиления заданного крупного масштаба при моделировании приводит к улучшению методики обнаружения ПМЦ.

Традиционные методы идентификации ПМЦ указаны в [10]: поля давления/геопотенциальной высоты и поля (геострофической) завихренности. Эти традиционные методы зачастую неправильно оценивают размеры ПМЦ [10]. Использование поля давления и геопотенциальной высоты дает противоречивые результаты в случае сильного фонового потока или в случае нескольких ПМЦ, расположенных близко друг к другу. Эти критерии идентификации хороши только для крупных и интенсивных ПМЦ. Проблема методов обнаружения ПМЦ с использованием поля завихренности состоит в том, что одна только завихренность не может различить сдвиговое и искривленное течение. Поэтому в [10] предлагаются кинематические методы (или Q-методы), а именно кинематическое число завихренности:

$$W_k = \frac{\|\Omega\|}{\|S\|} = \frac{\sqrt{\zeta^2}}{\sqrt{{D_h}^2 + Def^2 + Def'^2}}, \quad (1)$$

где ζ – вертикальная компонента вектора завихренности, D_h – горизонтальная дивергенция, Def – деформация растяжения, Def' – деформация сдвига.

Q-методы позволяют учитывать вращение и деформацию потока, и уже успешно применялись в исследованиях тропических циклонов. Сходство тропических циклонов и ПМЦ описано в [11]. Кинематическое число завихренности является одним из интегральных параметров, которые использовались в нашем исследовании.

Выбор критериев прогноза

В настоящем исследовании были рассмотрены случаи возникновения ПМЦ в период с 29 по 31 марта 2013 г. над Баренцевым и Норвежским морями, а также проанализирован период с 20 августа по 13 сентября 2015 г. над Карским и морем Лаптевых в районе Северной Земли, где явного ПМЦ не наблюдалось.

С помощью одного только кинематического числа завихренности не просто однозначно определить, является ли данное вихревое образование ПМЦ, хотя оно позволяет точно определить центр ПМЦ. Был выбран дополнительный критерий. Для этого были рассмотрены основные критерии, характеризующие формирование и движение тропических циклонов:

- доступная конвективная потенциальная энергия (CAPE),
- энергия конвективного подавления (CIN),
- относительная спиральность (Storm-relative environmental helicity, storm-relative helicity).

Относительная спиральность вычисляется по формулам:

$$SPEH = \int_0^h \left[(\boldsymbol{v} - \boldsymbol{c}) \cdot \left(\boldsymbol{k} \times \frac{\partial \boldsymbol{v}}{\partial z} \right) \right] \mathrm{d}z \,, \quad (2)$$

здесь $\boldsymbol{v}$ – горизонтальная компонента скорости ветра, $\boldsymbol{c}$ – скорость центра ПМЦ, h между 1 и 3 км, k – единичный вертикальный вектор, $\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial z}$ – сдвиг скорости ветра; $H = (\mathbf{v} - \mathbf{v}_{mean}) \frac{\partial \boldsymbol{u}}{\partial z} - (\boldsymbol{u} - \boldsymbol{u}_{mean}) \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial z}$, здесь $\boldsymbol{u}$, $\boldsymbol{v}$ – компоненты скорости ветра в ПМЦ, $\boldsymbol{u}_{mean}, \mathbf{v}_{mean}$ – компоненты скорости центра ПМЦ.

Но эти критерии имеют только диагностический смысл, прогностический потенциал отсутствует, кроме того, существует принципиальная зависимость этих показателей от информации о состоянии верхних слоев тропосферы с редкой аэрологической сетью, а также эти критерии сильно зависят от параметризации конвекции, облачности и т. д.

Было проведено построение основных характеристик: поля завихренности, поля отражаемости, поля облачности, поля спиральности, используемых для детектирования крупных вихревых образований, и показана на примере случая марта 2013 г. над поверхностью Норвежского и Баренцева морей недостаточность этих полей для обнаружения и идентификации всех возникающих ПМЦ.

Индекс спиральности, предложенный М.В. Курганским в 2008 г.:

$$S = \frac{8\pi}{3} \int_0^\infty V^3 dr, \quad (3)$$

где S – индекс спиральности (м^4/с^3), V – тангенциальная скорость ветра (м/с), r – радиус (м), содержащий интеграл от куба тангенциальной скорости ветра, и являющийся, по сути, скоростью разрушения спиральности в приземном слое, пропорциональной мощности силы динамического давления (разрушительной силе вихря), сложен для вычисления и плохо пригоден для оперативного прогноза.

Критерий развития тропических циклонов и ПМЦ, предложенный Г. С. Голицыным в 2012 г.:

$$\frac{(2bt)^{1/2}}{hN} \geq 1,; \quad (4)$$

где b – поток плавучести на нижней границе конвективного слоя, $h(t) = N^{-1}(2bt)^{1/2}$– высота проникающего конвективного слоя, $\vec{t}$ – время, N – частота Брента-Вяйсяля, является необходимым, но не достаточным условием для возникновения интенсивных вихрей. Это комплексный критерий, который выражается через параметры термодинамической неравновесности между океаном и атмосферой: температуру, влажность, статическую устойчивость, время развития – для вычисления требуется много предварительно собранной и

обработанной информации и большой ресурс времени на подготовительные работы.

Для наших целей достаточно эффективным, простым и быстрым способом прогнозирования ПМЦ является использование спиральности как площадной характеристики, относящейся к целостным вихревым образованиям. Для экмановского течения спиральность в данном случае определяется только горизонтальными компонентами завихренности и имеет вид [12]:

$$H(z) = -U(z)\frac{\partial V}{\partial z} + V(z)\frac{\partial U}{\partial z}. \quad (5)$$

Здесь z – вертикальная координата.

Интегральная спиральность равна полусумме квадрата компонент скорости геострофического ветра [12]:

$$H_{int} = \int_0^{\infty} H(z)dz = \frac{1}{2}\left({U_G}^2 + {V_G}^2\right). \quad (6)$$

Хорошая корреляция между интегральной спиральностью и полусуммой квадратов компонент геострофической скорости ветра позволила использовать данные по этим скоростям для построения глобальных или региональных полей спиральности, существенно упрощая процесс построения. Такую оценку спиральности возможно получить максимально быстро, что имеет большой прогностический потенциал, и с достаточной для целей исследования точностью. Далее выбиралась область, в которой рассчитывается усредненное значение оценки спиральности $H_{est} = \bar{H}_S = \overline{\sum_S H_{int}}$.

Численное моделирование и анализ результатов

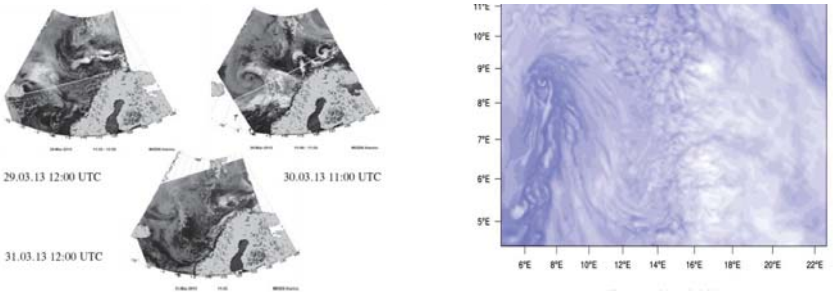
Для численного моделирования была выбрана открытая исследовательская негидростатическая мезомасштабная атмосферная модель WRF (версия 4.1) – Weather Research and Forecasting. Рассчитаны 2 случая: ПМЦ марта 2013 г. и отсутствие ПМЦ в августе 2015 г. Использовались аналогичные сетки и схемы параметризации, представленные в табл. 1.

Таблица 1

Параметры сетки и выбранные схемы параметризации в модели WRF-ARW

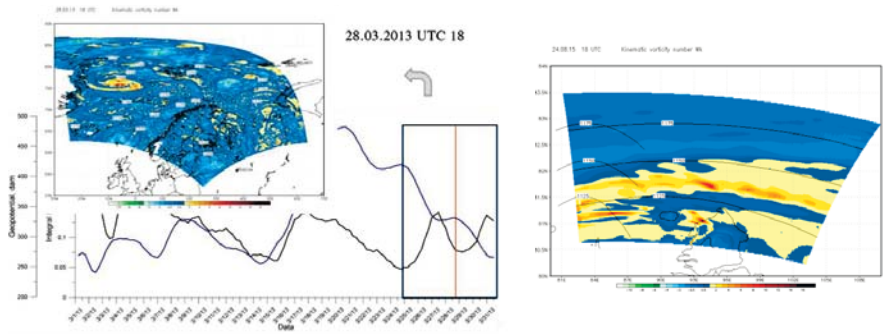
Расчетное время	01.03.2013 00 UTC – 31.03.2013 18 UTC, 20.08.2015 00 UTC – 13.09.2015 18 UTC
Количество вложенных сеток	2
Тип проекции карты	Polar
Шаг сетки	10 000 м (10 км) / 3333 м (3,333 км)
Количество шагов сетки в направлении север – юг	327/109
Количество шагов сетки в направлении восток – запад	207/90
Количество вертикальных уровней	50
Шаг по времени для первой области	60 с
Длинноволновая радиация	CAM/CAM (Community atmosphere model, W. D. Collins et al., 2004)
Поверхностный слой	Monin-Obukhov (Zilitinkevitch)
Модель поверхности земли	Noah, (Chen et al., 2001)
Атмосферный пограничный слой	Mellor-Jamada-Janjic scheme (Janjic, 1994, MWR)

Эти два основных критерия (кинематическое число завихренности и оценка спиральности как площадной характеристики) подтвердили свою эффективность для случаев марта 2013 г. над Норвежским и Баренцевым морями и августа 2015 г. в районе Северной Земли и Карского и моря Лаптевых (рис. 1–4). В таком случае при прогнозе необходимо знать только поле скорости ветра, сложных и долгих вычислений проводить не требуется, что является большим преимуществом для эффективного оперативного прогноза. Областям вихревого движения соответствует значение $W_k > 1$.



а *б*

Рис. 1. а) MODIS-thermo спутниковое изображение.
б) Доля водяного пара по результатам моделирования на WRF-ARW V4.1.
Норвежское и Баренцево моря. 18 UTC 28 марта, 2013, уровень 850 гПа. Явно видны ПМЦ в форме «запятой»



а *б*

Рис. 2. Результаты расчета адаптированной модели WRF-ARW: (а) W_k (заполнено цветом на карте), оценка интегральной спиральности (м $с^{-2}$, черная линия графика) и геопотенциал (дам, синяя линия графика, изолинии на карте) в АПС. 18 UTC 28 марта 2013 г. Уровень 850 гПа. Норвежское и Баренцево моря. ПМЦ. (b) W_k 18 UTC 24 августа, 2015 г. Карское и море Лаптевых. Уровень 850 гПа. Отсутствие явного ПМЦ

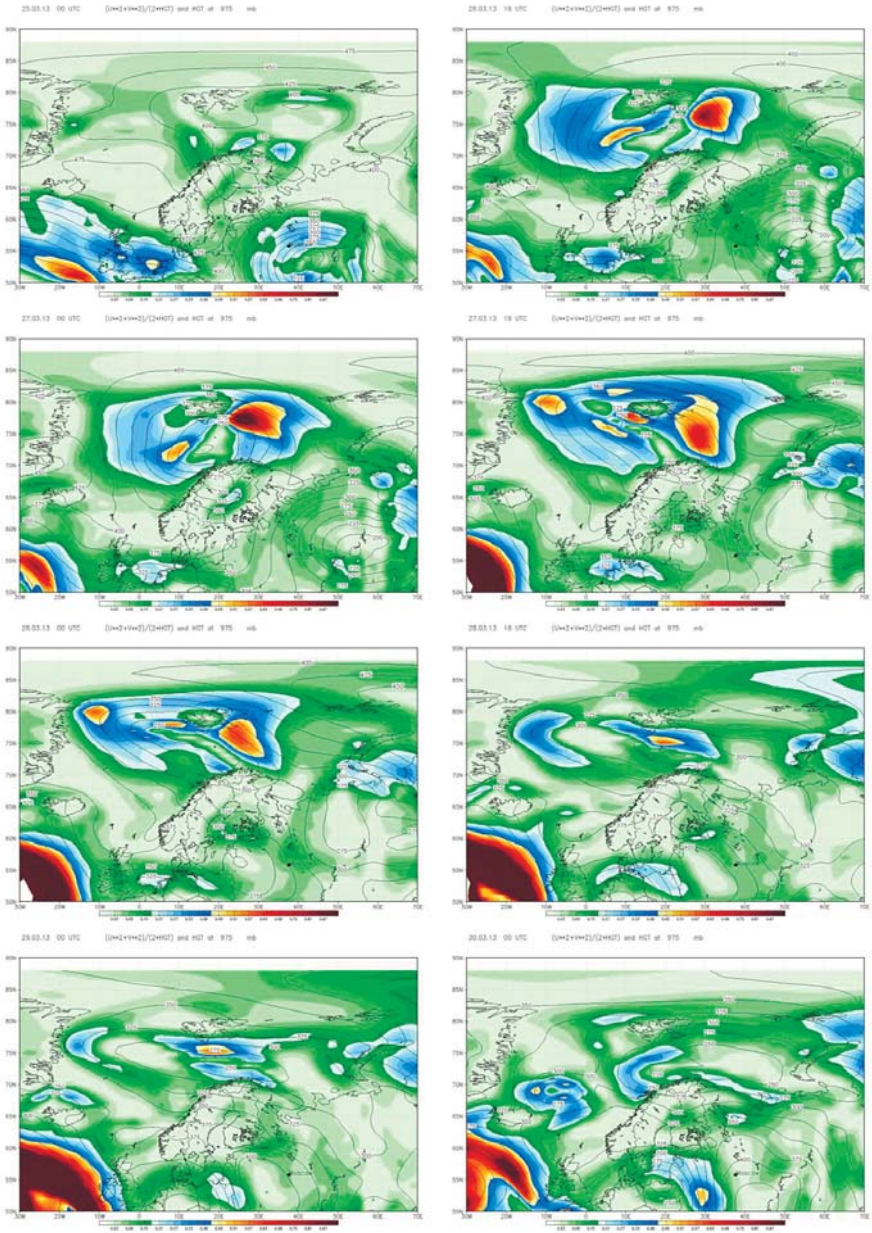


Рис. 3. Оценка интегральной спиральности (м $с^{-2}$, черная линия графика) и геопотенциал (дам, синяя линия графика, изолинии на карте) в АПС. 18 UTC 25–30 марта 2013 г. Уровень 850 гПа. Норвежское и Баренцево моря. ПМЦ

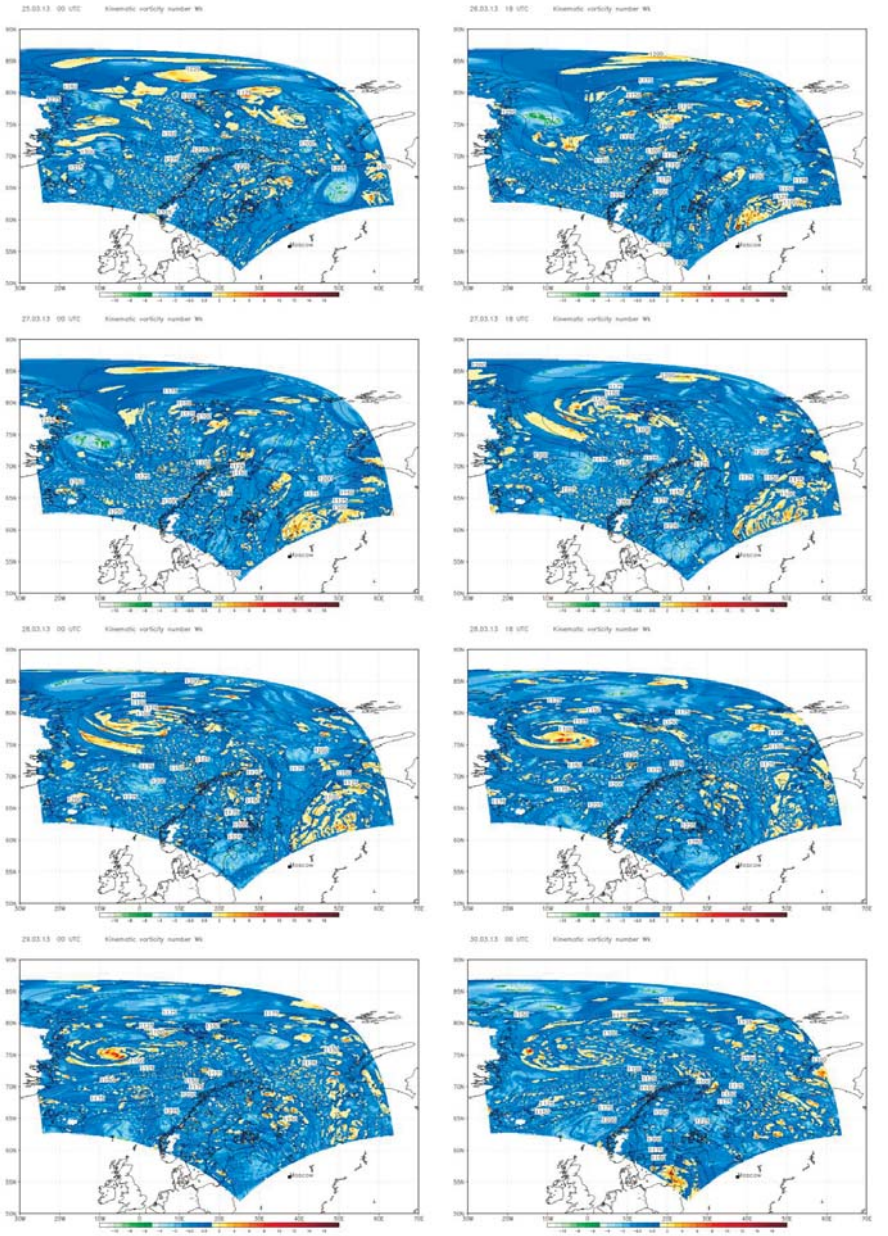


Рис. 4. W_k и геопотенциал (дам, изолинии на карте) в АПС. 18 UTC 25–30 марта 2013 г. Уровень 850 гПа. Норвежское и Баренцево моря. ПМЦ

В последнем случае ПМЦ возникают значительно реже и подтверждено отсутствие ложной идентификации ПМЦ при использовании выбранных критериев. В момент максимальной интенсивности ПМЦ кинематическое число завихренности достигало значений 12–14 единиц. Преимуществом использования кинематического числа завихренности является также четкое изменение этого числа непосредственно в центре возникающих ПМЦ, что позволяет точно указать границы наиболее интенсивной части ПМЦ. Результаты расчета числа кинематической завихренности вместе с описанной выше интегральной спиральностью на первых этапах жизненного цикла ПМЦ показаны на рисунках 1, 2. В 2015 г. кинематическое число завихренности не превышало 4–6 единиц, что соответствовало локальным вихревым образованиям. В исследуемом случае 2015 г. поля завихренности, облачности, спиральности совместно с геопотенциалом ПМЦ явно не детектируются, возможна визуализация только края ПМЦ, возникающего западнее. Критерии, связанные с завихренностью и спиральностью, достаточно четко проявляются в генезисе и развитии ПМЦ и могут использоваться для повышения эффективности и точности методов прогнозирования. Динамика изменения спиральности и кинематического числа завихренности для случая 2013 г. показана на рис. 3, 4. Показано, что в период возникновения ПМЦ интегральная спиральность возрастает. Локальные изменения спиральности граничат с фронтом. Примерно за сутки до образования ПМЦ наблюдалось значительное увеличение спиральности. Средние плотности спиральности крупномасштабных движений составляют 0,3–0,4 м/с^2.

Описанный интегральный критерий спиральности позволяет идентифицировать область генерации ПМЦ. Для более детального анализа интенсивности ПМЦ используется кинематическое число завихренности, которое в то же время характеризует размер и интенсивность ПМЦ. Результаты численного моделирования сравнивались с результатами обработки данных реанализов – ERA5, ERA-Interim и ECMWF. Получили хорошую корреляцию характера изменения оценки спиральности и кинематического числа завихренности (оба критерия находятся по полям скорости), что показывает универсальность выбранных критериев ПМЦ.

Заключение

В рамках исследования получены следующие основные результаты. Подобрана комбинация критериев, достаточных для идентификации ПМЦ и анализа их размера и интенсивности в удобной и понятной форме: оценки спиральности как интегральной квадратной характеристики, относящейся к совокупным вихревым образованиям и кинематического числа завихренности. Использовались данные реанализа и результаты численного моделирования в модели WRF-ARW для ПМЦ над Норвежским и Баренцевым морями в 2013 г. и в окрестностях Северной земли в 2015 г. Отмечено, что локальные минимумы геопотенциала хорошо коррелируют с локальными максимумами спиральности за все время жизни ПМЦ (отрицательный коэффициент корреляции –0,71 для 27–31 марта и –0,95 для 29–31 марта 2013 г.). Локальные изменения спиральности примыкают

к фронту ПМЦ. За сутки до образования ПМЦ наблюдалось значительное увеличение спиральности. Средние плотности спиральности крупномасштабных движений имеют значения 0,3–0,4 м/с^2. В момент максимальной интенсивности ПМЦ кинематическое число завихренности достигает значений 12–14 единиц. Для увеличения статистической достоверности планируется применение выбранного критерия на более широком ансамбле случаев. Данный комбинированный критерий можно использовать в качестве предварительного для процедуры идентификации ПМЦ методами машинного обучения, где в настоящее время в большинстве случаев применяется анализ спутниковых изображений и фиксация определенных облачных структур (например, в форме запятой). Это значительно упростит трудоемкий этап сбора первичных данных.

Исследования выполнены при поддержке РНФ (№ 19-17-00248).

Список литературы

1. Deep Convolutional Neural Networks Capabilities for Binary Classification of Polar Mesocyclones in Satellite Mosaics / M. Krinitskiy P., Verezemskaya, K. Grashchenkov, N. Tilinina Gulev, S. Lazzara // Atmosphere. 2018. Vol. 9, N 11. P. 426.

2. *Rasmussen E. A.* A case study of a polar low development over the Barents Sea // Tellus A. 1985. Vol. 37, N 5. P. 407–418.

3. *Rasmussen E. A.*, *Turner J.* Polar lows. Cambridge : Cambridge University press, 2003. 612 p.

4. *Zahn M. von Storch H., Bakan S.* Climate mode simulation of North Atlantic polar lows in a limited area model // Tellus A*:* Dynamic Meteorology and Oceanography, 2008. Vol. 60, N 4. P. 620–631.

5. Quart. J. Roy / G. Noer, Ø. Saetra, T. Lien, Y. Gusdal // Meteor. Soc. 2011. Vol. 137, N 660. P. 1762–1772.

6. *Romero R., Emanuel K.* Climate change and Hurricane-like extratropical cyclones: Projections for North Atlantic polar lows and medicanes based on CMIP5 models // J. of Climate. 2017. Vol. 30, N 1. P. 279–299.

7. *Harley D. G.* Frontal contour analysis of a “polar” low // Meteor. Mag. 1960. Vol. 89. P. 146–7.

8. *Businger S.* The synoptic climatology of polar low outbreaks // Tellus A. 1985. Vol. 37, N 5. P. 419–432.

9. *Zappa G. Shaffrey L., Hodges K.* Can polar lows be objectively identified and tracked in the ECMWF operational analysis and the ERA-Interim reanalysis? // Mon. Wea. Rev. 2014. Vol. 142, N 8. P. 2596–2608.

10. *Schielicke L. Névir P. Ulbrich U.* Kinematic vorticity number – a tool for estimating vortex sizes and circulations // Tellus A. Dynamic Meteorology and Oceanography. 2016. Vol. 68, N 1. P. 29464.

11. *Golitsyn G. S.* Tropical cyclones and polar lows: Velocity, size, and energy scales, and relation to the 26° C cyclone origin criteria // Advances in Atmospheric Sciences. 2009. Vol. 26, N 3. P. 585–598.

12. *Kurgansky M. V.* On the relation between helicity and potential vorticity in an compressible rotating fluid // Izvestia Akademii nauk SSSR. *FAO*. 1989. Vol. 25, N 12. C. 1326–1329.

УДК 551.593.9

Влияние гидрометеоров на лавины релятивистских убегающих электронов

Д. И. Землянская (zemlianskay.d@phystech.edu)[1,3], Е. М. Стадничук (yegor.stadnichuk@phystech.edu)[2]

[1]*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Москва*
[2]*Национальный исследовательский университет «Высшая Школа Экономики», Москва*
[3]*Институт ядерных исследований РАН, Москва*

Аннотация. Проведено моделирование распространения лавин релятивистских убегающих электронов (RREA) в среде с наличием гидрометеоров. Получены зависимости характеристик RREA от концентрации льда в моделируемой ячейке.

Ключевые слова: GEANT4, лавины релятивистских убегающих электронов, гидрометеоры.

Немалый интерес для физики атмосферы представляет исследование физического явления, предложенного Гуревичем, лавинообразного размножения в веществе быстрых электронов, которое называют пробоем на убегающих электронах (ПУЭ).

Это повсеместно используется в анализе процессов в грозовых облаках. В основном, изучение этих явлений проводятся для однородных сред. Данная упрощенная модель не учитывает наличие множества аэрозолей и гидрометеоров в грозовых облаках. В работе были исследованы модели грозовых ячеек с учетом гидрометеоров. Были проведены симуляции в GEANT4 для получения зависимости количества рожденных электронов, позитронов и гамма-квантов от массовой доли льда.

Также была рассмотрена ситуация с наличием поля и без. Проведены симуляции для исследования слоистой системы облака (воздух, снег, воздух), что также позволило расширить технические возможности техники и увеличить модель до 600 м.

Замечено существенное различие в количествах и энергиях рожденных частиц с увеличением доли гидрометеоров в эксперименте. Данные результаты вызывают интерес к дальнейшему рассмотрению влияния неоднородностей на распространения лавин релятивистских убегающих электронов.

Список литературы

1. *Гуревич А. В., Зыбин К. П.* Пробой на убегающих электронах и электрические разряды во время грозы // Успехи физических наук, 2001. Т. 117, № 11. С. 1177–1198.

2. *Dwyer J., Babich L.* Low-energy electron production by relativistic runaway electron avalanches in air // Journal of Geophysical Research. 2011. Vol. 116. P. 1–14.

3. Recent developments in GEANT4 / J. Allison [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment. 2016. Vol. 835. P. 186–225.

4. *Dwyer J., Babich L.* Low-energy electron production by relativistic runaway electron avalanches in air // Journal of Geophysical Research. 2011. Vol. 116. P. 1–14.

5. *Yong Han, Hao Luo, Yonghua Wu, Yijun Zhang, Wenjie Dong.* Cloud ice fraction governs lightning rate at a global scale, Communications Earth & Environment, 2021. Vol. 2. Article number: 157.

УДК 551.509.324.3

Эксперименты по прогнозу возникновения и максимальной толщины гололедных отложений

Р. Ю. Игнатов (prognozist@gmail.com)[1,3], К. Г. Рубинштейн (k.g.rubin@googlemail.com)[1,2,3]

[1]*Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва*
[2] *Гидрометцентр России, Москва*
[3]*НПЦ «Мэп Мэйкер», Москва*

Аннотация. Приведены результаты численных экспериментов по моделированию гололедных отложений и оценки прогноза фактов наличия и отсутствия гололеда и максимальной толщины гололедных отложений.

Ключевые слова: гололед, прогноз, модель WRF-ARW.

Введение

Гололед – опасное метеорологическое явление. Гололеды опасны для любого вида транспорта и энергетики из-за разрывов линий электропередач. Публикации по численному прогнозу гололедов в научной периодике России практически отсутствуют. В 2018 и 2020 гг. были опубликованы статьи авторов этой работы [1; 3] с удачными результатами численных прогнозов фактов возникновения гололеда и наледи на проводах.

В зарубежной периодике имеется немного публикаций по численному прогнозу гололедных явлений, например [5– 7; 10; 13–15].

Наиболее близкое к данной работе исследование в [4]. по прогнозам модели WRF-ARW США [11], где авторы рассчитывали рост гололедных отложений с помощью видоизмененной схемы Рамера [4; 9]. В основном, случаи гололедов были предсказаны успешно. Подробно обсуждаются трудности оценок качества прогнозов факта наличия и отсутствия гололеда, с которыми мы также столкнулись и о которых говорим ниже.

На некоторых метеорологических станциях с помощью специального гололедного станка измеряется толщина, а точней диаметр гололедных отложений. Качество прогнозов толщины гололеда нами оценивалось по данным наблюдений за диаметром гололедных отложений на метеорологических станциях.

Гололедные явления могут образовываться из осадков как жидкой, так смешанной фазы при отрицательной температуре приземного воздуха или поверхностей.

В настоящее время во всем мире гололед оперативно прогнозируется только синоптиками или с помощью статистических методов.

Формирование и интенсивность гололеда зависит от температуры воздуха, температуры подстилающей поверхности, наличия и количества твердых и жидких гидрометеоров в воздухе непосредственно у поверхности земли. Успешность численного прогноза гололеда зависит в большой мере от успешности прогноза моделью перечисленных выше параметров.

Стоит упомянуть, что ни в России, ни за рубежом к настоящему времени не создано надежной оперативной системы численного прогноза гололеда, что было бы для таких значительных территорий северных государств как Россия или Канада, и с продолжительным холодным периодом, весьма полезным вкладом в численный прогноз опасных явлений погоды.

Метод прогноза и оценок толщины гололеда и факта его наличия

Для прогноза гололеда нами использовались результаты региональной негидростатической модели WRF-ARW версии 4.3 [12] с пространственным шагом в 18 км и 41-й сигма поверхностью по вертикали. В качестве начальных данных и краевых условий использовались анализы GFS [8] с разрешением 0,25° вдоль широты и долготы.

Для оценки результатов прогноза гололедных явлений использовались данные наблюдений на приблизительно 800 метеорологических станциях на Восточно-Европейской равнине.

Оценивался как максимальный диаметр отложений для данного случая, так и факт наличия и отсутствия гололеда как явления в течение всего периода случая. Каждый случай состоял из одного или нескольких, идущих подряд 12-часовых интервалов времени.

Оценка прогноза факта наличия и отсутствия гололеда проводилась по этим 12-часовым интервалам (день и ночь). Оценка прогноза максимального диаметра отложений проводилась путем сравнения максимальных значений прогностических диаметров гололедных отложений с наблюденными значениями за тот же период.

Выборка случаев наличия и отсутствия гололеда по данным наблюдений

В качестве надежных случаев наличия гололедных явлений за данный 12-часовой интервал времени в наблюдениях рассматриваются случаи, удовлетворяющие следующим условиям:

1) хотя бы в один из 4 сроков наблюдения в течение 12 ч (9, 12, 15, 18 или 21, 0, 3, 6 ч) в сводках погоды в срок наблюдения или в последний час отмечались явления: замерзающая морось или замерзающий дождь, ледяной дождь (синоптические коды 24, 56, 57, 66, 67, 79), синоптические коды расшифрованы в [2];

2) на станции хотя бы в один из этих сроков или в последний час отмечались в сводке погоды в срок: морось, дождь, дождь со снегом любого характера или интенсивности (синоптические коды 20, 21, 25, 50–55, 58–65, 68,69, 80–84) при нулевой или отрицательной температуре воздуха;

3) при этом в любом случае сумма осадков за интервал 12 ч (за сроки 6 или 18 ч) должна быть не менее 0,1 мм/12 ч.

В качестве надежных случаев отсутствия гололедных явлений в наблюдениях должны выполниться следующие условия:

1) ни в один из 4-х сроков наблюдения в течение 12 ч (9, 12, 15, 18 или 21, 0, 3, 6 ч) в погоде в срок или в последний час не отмечались явления: замерзающая морось, замерзающий дождь, ледяной дождь любой интенсивности (синоптические коды 24, 56, 57, 66, 67, 79);

2) при нулевой или отрицательной температуре воздуха на станции ни в один из этих сроков или в последний час не отмечались следующие явления погоды в срок: морось, дождь, дождь со снегом любого характера или интенсивности (синоптические коды 20, 21, 25, 50–55, 58–65, 68, 69, 80–84);

3) упомянутые в предыдущих пунктах явления на станции отмечались, но сумма осадков за 12 ч была менее 0, мм;

4) во все четыре срока наблюдалось какое-то другое явление (кроме тех, что перечислены выше в пунктах 1 и 2) или во все сроки какие-либо явления отсутствуют.

Отметим, что выявление случаев отсутствия гололеда на станции представляет некоторую трудность, так как случаи отсутствия явлений кодируются также, как и случаи отсутствия информации о явлениях. Поэтому приходится отбраковывать достаточно большое количество станций.

Метод расчета толщины гололедных отложений

Диаметр гололедных отложений (G(t)) в каждый момент времени в каждом узле по рассчитывался по следующей формуле:

G(t) = G(t-1) + R(t) при выполнении одного из условий: Ts(t-1) < = 0 и узел находится на суше, или T2(t-1) <= 0 и узел на воде. Принимается, что если Ts(t-1)> = 0,1 на суше или T2(t-1)> = 0,1 на воде, то G(t) = 0, т. е. лед разрушается (тает), где: G – диаметр гололедного отложения в мм, t – текущий момент времени, t-1 – предыдущий момент времени, R(t) – прирост льда за интервал времени от t-1 до t, Ts – температура поверхности, T2 – температура на 2 м, ледяное покрытие принимается за сушу.

Прирост льда в каждый момент времени рассчитывается по формуле [4]:

$$R(t) = \frac{1}{\rho_i \pi}\sqrt{[\rho_0 P(t)]^2 + [3{,}6V(t)W(t)]^2}, \quad (1)$$

где $W(t) = 0{,}067P(t)^{0.846}$ – содержание воды, P – сумма жидких осадков (мм) за период времени между $t-1$ и t, ρ_0 – плотность воды (приблизительно 1 кг/м^3), ρ_i – плотность льда (приблизительно 0,9 кг/м^3), V – скорость ветра, м/с.

Анализ прогноза гололеда и его оценки для нескольких случаев на Восточно-Европейской равнине

Прогноз гололеда дается на временной интервал 12 ч (день или ночь) без привязки к конкретным срокам в пределах этого интервала, т. е. прогнозируется факт наличия или отсутствия гололеда в течение 12 ч. В модели за факт гололеда принимался случай, когда величина роста отложений в точке с координатами данной станции за 12-часовой период времени превышала некоторый порог, который варьировался в экспериментах от 0,1 до 3 мм/12 ч. Путем анализа полученных оценок был сделан вывод о том, что оптимальным порогом является 1 мм/12 ч.

Результаты прогноза по гидродинамической модели для оценок его качества интерполировались билинейно в точки с координатами станций с наблюдениями.

Были выбраны случаи, когда соотношение станций, где наблюдался гололед и станций, где он не наблюдался, было не менее 1/10. Таким образом, в каждом случае были как станции с наличием явления, так и станции с его отсутствием, т. е. гололед никогда не наблюдался на всех станциях одновременно, а также не было случаев с его полным отсутствием. Это нужно для корректных оценок прогноза фактов наличия и отсутствия данного явления.

На рис. 1 приведен пример прогноза факта наличия и отсутствия гололеда в сравнении с данными наблюдений. Видно, что в центральной части области наблюдалась значительная территория с гололедом, который фиксировался десятком метеорологических станций. На большей части этой территории гололед был удачно предсказан – область, покрытая красными квадратами, заметно превосходит области ошибочных. Также удачным можно считать прогноз отсутствия гололеда на юго-западе. Некоторое, относительно небольшое число ложных тревог и пропусков цели наблюдалось на пограничной территории между наличием и отсутствием гололеда, что связано, скорее всего, с недостатками прогноза температуры.

В табл. 1 приводятся оценки факта прогноза наличия и отсутствия гололеда для всех 11 случаев. В качестве порога факта наличия гололеда является значение прироста льда, превышающее 1 мм/12 ч. Если прирост льда был менее 1 мм/12 ч, считалось что прогнозируется отсутствие гололеда на данной станции за данный 12-часовой интервал времени.

Таблица 1

Средние оценки качества прогнозов факта наличия и отсутствия гололеда для 11 случаев на Восточно-Европейской равнине

№ случая	Оценки								Число случаев			
									Прогноз		Наблюдения	
	ОО	ОН	ПН	ОО	ПО	ПИР	ЛТ	ПЦ	Н	О	Н	О
1	81	54	51	88	89	0,398	46	12	175	758	188	745
2	82	54	67	91	86	0,532	46	9	579	1765	465	1879
3	80	39	56	91	84	0,398	61	9	237	838	165	910
4	66	31	81	94	62	0,431	69	6	550	674	211	1013
5	77	36	61	92	81	0,412	64	8	148	424	89	483
6	88	72	47	90	96	0,431	28	10	32	251	49	234
7	73	24	46	90	77	0,232	76	10	264	742	136	870
8	84	38	45	92	89	0,341	62	8	143	820	121	842
9	88	52	59	94	92	0,517	48	6	109	663	96	676
10	84	46	63	94	88	0,506	54	6	92	390	67	415

Обозначения: ОО – общая оправдываемость, ОН – оправдываемость наличия, ПН – предупрежденность наличия, ОО – оправдываемость отсутствия, ПО – предупрежденность отсутствия, ПИР – критерий Пирса, ЛТ – ложные тревоги (не оправдавшиеся прогноза наличия), ПЦ – пропуск цели (не предсказанные случаи наличия), Н – наличие явления, О – отсутствия явления.

Из табл. 1. видно, что для большинства случаев прогноз факта наличия и отсутствия гололеда оказался успешным, учитывая сложность выборки данных наблюдений. Критерий Пирса, который можно выбрать, как основной, составляет 0,4–0,5, и лишь для двух случаев (№ 7 и 8). Общая оправдываемость прогноза при этом составляет для большинства случаев более 80 %, а пропусков цели при этом почти нет (их доля, в основном, не превышает 10 %). Видно, что доля ложных тревог повышенная, что можно отнести к основному недостатку метода.

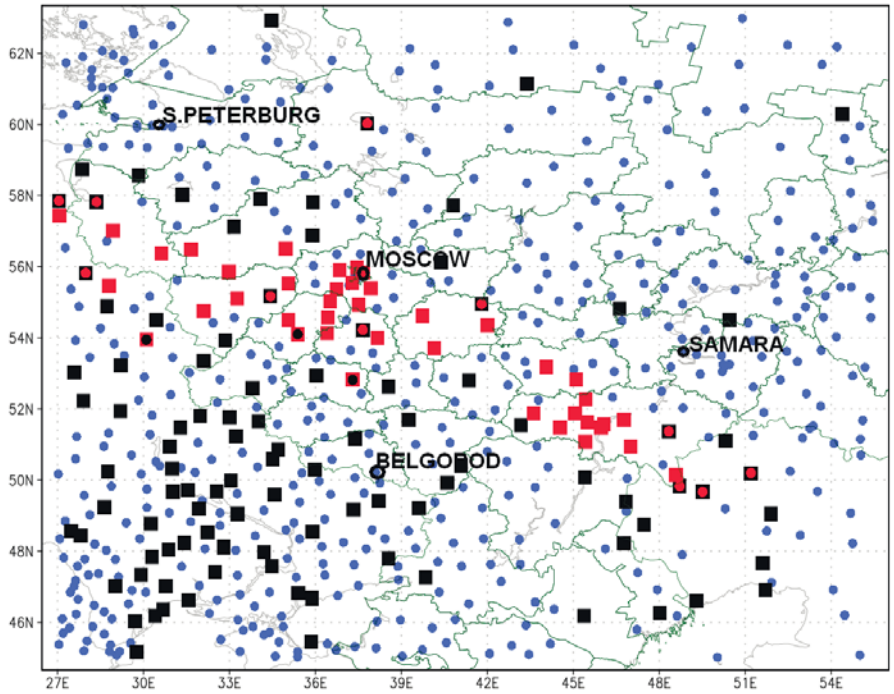


Рис. 1. Пример прогноза и оценок факта наличия и отсутствия гололеда на ночь 24 декабря 2010 г. Обозначения: красный квадрат – успешный прогноз гололеда, черный квадрат – успешный прогноз отсутствия гололеда, черный квадрат с красным кружком – ложная тревога (гололед прогнозируется, но по факту его не было), красный квадрат с черным кружком – неоправдавшийся прогноз гололеда (в прогнозе гололед есть, по факту его не было), синие кружки – отбракованные наблюдения

На рис. 2 для некоторых случаев приведены примеры прогнозов максимальной толщины гололедных отложений в сравнении с данными отложений. Можно видеть, что в большинстве случаев прогноз гололедных отложений весьма близок к данным наблюдений.

В первом случае (case 01) на юго-западе области и во втором (case 02) – на значительной части территории (рис. 2) наблюдался гололед, который был описан приведенной методикой очень хорошо. Также близки к наблюдениям и максимальные прогностические диаметры гололедных отложений, причем район максимумов и величины отложений в прогнозе практически совпадает с районом максимумов и величины в наблюдениях. Это касается двух максимумов на востоке и юго-западе области во втором примере и одного максимума в первом.

Третий (case 02) и четвертый (case 03) примеры меньших размеров и интенсивности, однако также предсказаны весьма успешно: районы распространения гололеда в наблюдениях и прогнозе очень близки.

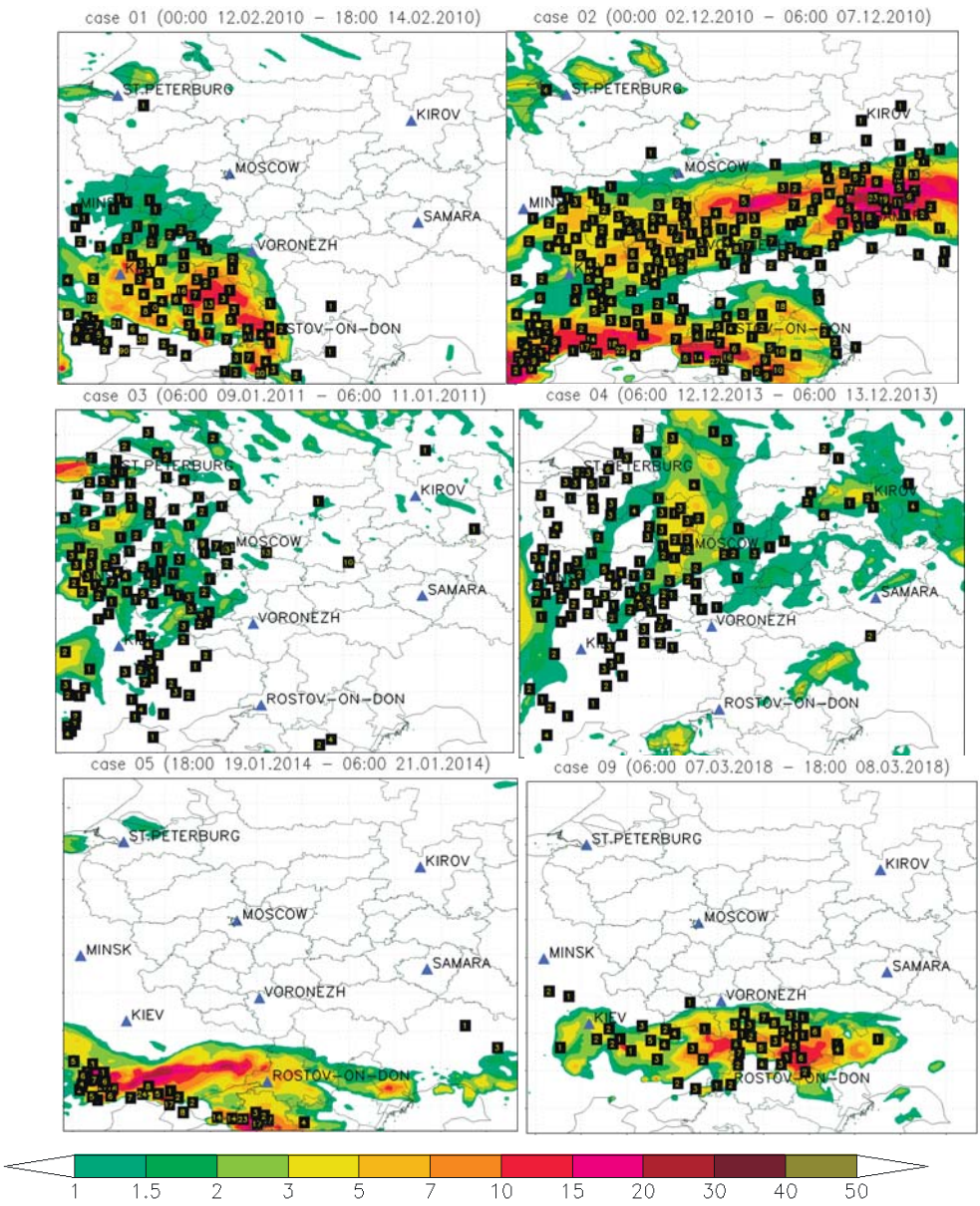


Рис. 2. Прогноз максимального диаметра гололедных отложений (мм) для 6 случаев гололеда на Восточно-европейской равнине, цифры в квадратах – данные наблюдений, цвет – прогноз

Не очень удачным можно назвать случай 5 (case 05), где есть районы, где гололед прогнозировался, но не наблюдался (Ростовская область, юг Украины).

Достаточно удачно спрогнозирована максимальная толщина гололедных отложений в случае 9 (case 09). Средние оценки качества прогноза максимальной толщины гололедных отложений для всех рассматриваемых случаев приведены в табл. 2. Важно заметить, что для случаев с большими диаметрами гололедных отложений (№ 2, 5, 11) оценки оказались весьма удачными. Можно отметить небольшую недооценку гололедных отложений в прогнозе. Лишь в одном случае (№ 2) прогностическое значение максимального диаметра оказалось незначительно больше наблюдённого.

Для всех случаев был отдельно оценен прогноз максимального диаметра отложений для каждой станции.

Таблица 2

Средние оценки качества прогнозов максимального диаметра гололедных отложений для 1–11 случаев на Восточно-Европейской равнине

№ случая	BIAS	RMSE	MOD	OBS	100 %* MOD/OBS	COUNT
1	–2,75	11,49	2,99	5,74	52	103
2	0,74	4,71	5,02	4,29	117	245
3	–1,18	1,69	1,05	2,22	47	160
4	–1,51	7,00	1,10	2,61	42	180
5	–1,0	6,97	5,34	6,39	84	89
6	–1,02	3,99	1,90	2,92	65	63
7	–0,56	3,06	1,49	2,05	73	182
8	–1,33	2,28	0,56	1,89	30	108
9	0,91	2,10	2,84	3,18	89	227
10	–0,68	2,88	1,20	1,88	64	126
11	–0,61	8,10	3,69	4,30	86	191

Обозначения в табл. 2: BIAS – сдвиг, RMSE – среднеквадратическая ошибка, MOD – среднее значение максимального диаметра по данным прогноза OBS – среднее значение максимального диаметра по данным наблюдений, COUNT – размер выборки

Заключение

Предложены и испытаны методы краткосрочного прогноза и оценок факта наличия и отсутствия гололедных явлений и максимальной толщины (диаметра) отложений.

Тестирование и определение необходимых критериев для предложенных методов прогноза гололеда проведено на ряде, охватывающим большую равнинную территорию.

Так как использовались прогностические параметры модели WRF-ARW, прогноз в большой степени зависит от качества прогноза температуры и осадков моделью.

Практически все рассмотренные случаи сильных гололедных отложений (более 10 мм) оказались успешно предсказаны. Необходимо подчеркнуть, что нам не известно ни в России, ни за рубежом публикаций с прогнозами толщины отложений.

Список литературы

1. *Игнатов Р. Ю., Рубинштейн К. Г., Юсупов Ю. И.* Численные эксперименты по прогнозу гололедных явлений / Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33, № 9. С. 735–741.

2. Наставления по кодам // Международные коды. 2018. Т. I.1. Дополнения II к Техническому регламенту ВМО. Ч. А – Буквенно-цифровые коды, ВМО-№ 306.

3. Использование тепло-балансного метода для прогнозирования гололедно-изморозевых отложений на проводах воздушных линий электропередачи / К. Г. Рубинштейн, Р. Ю. Игнатов, Ю. И. Юсупов, Д. Е. Титов // Энергия Единой Сети. 2018. №2 (37). С. 43–50.

4. *DeGaetano A. T., Belcher B. N., Spier P. L.* Short-Term Ice Accretion Forecasts for Electric Utilities Using the Weather Research and Forecasting Model and a Modified Precipitation-Type Algorithm // Weather and forecasting. 2008. Vol. 23. P. 838–853.

5. *DeGaetano A. T., Belcher B. N., Spier P. L.* Short-term ice accretion forecasts for electric utilities using the weather research and forecasting model and a modified precipitation-type algorithm // Weather and Forecasting, 2008. Vol. 23. P. 878–853.

6. Learning to predict ice accretion on electric power lines / A. T. DeGaetano, B. N. Belcher, P. L. Spier, A. Zarnani, P. Musilek, X. Shi, X. Ke, H. He, R. Greiner // Journal Engineering Applications of Artificial Intelligence archive. 2012. Vol. 25, N 3. P. 609–617.

7. *Egil B., Nygaard K.* Evaluation of icing simulations for the “COST727 icing test sites” in Europe // Book of IWAIS, 2009. XIII, Andematt. P. 11–16.

8. NCEP Products Inventory. URL: https://www.nco.ncep.noaa.gov/pmb/products/ (дата обращения: 10.10.2021).

9. *Ramer J.* An empirical technique for diagnosing precipitation type from model output // Preprints, Fifth Int. Conf. on Aviation Weather Systems. Vienna, VA, Amer. Meteor. Soc., 1993. P. 227–235.

10. Nowcasts of temperature and ice on overhead railway transmission wires / J. Shao, S. J. Laux, B. J. Trainor, R. E. W. Pettifer // Meteorological Applications. 2003. Vol. 10, N 2. P. 123–133.

11. Description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Technical Note NCAR/TN-475+STR / W. C. Skamarock, J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. Barker, M. G. Duda, X.-Y. Huang, W. A. Wang. University Corporation for Atmospheric Research, USA, 2008. 520 p.

12. A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4.3, 2021 / W. C. Skamarock, J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, Z. Liu, J. Berner, X.-yu. Huang. https://doi.org/10.5065/1dfh-6p97.

13. *Thompson G.* Using the Weather Research and Forecasting (WRF) Model to Predict Ground Structural Icing // Book of IWAIS XIII, 2009, Andematt, P. 2–10.

14. *Titov D. E., Ugarov G. G., Soshinov A. G.* Monitoring the Intensity of Ice Formation on Overhead Electric Power Lines and Contact Networks // Powr Technology and Engineering. 2015. Vol. 49, N 1. P. 78–82.

15. *Titov D. E., Ugarov G. G., Ustinov A. A.* Analysis of application of models to assess parameters of ice formation on overhead electric power lines // Power Technology and Engineering. 2017. Vol. 51, N 2. P. 240–246.

УДК 551.509.327:551.515.3

Прогноз угроз возникновения смерчей вблизи Черноморского побережья России на базе выходной продукции мезомасштабной модели COSMO-Ru2 с использованием регионального индекса смерчеопасности

О. В. Калмыкова (kov@feerc.ru)

Научно-производственное объединение «Тайфун», Обнинск

Аннотация. Рассматриваются вопросы прогноза черноморских смерчей. Дается описание метода определения нового индекса смерчеопасности WRI для прибрежной акватории Черного моря. Представлены исходная и усовершенствованная формулы расчета индекса WRI. Последняя получена по результатам проведенных исследований в 2021 г. Описана схема работы технологии оперативного прогноза смерчеопасности. Дана оценка успешности прогноза смерчей 8 августа и 12 сентября 2021 г. с использованием различных формул расчета индекса WRI.

Ключевые слова: смерч, смерчеопасная ситуация, прогноз, модель COSMO-Ru2, индекс смерчеопасности WRI, региональные пороговые значения.

Введение

По современным оценкам водяные смерчи над Черным морем – довольно частое явление юга нашей страны [3]. Как правило, они малоподвижны и распадаются в море. Однако в последнее время отмечается тенденция к увеличению числа смерчей, достаточно близко подходящих к берегу. Те из них, которые выходят на сушу обычно сразу разрушаются. Возникающий при этом порыв ветра может нанести ущерб прибрежной инфраструктуре, как, например, это имело место в с. Широкая балка и в п. Кудепста в 2021 г. [5; 9]. Известны случаи выхода смерчей из моря и последующего их перемещения по суше [6]. Как правило, такие эпизоды всегда связаны с огромным экономическим ущербом и нередко с человеческими жертвами.

Прогноз смерчей достаточно сложная задача. Исторически первыми за ее решение взялись американские специалисты, поскольку для США смерчи, или как их еще принято называть торнадо, являются серьезным стихийным бедствием. Ежегодно в пределах Аллеи торнадо, территории, простирающейся от Скалистых гор до гор Аппалачи, регистрируются около 1000 смерчей, в том числе, как правило, и самые сильные смерчи на нашей планете. Сложность прогнозирования смерчей обусловлена недостаточной изученностью этого явления, несмотря на многолетнюю историю его наблюдений. Большая скорость ветра практически исключает возможность прямых измерений внутри вихря. По этой причине по второй половине XX в. стали активно изучать водяные смерчи, которые обычно менее интенсивны, чем смерчи над сушей в надежде, что полученные при этом знания в дальнейшем получится обобщить и на более сильные случаи [13]. В результате самолетных измерений внутри материнских облаков водяных смерчей удалось получить ряд данных об их окружении и впоследствии сопоставить эти данные с известными простейшими моделями вихревых образований [10].

Достигнутые успехи в понимании природы образования смерчей позволили выдвинуть две эмпирические теории их формирования: теорию возникновения сильных, как называемых мезоциклонных смерчей из суперячеек и теорию немезоциклонных смерчей, к которым, в частности, относятся и водяные смерчи в основной своей массе [11; 12]. Впоследствии для прогноза смерчей каждого типа были предложены соответствующие индексы конвективной неустойчивости [7]. С каждым индексом связано определенное пороговое значение. Превышение порога указывает на наступление смерчеопасной ситуации – ситуации, благоприятной для образования смерчей. Расчет индексов, как правило, ведется с использованием выходной продукции численных моделей атмосферы.

В 2017–2018 гг. автором проводились работы по оценке эффективности прогноза черноморских смерчей на базе известных индексов немезоциклонного типа [2]. Поля индексов рассчитывались по исходным прогностическим полям метеоэлементов мезомасштабной модели COSMO-Ru2. По результатам исследования было установлено, что в летний период в рассматриваемом регионе индексы дают большое количество ложных тревог (до 79 %), что исключает возможность их использования для оперативного прогнозирования смерчеопасных ситуаций над Черным морем. По этой причине автором был разработан метод определения нового регионального индекса смерчеопасности, и впоследствии была получена формула расчета индекса для прибрежной акватории Черного моря [4].

Региональный индекс смерчеопасности

При определении регионального индекса смерчеопасности WRI (Waterspout Risk Index) для прибрежной акватории Черного моря был проведен анализ известных данных о водяных смерчах и об условиях их возникновения. По результатам анализа были отобраны наиболее часто встречающиеся факторы, способствующие формированию водяных смерчей: сильная конвективная неустойчивость, приводящая к образованию быстро растущих облаков, вертикальная завихренность в приводном слое, обусловленная конвергенцией воздушных потоков, бризовой циркуляцией или оттоком холодного воздуха, а также небольшой вертикальный сдвиг ветра [8]. Перечисленные факторы впоследствии нашли выражение в шести предикторах водяных смерчей:

- DT_1 – разность температур поверхности моря и воздуха на уровне 1 км (ºС),
- DD_{10} – локальная деформация ветра на уровне 10 м (º/км),
- RH_1 – относительная влажность воздуха, осредненная в слое 0–1 км (%),
- CD – глубина конвекции (км),
- DU_1 – абсолютное значение разности скоростей ветра на уровнях 10 м и 1 км (м/с),
- S_1 – сдвиг ветра, осредненный в слое 0–1 км (м/(с·км)).

С использованием первых четырех предикторов можно спрогнозировать условия благоприятные для зарождения вихря – чем больше значение предиктора, тем больше соответствующая вероятность образования смерча. Предиктор локальной деформации позволяет выявить области горизонтального сдвига

ветра, в пределах которых возможно возникновение вертикальной завихренности [4]. Последние два предиктора связаны с полем ветра. Это класс предикторов, имеющих ограничение на максимальное значение. Известно, что большой сдвиг ветра может привести к быстрому разрушению вихря, так и не дав ему до конца реализоваться в полноценный смерч.

На выборке данных о смерчах над Черным морем в 2014–2016 гг. для каждого предиктора было определено региональное пороговое значение. Настройка порогов под региональные особенности смерчегенеза взамен использования общепринятых пороговых значений обусловила, как показали результаты дальнейшего тестирования, преимущество нового индекса перед другими известными индексами.

Формула расчета индекса WRI включает в себя нормированную сумму вкладов от шести вышеперечисленных предикторов:

$$WRI = \frac{1}{6} * [(DT_1 \geq 8) + (DD_{10} \geq 3.3) + (RH_1 \geq 80.7) + (CD \geq 7.6) + (DU_1 \leq 2.5) + (S_1 \leq 6.3)] \qquad (1)$$

Вклад от предиктора считается положительным (в числовом выражении соответствует единице), если значение предиктора в зависимости от его класса либо больше, либо меньше установленного порога. В противном случае вклад является нулевым. Вклад от предикторов DU_1 и S_1 учитывается только в том случае, если по всем смерчеобразующим предикторам фиксируются превышения порогов. Отдельное рассмотрение этих предикторов вне связи со смерчеобразующими не имеет смысла для решаемой задачи. Индекс WRI принимает значения в диапазоне от 0 до 1. Значение индекса соответствует вероятности образования смерчей.

В ходе непрерывных испытаний была подтверждена достаточно высокая прогностическая значимость индекса WRI: предупрежденность смерчей до 85 %, оправдываемость с явлением до 43 %, критерий Багрова – Хайдке до 0,441, доля ложных прогнозов до 71 % [3]. По последнему показателю индекс WRI в рассматриваемом регионе превосходит все известные индексы прогноза немезоциклонных смерчей. В настоящее время этот индекс используется в разработанной автором методике оценки смерчеопасности вблизи Черноморского побережья Краснодарского края и Республики Крым в качестве основного метода прогноза смерчей в теплый конвективный период [1]. Методика внедрена в оперативную работу региональных прогностических центров.

В 2021 г. автором проводились работы по усовершенствованию индекса WRI за счет уточнения пороговых значений предикторов, входящих в формулу его расчета. В ходе этой работы была сформирована выборка значений предикторов за период с 2017 по 2020 г., охватывающий 136 смерчей. Для расчета предикторов использовались прогнозы метеоэлементов по модели COSMO-Ru2 с шагом сетки 2,2 км и часовым разрешением по времени, заблаговременность прогнозов относительно моментов регистрации смерчей составляла около 24 ч. Для каждого анализируемого случая по каждому предиктору проводился расчет статистических показателей его выборки в окрестности радиусом 50 км от местоположения смерча: минимальное и максимальное значения, выборочное

среднее, медиана, среднеквадратическое отклонение. В более ранних работах автора на основе этих данных впоследствии осуществлялся отбор пороговых значений предикторов. В текущем году был применен особый подход к подготовке исходных данных для выбора порогов, учитывающий совместное распределение значений анализируемых предикторов. В рамках этого распределения ранее установленное критическое значение (максимум или минимум в зависимости от класса предиктора), полученное при отдельном рассмотрении предиктора может и не достигаться.

Для уточнения критических значений была разработана специальная программа. В ходе ее работы на начальном этапе каждому предиктору сопоставляется его исходное критическое значение. Далее подсчитывается количество узлов расчетной сетки в пределах окрестности радиусом 50 км от смерча, в которых значения всех предикторов больше/меньше их критических значений. Если количество таких узлов меньше трех, то критические значения корректируются (в меньшую или большую сторону в зависимости от класса предиктора). Процедура коррекции повторяется до тех пор, пока для рассматриваемого случая не будет найден оптимальный набор критических значений по всем предикторам.

Примененный подход позволил выявить некоторые особенности смерчегенеза в рассматриваемом регионе. В частности было установлено, что в большинстве случаев в теплый период года формированию черноморских смерчей способствуют достаточно высокие значения предиктора разности температур DT_1 (> 8,5 °C), глубина конвекции при этом может варьироваться от 6 до 9 км. В то же время смерчи могут формироваться и при более низких значениях рассматриваемой разности (от 6 до 8,5 °C) в условиях, способствующих возникновению крайне мощных по вертикали облаков (> 9 км). По всей видимости, в образовании смерчей первой из упомянутых категорий важную роль играет термическая конвекция, в то время как смерчи второй категории возникают при вынужденной конвекции, очевидно обусловленной прохождением атмосферных фронтов.

По результатам обобщения критических значений предикторов по всем проанализированным смерчам для каждого предиктора было выбрано новое пороговое значение. Для учета выявленных особенностей образования смерчей различных категорий было введено понятие пороговой плоскости, описывающей допустимое множество значений предикторов DT_1 и CD. Ниже дана усовершенствованная формула расчета индекса WRI:

$$WRI_{21} = \frac{1}{5} * [\begin{cases}(DT_1 \geq 8.5) \& (CD \geq 6) \\ (DT_1 \geq 6) \& (CD \geq 9)\end{cases} + (DD_{10} \geq 6) + (RH_1 \geq 76) + (DU_1 \leq 3.5) + (S_1 \leq 7.5)] \qquad (2)$$

В формуле (2) рассматривается сумма вкладов от четырех одиночных предикторов и от одного составного. Правило учета вкладов от предикторов DU_1 и S_1 сохраняется. Составной предиктор вносит положительный вклад в значение индекса WRI в случае выполнения одной из двух групп поставленных условий. Знак «&» означает конкатенацию условий. По сравнению с формулой (1) в формуле (2) практически вдвое увеличен порог для предиктора DD_{10}, для влажности, наоборот, порог несколько снижен. Пороговые значения для предикторов DU_1 и S_1 скорректированы в сторону увеличения.

Технология оперативного прогноза смерчеопасности

Для оперативной информационной поддержки принятия решений в вопросах выдачи предупреждений об угрозах возникновения смерчей была разработана технология, реализующая расчет по предложенной автором методике оценки смерчеопасности. Методика предусматривает построение прогноза смерчеопасных областей, а также оценку риска образования смерчей из облачных ячеек, обнаруживаемых в режиме реального времени по радиолокационным и спутниковым данным [1]. Доступ к выходной продукции технологии осуществляется посредством специально разработанной подсистемы визуализации (рис. 1).

Прогноз смерчеопасности строится на базе прогнозов метеоэлементов по модели COSMO-Ru2. Заблаговременность прогноза не превышает 42 ч. Прогноз уточняется дважды в сутки по мере поступления новой порции прогнозов COSMO-Ru2. На основе построенного прогноза смерчеопасности формируются информационные сообщения (предупреждения), в которых указываются периоды времени и участки акватории, в пределах которых прогнозируется опасность появления смерчей. Для оценки риска образования смерчей из облачных ячеек проводится поиск специальной сигнатуры опасных явлений на радиолокационных изображениях [1]. Ячейки с выявленной сигнатурой, возникшие в пределах областей с крайне высоким прогнозируемым риском появления смерчей классифицируются как потенциально смерчеопасные.

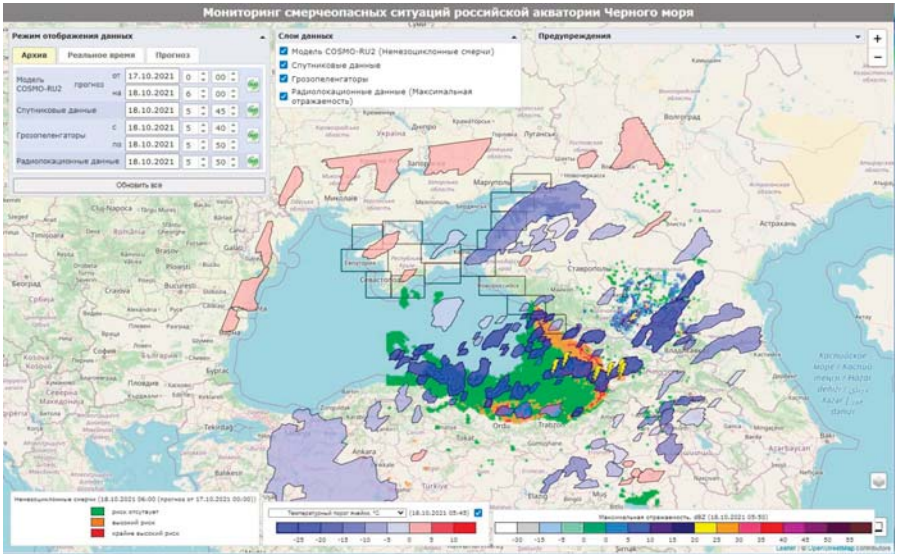


Рис. 1. Подсистема визуализации технологии оценки смерчеопасности

Анализ успешности прогноза смерчей 8 августа и 12 сентября 2021 г.

В 6 ч утра (по ВСВ) 8 августа 2021 г. в море неподалеку от новороссийского села Широкая Балка образовался смерч (рис. 2). Он быстро преодолел несколько десятков метров и вышел на берег, после чего распался. Возникший в результате сильный порыв ветра снес крыши с пляжных конструкций и вырвал деревянные навесы. Никто из очевидцев не пострадал [9].

Рис. 2. Смерч вблизи с. Широкая Балка

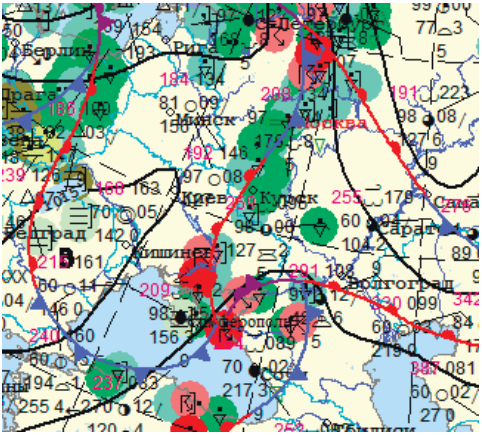


Рис. 3. Синоптическая карта за 8 августа 2021 г. 06 ч (по ВСВ)

Синоптическая обстановка в районе Новороссийска в день появления смерча определялась сложной системой фронтов с точкой окклюзии над Керченским проливом (рис. 3). Отмечалась активная грозовая деятельность. По модели COSMO-Ru2 давался прогноз образования крайне мощных по вертикали облаков протяженностью свыше 11 км. Конвективная доступная потенциальная энергия CAPE по прогнозу доходила до 3000 Дж/кг. Разность температур по предиктору DT_1 не превышала 6 °С. По вышеуказанной классификации рассматриваемый смерч соответствовал смерчам второй категории.

На рис. 4 показаны прогностические поля индекса WRI, рассчитанные по исходной формуле (1) (слева) и по усовершенствованной формуле (2) (справа). Прогнозируемое значение предиктора DT_1 было меньше используемого в формуле (1) порога в 8 °С. По этой причине индекс WRI в исходном варианте его расчета не смог выявить угрозу возникновения смерчей. По усовершенствованной формуле (2) отмечалась хорошо локализованная смерчеопасная область, показанная на рис. 4 розовым цветом, которая находилась на удалении порядка 20 км от фактического места регистрации смерча.

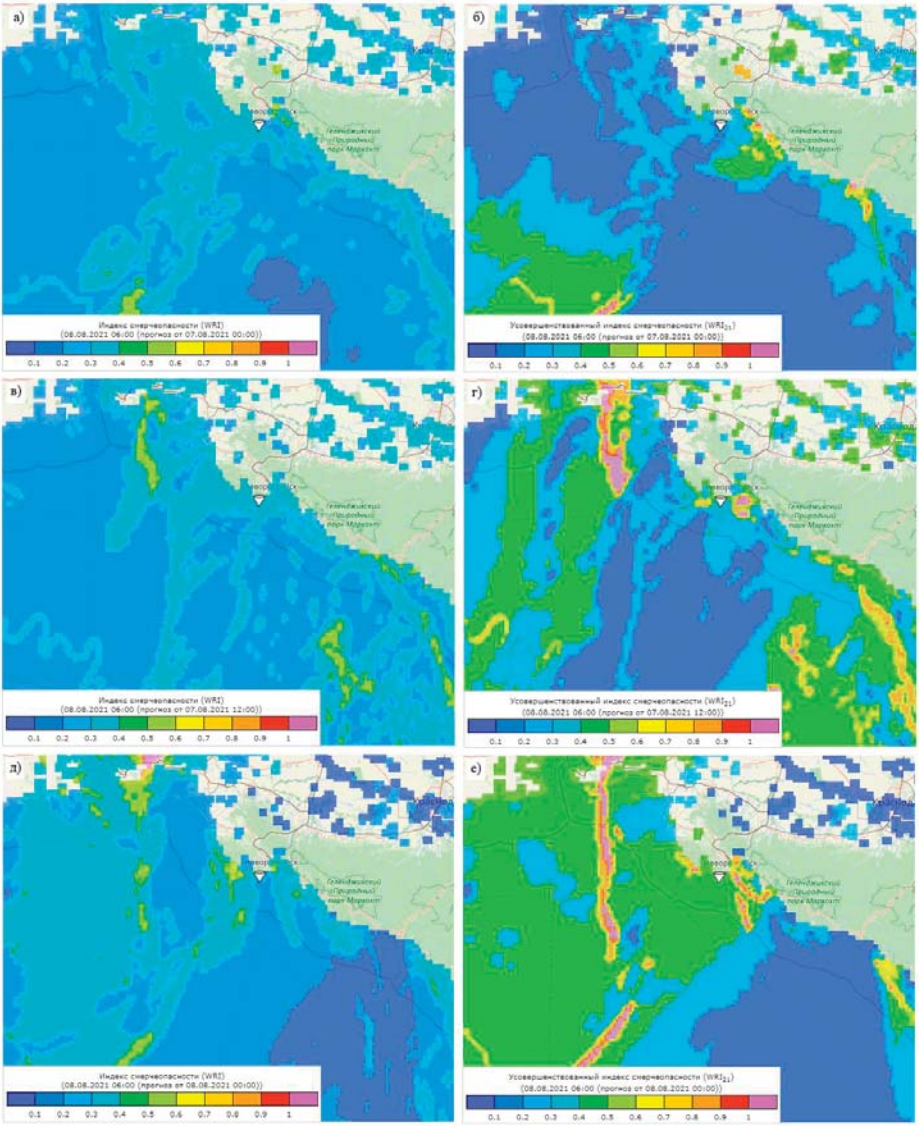


Рис. 4. Прогностические поля индексов WRI (слева) и WRI_{21} (справа) различной заблаговременности счета в момент регистрации смерча вблизи с. Широкая Балка
а), б) прогноз от 07.08.2021 00 ч ВСВ;
в), г) прогноз от 07.08.2021 12 ч ВСВ
д), е) прогноз от 08.08.2021 00 ч ВСВ

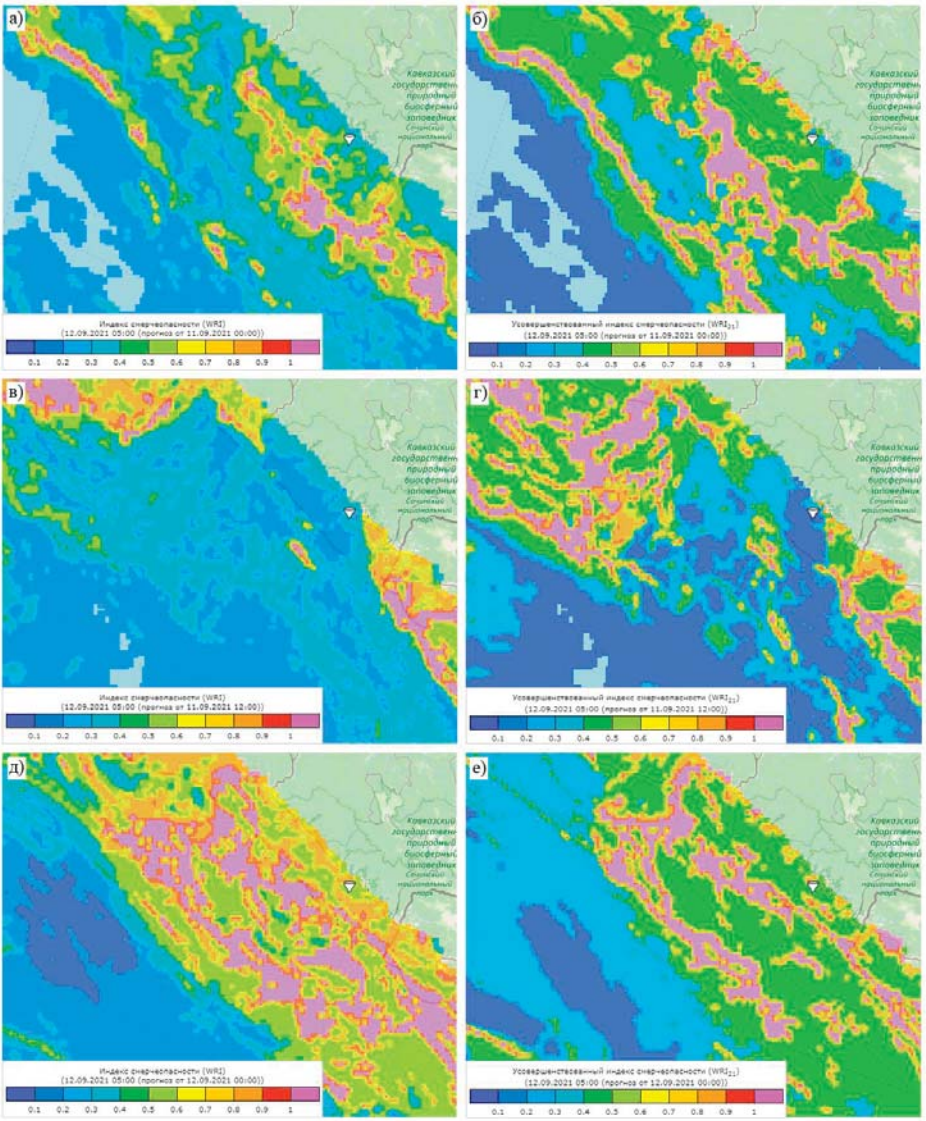


Рис. 5. Прогностические поля индексов WRI (слева) и WRI_{21} (справа) различной заблаговременности счета в момент регистрации смерча вблизи г. Сочи
а), б) прогноз от 11.09.2021 00 ч ВСВ
в), г) прогноз от 11.09.2021 12 ч ВСВ
д), е) прогноз от 12.09.2021 00 ч ВСВ

Смерч, возникший в 5 ч утра (по ВСВ) 12 сентября 2021 г. вблизи г. Сочи, сформировался в море на достаточно большом расстоянии от берега. На сушу он не выходил. В рассматриваемый день южный участок российского побережья находился под влиянием небольшого фронта окклюзии. В Сочи шел дождь, регистрировались грозовые разряды. Прогнозируемое значение CAPE не превышало 800 Дж/кг. Этот смерч по вышеуказанной классификации можно отнести к первой категории. Способствовавшая его появлению смерчеопасная ситуация успешно прогнозировалась как по исходной, так и по усовершенствованной формуле расчета индекса WRI (рис. 5). Последняя, ко всему прочему, давала меньшую погрешность локализации смерчеопасной области – около 13 км.

Заключение

Смерчи – сложное, до конца не изученное, опасное метеорологическое явление. Наибольшая плотность смерчей в нашей стране приходится на прибрежную акваторию Черного моря. Черноморские смерчи могут выходить на сушу, причиняя ущерб прибрежной инфраструктуре, в случае довольно сильных смерчей не исключаются и человеческие жертвы. Прогноз угроз возникновения смерчей – актуальная задача нашего времени. По результатам проведенных исследований для прибрежной акватории Черного моря был разработан региональный индекс смерчеопасности WRI. В ходе испытаний индекс WRI показал свою прогностическую значимость. Установлено, что этот индекс обеспечивает наилучшее качество прогноза смерчей в рассматриваемом регионе в теплый период года. В 2021 г. была предложена усовершенствованная формула расчета индекса WRI, которая, как показали результаты тестирования, позволяет уменьшить количество неспрогнозированных смерчей.

Список литературы

1. *Калмыкова О. В.* Методика оценки смерчеопасности вблизи Черноморского побережья России и результаты ее испытаний // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. М. : Гидрометцентр России, 2021. № 48.

2. *Калмыкова О. В.* Оценка смерчеопасности вблизи Черноморского побережья Краснодарского края и Республики Крым : автореф. дис. … канд. физ.-мат. наук : 25.00.30. Обнинск, 2019. 30 с.

3. *Калмыкова О. В.* Смерчи над Черным морем – новая визитная карточка юга России // Закономерности формирования и воздействия морских, атмосферных опасных явлений и катастроф на прибрежную зону РФ в условиях глобальных климатических и индустриальных вызовов («Опасные явления – III») : материалы Междунар. науч. Конф. Ростов-на-Дону, 15–19 июня 2021 г. Ростов на/Д. : ЮНЦ РАН, 2021.

4. *Калмыкова О. В., Шершаков В. М.* Индекс смерчеопасности российской акватории Черного моря : труды ГГО им. А. И. Воейкова. ГГО, 2017. Вып. 584. 22 с.

5. Кубанские новости. Мощный смерч вышел на пляж в Сочи и раскидал лежаки. URL: https://kubnews.ru/obshchestvo/2021/09/01/moshchnyy-smerch-vyshel-na-plyazh-v-sochi-i-raskidal-lezhaki/ (дата обращения: 22.10.2021).

6. *Шнюков Е. Ф.*, *Митин Л. И., Цемко В. П.* Катастрофы в Черном море. М. : Манускрипт, 1994. 296 с.

7. *Doswell C.A., Schultz D.M.* On use of Indices and Parameters in Forecasting Severe Storms // Electronic Journal of Severe Storms Meteorology. Norman Okla, 2006. Vol. 1, N 3. P. 14.

8. Waterspouts over the North and Baltic Seas: Observations and climatology, prediction and reporting / N. Dotzek, S. Emeis, C. Lefebvre, J. Gerpott // Meteorologische Zeitschrift. Gebrüder Borntraeger Verlagsbuchhandlung. 2010. Vol. 19, N 1. P. 15.

9. Lenta.ru. Мощный смерч разрушил пляж на Кубани и попал на видео. URL: https://lenta.ru/news/2021/08/08/novorossiysk/ (дата обращения: 22.10.2021).

10. *Leverson V. H., Sinclair P. C.* Waterspout Wind, Temperature and Pressure Structure Deduced from Aircraft Measurements // Monthly Weather Review. American Meteorological Society, 1977. Vol. 105. P. 9.

11. *Markowski P. M., Richardson Y. P.* Mesoscale Meteorology in Midlatitudes. Willey, 2010. 407 p.

12. *Markowski P. M., Richardson Y. P.* Tornadogenesis: Our current understanding, forecasting considerations, and questions to guide future research // Atmospheric Research. Elsevier, 2009. Vol. 93. 8 p.

13. Observations and Mechanism of GATE Waterspouts / J. Simpson, B. R. Morton, M. C. McCumber, R. S. Penc // Journal of the Atmospheric Sciences. American Meteorological Society. 1986. Vol. 43, N 8. P. 30.

УДК 551.583

Смерчи на Байкале

К. А. Лощенко (loshchenko@bk.ru), А. И. Развозжаев (kafedrameteo@yandex.ru)
Иркутский государственный университет, Иркутск

Аннотация. Выполнен синоптический анализ условий образования смерчей на Байкале на примере 2021 г. Проанализированы приземные и высотные карты погоды, динамическая значимость атмосферных фронтов и высотных фронтальных зон, энергия струйных течений, возможность развития конвекции по взрывному типу в условиях повышенных значений конвективной неустойчивости над более теплой по сравнению с приземным слоем атмосферы поверхности оз. Байкал в холодный период года.

Ключевые слова: оз. Байкал, смерч, бароклинность атмосферы, атмосферный фронт, высотная фронтальная зона, струйное течение, взрывная конвекция.

Введение

Смерч – опасное погодное явление, образование которого часто связано со скоплениями кучево-дождевой облачности или суперячейковыми кучево-дождевыми облаками. На территории России смерчи чаще всего возникают при интенсивной адвекции холодного воздуха, которая возможна перед прохождением холодного фронта либо в тылу циклона или на восточной периферии антициклона. В этой ситуации проявляется действие нескольких усиливающих друг друга факторов. Прежде всего, это конвергенция или сходимость теплых и влажных потоков в нижней части тропосферы и расходимость или дивергенция холодных и сухих по абсолютному влагосодержанию потоков верхней тропосферы и нижней стратосферы. Необходимы также наличие сдвигов ветра в тропосфере и конвективная неустойчивость ($\gamma \gg \gamma_{\text{ва}}$). Последнее слагаемое хорошо выражено летом и поэтому сильные смерчи чаще наблюдаются в теплое время года, а в суточном ходе в послеполуденные и вечерние часы. В некоторых случаях образование смерча возможно перед теплым фронтом, где существенный вклад в их формирование вносит хорошо прогретый субтропический воздух. Нельзя исключать при интенсивном и продолжительном прогреве подстилающей поверхности образование смерчей нефронтального характера в однородной устойчивой воздушной массе, но и в таких случаях все же необходимо присутствие так называемого спускового механизма, которым часто является мезоциклон в средней тропосфере, который усиливает интенсивность восходящих потоков теплого воздуха [3].

Таким образом, наиболее благоприятные условия для образования смерчей на территории России наблюдаются при вовлечении в циклон с юга прогретого у поверхности Земли воздуха (25–35 °С) с высокими значениями абсолютной влажности (≥2–3 кг/м^3), а в средней и верхней тропосфере это наличие мезоциклона и адвекции холодных и сухих воздушных масс. Сильные смерчи нередко формируются после стационирования теплых высоких блокирующих антициклонов, где длительное время накапливаются большие запасы энергии конвективной неустойчивости. Обычно в таких случаях она быстро реализуется в развитие конвективного облака, если происходит быстрое смещение высотной ложбины на смену высотному гребню [5]. В результате развития термически прямой циркуляции теплый воздух активно вытесняется более плотным и холодным, а скорости восходящих потоков увеличиваются ≥2–6 м/с. Самые благоприятные условия для образования смерчей возникают при выходе южных циклонов, которые по сравнению с ныряющими циклонами обладают большими запасами потенциальной энергии. Если волновые циклонические возмущения объединяются, то происходит быстрое понижение давления в центре циклона, что может привести к взрывному развитию конвекции. Взрывная конвекция также возможна при инверсионном распределении температур выше пограничного слоя, если осуществляется интенсивная адвекции холода на поверхности 850 гПа (1,5 км), благодаря которой задерживающий слой быстро разрушается, и кучево-дождевая облачность может сформироваться в течение нескольких десятков минут. К потенциальным предикторам образования смерчей относятся расходимость потоков, уменьшение их скорости вдоль потока, наличие мезоструй в средней и нижней тропосфере и струйных течений в верхней тропосфере [1].

Анализ траекторий движения смерчей в России [2] показал, что в большинстве случаев (≥70%) они смещаются с юго-запада на северо-восток со средней скоростью около 40–60 км/ч, что происходит под передней частью высотной ложбины. У поверхности Земли в этом случае обычно наблюдается углубление (~3–4 гПа/3 ч) южного циклона. Вблизи тропопаузы проходит струйное течение со скоростями ветра на оси 144–150 км/ч. При смещении смерча с юга на север скорость перемещения возрастает до 50–80 км/ч, но, на их долю приходится в среднем не более 10 % от общего количества смерчей. Чаще всего они образуются вблизи центра волновых возмущений. В 5–6 % случаев смерчи двигаются в направлении с запада на восток или с юго-востока на северо-запад под передней частью высотной макроложбины, а в единичном числе случаев перемещаются с северо-запада на юго-восток. За период жизненного цикла смерча длина его траектории по наблюденным данным изменялась от 1 до 160 км, а ширина смерча находится в диапазоне 105–250 м [2].

Для моделирования и прогнозирования смерчей, которые носят мезомасштабный характер, но развиваются на фоне благоприятных крупномасштабных атмосферных процессов, необходимы метеорологические данные с высоким пространственным разрешением, что пока сложно реализовать из-за неравномерной и часто редкой сети метеорологических станции и постов [4].

Результаты исследований

На территории Иркутской области благоприятные условия для образования смерчей складываются на Байкале. Так как озеро содержит большое количество влаги, то в холодное время года при открытой поверхности более теплого по сравнению с окружающей атмосферой водоема усиливается испарение и создаются большие вертикальные термические градиенты. Также возможно формирование сдвигов ветра при усилении крупномасштабного потока на высотах средней и верхней тропосферы. Особенно благоприятными будут условия, когда длительное время сохраняются положительные аномалии температур либо происходит интенсивная адвекция холодной воздушной массы. Такие ситуации наблюдались в январе и ноябре 2021 г., когда на южной оконечности оз. Байкал были зафиксированы два случая смерчей. 5 января 2021 г. при образовании смерча адвекция холода достигла 8 °С, а 4 ноября 2021 г. при его образовании после длительного предшествующего прогрева адвекция холода составила около 8 °С.

Анализ погодных условий образования смерчей на Байкале выполнен по ежедневным синоптическим картам Гидрометцентра России. Он показал, что 4 ноября 2021 г. смерч возник в холодной неустойчивой воздушной массе на восточной периферии мощного антициклона с центром на юге Урала, при усилении северо-западного ветра, когда происходило сближение барического гребня данного антициклона с циклоном над Забайкальем (рис. 1). В средней тропосфере происходило также сближение осей полярной и арктической ветви высотной фронтальной зоны, что сопровождалось увеличением барических и термических градиентов, наблюдалось мощное струйное течение.

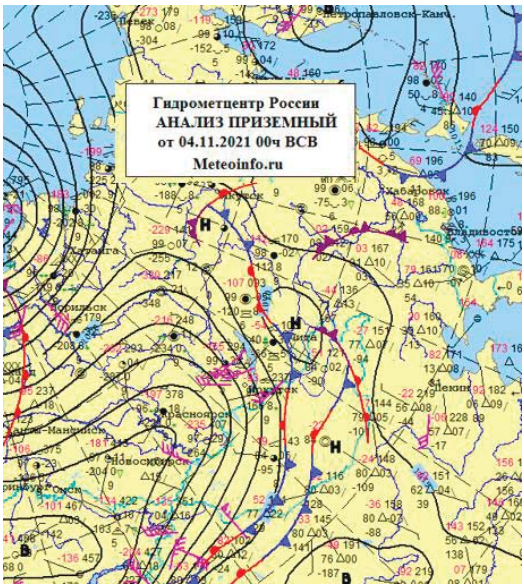


Рис. 1. Приземная синоптическая карта погоды за 00 ВСВ 4 ноября 2021 г.

Образование смерча 5 января 2021 г. на юге Байкала было также связано с влиянием восточной периферии антициклона с центром над Западной Сибирью и зоной высоких барических градиентов, которая создалась при сближении барического гребня антициклона с тихоокеанской ложбиной (рис. 2). Отмечалось прохождение вторичного холодного фронта. На высоте 5 км была меридионально ориентированная высотная фронтальная зона, а на высоте 3 км ось ложбины, где осуществлялось взаимодействие северной и южной умеренной воздушной массы.

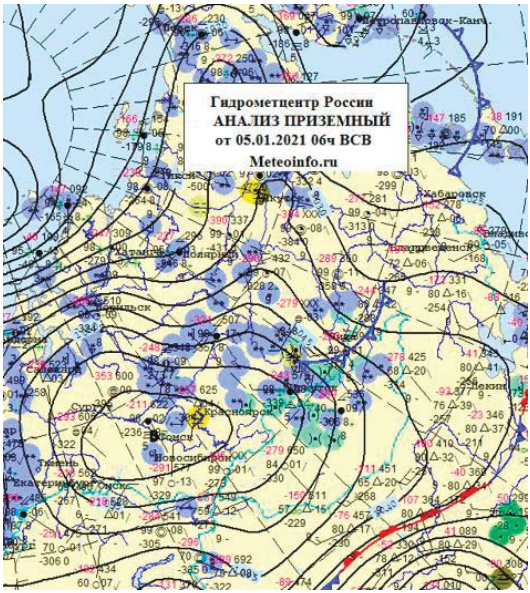


Рис. 2. Приземная синоптическая карта погоды за 00 ВСВ 5 января 2021 г.

Выводы

Анализ условий образования смерчей на Байкале в холодный период 2021 г. показал, что они сформировались при интенсивной адвекции холода на восточной периферии усиливающихся антициклонов и высоких термических и барических градиентов во всей толще атмосферы, т. е. в бароклинно активной зоне. Их формированию способствовали большие запасы потенциальной и кинетической энергии в зоне сопутствующих их образованию высотной фронтальной зоны и струйных течений вблизи тропопаузы. Смерчи носили локальный (мезомасштабный) характер, который проявлялся при благоприятных региональных синоптических процессах и под влиянием термической составляющей поверхности оз. Байкал, когда над открытыми участками прогретого водоема получают развитие процессы испарения и восходящих движений, усиленные влиянием адвективных факторов. Следует отметить, что вероятность таких явлений на Бай-

кале возрастает в условиях меняющегося климата, но, не только при его потеплении, но и когда усиливаются меридиональные крупномасштабные потоки, ориентированные с арктического побережья на южные районы Иркутской области и территорию Монголии.

Список литературы

1. Руководство по краткосрочным прогнозам / С. Л. Белоусов, А. А. Васильев, Н. Ф. Вельтищев, Н. Г. Леонов. Л. : Гидрометеоиздат, 1986. Ч. 1. 465 с.
2. *Будилина Е. Н., Прох Л. З.* Смерчи и шквалы умеренных широт. Л. : Гидрометеоиздат, 1976. 31 с.
3. *Воробьев В. И.* Синоптическая метеорология. Л. : Гидрометеоиздат, 1991. 616 с.
4. *Калинин Н. А., Смирнова А. А.* Исследование радиолокационных характеристик для распознавания опасных явлений погоды, связанных с кучево-дождевой облачностью // Метеорология и гидрология. 2005. № 1. С. 84–96.
5. Руководство по краткосрочным прогнозам погоды. Ч. 2, вып. 2. Урал и Сибирь. Л. : Гидрометеоиздат, 1986. С. 116–117.

УДК 551.509.56

Анализ и прогноз гроз в холодный период года на примере аэродрома Минск-2

М. В. Лукша (maril2010@mail.ru)
Белорусский государственный университет, Минск

Аннотация. Проводится анализ образования гроз в холодный период года (с октября по март) и их связь с аэросиноптическими условиями на примере аэродрома Минск-2 за период с 1989 по 2020 г. Определение этих связей необходимо для составления качественного прогноза гроз, как одного из опасных явлений погоды для авиации.

Ключевые слова: зимние грозы, аэросиноптические условия, авиационные прогнозы.

Объект и цель исследования

Зимние грозы представляют собой достаточно редкое метеорологическое явление, встречающееся в синоптической практике. Согласно литературе, к зимним, или снеговым грозам относят грозы, при которых вместо ливневого дождя выпадает ливневый снег, ледяной дождь или ледяная/снежная крупа. В условиях изменяющегося климата в сторону потепления отмечается тенденция к увеличению количества гроз в холодный период года с октября по март, часто сопровождающиеся ливневыми осадками в жидком виде. В этой связи, по мнению автора, возникает необходимость в пересмотре термина «зимние грозы», включив в определение понятия наличие осадков жидкого характера.

Прогноз опасных конвективных явлений в холодный период года является важной проблемой, с которой сталкиваются не только гражданские, но и авиационные синоптики в процессе своей оперативной деятельности.

В связи с редкостью данного явления рассматриваемый вопрос не имеет широкой освещенности в отечественной и зарубежной литературе и науке. Так,

в частности, на территории Республики Беларусь вопросами возникновения зимних гроз занималась авиационный инженер-синоптик М. К. Мальчик, которая выделила 5 основных синоптических условий, благоприятных для возникновения зимних гроз.

Отсутствие разработанных алгоритмов и методик прогноза таких нечастых, но очень опасных конвективных явлений, как зимние грозы и связанные с ними интенсивные ливневые осадки, и шквалистое усиление ветра определяет актуальность выбранной темы, в частности в области качественного метеорологического обеспечения авиации, от которого зависит безопасность, регулярность и эффективность полетов.

Целью данного исследования является разработать научно-обоснованные рекомендации к прогнозу условий возникновения гроз в холодный период года на примере аэродрома Минск-2.

Для достижения поставленной цели были осуществлены следующие виды работ: проведена выборка числа случаев фактически наблюдавшихся гроз и сопровождающих их явлений виде ливневых осадков и шквалистого ветра на аэродроме Минск-2 с октября по март за период с 1989 по 2020 г. на основе анализа дневников погоды АВ-6; установлена связь выявленных опасных конвективных явлений холодного периода года с аэросиноптическими условиями, при которых они наблюдались, на основании анализа карт приземного анализа и аэрологических диаграмм за те же сроки. В результате анализа определены основные критерии для прогноза зимних гроз, которые могут использоваться, как основные рекомендации для разработки прогноза опасных конвективных явлений в период с октября по март.

Теоретические аспекты возникновения гроз

Гроза – комплексное атмосферное явление с многократными электрическими разрядами в виде молний, сопровождающимися громом. Представляет собой одно из наиболее опасных для авиации явлением погоды. Опасность гроз обусловлена:

– интенсивной турбулентностью в облаках, способной вызывать сильную болтанку и перегрузки, превышающие предельно допустимые значения;

– сильным обледенением на высотах, где температура воздуха ниже 0 ºС;

– возможностью поражения самолета молниями;

– интенсивными ливневыми осадками [1].

Гроза связана с развитием мощных кучево-дождевых облаков, сильной неустойчивостью стратификации воздуха при высоком влагосодержании. Считается, что грозы в умеренных широтах гроза возникает тогда, когда верхняя граница облаков оказывается выше изотермы –23 °С, вертикальная скорость становится более 9 м/с и массовая доля водяного пара у поверхности Земли не менее 9,2 %, на уровне 850 гПа не менее 7,0 % и на уровне 700 гПа не менее 3,8 % [2].

Различают грозы фронтальные и внутримассовые. Большинство гроз (около 95 %) связаны с атмосферными фронтами, особенно холодными, на которых наиболее часто создаются условия для развития интенсивной конвекции [5].

Необходимая для образования гроз высокая неустойчивость атмосферы достигается путем поднятия хорошо разогретого и насыщенного влагой воздуха, его последующего охлаждения с высотой, достижения уровня конденсации и выделения скрытой энергии водяного пара, которая служит главным фактором образования кучевых форм облачности. Для дальнейшего перехода кучевой облачности в кучево-дождевую, необходимы восходящие потоки теплого воздуха от нагретой поверхности земли, увлекающие за собой более легкие и быстрые мелкие капли влаги, которые на своем пути сталкиваются к крупными, опускающимися вниз. Во время этих столкновений происходит электризация, и частички влаги получают свои заряды. Мелкие капли, несущие в себе положительный разряд, собираются в верхней части облака. А более крупные, заряд которых отрицательный, движутся вниз. Далее отрицательный заряд из облака направляется в землю и происходит молния. Такие благоприятные для образования гроз условия в основном складываются в теплый период года (с апреля по сентябрь), на который приходится 99 % гроз на территории Беларуси [4]. В зимнее время года воздух недостаточно влажный, так как низкие температуры препятствуют образованию излишка воды в атмосфере, вследствие чего любая избыточная влага в воздухе замораживается и выпадает на землю в виде снега. Также, перепады давления и температуры в холодный период не происходят так часто, как в теплое время года, и атмосфера не получает достаточно солнечной энергии из-за короткого светового дня. Однако в средних широтах в осенне-зимний промежуток времени нередко возможны грозы при условии, что воздушные потоки и циклоны приносят со стороны бассейнов океанов и морей очень теплые и влажные воздушные массы в виде выходов «южных циклонов». В теплом секторе таких циклонов отмечается вынос теплого и влажного воздуха, температура воздуха повышается до положительных значений, а при затоке холодного воздуха с севера в тыловой части такого циклона, на холодном фронте и возникают грозы, так как здесь отмечается вынужденная динамическая конвекция (рис. 1, *а*). Также зимние грозы возможны на фронтах окклюзий (рис. 1, *б*).

Гроза представляет собой локальное явление. Район, охватываемый грозой, в среднем имеет площадь 500–600 км^2. Гроза также относится к явлениям со сравнительно непродолжительным периодом действия: в среднем он длится 1,5–3 ч. Однако зимние грозы отличаются еще меньшей продолжительностью. Их длительность в среднем составляет 20–30 мин. Также они не такие шумные, как летние, что объясняется приглушением звуков грома, падающим снегом.

Зимние грозы сопровождаются шквалистым ветром, сильными снегопадами и ливнями. Известно, что осадки всех видов несут на себе электрические заряды. Снег представляет собой типичное сыпучее тело. При трении снежинок друг о друга и их ударами о землю и местные предметы снег электризуется. При низких температурах во время сильных снегопадов и метелей электризация снега настолько велика, что происходят зимние грозы, когда в облаках снежной пыли могут быть видны синие и фиолетовые вспышки, образуются шаровые молнии. Поэтому наличие осадков имеет важное значение при образовании зимних гроз. Чем они интенсивнее, тем больше вероятность грозы [5].

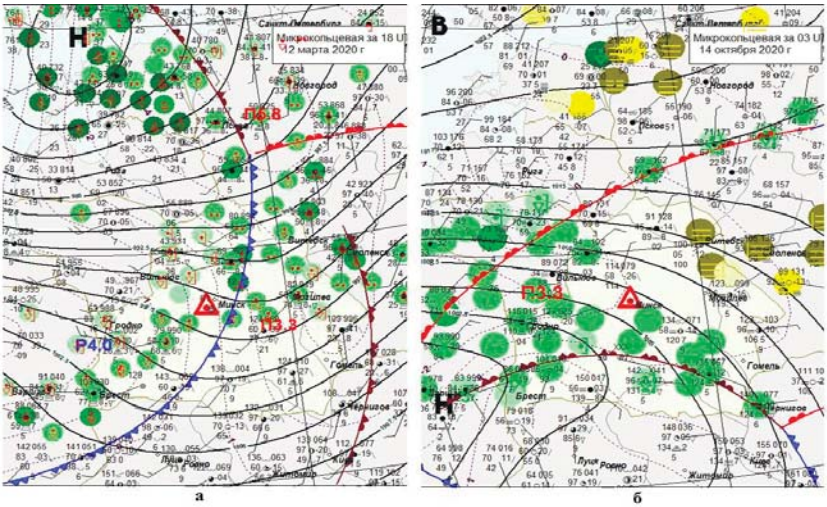


Рис. 1. Приземная синоптическая ситуация, с которой связанны зимние грозы: а – холодный фронт с волнами; б – фронт окклюзии

Анализ зимних гроз на аэродроме Минск-2

В ходе исследования произведен анализ повторяемости зимних гроз с октября по март на аэродроме Минск-2 за последние 32 года (с 1989 по 2020 г.), а также сопровождающих их явлений и связь с приземной синоптической ситуацией. Результаты данного анализа представлены в табл. 1.

Выбор 1989 г. за начало выборки обусловлен тем, что именно с этого года в Беларуси начался самый продолжительный период потепления за все время инструментальных наблюдений на протяжении последних 130 лет. Среднегодовая температура в стране за последние 30 лет, выросла на 1,2 °С. При этом особенно резкие повышения отмечаются для зимнего периода с января по март, когда отмечен рост температуры на 2 °С и более по сравнению с климатической нормой [3; 6].

На основании анализа исходной информации было выявлено, что за последние 32 года на аэродроме Минске-2 было отмечено 17 случаев с зимними грозами (1 в январе, 3 в феврале, 4 в марте, 8 в октябре, 1 в ноябре). Для сравнения, за 40-летинй период с 1936 по 1976 г., в расположенном рядом с аэродромом городе Минске наблюдались всего лишь 2 случая зимних гроз. Таким образом, количество зимних гроз с начала периода потепления увеличилась примерно в 7 раз.

Стоит также отметить, что в 1990 г. было зафиксировано 3 случая зимних гроз, в 2008 г. – 2 случая, в 2020 г. – 2 случая, что связано с тенденцией потепления климата в стране. Представленные на рис. 2 данные отклонения среднегодовых температур от климатической нормы показывает, что намечен устойчивый тренд роста температур в дальнейшем [3].

Таблица 1

Приземные метеорологические условия возникновения зимних гроз на аэродроме Минск-2 за период с 1989 по 2020 г.

Дата	Время, UTC	Синоптическая ситуация	Ветер		Барическая тенденция, гПа/3ч		Температура воздуха, °С		Явление, сопровождающие грозу	Видимость в осадках, м
			До фронта	После фронта	До фронта	После фронта	До фронта	После фронта		
26.01.1990	17.36–17.55	Фронт окклюзии	190° 3 м/с	220° 5–9 м/с	+1,8	+0,7	+6,4	+4,8	ливневый дождь	3800
27.02.1990	19.46–20.42	Холодный фронт с волнами	190° 4 м/с	290° 3–7 м/с	–1,4	+1,6	+3,0	+0,2	ливневый снег	400
07.03.1990	13.17–13.39	Вторичный холодный фронт	300° 5–8 м/с	320° 9–12 м/с	+0,3	+3,6	+2,1	+1,0	ливневый снег	300
19.10.1996	19.40–21.00	Фронт окклюзии	000° 0 м/с	000° 0 м/с	–0,6	-0,9	+11,4	+10,7	ливневый дождь	2500
27.02.2002	16.51–18.00	Холодный фронт с волнами	150° 3 м/с	290° 6–16 м/с	–3,5	+4,4	+5,3	+1,8	ливневый дождь	2500
03.10.2003	08.08–08.30	Фронт окклюзии	200° 1 м/с	210° 3 м/с	+0,3	+0,3	+10,7	+9,9	ливневый дождь	2300
31.10.2004	00.30–01.00	Фронт окклюзии	170° 2 м/с	180° 3 м/с	–1,0	+0,1	+12,1	+11,6	ливневый дождь	2700
15.03.2005	15.13–15.23	Холодный фронт с волнами	240° 4–9 м/с	300° 7–12 м/с	–1,7	+2,2	+2,7	–0,3	ливневый снег	100
03.10.2006 .	01.10–02.42	Холодный фронт с волнами	210° 1 м/с	230° 3–8 м/с	–0,4	+0,7	+12,7	+11,5	ливневый дождь	1600
23.02.2008	01.03–01.41	Холодный фронт	220° 3–8 м/с	280° 3–18 м/с	–4,0	+3,0	+5,0	+3,7	ливневый дождь	550
12.03.2008	15.31–15.39	Холодный фронт с волнами	170° 3 м/с	230° 3–8 м/с	–2,3	-0,5	+7,9	+5,7	ливневый дождь	1700
08.10.2009	18.06–18.38	Холодный фронт с волнами	180° 2 м/с	340° 9–13 м/с	–3,2	+2,2	+17,7	+11,2	ливневый дождь	2800
10.11.2010	08.50–09.06	Фронт окклюзии	150° 3 м/с	170° 5–8 м/с	–0,6	+0,4	+6,8	+3,7	ливневый дождь	3800
07.10.2011	18.14–18.54	Холодный фронт с волнами	000° 0 м/с	280° 3–6 м/с	–1,1	+1,1	+3,0	+0,2	ливневый снег	400
06.10.2012	18.31–19.30	Холодный фронт с волнами	000° 0 м/с	350° 4–7 м/с	–3,4	-1,2	+2,1	+1,0	ливневый снег	300
12.03.2020	16.54–17.28	Холодный фронт с волнами	200° 8 м/с	270° 11–24 м/с	–4,4	+3,4	+11,4	+10,3	ливневый дождь	2500
14.10.2020	03.45–04.07	Фронт окклюзии	060° 3–6 м/с	100° 3–6 м/с	–2,9	+1,0	+5,3	+1,8	ливневый дождь	2500

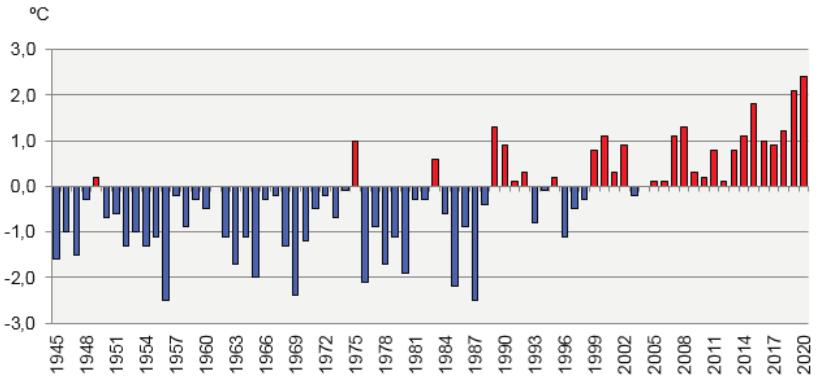


Рис. 2. Отклонение средней годовой температуры воздуха от климатической нормы (+6,7 °С) для территории Республики Беларусь

Формирование зимних гроз над аэродромом Минск-2 в рассматриваемый период было связано с прохождением атмосферных фронтов: холодного фронта с волнами (8 случаев), основного холодного фронта (1 случай), вторичного холодного фронта (1 случай) и фронта окклюзии (7 случаев). Грозы на холодных фронтах отмечались в послеобеденные часы (с 12 до 18 UTC – 5 случаев) или в вечерние часы (с 18 до 20 UTC – 4 случаев), а на фронтах окклюзии – в ночные (с 00 до 03 UTC – 3 случая) или утренние часы (с 08 UTC – 2 случая). Один случай зимней грозы на холодном фронте был отмечен ночью – с 00 до 02 UTC и 2 случая на фронте окклюзии – с 17 до 20 UTC.

При этом, как правило, зимние грозы отмечались вблизи вершины волновых возмущений на холодных фронтах с волнами и вблизи точки окклюзии на фронтах окклюзии. Фронтальные разделы имели скорости смещения более 30 км/ч и были связаны с ориентированными с юга на север или юго-запада на северо-восток ложбинами глубоких скандинавских циклонов с давлением в центре 965–985 гПа и южных циклонов с давлением в центре 995–1005 гПа.

Ветер у земли имел направление южной составляющей со средней скоростью 3–5м/с до прохождения фронта. Прохождение фронтов сопровождалось усилением ветра до 9–13м/с и разворотом на юго-запад в случае фронта окклюзии, или запад, северо-запад в случае холодного фронта. Отмечено лишь 2 случая усиления ветра выше 15 м/с. Также почти всегда отмечались большие градиенты давления, что говорит о больших скоростях смещения воздушных масс.

Пять гроз было отмечено при температуре воздуха +5–0 и менее градусов, две грозы – при температуре +5– +10 градусов, 10 гроз при температуре +10 – +15 градусов.

Все грозы сопровождались осадками: при высоких температурах в виде ливневого дождя с ухудшением видимости от 550 до 3800 м, при температурах около нуля – сильными снегопадами с видимостью от 100 до 400 м.

После определения приземной ситуации осуществлен анализ метеоусловий по высотам с помощью аэрологических диаграмм, полученных с помощью

бесплатной интернет-платформы thundeR [11]. При этом особое внимание было уделено анализу уровней АТ-700, АТ-850, АТ-500, АТ-300. Результаты анализа представлены в табл. 2.

Таблица 2

Аэрологические условия формирования зимних гроз для аэродрома Минск-2 за период с 1989 по 2020 г.

Дата	Время, UTC	Мощность конвективного облака		АТ-850		АТ-700, направление и скорость ветра	АТ-500, направление и скорость ветра	АТ-300, направление и скорость ветра
		Уровень конденсации, м	Уровень конвекции, м	Температура, °С	Дефицит, °С			
26.01.1990	17.36–17.55	700	3500	–0,3	2,0	240° 80 км/ч	240° 160 км/ч	280° 180км/ч
27.02.1990	19.46–20.42	600	2600	–3,3	1,4	250° 80 км/ч	240° 120 км/ч	240° 130км/ч
07.03.1990	13.17–13.39	600	4600	–7,7	4,5	320° 80 км/ч	330° 220 км/ч	330° 220км/ч
19.10.1996	19.40–21.00	700	5300	+5,0	1,3	160° 40 км/ч	160° 50 км/ч	200° 60 км/ч
27.02.2002	16.51–18.00	700	5100	–0,2	0,0	240° 100 км/ч	240° 110 км/ч	240° 150 км/ч
03.10.2003	08.08–08.30	300	5300	+4,8	1,1	220° 25 км/ч	160° 60 км/ч	200° 160км/ч
31.10.2004	00.30–01.00	600	5500	+9,7	2,5	240° 80 км/ч	240° 120 км/ч	240° 170 км/ч
15.03.2005	15.13–15.23	300	2000	–7,0	2,0	270° 80 км/ч	280° 90 км/ч	270° 140 км/ч
03.10.2006.	01.10–02.42	500	5900	+6,7	5	260° 70 км/ч	260° 80 км/ч	260° 150 км/ч
23.02.2008	01.03–01.41	700	2600	+0,5	0,0	270° 120 км/ч	260° 180 км/ч	260° 240 км/ч
12.03.2008	15.31–15.39	500	2400	+0,2	0,5	250° 80 км/ч	240° 120 км/ч	250° 110 км/ч
08.10.2009	18.06–18.38	300	8700	+10,7	0,3	250° 90 км/ч	250° 120 км/ч	250° 160 км/ч
10.11.2010	08.50–09.06	400	3800	+6,5	2,7	200° 60 км/ч	200° 70 км/ч	220° 120 км/ч
07.10.2011	18.14–18.54	800	2800	+5,1	0,2	220° 80км/ч	230° 100 км/ч	220° 130 км/ч
06.10.2012	18.31–19.30	800	5400	+5,5	0,0	250° 110 км/ч	260° 120 км/ч	250° 190 км/ч
12.03.2020	16.54–17.28	700	3100	+3,3	0,4	260° 120 км/ч	260° 120 км/ч	270° 200 км/ч
14.10.2020	03.45–04.07	900	4300	+9,8	2,0	150° 70 км/ч	160° 80 км/ч	210° 110 км/ч

Из аэрологических данных видно, что кучево-дождевые облака, с которыми были связаны зимние грозы, имели нижнюю границу порядка 300–900м, а верхнюю границу 2000–8700 м в зависимости от температурного фона. На уровне АТ-850 практически во всех случаях наблюдается гребень теплого и влажного воздуха, который затем меняется ложбиной холода. Диапазон температур на данном уровне колеблется от –7,7 до 10,7 °С в зависимости от господствующей воздушной массы. На уровне АТ-700 наблюдается усиление южного и юго-западного ветра до критериев струйного течения до 100 км/ч. Анализ данного уровня показывает наибольшие вертикальные скорости и наибольший

подъем частицы воздуха в сложившейся ситуации [10]. На уровне АТ-500 в большинстве случаев отмечаются ветры южного, юго-западного направления со скоростями более 100 км/ч, что говорит о наличии струйного течения. На уровне АТ-300 во случаях, за исключением 19.10.2006, отмечается струйное течение юго-западного направления со скоростями от 100 до 240 км/ч. Струйные потоки и дивергенция, которые наблюдаются на данном уровне, усиливают шторм и создают сдвиг, так что вершины грозового облака иногда будут пролетать над слоисто-кучевыми облаками [10]. К тому же, расположение района с грозами вблизи оси струйного течения на АТ-300 говорит о том, что циклон набирает свою активность [8].

Рекомендации к прогнозу гроз в холодный период года

Проанализировав представленный выше материал о фактических зимних грозах и аэросиноптические условия их формирования, были выделены основные рекомендации к прогнозу гроз в холодный период года для территории Беларуси:

1. Проведение анализа приземной синоптической ситуации, господствующих воздушных масс и стадий барических образований, который позволит определить наличие теплой (с температурой воздуха выше 0 °С) и влажной воздушной массы с юга или юго-запада, а также выявить смещение интенсивно углубляющихся северно-атлантических или южных циклонов в стадии молодого циклона.

2. Изучение динамического фактора поможет увидеть смещение со скоростью более 30 км/ч основных и вторичных активных холодных фронтов, холодных фронтов с волнами и фронтов окклюзии, которые обеспечивают подъем теплого и влажного воздуха нижней тропосферы.

3. Проведение анализа аэрологической диаграммы даст возможность выявить наличие конвективной неустойчивости в атмосфере, характеризующейся вертикальными градиентами температуры значительно больше влажноадиабатической.

4. Исследование ситуации на уровне АТ-700, АТ-500 позволит определить наличие низкоструйных течений и положительной завихренности, указывающей на подъем частицы воздуха.

5. Изучение ситуации на уровне АТ-300 даст возможность выявить наличие мощного струйного течения западной четверти, усиливающего конвективные процессы.

Если в результате пошагового выполнения пунктов данной рекомендации определены условия, благоприятные для формирования зимних гроз необходимо дополнительно использовать расчетные методы прогноза конвективных явлений, построенные для рассматриваемого города или аэродрома.

Также стоит помнить то, что поскольку гроза – это локальное мезомасштабное явление, поэтому для целей наукастинга в сочетании с численными моделями прогноза погоды стоит применять оперативные радиолокационные данные.

Список литературы

1. *Богаткин О. Г.* Основы авиационной метеорологии. СПб. : РГГМУ, 2009. 339 с.
2. *Воробьев В. И.* Синоптическая метеорология. Л. : Гидрометеоиздат, 1991. 616 с.

3. Государственное учреждение «Белгидромет». URL: belgidromet.by/ru/climatolog-ru/view/klimaticheskaja-xarakteristika-2020-goda-3666-2021 (дата обращения: 01.10.2021).

4. Государственное учреждение «Белгидромет». URL: belgidromet.by/ru/news-ru/view/opasnye-javlenija-pogody-v-teplyj-period-goda-grozy-livni-shkvaly-grad-3201 (дата обращения: 15.09.2021).

5. *Мальчик М. К.* Рекомендации по прогнозу гроз в осенне-зимний период. Минск : САМО РАМЦ, 2006. 41 с.

6. *Подгорная Е. В.* Особенности изменения климата Республики Беларусь за последние десятилетия. Минск : Белгидромет, 2015. 120 с.

7. Постнаука. URL: postnauka.ru/faq/88712 (дата обращения: 10.09.2021).

8. *Patrick S. Market* Upper Air Constant Pressure Composites of Midwestern Thundersnow Events. USA : Wea. Forecasting, 2006. 4 с.

9. *Schultz D. M.* An Overview of Thundersnow // Weather. 2009. P. 274–277.

10. The Ultimate Weather Education Website. URL: theweatherprediction.com/weatherpapers/043/index (дата обращения: 08.09.2021).

11. ThundeR – ERA5 sigma levels browser. URL: rawinsonde.com/ERA5_Europe (дата обращения: 29.09.2021).

УДК 551.59

Характеристика туманов в казахстанском секторе Каспийского моря

Ж. К. Наурозбаева (naurozbaeva.zhanar@mail.ru) , Г. М. Шишкина (shishkina_g@meteo.kz)

Управление гидрометеорологических исследований Каспийского моря РГП «Казгидромет», Алматы, Казахстан

Аннотация. Проведен статистический анализ повторяемости туманов казахстанского сектора Каспийского моря, непрерывной продолжительности, скорости и направления ветра, относительной влажности. Для исследования привлечены срочные данные станций: о. Кулалы, Форт-Шевченко, Актау и Тущибек. Период исследования с 1970 по 2020 г. Статистический анализ позволил выявить наибольшую повторяемость по сезонам, полугодиям, оценить непрерывную продолжительность туманов в зависимости от времени года и расположения пункта наблюдения. Также отмечены максимально длительные продолжительности явления, сопутствующие при этом метеорологические условия. Проведен сравнительный анализ станций Форт-Шевченко и Актау, который позволил выявить отличные сектора ветрового направления при появлении туманов, что говорит о различных барико-циркуляционных условий формирования явления. В заключение сделаны выводы, что наибольшая повторяемость туманов на восточном побережье Каспийского моря отмечается в переходные сезоны года, за исключением станции Актау, которая расположена гораздо южнее относительно остальных станций; наибольшая непрерывная продолжительность туманов на станциях Форт-Шевченко, о. Кулалы и Тущибек регистрируется зимой, до 6–8 дней. На станции Актау до 6–8 дней в теплое полугодие; продолжительность более 60 ч на о. Кулалы отмечается в холодное время года; максимальная продолжительность в Актау и Тущибек в последние десятилетия значительно меньше, чем на других станциях; при сравнительном анализе выявлено, что в Актау наибольшая повторяемость в западном и восточном секторах, а в Форт-Шевченко в северном.

Ключевые слова: Каспийское море, туман, продолжительность туманов, повторяемость туманов.

Введение

Туманы относятся к опасным явлениям, которые могут затруднять и даже препятствовать движению любого вида транспорта. Исследованиям формирования, прогнозирования и анализирования туманов посвящено немало работ отечественных и зарубежных ученых. На рубеже прошлого века исследованиями процессов туманообразования в Казахстане в основном занимались в Казахском научно-исследовательском гидрометеорологическом институте, Алма-Атинской Геофизической обсерватории. Известны работы 40-х гг. Э. М. Мошковича, Л. А. Чубукова [7]. В 50-е гг. прошлого века синоптико-аэрологическими условиями туманов в Казахстане занималась Т. А. Дулетова, в исследованиях были привлечены данные по основным аэропортам страны. Даны не только синоптические условия формирования, но и проведен тщательный анализ аэрологических условий. Рассмотрены все виды туманов, а также явления, которые могли предшествовать им или последовать после, такие как дождь, морось, мгла [4]. В современный период исследованиями туманов в Казахстане занимаются Г. О. Оракова, Г. Т. Мусралинова и др. [8]. Также известны работы В. П. Пастуха, Л. Е. Анапольской по исследованиям годового хода туманов и В. В. Смирнова, В. П. Шевченко по туманам северных морей России, где так же, как и на Каспийском море, в зимний период наблюдается устойчивый ледовый покров [9; 10]. Используются и спутниковые наблюдения за туманами, так, например, с помощью модели EOS MODIS ученые Китая определяют расположение туманов над Китайским морем [14]. Рассматриваются и особенности использования двумерной модели пограничного слоя атмосферы для оценки параметров прибрежного тумана для сибирских водохранилищ на основе реанализа и выходных данных региональной климатической модели [16]. Безусловно, основные условия формирования туманов, их особенности даны во многих источниках, посвященных опасным явлениям, морским исследованиям [1–2; 6; 11]. Исследования туманов проводились и на суши, и на акватории моря различных областей [12–13; 15].

Ограниченная видимость во время туманов является серьезной опасностью для судоходства, промысла, прибрежного обслуживания. Ухудшение видимости до 2 км и менее не позволяет в полной мере проведению погрузочно-разгрузочных работ в портах, представляет опасность для плавания и судоходства.

Во время тумана прекращается швартовка судов к базам, транспортным рефрижераторам и танкерам, что приводит к простоям судов и грузоподъемного оборудования, прекращению работ в портах и нефтеперевалочных пунктах [1]. Движение при ограниченной видимости запрещается. В холодный период времени года в Прикаспийском регионе повторяемость туманов довольно высока, особенно продолжительных туманов. Туманы бывают радиационные и адвективные, образуются при разных синоптических ситуациях.

Радиационные туманы, как правило, образуются в ночные и утренние часы, продолжительностью до 6 ч. Появляются в разрушающемся отроге Сибирского антициклона. В теплое время года радиационные туманы практически не формируются. Адвективные туманы более продолжительны, формируются в

теплых секторах циклонов. Появляются также преимущественно в холодное полугодие [2; 6; 11]. Исследования туманов на Каспийском море интересны и востребованы, в современный период не так много работ в данном направлении, ввиду ограниченности исходного материала и его доступа.

Исходные данные и методы исследования

Для проведения исследовательской работы были привлечены данные 4 станций Северного и Среднего Каспия за период с 1970 по 2020 г. (Актау, Тущибек) и с 1986 по 2020 г. (Форт-Шевченко, о. Кулалы), месторасположение которых отображены на рис. 1.

Рис. 1. Карта-схема расположения станций наблюдений

Выбраны были станции на акватории моря, на побережье и на континенте, что позволило рассмотреть, как влияет орография и локальные особенности на распределение явления.

В качестве данных были использованы сведения о фиксировании явления, времени начала и окончания явления.

Проведен статистический анализ. За период исследования были рассчитаны повторяемости туманов по месяцам, за сезоны и полугодия, посчитана продолжительность явлений, построены графики.

Повторяемость числа дней с туманами

Число дней с туманами зависит от многих факторов, прежде всего от синоптических условий, подстилающей поверхности, времени года и суток, близости моря и населенных пунктов и др. Восточное побережье характеризуется наибольшей повторяемостью туманов весной, в начале лета и осенью. Более продолжительные туманы до 8 дней отмечаются зимой, за исключением Актау, где продолжительность явления максимальна в теплое время года, а именно в конце весны-начале лета (рис. 2). Данный факт связан с наличием в этот период аномально холодных вод, увеличивающие возможность конденсации пара в привод-

ном слое. Под воздействием барических циркуляций с северо-запада с более теплой водной поверхности центральных районов моря перемещается на более холодную, что приводит к образованию туманов [2]. Продолжительность туманов до 2 дней наблюдается, как правило, в весенне-осенний период. Период с июля по сентябрь отмечается минимальной повторяемостью туманов.

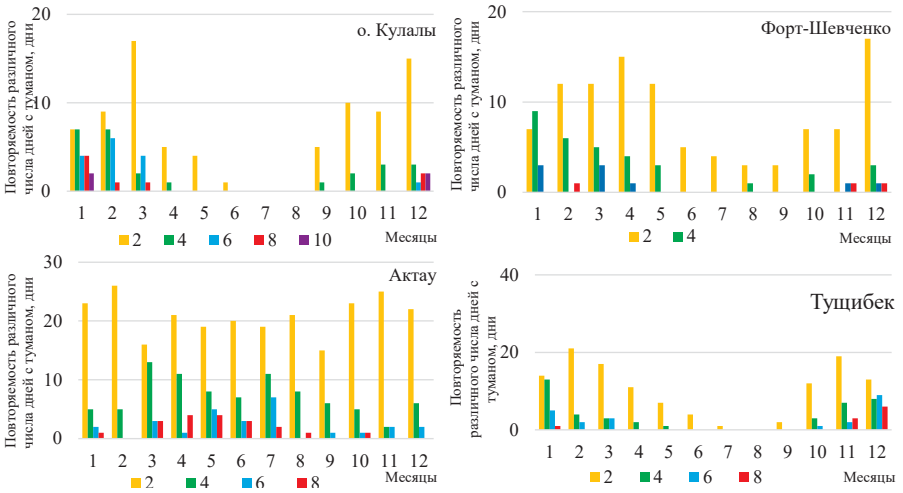


Рис. 2. Повторяемость различного числа дней с туманами

Распределение количества дней с туманами по сезонам, полугодиям также различны. Так, за весь период исследования было посчитано общее количество дней с туманами на станциях (табл. 1).

Таблица 1

Количество дней с туманами за весь период исследования на станциях

Станция	Зима	Весна	Лето	Осень	Холодный период (окт.–март)	Теплый период (апр.–сент.)	Весь период
О. Кулалы	253	79	1	59	361	31	392
Форт-Шевченко	146	118	16	42	234	88	322
Актау	179	334	290	156	392	567	959
Тущибек	328	93	6	132	517	42	559

Из табл. 1 следует, что наибольшее количество дней с туманами наблюдаются зимой и осенью, за исключением Актау, где максимум приходится на весну и составляет 334 дня за весь период с 1970 по 2020 г. Летний период, кроме Актау, характеризуется редкими туманами: на острове Кулалы за 35 лет туман был 1 раз, на Форт-Шевченко 16 раз, а на станции Тущибек за 51 год всего 6 раз. Если рассматривать общее количество туманов, то наибольшая повторяемость их наблюдается в Актау, 959 случаев, что в несколько раз превышает показатели на других станциях.

Продолжительность туманов

Важно не только частота повторяемости туманов, но и их непрерывная продолжительность. В табл. 2 представлены сведения о непрерывной продолжительности явления по часам в процентном соотношении за все месяцы по исследуемым станциям.

Таблица 2

Продолжительность туманов в процентах по часам

МС	Мес	Продолжительность туманов в часах													
		0–4	4–8	8–12	12–16	16–20	20–24	24–28	28–32	32–36	36–40	40–44	44–48	48–60	> 60
о. Кулалы	1	41	3	3	0	3	6	3	9	13	3	3	0	9	3
	2	38	13	6	0	13	3	9	3	6	3	0	0	6	0
	3	47	16	0	6	6	6	3	3	3	3	0	3	0	3
	4	91	0	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0
	5	97	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6	97	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	7	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	8	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	9	91	0	3	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10	75	6	13	3	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0
	11	65	10	10	3	10	0	3	0	0	0	0	0	0	0
	12	44	16	6	6	9	0	0	3	0	0	0	3	3	9
Форт-Шевченко	1	51	6	11	6	0	3	11	3	0	6	3	0	0	0
	2	59	12	3	12	0	3	6	3	0	0	0	0	3	0
	3	56	12	6	3	3	6	3	6	0	3	0	0	3	0
	4	69	9	11	0	3	3	0	0	6	0	0	0	0	0
	5	71	17	0	6	3	0	0	3	0	0	0	0	0	0
	6	97	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	7	94	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	8	94	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	9	94	3	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10	83	6	3	3	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	11	91	3	0	0	0	0	0	0	3	3	0	0	0	0
	12	54	14	17	3	3	3	0	0	0	6	0	0	0	0
Актау	1	65	14	10	2	0	2	4	0	0	4	0	0	0	0
	2	75	4	12	8	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0
	3	48	16	12	6	8	4	2	2	0	2	0	0	0	0
	4	39	29	10	8	6	2	0	0	0	0	2	2	0	2
	5	53	10	10	0	6	8	2	4	0	0	2	4	2	0
	6	49	18	18	2	4	2	0	0	2	4	2	0	0	0
	7	47	20	12	2	6	4	4	2	2	0	0	0	0	2
	8	67	14	10	2	4	0	2	0	2	0	0	0	0	0
	9	76	4	8	4	2	2	2	0	2	0	0	0	0	0
	10	61	20	10	2	0	0	4	0	2	0	0	2	0	0
	11	69	14	6	4	2	2	2	2	0	0	0	0	0	0
	12	69	10	10	8	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0
Тущибек	1	42	14	8	2	8	20	0	0	0	2	2	0	0	2
	2	64	12	6	6	4	2	4	0	0	0	2	0	0	0
	3	74	10	6	4	2	0	0	2	0	0	0	0	0	2
	4	86	8	4	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0
	5	92	6	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	7	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	8	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	9	98	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10	90	6	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0
	11	55	16	10	6	6	0	0	0	2	2	0	0	4	0
	12	45	16	6	6	8	6	2	4	2	0	4	0	2	0

Естественно, продолжительность до 4 ч больше на всех станциях. Более 60 ч на о. Кулалы отмечается в холодное время года, 3 и 9 % от общего числа зафиксированных наблюдений. На станции Тущибек 2 % туманов более 60 ч в январе и марте, а на станции Актау в теплый период – также 2 %. Более 30 ч продолжительности не превышает 13 %, в основном от 3 до 6 %. От 10 до 20 ч в среднем 8–10 %.

По данным табл. 2 также можно заметить больший процент в осенне-зимний период времени года.

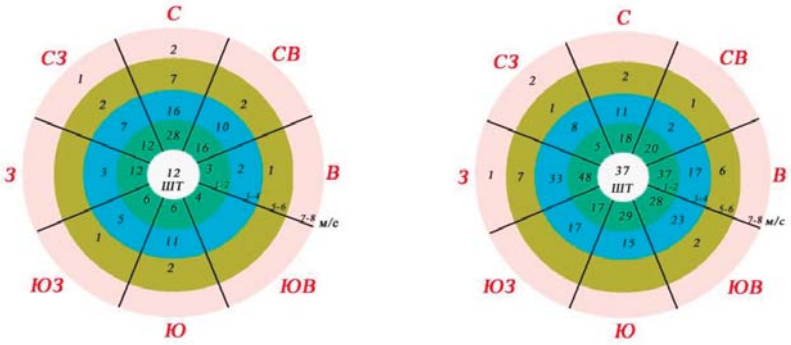
Интересно было также посмотреть максимальные значения продолжительности явления за весь период наблюдения и сопутствующие им значения относительной влажности, скорости и направления ветра. Так, максимум на станции Форт-Шевченко был в 2002 г. в феврале, продолжительность тумана составила 56 ч. При этом влажность была 98–100 %, скорость ветра в среднем до 3 м/с преимущественно западного и южного секторов.

На острове Кулалы максимальная продолжительность была в январе 2001 г., составила 78 ч при влажности 97–100 %, ветре северного сектора со скоростью 0–3 м/с. На станции Актау более продолжительные туманы были в 70–80-е гг. достигая 64 ч (1984, июль), в XXI в. продолжительность не превышает 50 ч, максимум 46 ч в 2010 г. в мае. Также и на станции Тущибек максимум был в 1971 г. – 71 ч., а в нынешнем столетии едва превышает 20 ч.

В ходе исследования было замечено, что наблюдаются некоторые отличия в повторяемости туманов в Актау по сравнению с другими станциями. Безусловно, основная причина кроется в месторасположении станции [3]. Также оказывают влияния и морские течения, и распределение ветра, соответственно барико-циркуляционное поле, близость населенного пункта. Даже при слабом ветре дым двух рядом стоящих труб разной высоты может переноситься в разных направлениях. А зона тумана более 200 м переносится, как правило, не как единое целое. Верхние и нижние слои могут переноситься в разных направлениях с разной скоростью [5]. Для наглядного сравнительного анализа представлены схемы распределения количества туманов в зависимости от направления ветра и скорости на станциях Форт-Шевченко и Актау за период с 2010 по 2020 г. (рис. 3). Скорости ветра отмечены разными цветами от штиля до 8 м/с.

Естественно, повторяемость туманов при малых скоростях ветра 1–2 м/с наибольшая. Наибольшая повторяемость туманов в Форт-Шевченко отмечалось в северном секторе, 28 случаев при скорости 1–2 м/с и даже 2 случая при скорости 7 м/с. А в Актау наибольшая повторяемость в западном и восточном секторах по 48 и 37 случаев. И по количеству туманов в Актау больше, на станции Форт-Шевченко за тот же период.

Таким образом, продолжительные туманы более суток могут наблюдаться в холодное время года, а в Актау и летом, что может приводить к продолжительному по времени ухудшению видимости. Что в свою очередь находит отражение в работе судоходства, промысла и пр. Суда снижают скорость движения, а иногда и вовсе прекращают плавание. При видимости менее 1 км вводятся ограничения для маломерных судов и для судов, занятых ловом рыбы.



а) Форт-Шевченко б) Актау

Рис. 3. Распределение количества туманов в зависимости от направления ветра и скорости на станциях Форт-Шевченко и Актау за период с 2010 по 2020 г.

Заключение

В заключение проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

– наибольшая повторяемость туманов на восточном побережье Каспийского моря отмечается в переходные сезоны года, за исключением станции Актау, которая расположена гораздо южнее относительно остальных станций. Там максимальная повторяемость туманов наблюдается в весенне-летний период, причем начало летнего периода;

– наибольшая непрерывная продолжительность туманов на станциях Форт-Шевченко, о. Кулалы и Тущибек регистрируется в основном зимой, до 6–8 дней, иногда доходя и до 10 дней. На станции Актау до 6–8 дней в теплое полугодие;

– продолжительность явления более 60 ч на о. Кулалы отмечается в холодное время года, что составляет 3–9 % от общего числа зафиксированных наблюдений. На станции Тущибек 2 % туманов более 60 ч в январе и марте, а на станции Актау в теплый период – также 2 %. Более 30 ч процент продолжительности не превышает 13 %, в основном от 3 до 6 %, от 10 до 20 ч – в среднем 8–10 %;

– максимальная продолжительность явления на станциях Актау и Тущибек в последние десятилетия значительно меньше, чем на станциях Форт-Шевченко и Кулалы;

– при сравнительном анализе двух станций было выявлено, что в Актау наибольшая повторяемость в западном и восточном секторах, а в Форт-Шевченко в северном и северо-восточном.

Список литературы

1. *Бухарицин П. И., Болдырев Б. Ю., Новиков В. И.* Комплексная система гидрометеорологического обеспечения безопасности мореплавания, портов и транспортных комплексов на Каспийском море. Астрахань, 2014. 319 с.

2. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. 6. Каспийское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. СПб. : Гидрометеоиздат, 1992. 359 с.

3. *Гусак Ж. К., Кошеленко И. В.* Влияние орографии на туман // Труды украинского научно-исследовательского гидрометеорологического института. М. : Гидрометеоиздат, 1976. Вып. 134. С. 67–78.

4. *Дулетова Т. А.* Синоптико-аэрологические условия туманов в Казахстане : дополнение к отчету / Казахский научно-исследовательский гидрометеорологический институт. Алма-ата, 1957. 51 с.

5. *Кошеленко И.В.* Изменчивость ветра и ее учет при анализе и прогнозе тумана // Труды украинского научно-исследовательского гидрометеорологического института. М. : Гидрометеоиздат, 1977. С. 30–40.

6. *Матвеев Ю. Л.* Синоптические условия образования туманов и дымок // Оптика атмосферы и океана. 2005. Т. 18, № 08. С. 725–726.

7. *Мошкович Э. М.* Исследования процессов туманообразования в районах некоторых АМСГ Казахстана / под ред. Л. А. Чубукова. Алма-Ата : Геофизическая обсерватория, 1943. 65 с.

8. *Оракова Г. О., Мусралинова Г. Т.* Туманы на территории юго-востока Казахстана / Вестник КазНУ. Серия географическая. 2016. С. 149–154. URL: https://bulletin-geography.kaznu.kz/index.php/1-geo/article/view/294

9. *Пастух В. П., Анапольская Л. Е.* Некоторые особенности годового хода туманов на территории СССР // Труды ГГО. 1960. Вып. 113. С. 3–5.

10. *Смирнов В. В., Шевченко В. П.* Дымки и туманы полярных морей // Метеорология и Гидрология. 2003. № 1. С. 49–57.

11. World marine fog analysis based on 58-years of ship observations / C. E. Dorman, J. Mejia, D. Koračin, D. Mcevoy // International journal of climatology. 2020. Vol. 40, N 1. P. 145–168. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=43506900 (дата обращения: 24.08.2021).

12. Review on ice fog measurements and modeling / I. Gultepe, P. Liu, B. Zhou, B. Ferrier, J. Milbrandt, A. Bott, Y. Li, A. J. Heymsfield, R. Ware, M. Pavolonis, T. Kuhn, J. Gurka, J. A. Cermak // Atmospheric research. 2015. Vol. 151. P. 2–19. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=24474577 (дата обращения: 24.08.2021).

13.. Sea fog characteristics based on modis data and streamer model. Material of conference Remote sensing of clouds and the atmosphere XIV / Hao Zhengzhou, Pan Delu, Gong Fang, Chen Jianhua. Berlin, 2009. P. 747515–8. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=16437325 (дата обращения: 24.08.2021).

14.Marine fog: a review / D. Koračin, J. M. Lewis, J. G. Hudson, E. M. Wilcox, C. E. Dorman, A.Torregrosa // Atmospheric research. 2014. Vol. 143. P. 142–175. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=24693329 (дата обращения: 24.08.2021).

15.Model estimates of the fog parameters on the coasts of the siberian reservoirs / E. D. Nadezhina, A. A. Semioshina, I. M. Shkol'nik, V. I. Matsak // Russian meteorology and hydrology. 2010. Vol. 35, N 12. P. 791–798. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=16681119 (дата обращения: 24.08.2021).

УДК 551.509.52

Анализ условий возникновения сдвига ветра на аэродроме Талаги (г. Архангельск)

А. О. Нестерова (lina01nesterova@mail.ru), О. В. Волобуева (ovvolobueva@rshu.ru)
Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург

Аннотация. Представлен анализ условий образования сдвига ветра на аэродроме Талаги (г. Архангельск). Выявлены типовые синоптические ситуации, рассмотрены данные зондирования, рассчитаны критерии неустойчивости атмосферы случаев возникновения сдвига ветра за период 2018–2021 г.

Ключевые слова: сдвиг ветра, атмосфера, интенсивность, неустойчивость, аэродром.

Введение

Главная задача метеорологического обслуживания авиации – это обеспечение и повышение безопасности на протяжении всех этапов полетов, особенно наиболее уязвимых – взлета и посадки.

Сдвиг ветра является одним из опасных метеорологических явлений для воздушных судов, быстро возникающим и трудно определимым. При таких этапах, как взлет и посадка, данное явление приводит к следующим происшествиям: недолет до взлетно-посадочной полосы или выкатывание за пределы дальнего конца полосы, выход за нижний или верхний пределы траектории начального набора высоты.

При управлении самолетом в непосредственной близости от поверхности земли экипаж должен иметь в обязательном порядке информацию о направлении и скорости ветра, а также о возможных резких изменениях этих параметров вдоль траектории движения. Отсутствие информации о резких усилениях или ослаблениях ветра до сих пор является одной из причин летных происшествий [1].

Цель исследования – анализ условий возникновения сдвига ветра на аэродроме Талаги города Архангельска.

Основные задачи – проанализировать метеорологические и синоптические признаки образования сдвига ветра, распределение случаев сдвига ветра по интенсивности, сезонам, эшелонам, анализ данных зондирования атмосферы.

Сдвиг ветра. Общие положения

Сдвиг ветра (WS) – это изменение направления и/или скорости ветра в пространстве в районе аэродрома. Определяется как разность векторов ветра, зависящая от расположения двух точек, находящихся в пространстве [2]. Горизонтальный сдвиг измеряется в метрах в секунду на 600 м расстояния. В табл. 1 приведены критерии интенсивности сдвига ветра.

Представленные выше критерии были введены в Монреале в 1967 г. на пятой Аэронавигационной конференции. Данная классификация сформирована на том, что опасность, относящаяся к сдвигам ветра, связана с фронтами (фронты порывов при грозах и профили сильных ветров вблизи земли) [2]. Позже стало понятно, что подобный подход достаточно простой, и критерии стоит считать условными.

Таблица 1

Критерии интенсивности сдвига ветра

Интенсивность сдвига ветра	Влияние на управление (ВС)	Вертикальный сдвиг ветра, м/с на 30 м высоты; горизонтальный сдвиг ветра на 600 м
Слабый	Незначительное	0–2,0
Умеренный	Значимое	2,1–4,0
Сильный	Существенные трудности	4,1–6,0
Очень сильный	Опасное	>6

Синоптические и метеорологические признаки обнаружения сдвига ветра

Сдвиг ветра может возникать при погоде характерной для антициклона в ночные или утренние часы: появляются условия для возникновения ночной радиационной приземной инверсии температуры.

При приближающемся к аэродрому атмосферном фронте или барической ложбине, за ночь происходит увеличение барического градиента, преимущественно при адвекции тепла на верхней границе пограничного слоя атмосферы. В возникших условиях во второй половине ночи могут сформироваться резкие вертикальные профили ветра в инверсионном слое. Наиболее сильные вертикальные сдвиги ветра в большинстве случаев наблюдаются выше 50–60 м от земной поверхности, в так называемом верхнем слое инверсии. В случае усиления ветра вечером усиливается и турбулентность, в результате инверсия температуры не возникает, и резких вертикальных сдвигов наблюдаться не будет.

При схожести метеорологических условий сдвиги ветра всегда будут в некоторой степени больше в условиях пересеченной местности, чем над равниной. Влияние рельефа возрастает при увеличении скорости ветра. При обтекании препятствий воздушным потоком с большой скоростью на наветренной стороне зарождаются восходящие потоки, увеличивается турбулентность, вертикальные и горизонтальные сдвиги ветра. Достигнув вершины обтекаемого препятствия, скорость и сдвиги ветра усиливаются. На подветренной стороне воздушный поток деформируется: здесь наблюдаются наибольшие сдвиги ветра и турбулентность.

Размеры возмущенной зоны в горизонтальном направлении во много раз могут превышать протяженность самого препятствия. В данной зоне иногда возникают «роторные» вихри, опасные для ВС, имеющие горизонтальную ось радиусом в 100 м и более, в которых часто встречаются наиболее сильные вертикальные потоки и отдельные порывы.

Метеорологические признаки распознавания сдвига ветра

Для приближенной оценки сдвига ветра на аэродромах пользуются данными шаропилотных наблюдений и анеморумбометров, установленных на мачтах или на крышах зданий вблизи аэродрома. В международной практике используют доплеровские радиолокаторы [3].

Признаками наличия сдвига ветра на аэродроме являются:

1) сильный порывистый приземный ветер: часто наблюдается при расположении аэродрома около высоких построек или холмов;

2) реакция ветровых конусов на различное направление ветра;

3) грозы: следует считать, что сдвиг ветра возможен;

4) движения дымовых факелов в разные направления от антропогенных источников;

5) «вирга»: осадки, выпадающие из основания облаков, но при этом не достигающих земли по причине испарения. Несмотря на то что осадки могут не достигать земли, нисходящие потоки доходят до земной поверхности;

6) шкваловый ворот, движущееся впереди пояса дождя и указывающее на наличие фронта порывов.

Физико-географическое и климатическое описание района

Город Архангельск и сам аэропорт располагаются в устье р. Северной Двины на расстоянии 30–35 км от ее впадения в Двинской залив Белого моря. На западе в пяти километрах от аэродрома находится р. Кузнечиха, на юго-западе в двух километрах от аэродрома – р. Юрас. Территория представляет собой обширную равнину, имеется небольшой уклон к Белому и Баренцеву морям (рис. 1).

Рис. 1. Местоположение аэропорта на материковой карте Архангельской области

ВПП ориентирована с запада на восток. С севера к ВПП примыкает лес высотой 10–15 м, на северо-востоке и востоке расположены болота.

Географическое распределение направлений ветра и его скоростей определяется сезонным режимом барических центров, стационирующих над Северной Атлантикой и Евразией и орографических условий. В холодное время года ветровой режим формируется под влиянием Исландского минимума, который в теплое время года заполняется и его деятельность ослабевает.

В районе аэродрома наиболее неблагоприятными направлениями ветра, перпендикулярными к взлетно-посадочной полосе, являются северные и южные. Усиление этих ветров до скорости более 10 м/с затрудняет взлет и посадку самолетов.

Анализ условий образования сдвига ветра на аэродроме Талаги города Архангельска

Для исследования случаев сдвига ветра были использованы данные бортовой погоды и журнала фактической погоды АВ-6 Авиационного Метеорологического Центра (АМЦ) Архангельск. За период 2018 – июнь 2021 г. представлены данные по количеству случаев сдвига ветра различной интенсивности на аэродроме Талаги (табл. 2).

Таблица 2

Повторяемость случаев сдвига ветра различной интенсивности на аэродроме Талаги за период 2018 – июнь 2021 г.

Интенсивность сдвига ветра	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г. (январь-июнь)	Общее количество	Повторяемость, %
Слабая	2	2	3	0	7	27
Умеренная	7	5	4	2	18	69
Сильная	0	0	0	1	1	4
Итого	9	7	7	3	26	100

За исследуемый период количество случаев сдвига ветра со слабой интенсивностью составляет 7 случаев (27 %), умеренной – 18 случаев (69 %). Случай сдвига ветра сильной интенсивности был зафиксировано только в апреле 2021 г. (рис. 2).

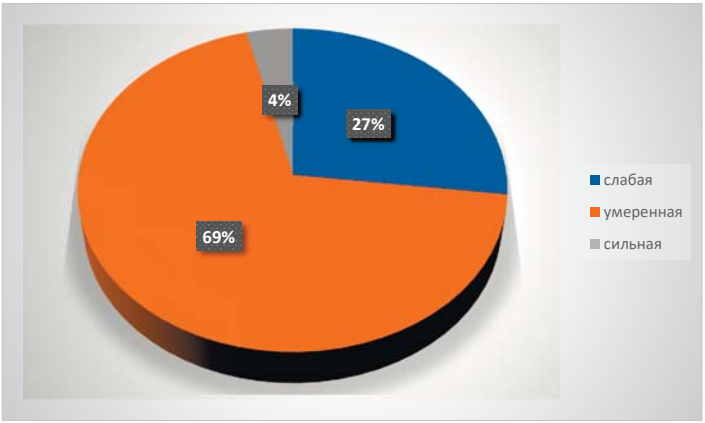


Рис. 2. Повторяемость случаев сдвига ветра различной интенсивности на аэродроме Талаги за период 2018 – июнь 2021 г.

Распределение случаев сдвига ветра по сезонам представлено в табл. 3.

Таблица 3

Повторяемость случаев сдвига ветра по сезонам на аэродроме Талаги за период 2018 – июнь 2021 г.

Интенсивность сдвига ветра	Зима	Весна	Лето	Осень	Общее количество
Слабая	2	4	0	1	7
Умеренная	3	5	5	5	18
Сильная	0	1	0	0	1
Итого случаев	5	10	5	6	26
Повторяемость, %	19	38	19	23	100

По табл. 7 видно, что наибольшее количество случаев сдвига ветра было весной (10 случаев), 6 случаев – осенью и по 5 случаев – зимой и летом.

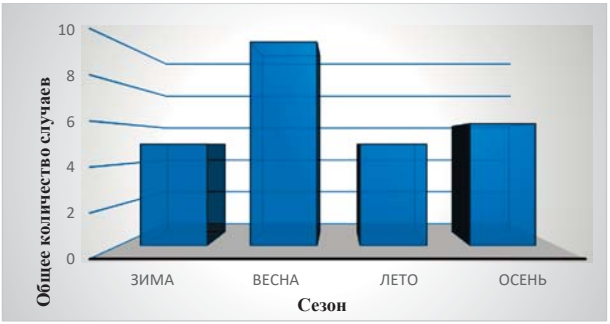


Рис. 3. Повторяемость случаев сдвига ветра по сезонам на аэродроме Талаги за период 2018 – июнь 2021 г.

Наибольшая повторяемость случаев сдвига ветра по сезонам за исследуемый период наблюдалась весной (38 %), а наименьшая – зимой и летом (по 19 %).

Большое количество случаев сдвигов ветра весной обусловливается тем, что в это время активизируются синоптические процессы, устойчивые воздушные массы сменяются неустойчивыми, теплый воздух с океана начинает смещаться на охлажденную поверхность.

Также были проанализированы случаи сдвига ветра по эшелонам (высотам) (табл. 4)

Таблица 4

Повторяемость случаев сдвига ветра по эшелонам на аэродроме Талаги за период 2018 – июнь 2021 г.

Интенсивность сдвига ветра	0–600 м (SFC/FL030)	600–1500 м (FL030/ FL050)	1500–3000 м (FL050/ FL100)	Выше 3000 м (выше FL100)
Слабая	7	–	–	–
Умеренная	18	1	–	–
Сильная	1	–	–	–
Итого случаев	26	1	0	0
Повторяемость, %	96	4	0	0

Сдвиги ветра в большей степени наблюдались от земной поверхности до 600 м (до эшелона 020). Один случай с умеренным сдвигом произошел в промежутке от 300 до 1000 м 23 марта 2019 г. Выше 1500 м сдвигов не было.

В результате проведенного анализа синоптических ситуаций (используя приземные карты погоды), были определены типовые синоптические ситуации при возникновении сдвига ветра на аэродроме Талаги (табл. 5, рис. 4).

Таблица 5

Типовые синоптические ситуации при возникновении сдвига ветра на аэродроме Талаги

Синоптическая ситуация	Количество случаев	Повторяемость, %
Ложбина	11	48
Холодный фронт	2	8
Тыловая часть циклона	4	16
Передняя часть циклона	1	4
Гребень	5	20
Теплый сектор циклона	1	4
Итого	25	100

Наибольшее количество сдвигов ветра наблюдалось в барических ложбинах (11 случаев или 48 %), 5 случаев (20 %) было на гребнях антициклонов, два случая на холодном фронте, четыре в тыловой части циклона, по одному – в передней части циклона и в теплом секторе.

Большое количество сдвигов ветра в ложбинах обусловлено изменениями градиента давления. На холодном фронте и в тыловой части циклона сдвиги ветра могут возникать из-за изменений направления ветра, при прохождении конвективной системы.

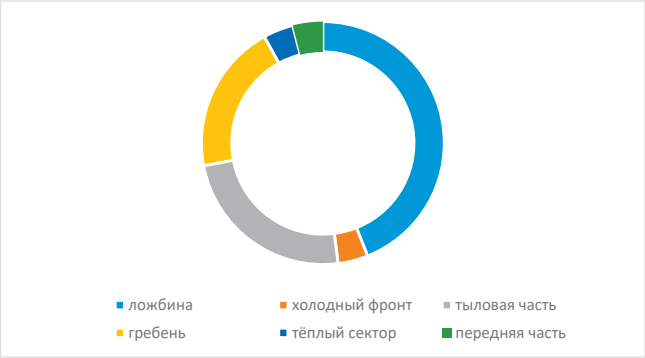


Рис. 4. Типовые синоптические ситуации при возникновении сдвига ветра на аэродроме Талаги за период 2018–2021 г.

На рис. 5 представлен пример синоптической ситуации (ложбина) случая сдвига ветра 29 марта 2018 г.

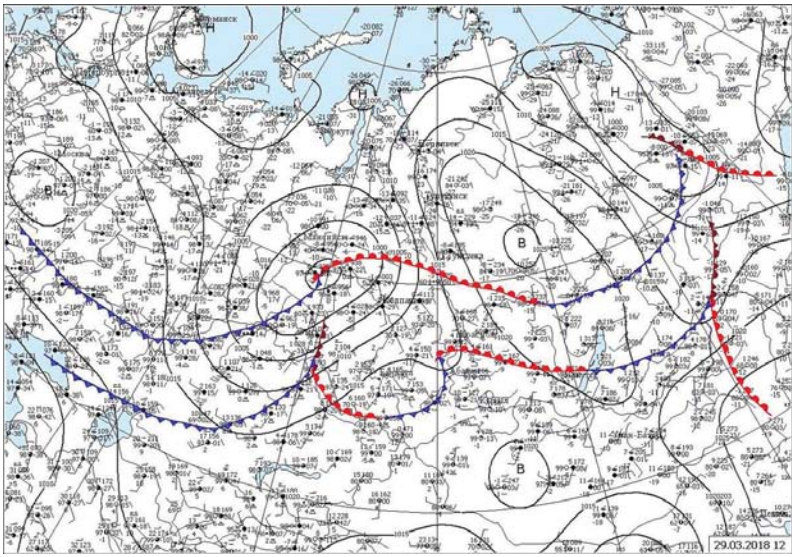


Рис. 5. Приземная синоптическая карта 29.03.2018, 12 UTC (ложбина)

Анализ состояния приземного слоя по данным зондирования

По выбранным случаям сдвига ветра за период 2018–2021 гг. были проанализированы данные зондирования атмосферы [4] от земной поверхности до высоты 600 м.

При анализе данных зондирования было выявлено 5 случаев инверсий. По причине запуска радиозондов только два раза в сутки (в 00 и 12 UTC), время зондирования может не совпадать со временем наличия инверсии, когда были зафиксированы сдвиги ветра. Так как небольшое количество инверсий, зафиксированных по данным радиозондирования, не может быть достаточным для использования этого параметра в качестве предиктора для прогноза сдвига ветра, было решено исследовать состояние атмосферы на предмет неустойчивости.

Были рассчитаны индексы неустойчивости Вайтинга, индекс Total Totals, Vertical totals index и Cross total index [4]. Анализ расчетов показал, что успешность прогнозов сдвига ветра с применением индексов неустойчивости недостаточная. Предполагается, что исследование большего количества случаев сдвига ветра позволит получить более репрезентативные результаты.

Заключение

В представленной работе, исходя из бортовых и фактических данных с аэродрома Талаги г. Архангельска, был проведен анализ случаев сдвига ветра по различным параметрам. По интенсивности больше всего наблюдался умеренный сдвиг (69 %), чаще в весеннее время (38 %) и в слое между земной поверхностью и 600 м в 96 % случаях.

Анализ синоптических ситуаций, при которых возникали сдвиги ветра показал, что в большей степени сдвиги ветра наблюдались в барических ложбинах (58 %) и на гребнях антициклонов (22 %), меньше при прохождении фронтов и в тыловой части циклонов.

Расчет индексов неустойчивости (Вайтинга, Total Totals index, Vertical Total Index и Cross Total Index) показал неустойчивые результаты, не прослеживается четкая зависимость между наблюдаемыми сдвигами ветра и полученными значениями индексов.

В результате проведенного анализа, можно отметить, что для прогноза сдвигов ветра необходимо использовать комплексный подход: анализ синоптической ситуации, данных зондирования атмосферы, бортовой погоды, расчет критериев неустойчивости и, несомненно, необходимо знание местных особенностей территории прогнозирования.

Результаты исследований будут предоставлены специалистам АМЦ Архангельск для использования при анализе и прогнозе сдвига ветра на аэродроме Талаги.

Список литературы

1. *Богаткин О. Г.* Основы авиационной метеорологии : учебник. СПб. : Изд-во РГГМУ, 2009. 339 с.

2. *Позднякова В. А*. Практическая авиационная метеорология : учеб. пособие для летного и диспетчер. состава ГА. Екатеринбург : Уральский УТЦ ГА, 2010. 113 с.

3. Руководство по сдвигу ветра на малых высотах. Международная организация гражданской авиации. Изд. первое. Женева, 2005. 258 с.

4. University of Wyoming. URL: http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html

УДК 551.583.1

Повторяемость заморозков на территории Забайкальского края

Е. В. Носкова (elena-noskova-2011@mail.ru)[1,2], И. Л. Вахнина (vahnina_il@mail.ru)[1,2]

[1] *Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, Чита*
[2] *Забайкальский государственный университет, Чита*

Аннотация. Проведен пространственно-временной анализ заморозков на территории Забайкальского края за 1976–2020 гг. Рассчитана продолжительность безморозного периода, определены даты последнего заморозка весной и первого заморозка осенью, а также повторяемость числа дней с заморозками по геоадминистративным районам края.

Ключевые слова: температура воздуха, опасное явление, заморозок, безморозный период, Забайкальский край.

В связи с проблемой глобального изменения климата, связанной преимущественно с повышением приземной температуры воздуха, исследование погодных явлений, в том числе заморозков и их пространственного распределения, является весьма актуальным. Согласно типовому перечню и критериям опасных метеорологических явлений (ОЯ) [9] заморозки относятся к ОЯ, приводящим к

повреждению сельскохозяйственных культур, а также к частичной или полной гибели урожая. Под заморозком понимается понижение температуры воздуха на поверхности почвы до нуля и ниже при положительной средней суточной температуре воздуха [2]. Промежуток времени между датой последнего заморозка весной и датой заморозка осенью относится к безморозному периоду [7]. Информация о повторяемости заморозков используется при установлении сроков сева сельхозкультур и их уборки, для разработки мер защиты растений от этого опасного явления, для получения высоких и устойчивых урожаев.

Темпы роста температуры воздуха в Забайкальском крае за период наиболее активного глобального потепления [1; 4–6] соизмеримы с данными по РФ. Наряду с этим в крае наблюдается и увеличение продолжительности периодов с устойчивыми переходами температуры воздуха через 0, 5, 10 и 15 °С [4]. Поскольку территория Забайкальского края является зоной рискованного земледелья [10], пространственно-временной анализ климатических показателей, в том числе ОЯ, оказывающих влияние на сельскохозяйственное производство, имеет важное значение для экономики региона. На территории исследования устойчивый переход среднесуточной температуры воздуха через 5 °С в весенний и осенний сезоны, когда начинается активное развитие сельскохозяйственных и дикорастущих видов растений [3], отмечается в первых числах мая и осенью в третьей декаде сентября [4]. Таким образом на вегетационный период здесь приходится промежуток времени с мая по сентябрь.

Оценка повторяемости заморозков на территории Забайкальского края выполнена по данным наблюдений 27 метеорологических станций Забайкальского управления по метеорологии и мониторингу окружающей среды УГМС, которые объединены в группы по геоадминистративному расположению [8]. Использованы данные о средней и минимальной суточных температурах воздуха за 1976–2020 гг.

За период исследования получено, что в среднем на территории Забайкальского края 92 сут. в году относятся к периоду без заморозков (от даты последних заморозков (до 15 июля – середины календарного лета) до первых (после 15 июля)), изменяясь по территории от 75 до 110 сут. (рис.). Наименьшая продолжительность безморозного периода наблюдается на севере края, наибольшая – в центральных, юго-восточных и восточных районах края. В среднем по региону последние заморозки отмечаются 3 июня, первые – 3 сентября.

Наиболее часто заморозки отмечаются в начале (мае) и в конце (сентябре) периода вегетации (табл.). В мае на территории исследования по данным всех исследуемых метеостанций повторяемость заморозков в среднем составляет 44 % дней (около 14 сут.), в сентябре – 37 % (около 11 сут.). Пространственное распределение повторяемости понижений минимальной температуры воздуха до 0 °С и ниже на фоне положительных среднесуточных значений сходно с распределением продолжительности безморозного периода. В северных и западных районах повторяемость заморозков равна 5 суткам, в остальных – 3–4.

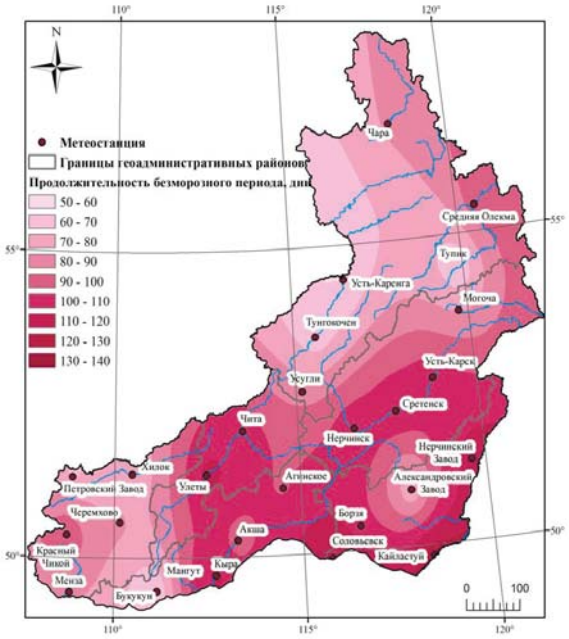


Рис. Продолжительность периода без заморозков на территории Забайкальского края

Таблица

Повторяемость числа дней с заморозками по месяцам по геоадминистративным районам Забайкальского края за 1976–2020 гг., дни

Район	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь
Западные	17	3	0	1	13
Центральные	10	0	0	0	8
Южные	13	2	0	1	11
Юго-восточные	9	1	0	0	8
Восточные	12	1	0	0	10
Северные	17	2	0	2	14
В среднем по краю	14	2	0	1	11

Заморозки в июне, повторяемость которых составляет 2 дня, также встречаются практически ежегодно: в среднем по территории исследования в этом месяце в 43 случаях из 45 лет фиксировались заморозки. В западных и северных районах июньские заморозки встречаются в 10 случаях из 10, в южных – в 8, в восточных – в 6, в юго-восточных – в 5 и в центральных – в 3. В отдельные годы в среднем по территории исследования было до 4–5 сут. с заморозками (1976, 1987, 1992 и 1999 гг.). На метеостанции Кайластуй (юго-восточный район) за исследуемые 45 лет не было ни одного случая заморозка. В июле в Забайкальском крае заморозки в воздухе фиксируются редко. За период с 1976 по 2020 г. на 10 из 27 рассматриваемых метеостанций в этом месяце они не отмечались.

Только в западных, южных и северных районах приходится 1 случай на 10 лет (в северных – 2). В августе заморозки встречаются в 6 случаях из 10. В этом месяце их повторяемость равна 1 суткам, однако в 1979 г. наблюдалось 3 случая, а в западных и южных районах – 5. Средняя повторяемость заморозков в сентябре равна 11 суткам: в северных – 14, в южных и юго-восточных – 8.

За исследуемый 45-летний период в среднем по исследуемой территории выявлено увеличение продолжительности периода без заморозков на 11 сут. Это обусловлено тем, что последние заморозки стали наблюдаться раньше в среднем на 8 сут., а первые – позже на 3 сут. При этом увеличение длительности безморозного периода отмечено во всех районах края. Наибольший рост характерен для западных и северных районов (на 14–20 сут.), наименьший – для юго-восточных и восточных (3–6 сут.). Повторяемость же заморозков в среднем за сезон (май – сентябрь) уменьшилась на 1,6 сут. за 10 лет, что составляет около 25 % от среднего значения за период исследования.

Таким образом, за 1976–2020 гг. в Забайкальском крае наряду с ростом температуры воздуха и увеличение продолжительности периода вегетации отмечается снижение повторяемости заморозков и увеличение продолжительности безморозного периода, что не может не оказывать влияние на продуктивность сельскохозяйственных культур. Результаты проведенных исследований необходимо учитывать при стратегическом планировании и разработке планов адаптации аграрного сектора экономики региона к климатическим рискам и современным изменениям климата.

Список литературы

1. *Вахнина И. Л., Носкова Е. В.* Изменения климатических условий Юго-Восточного Забайкалья за период вегетации по метеорологическим и дендрохронологическим данным // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2021. № 3. С. 83–101. https://doi.org/10.37162/2618-9631-2021-3-77-94

2. ГОСТ 17713-89. Сельскохозяйственная метеорология. Термины и определения. М. : Изд-во стандартов, 1989. 16 с.

3. *Григорьева Е. А.* Динамика временной границы вегетационного периода Южной части Дальнего Востока // Региональные проблемы. 2009. № 12. С. 29–34.

4. *Носкова Е. В., Вахнина И. Л., Рахманова Н. В.* Суммы активных температур воздуха (выше 10 °С) на территории Забайкальского края // Успехи современного естествознания. 2019. № 11. С. 148–153. https://doi.org/10.17513/use

5. *Носкова Е. В., Обязов В. А., Вахнина И. Л.* Изменения приземной температуры воздуха на юге Сибири и их взаимосвязь с крупномасштабными циркуляционными процессами в атмосфере // Географический вестник. 2021. № 2 (57). С. 75–84. https://doi.org/10.17072/2079-7877-2021-2-75-84.

6. *Обязов В. А.* Адаптация к изменениям климата: региональный подход // География и природные ресурсы. 2010. № 2. С. 34–39.

7. Российский гидрометеорологический энциклопедический словарь / под. ред. А. И. Бедрицкого. СПб. ; М. : Летний сад, 2008. Т. 1: А-И. 336 с.

8. Список станций по геоадминистративному расположению // Официальный сайт Федерального государственного бюджетного учреждения «Забайкальское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды». URL: https://zabgidromet.ru/spisok-stanczij-po-geoadministrativnomu-raspolozheniyu/ (дата обращения: 20.01.2021).

9. Типовой перечень и критерии опасных метеорологических явлений // Гидрометцентр России. URL: https://meteoinfo.ru/hazards-definitions (дата обращения: 20.10.2021).

10. Читинская область // Энциклопедия Забайкалья. URL: http://encycl.chita.ru/encycl/concepts/?id=9138 (дата обращения: 21.10.2021).

УДК 551.579(470)(063)

Анализ максимальных уровней воды на гидрологических постах Иркутской области (на примере бассейна Ангары)

Е. А. Парыгина (lizavetaparygina@yandex.ru), Н. В. Кичигина (nkichigina@mail.ru)
Иркутский государственный университет, Иркутск
Институт географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, Иркутск

Аннотация. Представлены результаты анализа максимальных и критических уровней воды на 13 исследуемых гидрологических постах бассейна Ангары за период 1970–2019 гг., выявлена основная причина, способствовавшая возникновению самых масштабных наводнений за рассматриваемый промежуток времени и дана краткая характеристика этих наводнений. Исходные данные по уровням воды предоставлены «Иркутским управлением по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» и «Автоматизированной информационной системой государственного мониторинга водных объектов» (АИС ГМВО). На примере гидрологических постов в бассейне р. Ангары было показано, что вышеприведенные гидрологические параметры, а именно критические и максимальные уровни воды, являются достаточно информативными и важны при анализе опасности наводнений. Выявлено, что наивысшие уровни воды на гидрологических постах наблюдались в 1971, 2001 и 2019 гг. Наибольшее количество превышений критических уровней наблюдалось в 2001 г., наивысших уровней воды больше всего было зафиксировано в 2019 г.

Ключевые слова: наводнения, критический и максимальный уровни воды, дождевые паводки, водосборный бассейн р. Ангара, Иркутская область.

Введение

Одними из главных природных гидрологических параметров, характеризующих опасность наводнений, являются критический и максимальный уровни воды на реках. Количественным показателем начала наводнения принят критический уровень (Нкр), при котором происходит выход воды на пойму со значительным затоплением сельскохозяйственных угодий и частичным – населенных пунктов [9]. Если максимальный уровень воды во время дождевого паводка превышает критический уровень на гидрологическом посту, то происходит затопление местности и фиксируется наводнение. В бассейне р. Ангары наводнения не редкое явление, этим обусловлена актуальность данного исследования.

Цель работы – проанализировать самые масштабные наводнения за период с 1970 по 2019 г. на исследуемых гидрологических постах бассейна Ангары в пределах Иркутской области по данным максимальных уровней воды.

Напомним, что основной водной артерией в Иркутской области является р. Ангара с ее крупными притоками (реки Иркут, Китой, Ока, Ия, Уда, Бирюса и др.). Бассейн Ангары отличается разнообразием не только климатических условий ввиду большой протяженности территории бассейна, но и наличием различных типов рельефа – как горного, так и равнинного платформенного. В связи с этим формируются особенности гидрологического режима рек. Области формирования и питания рек бассейна Ангары приурочены к горам Восточного Саяна, где значительные перепады высот способствуют быстрому сбросу воды в реки. Для ангарского бассейна свойственно общее увеличение нормы стока весеннего периода во время половодий с юга на север и обратная тенденция для стока в

летний сезон в период дождевых паводков. Среднее течение рек проходит по Среднесибирскому плоскогорью, где небольшая высота и крутизна склонов приводят к обширному затоплению пойменных участков во время пика наводнения [6].

Сильные ливневые дожди в теплый период года вызывают наводнения паводочного генезиса. Главной причиной большинства паводочных наводнений в бассейне Ангары является вторжение на территорию Иркутской области в летний сезон мощных циклонов. В это время над областью формируется область пониженного атмосферного давления. Теплые воздушные массы приходят с юга и запада.

Объекты, исходные данные и методика исследования

Объектом исследования стал бассейн р. Ангары с ее крупными притоками в пределах Иркутской области.

Ввиду ограниченности исходных данных по критическим и максимальным уровням воды исследовано 13 гидрологических постов в бассейне Ангары за период с 1970 по 2019 г. В данном исследовании максимальные уровни воды необходимы для определения периодов превышения критического уровня начала затопления на рассматриваемых гидрологических постах. Критический уровень начала затопления установлен для каждого из исследуемых гидрологических постов.

Информация предоставлена «Иркутским управлением по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» [4] и Автоматизированной информационной системой государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО) [1]. Все рассмотренные в работе гидрологические посты указаны в табл. 1.

Таблица 1

Критические и максимальные уровни воды на гидрологических постах в бассейне реки Ангары Иркутской области (составлено по данным ФГБУ «Иркутское УГМС» и АИС ГМВО)

Река – пункт наблюдения	Критический уровень воды ($H_{кр}$), см	Максимальный уровень воды за рассматриваемый период	Дата наступления
Иркут – с. Тибельти	600	887	27.07.1971
Олха – д. Олха	210	282	26.07.1971
Китой – с. Раздолье	280	344	26.07.1971
Китой – р.п. Китой	400	622	09.07.2001
Ока – с. Ухтуй	400	662	09.07.2001
Тагна – с. Хор-Тагна	460	507	08.07.2001
Ия – г. Тулун	700	1382	29.06.2019
Уда – г. Нижнеудинск	320	507	28.06.2019
Уда – с. Широково	570	924	29.06.2019
Чукша – д. Савельевка	570	615	06.05.1999
Бирюса (Большая Бирюса) – уч. Нерой	310	371	27.06.2019
Бирюса – г. Бирюсинск	350	554	28.06.2019
Бирюса – р. п. Шиткино	550	803	30.06.2019

Методика исследования заключается в анализе максимальных уровней воды по сравнению с критическими уровнями начала наводнения на гидрологических постах. Далее выделялись случаи наводнений по превышениям критического уровня, с определением дат и высотой подъема уровня во время пика

наводнения. На основе этих данных проанализирована опасность наводнений и выявлена основная причина, способствовавшая их возникновению.

Результаты исследования

За период с 1970 по 2019 г. наивысшие уровни воды на гидрологических постах наблюдались в 1971, 2001 и 2019 гг. (см. табл. 1) с конца июня по конец июля, что говорит о их паводочном (дождевом) генезисе.

На рисунке представлено распределение количества случаев превышения критического уровня воды на гидропостах по годам.

Наибольшее количество превышений критических уровней воды за анализируемый период наблюдалось в 2001 г. (10 гидропостов из 13 подверглись затоплению). Далее следуют 1980, 2006 и 2019 гг., во время которых на 8 исследованных гидропостах зафиксировано превышение критического уровня. В 1984 г. 7 гидропостов подверглись затоплению.

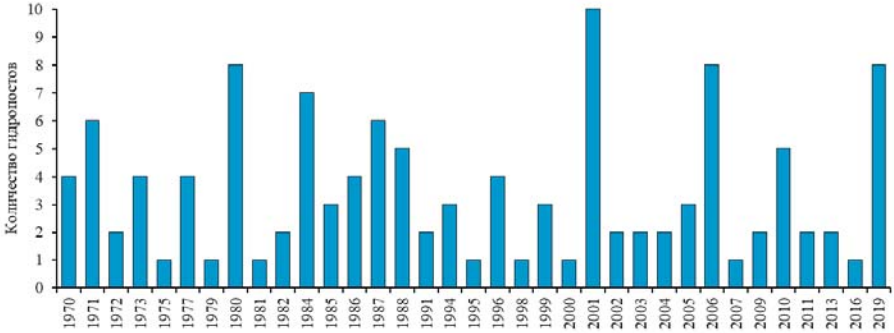


Рис. Количество гидропостов, на которых наблюдались наводнения по годам (по данным Иркутского УГМС и АИС ГМВО)

Стоит отметить, что почти каждый год на каких-либо из исследуемых гидропостов фиксировались превышения критического уровня – из 50 рассмотренных лет для 36 были зафиксированы случаи наводнений на том или другом гидропосту. Однако зачастую уровень воды поднимался всего на 1–10 см выше критического уровня и не приводил к формированию крупного наводнения. Это были малозначительные затопления прибрежных пойменных участков без серьезных последствий для проживающих вблизи рек жителей населенных пунктов.

Наивысших уровней воды больше всего было зафиксировано в 2019 г. – на 6 гидрологических постах из 13 исследованных, меньше всего в 1999 г. – лишь на одном гидропосту (р. Чукша – д. Савельевка). По три гидрологических поста пришлось на 1971 и 2001 гг. (см. табл.).

Вышеизложенный результат подтверждает, что самые опасные наводнения за исследуемый период в Иркутской области наблюдались в 1971, 2001 и 2019 гг. В 1971 г. наводнение произошло в период с 18 по 26 июля. Причиной наводнения стали обильные летние паводки, возникшие после трех дождевых

периодов (18–20, 22–23 и 25–26 июля), в результате вторжения на территорию Иркутской области циклонов со стороны Монголии. Следует отметить, что вторжение крупных циклонов с юга представляет собой относительно редкое атмосферное явление, повторяющееся раз в 15–40 лет. Такие циклоны, как правило, сопровождаются обилием осадков высокой интенсивности, что и произошло в Иркутской области [5]. Так как максимальные уровни на гидропостах наблюдались 26 и 27 июля, то основную роль в формировании серьезных последствий от наводнения сыграл третий циклон. Во время прохождения первых двух циклонов произошло насыщение грунта влагой. Осадки, выпавшие во время третьего циклона на уже насыщенную влагой поверхность водосбора, привели к быстрому поверхностному стеканию воды в речную сеть и еще большему подъему уровня воды, поэтому максимальный уровень воды на гидропостах наблюдался во время действия последнего циклона.

В период с 8 по 12 июля 2001 г. на левых притоках бассейна Ангары прошел сильный паводок. На территорию Иркутской области снова вторгся циклон, пришедший из Монголии [8]. Обильные дождевые паводки привели к разливу рек Иркут, Китой, Белая, Ия, Ока и др. От разлива только одного Иркута и его притоков (реки Олха и Кая) был нанесен ущерб более 600 жилым домам и около 800 дачным участкам в пригородах Иркутска и Шелехова, разрушены десятки километров дорог, линий электропередачи. В Шелеховском районе было повреждено семь мостов на р. Олха, два из которых не подлежат восстановлению [2]. В результате наводнения 2001 г. затоплениям подверглись Ангарский, Усольский, Черемховский, Зиминский, Заларинский, Тулунский и Тайшетский районы [3]. Больше всех от затоплений пострадали р.п. Китой, с. Ухтуй, с. Хор-Тагна, так как здесь наблюдались наивысшие уровни воды с 1970 по 2019 г., что отражено в табл. 1.

В 2019 г. над территорией Иркутской области прошел еще один мощный циклон. Выпавшие дожди в период с 25 по 27 июня превысили месячную норму в 1,5–4 раза. С 27 по 30 июня наблюдалась волна мощных наводнений, которые возникли в результате резкого повышения уровня воды и стали причиной затопления населенных пунктов, расположенных в поймах рек Ия, Уда, Бирюса, Ока. С 27 по 31 июля наблюдалась вторая волна дождевого паводка на реках Ия, Иркут, Ока и др. В результате прохождения интенсивных дождей в зону затопления попало 109 населенных пунктов в 11 муниципальных районах, где было затоплено около 10890 жилых домов (из них более 5000 домов было снесено полностью), разрушены дамбы, повреждены автомобильные мосты [7].

Наводнение 2019 г. является одним из самых крупных наводнений за последние 50 лет фиксирования максимальных уровней воды на гидрологических постах в бассейне Ангары. Наиболее масштабные разрушения и затопления произошли в городах Тулун, Нижнеудинск, Бирюсинск и др. На гидрологических постах, расположенных в городах Тулун, Нижнеудинск и Бирюсинск, а также с. Широково, уч. Нерой и р. п. Шиткино в этот год наблюдались наивысшие уровни воды за исследуемый период.

Заключение

Одним из наиболее значимых параметров при анализе опасности наводнений являются уровни воды. На основе проведенного анализа, выявлено, что наивысшие уровни воды на гидрологических постах наблюдались в 1971, 2001 и 2019 гг. Наибольшее количество превышений критических уровней воды за анализируемый период наблюдалось в 2001 г. (10 гидропостов из 13 подверглись затоплению). Наивысших уровней воды больше всего было зафиксировано в 2019 г. – на 6 гидрологических постах из 13 исследованных, меньше всего в 1999 г. – лишь на одном гидропост (р. Чукша – д. Савельевка). По три гидрологических поста пришлось на 1971 и 2001 гг.

За рассматриваемый период с 1970 по 2019 г. основополагающая роль в возникновении масштабных затоплений населенных пунктов, расположенных в бассейне Ангары Иркутской области, принадлежала активной циклонической деятельности, которая оказала значительное влияние на гидрологический режим рек и способствовала возникновению интенсивных летних дождевых паводков. Теплые воздушные массы приходят на территорию области с юга и запада.

В 1971 г. наводнение произошло в период с 18 по 26 июля. Причиной наводнения стали обильные летние паводки, возникшие после трех дождевых периодов (18–20, 22–23 и 25–26 июля), в результате вторжения на территорию Иркутской области циклонов со стороны Монголии.

В период с 8 по 12 июля 2001 г. на территорию Иркутской области снова вторгся циклон, пришедший из Монголии. Обильные дождевые паводки привели к разливу рек Иркут, Китой, Белая, Ия, Ока и др., затоплениям подверглись Ангарский, Усольский, Черемховский, Зиминский, Заларинский, Тулунский и Тайшетский районы.

В 2019 г. наблюдалось две волны дождевых паводков (с 27 по 30 июня и с 27 по 31 июля), которые стали причиной затопления населенных пунктов, расположенных в поймах рек Ия, Уда, Бирюса, Ока и др. Наиболее масштабные разрушения и затопления произошли в городах Тулун, Нижнеудинск и др.

Работа выполнена при поддержке гранта ИГУ № 091-21-331.

Список литературы

1. Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов. URL: https://gmvo.skniivh.ru/index.php?id=296 (дата обращения: 19.06.2021).

2. Географические закономерности гидрологических процессов юга Восточной Сибири / А. Н. Антипов [и др.]. Иркутск : Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2003. 208 с.

3. *Добровольский С. Г., Истомина М. Н.* Наводнения мира. М. : ГЕОС, 2006. 256 с.

4. Иркутское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. URL: http://www.meteorf.ru/ (дата обращения: 05.07.2021).

5. *Лапердин В. К., Качура Р. А.* Геодинамика опасных процессов в зонах природно-техногенных комплексов Восточной Сибири. Иркутск : Институт земной коры СО РАН, 2010. 312 с.

6. *Лексакова В. Д.* Максимальный сток рек бассейна Ангары. Новосибирск : Наука, 1987. 132 с.

7. Мониторинг наводнения в Иркутской области. URL: https://www.meteorf.ru/press/news/19528/ (дата обращения: 23.09.2021).

8. Наводнения в Иркутской области (май и июль 2001 года). URL: https://survincity.ru/2012/02/navodneniya-v-irkutskoj-oblasti-maj-i-iyul-2001/ (дата обращения: 25.09.2021).

9. Экстремальные гидрологические ситуации / под ред.: Н. И. Коронкевича, Е. А. Барабанова, И. С. Зайцева. М. : Медиа-ПРЕСС, 2010. 464 с.

УДК 551.50

Расчет полей вероятности зарождения (обнаружения) полярных мезоциклонов в Арктическом регионе России с использованием региональных пороговых значений индексов конвективной неустойчивости

С. А. Петриченко (psa@rpatyphoon.ru), О. В. Калмыкова (kov@feerc.ru)
С. В. Козлов (kozlov-sv@rpatyphoon.ru)

Научно-производственное объединение «Тайфун» Росгидромета, Обнинск.

Аннотация. Отобран перечень индексов конвективной неустойчивости, которые могут быть использованы для оценки рисков возникновения полярных мезоциклонов. Предложен алгоритм комплексирования полей индексов. Он составит основу работы разрабатываемой автоматизированной технологии прогноза генезиса полярных мезоциклонов. Показана необходимость определения региональных пороговых значений для каждого из отобранных индексов. Представлены результаты расчета полей вероятности зарождения ряда полярных мезоциклонов с использованием региональных пороговых значений рассматриваемых индексов.

Ключевые слова: полярные мезоциклоны, индексы конвективной неустойчивости, региональные пороговые значения, зарождение, прогноз, модель Polar WRF.

Введение

Полярный мезомасштабный циклон (ПМЦ) – это интенсивный морской циклон, зачастую сопровождающийся опасными погодными явлениями – штормовым волнением и ветром, обледенением судов и сооружений, снежными зарядами с ухудшением видимости. Штормовая ситуация развивается, как правило, внезапно и в течение короткого времени. Горизонтальные размеры таких мезоциклонов варьируются в диапазоне от 100 до 1000 км, в среднем составляют 200–600 км. Скорость приземного ветра в полярном мезоциклоне может достигать штормовых величин.

В Северном полушарии областью наиболее активного мезомасштабного циклогенеза является акватория Северо-Европейского бассейна. Это связано с наличием значительных межширотных температурных контрастов в приводном слое атмосферы, которые особенно велики вблизи ледового барьера и усилены проникновением теплых атлантических вод на север. В сочетании с интенсивным тропосферным переносом это создает условия для развития бароклинной неустойчивости в регионе в холодное время года. Основными источниками энергии при образовании и развитии полярных мезоциклонов являются турбулентные потоки тепла и влаги от морской поверхности.

Над северными морями России, лежащими к востоку от Новой Земли (Карское море, море Лаптевых и Восточно-Сибирское море), ПМЦ возникают реже вследствие меньшей, чем в Северо-Европейском бассейне, площади свободной ото льда морской поверхности. Однако при наличии тенденции к увеличению акваторий открытой воды в условиях происходящего потепления в этом регионе следует ожидать и возрастания количества возникающих ПМЦ.

Поскольку размеры полярных мезоциклонов незначительны по сравнению с крупномасштабными барическими образованиями, а срок их жизни в большинстве случаев менее суток, они достаточно редко отображаются на синоптических картах в виде замкнутых изобар. На обширных арктических акваториях, где образуются полярные циклоны, как правило, отсутствуют данные стандартных метеорологических наблюдений, поэтому такого рода образования обнаруживаются, в основном, по данным спутниковых наблюдений облачного покрова. Интенсивность ПМЦ определяется качественно по структуре и степени яркости изображения облачных вихрей на спутниковых снимках. Фактически в настоящий момент спутниковые методы – это единственное средство обнаружения и идентификации такого явления, как полярные мезоциклоны

До настоящего времени обнаружение ПМЦ, и тем более их прогноз, остаются нерешенной проблемой.

Поскольку полярные мезоциклоны представляют собой развитые интенсивные конвективные образования, то для создания автоматизированной системы прогноза их генезиса нами было предложено использовать в качестве прогностических признаков индексы конвективной неустойчивости [2].

Ниже представлено краткое описание технологии расчета полей вероятности зарождения полярных мезоциклонов.

Программные средства и результаты расчетов

Для расчетов полей метеовеличин в районах генезиса полярных мезоциклонов нами был использован программный комплекс Polar WRF v. 4.1.1 + Polar WPS v. 4.1. Результаты расчетов метеопараметров в узлах расчетной сетки использовались в качестве входных данных для расчета полей индексов конвективной неустойчивости атмосферы. Для этого на языках программирования C и Fortran были разработаны соответствующие программные средства

При моделировании ПМЦ, информация о которых была взята из различных публикаций, в качестве начальных и граничных условий для расчетов по модели WRF были использованы данные Final Analyses из CISL Research Data Archive. При моделировании мезоциклонов текущего года использовались данные GFS.

Из огромного числа известных Индексов необходимо было отобрать ограниченное число таких, которые имеют особенности в зонах ПМЦ. Такой отбор был произведен при помощи анализа полей конвективных индексов, рассчитанных для ранее уже идентифицированных ранее ПМЦ. Всего было отобрано 33 Индекса, которые имели локальные максимумы или минимумы в зонах действия ПМЦ и, таким образом, могли бы быть использованы в качестве прогностических признаков. Однако для реального использования такое количество явно избыточно. Поэтому мы ограничились семью Индексами, имевшими наиболее выраженные особенности в зонах ПМЦ.

На рис. 1 в качестве примера приведены поля Rackliff Index (а) и K Index (б), рассчитанные для полярного мезоциклона (рис. 2), наблюдавшегося над Баренцевым морем 2 ноября 2002 г. Информация о циклоне взята из работы [3].

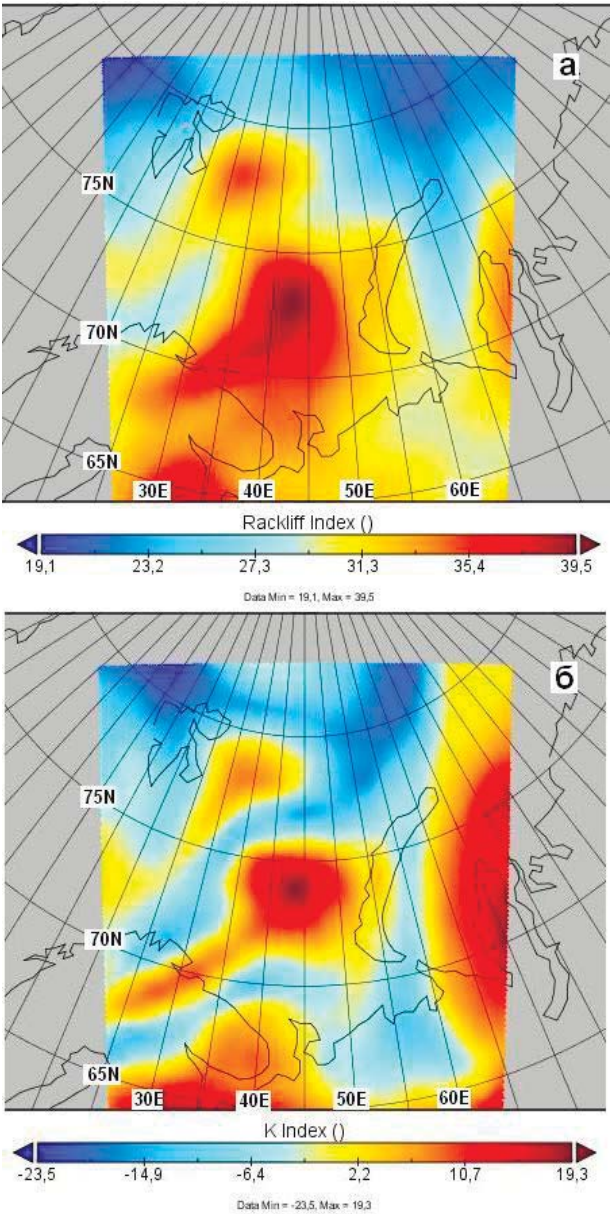


Рис. 1. Поля конвективных индексов Rackliff Index (а) и K Index (б) в районе развития полярного мезоциклона 2 ноября 2002 г. в 00:00 UTC над Баренцевым морем

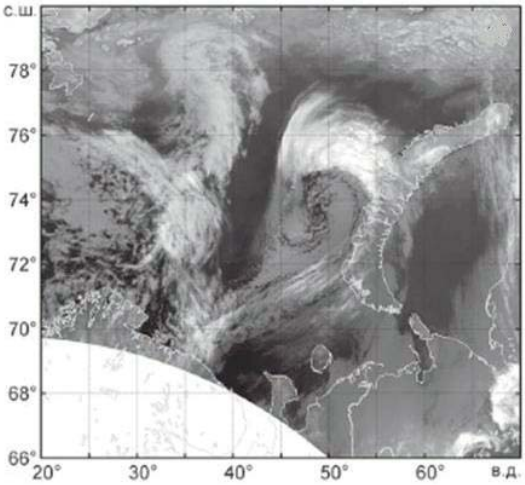


Рис. 2. Полярный циклон 2 ноября 2002 над акваторией Баренцева моря. ИК-изображение, полученное спектрорадиометром MODIS в 09:10 UTC

С учетом полученных результатов был разработан алгоритм расчета областей риска возникновения полярных мезоциклонов. Алгоритм предполагает комплексирование полей отобранных индексов с последующей оценкой вероятности возникновения ПМЦ в каждом узле расчетной сетки. Достаточно подробно этот алгоритм описан в [2]. Существенным моментом в этом подходе является то, что для каждого используемого индекса необходимо указать пороговое значение, которое определит возможность или невозможность развития ПМЦ. Для нас совершенно очевидно, что для Арктики необходимо определить региональные пороговые значения отобранных Индексов.

Из рис. 1 видно, что достаточно грубо, приблизительно, пороговое значение каждого индекса можно оценить из представленной пространственной картины. Для более точного определения региональных пороговых значений была разработана специальная программа, которая позволяет производить «точную настройку». Незначительно меняя пороговое значение, можно в итоге сформировать такие зоны закритических значений Индекса, которые бы хорошо согласовывались с зоной влияния ПМЦ.

В табл. 1 приведены региональные пороговые значения отобранных конвективных индексов. Там же указаны их общепринятые пороговые значения.

На рис. 3 представлены для примера зоны закритических значений Rackliff Index для его общепринятого порогового значения (а) и регионального (б), рассчитанные для ПМЦ, представленного на рис. 2.

Представленные данные указывают на необходимость использования региональных пороговых значений для каждого из отобранных индексов взамен общепринятых.

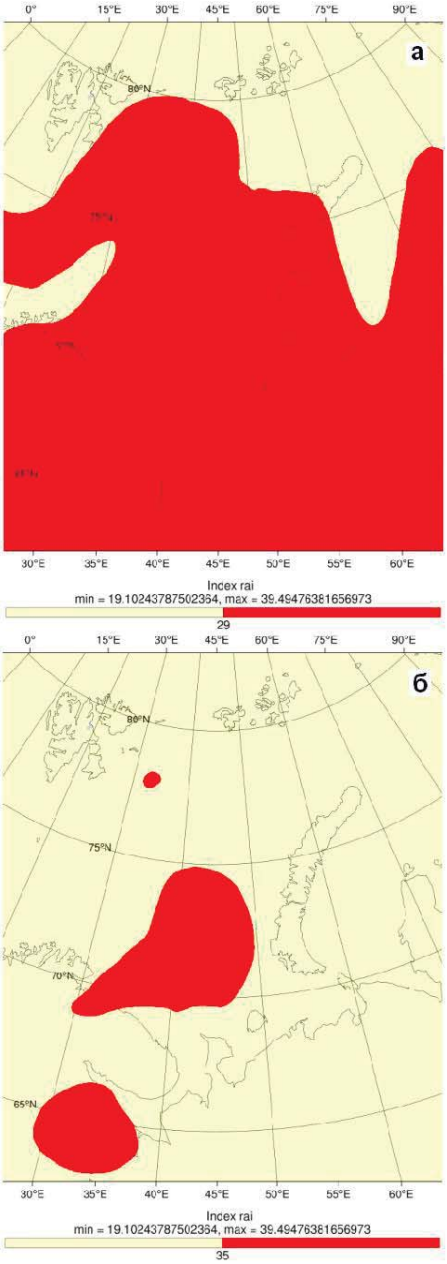


Рис. 3. Зоны закритических значений Rackliff Index (показаны красным) при использовании общепринятого (а) и регионального (б) порогового значения, рассчитанные для ПМЦ, представленного на рис. 2

Таблица 1

Индексы конвективной неустойчивости для Арктического региона РФ, отобранные для расчета риска возникновения полярных мезоциклонов

№	Обозначение индекса	Описание индекса	Общепринятый порог	Региональный порог (Арктика)
1	ci	Convective Instability Index	>5	>-9
2	ki	K Index	>30	>3
3	kim	Modified K Index	>36	>15
4	ko	Ko Index	<5	<6
5	si	S Index	>40	>42
6	rai	Rackliff Index	>29	>35
7	swiss12	Stability and Wind Shear Index for thunderstorms in Switzerland 12	<1,3	<6

На рис. 4 показана карта рассчитанных областей риска возникновения ПМЦ 2 ноября 2002 г. При расчете использовались региональные пороговые значения рассматриваемых индексов. На рис. 5 – аналогичная карта областей, но уже на базе общепринятых порогов.

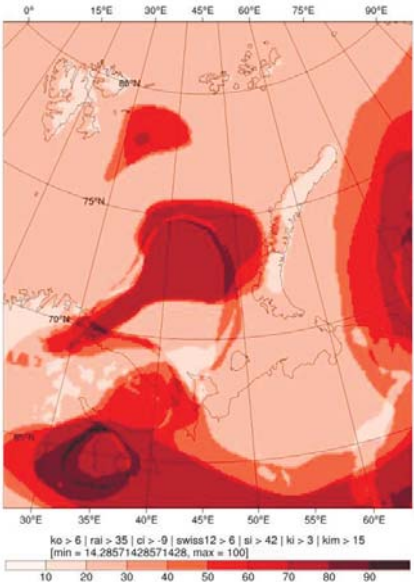


Рис. 4. Карта областей риска возникновения ПМЦ на 2 ноября 2002 г. 00:00 UTC, рассчитанная с использованием региональных пороговых значений отобранных конвективных индексов

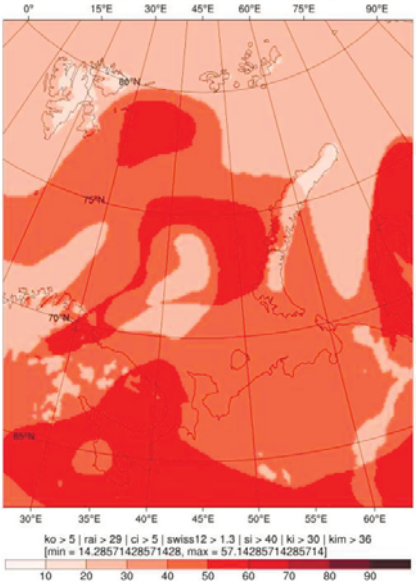


Рис. 5. Карта областей риска возникновения ПМЦ на 2 ноября 2002 г. 00:00 UTC, рассчитанная с использованием общепринятых пороговых значений отобранных конвективных индексов

Еще один пример, демонстрирующий важность учета региональных порогов, показан на рис. 6 и 7. В этом примере анализируется полярный мезоциклон (рис. 8), возникший над Карским морем 29 сентября 2012 г. Информация об этом циклоне получена из работы [1].

Резюме

С использованием специально разработанных программ в ходе проведенной работы для Арктического региона России были получены оценки пороговых значений предварительно отобранных индексов конвективной неустойчивости. Наглядно продемонстрирована важность использования региональных пороговых значений рассматриваемых индексов при расчетах областей риска возникновения полярных мезоциклонов по ранее предложенному алгоритму комплексирования полей индексов. Спроектирована технологическая линия работы автоматизированной системы прогноза генезиса полярных мезоциклонов. В частности, линия включает в себя блок численного моделирования Polar WRF с заданием начальных и граничных условий по данным модели GFS, блок расчета индексов конвективной неустойчивости, блок расчета полей вероятности зарождения ПМЦ с использованием региональных порогов для отобранных индексов, подсистема визуализации.

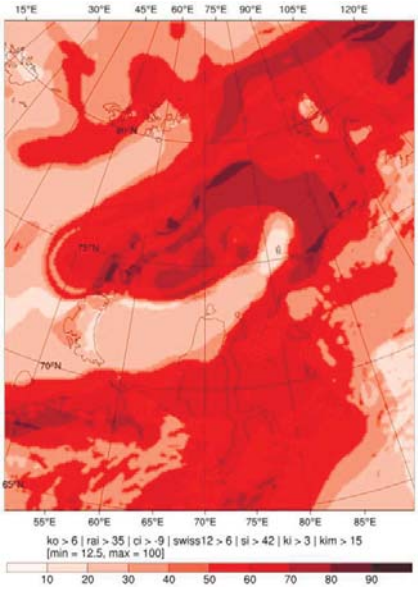


Рис. 6. Карта областей риска возникновения ПМЦ на 29 сентября 2012 г. 06:00 UTC, рассчитанная с использованием региональных пороговых значений отобранных конвективных индексов

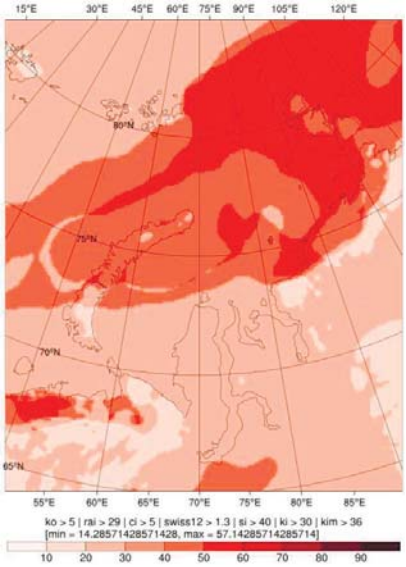


Рис. 7. Карта областей риска возникновения ПМЦ на 29 сентября 2012 г. 06:00 UTC, рассчитанная с использованием общепринятых пороговых значений отобранных конвективных индексов

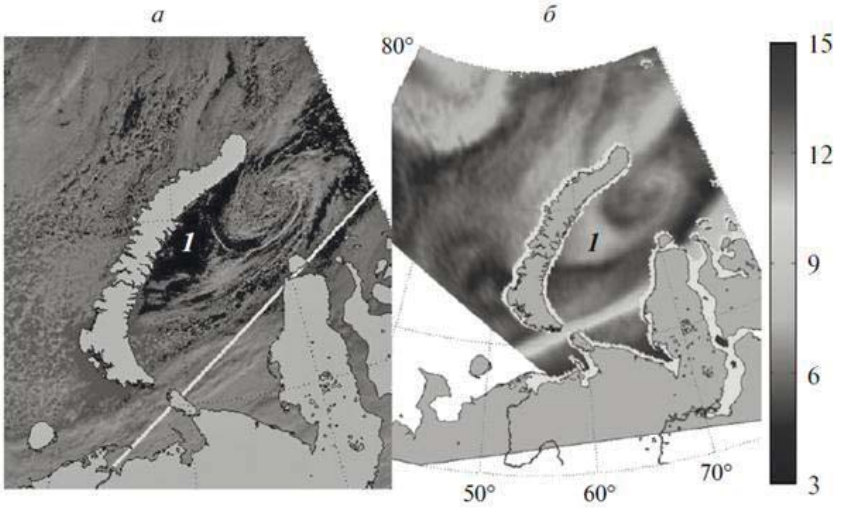


Рис. 8. Полярный циклон 29 сентября 2012 г. над акваторией Карского моря. ИК-изображение MODIS (спутник Aqua) в 06:40 UTC (а) и поле влагозапаса атмосферы по данным AMSR2 (спутник GCOM-W1) в 06:39 UTC (б). Шкала в кг/м^2

Список литературы

1. *Заболотских Е. В., Гурвич И. А., Шапрон Б.* Новые районы распространения полярных циклонов в Арктике как результат сокращения площади ледового покрова // Исследования Земли из космоса. 2015. № 3. С. 64–77.

2. *Петриченко С. А., Калмыкова О. В., Козлов С. В.* Использование индексов конвективной неустойчивости для оценки вероятности возникновения полярных мезоциклонов в Арктическом регионе России // Закономерности формирования и воздействия морских, атмосферных опасных явлений и катастроф на прибрежную зону РФ в условиях глобальных климатических и индустриальных вызовов (Опасные явления – III) : материалы III Междунар. науч. конф. памяти члена-корреспондента РАН Д.Г. Матишова. Ростов-на-Дону, 15–19 июня 2021 г. Ростов на/Д : Изд. ЮНЦ РАН, 2021. С. 114–117.

3. *Смирнова Ю. Е., Голубкин П. А.* Оценка доли полярных циклонов, воспроизводимых атмосферными реанализами, с использованием различных наборов данных // Проблемы Арктики и Антарктики. 2017. № 1 (111). С. 97–108.

УДК 551.515.3+004.942

Смерч над Амуром в Хабаровске 11 сентября 2021 г.

С. О. Романский (khvstas@gmail.com)[1, 2], Е. М. Вербицкая (werbaem@gmail.com)[1]

[1]*Дальневосточный региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт, Хабаровск*

[2]*Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск*

Аннотация. Приведена информация о смерче в Хабаровске, возникшем вблизи левого берега Амура над его широко разлитой водной гладью, 11 сентября 2021 г. Рассмотрены синоптические и мезомасштабные условия формирования явления по данным наблюдений и результатам численного моделирования высокого пространственного разрешения по негидростатической модели прогноза погоды Weather Research and Forecasting.

Ключевые слова: торнадо**,** вихрь**,** опасные явления погоды, конвективные процессы, WRF, Дальний Восток.

Смерчи являются одними из самых опасных метеорологических явлений. Обычно они возникают неожиданно, т. е. метеорологическими прогнозами не предусмотрены. Для Дальнего Востока России смерчи явление достаточно редкое [3]. Тем не менее на рассматриваемой территории они происходят с существенно большей частотой, чем зафиксировано наблюдательной сетью. О таких явлениях можно узнать из свидетельств очевидцев. Например, в [4] приведена информация о ряде смерчей, произошедших в Приморском крае, хотя большая часть из них сетью наблюдений не отмечена. За последнее десятилетние на Дальнем Востоке России самым разрушительным был смерч в городе Благовещенск Амурской области 31 июля 2011 г. [2]. Исследование каждого такого явления с целью выявления характеристик смерча и анализа условий его формирования представляет несомненный интерес и является актуальной задачей с точки зрения возможности их прогнозирования даже с минимальной заблаговременностью. В данной работе на основе данных наблюдений и численного моделирования определены условия формирования и характеристики смерча, наблюдавшегося в Хабаровске 11 сентября 2021 г.

Описание явления

Вечером около 17 ч местного времени 11 сентября 2021 г. в Хабаровске над поверхностью Амура сформировался смерч. Воронка смерча опустилась из кучево-дождевого облака к широко разлитой водной поверхности Амура. Передняя кромка облака клубилась и вращалась по часовой стрелке. Вихрь просуществовал около 7–10 мин и прошел незначительное расстояние по дуге с севера на юг вдоль левого берега Амура (напротив центральной набережной).

Явление наблюдалось из всех прибрежных районов Хабаровска, оно заснято многими очевидцами. Ущерба от смерча не зафиксировано. Следует отметить, что центральный и серверный округа расположены на высоком правом берегу Амура, весь город протянулся вдоль правого берега реки примерно на 40 км, а низкий левый берег практически не заселен.

Анализ видеоматериалов из сети Интернет (например, [1]) показывает, что кучево-дождевое волосатое облако за короткое время породило два смерча. Первый из них – прямой, вытянутый, правильной цилиндрической формы – достиг водной поверхности Амура (рис. 1), образовав водный вихрь, хорошо видный на видеозаписях. Во втором случае оформилась только воронка вихря, направленная к поверхности воды, которая затем быстро втянулась обратно в облако. Явление метеорологическими станциями не зафиксировано.

Возникновение смерча было неожиданным. Хабаровским Гидрометцентром в связи с циклонической деятельностью в центральных и южных районах Хабаровского края прогнозировалась неустойчивая погода с осадками различной интенсивности. В суточном прогнозе по городу на день ожидалась переменная облачность, кратковременный дождь, ветер западный 6–11 м/с, по району – кратковременный дождь, местами ливни, ветер юго-западный 8–13 м/с.

Синоптическая ситуация и атмосферные процессы 10–12 сентября 2021 г.

В первой декаде сентября в центральных и южных районах Хабаровского края установился антициклональный тип циркуляции с преимущественно ясной и сухой погодой, что способствовало существенному прогреву подстилающей поверхности. По информации ФГБУ «Дальневосточное УГМС» среднесуточные температуры воздуха в течение декады превышали норму на 2–5°, в южных районах в течение 6–8 дней абсолютный максимум достигал 25 °С и выше.

К 11 сентября уровень Амура у Хабаровска составил 507 см (превышение над уровнем поймы на 207 см). Гребень паводка уже сместился ниже по течению, но гидрологическая обстановка оставалась сложной: полностью или частично были затоплены острова – Дачный, Кабельный и другие, ширина разлива Амура достигала 10–15 км. В первой декаде сентября вода в Амуре прогревалась до 23 °С; 11 сентября температура воды составила 18,9 °С.

Рис. 1. Смерч над Амуром (11 сентября 2021 г., Хабаровск)

Синоптическая ситуация 10–12 сентября в центральных и южных районах Хабаровского края, Еврейской автономной области, Приморском крае и приграничной провинции Китая Хэйлунцзян определялась действием обширного малоподвижного циклона, пришедшего из Забайкалья (рис. 2, *а*). К началу дня 11 сентября циклон имел два центра: в провинции Хейлунцзян и вблизи Хабаровска. В обоих центрах минимальное давление в 06 ч всемирного скоординированного времени (ВСВ, 16 ч местного времени) составило 1006 гПа. В это же время над восточной частью Якутии и Охотским морем располагался мощный гребень с наибольшим давлением до 1020 гПа, который

смещался к югу. При взаимодействии воздушных масс арктических и умеренных широт, с контрастами температур до 5–6 °С на 500 км в слое 1–3 км от уровня земли, во второй половине дня 11 сентября вблизи Хабаровска сформировалась мощная кучево-дождевая облачность с ливнями, грозами и смерчем (рис. 2, *б*).

Метеорологическими наблюдениями в аэропорту Хабаровска (расстояние до Амура около 11 км) с 15 до 18 ч местного времени отмечен преимущественно юго-восточный ветер до 3 м/с, слабый ливень, гроза в окрестности пункта наблюдения, нижняя граница облачности опускалась до высоты 270 м. Данные наблюдений на ближайшей к смерчу автоматической метеорологической станции, расположенной вблизи моста через Амур, в 16 ч местного времени показывают, что у земли дефицит точки росы составил 5,0 °С при температуре воздуха 20,1 °С и давлении 1007,3 гПа.

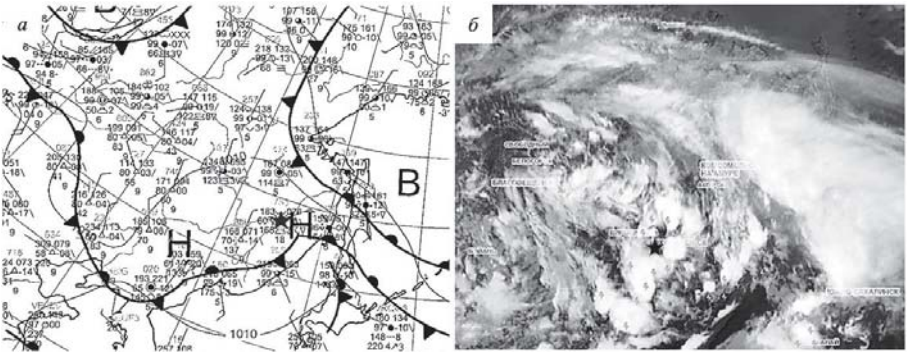


Рис. 2. а) приземный анализ за 06 ч ВСВ 11.09.2021 (центр RUHB); б) карта облачности и гроз за 07 ч ВСВ 11.09.2021 (портал «meteo-dv.ru»). Хабаровск обозначен звездочкой

Аэрологические наблюдения в аэропорту Хабаровска в 00 ч ВСВ (10 ч местного времени) 11 сентября показывают, что количество положительной энергии неустойчивости составило около 1100 Дж/кг, мощность задерживающего слоя – порядка 15 Дж/кг, высота уровня конденсации – 280 м, уровня равновесия – 9700 м, тропопаузы – около 10 км. Сдвиг ветра в нижнем слое атмосферы составил 7 м/с (направление ветра – от западного до юго-юго-восточного). В нижнем и среднем слоях атмосферы максимальные скорости ветра отмечены в слое 500–600 гПа (до 13 м/с, направление южное). На уровне 300 гПа отмечен ветер юго-юго-восточного направления со скоростью до 25 м/с. Данные таблицы 1 показывают, что на высотах имелись перемежающиеся слои сухого воздуха с дефицитом точки росы до 10,0−15,0°. Согласно [3], слой сухого воздуха с дефицитом точки росы более 10° на высоте 2000–2500 м способствует возникновению на небольшом расстоянии больших контрастов температуры и градиентов давления, что может привести к образованию смерча.

Таблица 1

Данные радиозондирования в 10 ч местного времени 11 сентября в Хабаровске

Давление, гПа	925	850	800	745	700	650	600	550	500	450	400
Дефицит точки росы, °С	3,8	3,5	10,0	9,4	8,0	5,0	9,9	15,0	14,0	13,0	10,0

Верхняя граница облачности по данным спутниковых наблюдений располагалась на высоте 10–11 км. Образование такой мощной облачности произошло при неустойчивой стратификации атмосферы. Небольшие скорости ветра у земли, достаточно теплая для сентября вода Амура и его широкий разлив также могли благоприятствовать развитию смерча за счет дополнительного притока энергии неустойчивости и малых значений шероховатости поверхности воды. Таким образом, во второй половине дня 11 сентября в Хабаровске имелись условия для возникновения смерча, но сдвиг ветра в нижнем слое по данным наблюдений был незначительным. Величина индекса Energy-Helicity Index (EHI), учитывающего энергию неустойчивости и величину вращения восходящего воздушного потока, использующегося для прогноза суперячеек (supercell) и торнадо в США [5] была очень малой и составила 0,05 (по данным радиозондирования в Хабаровске за срок 00 ч ВСВ 11 сентября 2021 г.).

Результаты численного моделирования

Для выявления особенностей атмосферных процессов выполнены расчеты с использованием негидростатической модели Weather Research and Forecasting (WRF) – Advanced Research WRF (WRF–ARW) [7]. Область моделирования с координатами центра 48,47° с. ш., 135,05° в. д., расположенным в Хабаровске, состоит из двух вложенных друг в друга сеток с горизонтальным шагом по пространству 1500 и 500 м соответственно. Размеры квадратных сеток в порядке убывания составляют 900×900 и 100×100 км; проекция – равноугольная коническая Ламберта. По вертикали от уровня земли до 50 гПа задана неравномерная сетка, состоящая из 51 уровня. В модели использовались следующие параметризации: подстилающая поверхность – схема Noah land surface; коротковолновая и длинноволновая радиация – схемы Дудьи и Rapid radiative transfer model соответственно; микрофизика – схема Томпсона, оперирующая шестью гидрометеорами; пограничный и приземный слои – схемы Yonsei University и Mesoscale model 5 соответственно; параметризация конвекции при заданных горизонтальных шагах не применялась. Численное моделирование проводилось от срока 00 ч ВСВ 11 сентября 2021 г. на 18 ч вперед. Начальные и граничные данные задавались по информации Global Forecast System разрешением 0,5º×0,5º. Вывод модельных данных осуществлялся каждые 60 с. Следует отметить, что шаг по горизонтали в 500 м не достаточен для моделирования воронки смерча, но такой численный эксперимент позволит выявить особенности мезомасштабных процессов вблизи Хабаровска, как это было сделано ранее при моделировании интенсивной конвекции со смерчем в Благовещенске 31 июля 2011 г. [2].

На рис. 3 представлены модельные поля приземного давления в 00 ч и 06 ч ВСВ 11 сентября по данным модели WRF–ARW, расчеты которой выполняются

по территории Восточной Сибири и Дальнего Востока с горизонтальным шагом 5 км [6]. Во второй половине дня у Хабаровска вследствие прогрева подстилающей поверхности и развития конвективных процессов образовалась область пониженного давления (до 1007 гПа), при этом, происходило смещение к югу холодной воздушной массы с побережья Охотского моря, что привело к обострению контрастов температуры. По модельным данным на высоте 925 гПа он составил до 8–10 °С на 500 км.

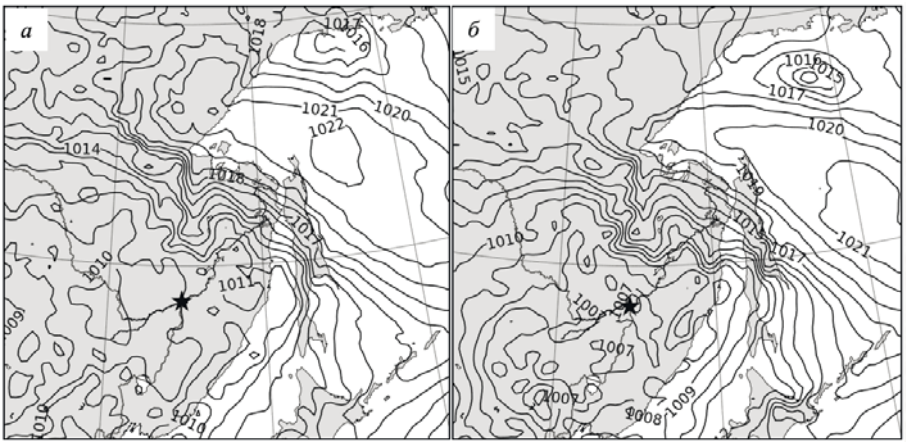


Рис. 3. Модельные поля приземного давления 11 сентября 2021 г. а) 00 ч ВСВ; б) 06 ч ВСВ. Хабаровск обозначен звездочкой

По данным расчетной сетки с горизонтальным шагом 1500 м были построены ежечасные аэрологические диаграммы. Они показывают, что во второй половине дня 11 сентября в Хабаровске количество положительной энергии неустойчивости возрастало до 1158 Дж/кг, сдвиг ветра в слое от уровня земли до высоты 3 км (WS3) достигал значений до 24 м/с.

В 18 ч 15 мин местного времени по модели были получены наиболее благоприятные условия для развития вихря (исходя из значений индекса EHI): на высоте 850 гПа имелся слой сухого воздуха с дефицитом точки росы 9,1 °С (табл. 2); количество положительной энергии неустойчивости составило 939 Дж/кг, мощность задерживающего слоя – 13 Дж/кг, WS3 – 20 м/с, высота уровня конденсации – 684 м, уровня равновесия – 9697 м, индекс EHI – 0,56. Значение индекса EHI выше полученного по данным радиозондирования атмосферы в 00 ч ВСВ, но оно также существенно меньше единицы. Таким образом, исключается возможность развития суперячейки.

Таблица 2

Модельные данные в 18 ч 15 мин местного времени 11 сентября в Хабаровске

Давление, гПа	925	850	800	750	700	650	600	550	500	450	400
Дефицит точки росы, °С	2,1	9,1	6,7	6,3	7,0	5,9	6,8	5,0	2,4	2,1	3,9

На модельных полях радиолокационной отражаемости (РЭ) вблизи Хабаровска во второй половине дня фиксируется возникновение и развитие конвективных ячеек различной интенсивности. По данным обеих расчетных сеток отмечается конвективная ячейка с максимальным значением РЭ в ядре до 45–60 *∂*БZ, такие значения отражаемости наблюдались примерно с 16 ч 30 мин до 19 ч 30 мин местного времени. В течение этого времени положение ячейки менялось незначительно, но большую часть времени она располагалась вблизи Хабаровска (рис. 4, *а*, отмечена буквой «А»). Примерно в это же время во вложенной сетке расчета отмечается возникновение значительных вертикальных движений воздуха вблизи этой конвективной ячейки. На рис. 4, *б* представлена вертикальная скорость, полученная в 18 ч 25 мин местного времени. Хорошо оформлена зона восходящих движений со скоростями до 8–10 м/с, максимальные скорости отмечаются на высоте около 3–4 км. Вокруг этой зоны имеются области со слабыми нисходящими токами до –2 м/с. Такие большие значения вертикальной скорости наблюдались не более 10–15 мин.

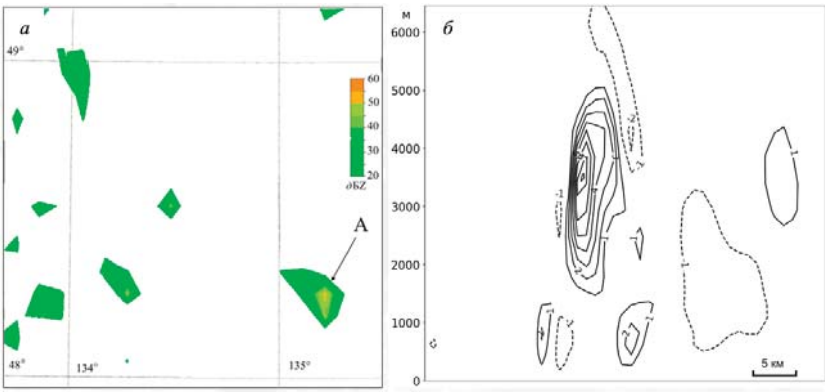


Рис. 4. Модельные данные вложенной сетки (время местное): а) радиолокационная отражаемость в 18 ч 00 мин; б) вертикальная скорость (м/с) в 18 ч 25 мин

Заключение

Около 17 ч местного времени 11 сентября 2021 г. в Хабаровске наблюдался смерч. Образование вихря происходило над водной поверхностью Амура при взаимодействии воздушных масс арктических и умеренных широт, с контрастами температур до 5–6 °С на 500 км в слое 1–3 км от уровня земли. Состояние атмосферы вблизи Хабаровска благоприятствовало образованию смерча: большое количество положительной энергии неустойчивости при наличии слабого задерживающего слоя привело к образованию во второй половине дня мощной кучево-дождевой облачности. По данным аэрологических наблюдений за срок 00 ч ВСВ 11 сентября в слое 800–400 гПа имелись перемежающиеся слои сухого воздуха с дефицитом точки росы до 10,0−15,0°, что способствовало возникновению на небольшом расстоянии больших контрастов температуры и градиентов давления.

Смерч в Хабаровске имел некоторые характерные особенности: он образовался при безветренной теплой погоде, которую обеспечил обширный малоградиентный циклон, что не препятствовало возникновению конвективных движений воздуха; явление возникло над хорошо прогретой для сентября водной гладью Амура и его широкий разлив у города способствовал развитию вихря благодаря дополнительному притоку энергии неустойчивости, малым значениям шероховатости и разнородными типами постилающей поверхности (песчаные отмели, островки с растительностью, водная гладь реки) различной теплопроводности, существенно влияющими на местные контрасты температур в приземном слое атмосферы. По данным аэрологических наблюдений за срок 00 ч ВСВ 11 сентября значительного сдвига ветра в нижнем и среднем слоях атмосферы не выявлено, как и сильных струйных течений на высотах: на уровне 300 гПа отмечен ветер юго-юго-восточного направления со скоростью до 25 м/с. Однако по данным численного моделирования высокого пространственного разрешения получены существенные значения сдвига ветра в нижнем 3-километровом слое у земли во второй половине дня 11 сентября (до 20−24 м/с). Расчетное значение индекса EHI составило 0,56, что исключает возможность наличия суперячейки. Смерч может быть отнесен к категории EF0 по улучшенной шкале Фудзиты–Пирсона в соответствии с практически отсутствующим ущербом от явления, а также по результатам численного моделирования.

Отметим, что численное моделирование атмосферных процессов с высоким пространственным разрешением позволяет получить дополнительную информацию о мезомасштабных процессах, формирующих подобные явления, особенно в условиях практически полного отсутствия данных доплеровских радиолокаторов на рассматриваемой территории.

Благодарности. *Авторы выражают признательность сотрудникам Гидрометцентра ФГБУ «Дальневосточное УГМС» за предоставленную информацию и обсуждение работы.*

Список литературы

1. Видеозапись смерча в Хабаровске. URL: https://bit.ly/3CrA1bf (дата обращения: 25.09.2021).

2. Условия возникновения смерча в Благовещенске 31 июля 2011 г. / С. О. Романский, Е. М. Вербицкая, С. В. Агеева, Д. П. Истомин // Метеорология и гидрология. 2018. № 9. С. 26–35.

3. *Снитковский А. И.* Смерчи на территории СССР // Метеорология и гидрология. 1987. № 9. С. 12–25.

4. *Тунеголовец В. П., Михайленко Т. Д.* Смерчи во Владивостоке 20 сентября 1997 г. // Метеорология и гидрология. 1998. № 6. С. 100–107.

5. *Rasmussen E. N., Blanchard D. O.* A baseline climatology of sounding-derived supercell and tornado forecast parameters // Weather and Forecasting. 1998. Vol. 13, № 4. P. 1148–1164.

6. *Romanskiy S., Verbitskaya E.* New operational short-range numerical weather prediction system of the Regional Specialized Meteorological Center of Khabarovsk // CEUR Workshop Proceedings ITHPC 2019 – Short Paper Proceedings of the 5th International Conference on Information Technologies and High-Performance Computing. 2019. Vol. 2426. P. 77–82.

7. A Description of the Advanced Research WRF Version 3 (No. NCAR/TN-475+STR) / W. C. Skamarock, J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G. Duda, X. Huang, W. Wang, J. G. Powers. University Corporation for Atmospheric Research, 2008. https://doi.org/10.5065/D68S4MVH. URL: https://opensky.ucar.edu/islandora/object/technotes:500 (дата обращения: 25.09.2021).

УДК 551.5

Статистический анализ засушливости на территории Северного Казахстана

Л. С. Рысалиева (marchoctmay@gmail.com)
Казахский национальный университет им аль-Фараби, Алматы

Аннотация. Использован и рассчитан гидротермический коэффициент увлажнения Селянинова (ГТК) по территории Северного Казахстана, также выполнены статистический анализ засушливости на территории Северного Казахстана по пяти метеостанциям (Нур-султан, Костанай, Павлодар, Петропавловск, Щучинск) с помощью гидротермического коэффициента каждого месяца вегетационного периода 2016–2020 гг.

Ключевые слова: атмосферная засуха, засушливость, экстремальные явления погоды, метеорологические индексы засушливости.

Введение

Большая часть территории Республики Казахстан располагается в аридных и полуаридных зонах, здесь засухи являются одним из потенциально опасных природных процессов. В результате засухи наносят огромный экономический и социальный ущерб – снижая продуктивность сельскохозяйственного сектора, что влечет за собой цепочку последствий затрагивая животноводство, растениеводство и имея серьезные последствия для поставок продовольствия и средств к существованию, а также приводит к дефициту водных ресурсов, которые необходимы для ведения сельскохозяйственной деятельности и социально-экономического развития страны. В особенности засухи затрагивают и северную часть Казахстана – поставщика зерновых культур для многих стран [11].

Так, например, засуха в Казахстане летом 2012 г. уничтожила посевы зерновых культур площадью в 1 млн га.

Засуха является очень частым явлением в Республике Казахстан, и она усугубляется изменением климата и растущим антропогенным давлением, а также угрожает водной безопасности региона.

Актуальность исследования засух обусловлена, в первую очередь ее последствиями для природной среды и общества всего земного шара. Большая часть территории Республики Казахстан располагается в аридных и полуаридных зонах, здесь засухи являются одним из потенциально опасных природных процессов. В результате засуха наносит огромный экономический и социальный ущерб, снижая продуктивность сельскохозяйственного сектора, что влечет за собой цепочку последствий, затрагивая животноводство, растениеводство и имея серьезные последствия для поставок продовольствия и средств к существованию, а также приводит к дефициту водных ресурсов, которые необходимы для ведения сельскохозяйственной деятельности и социально-экономического развития страны.

Цель данной работы – выявить наиболее подходящий показатель засухи для рассматриваемой территории и провести статистический анализ засушливости территории северного Казахстана за последние 5 лет.

Метеорологические индексы и показатели для выявления атмосферной засухи

Засухи – одно из наиболее дорого обходящихся природных опасных явлений, которые наблюдаются ежегодно в различных регионах земного шара и для облегчения мониторинга за таким явлением используются индексы и показатели засухи.

В мировой практике индексы и показатели засухи делятся на следующие типы:

1) метеорологические индексы;
2) индексы, характеризующие почвенную влагу;
3) гидрологические индексы;
4) индексы дистанционного зондирования [12].

В рамках данной работы приведены метеорологические индексы и показатели также индексы дистанционного зондирования, характеризующие атмосферную засуху.

Было выполнено большое количество научных работ по мониторингу и изучению атмосферной засухи, в которых были разработаны ряд метеорологических индексов и показателей. Ниже приведены наиболее часто используемые индексы и показатели в изучении засух на территории Республики Казахстан:

1. Процент от нормы количества осадков – является самым простым показателем для выявления и мониторинга засухи, который применяться для разных временных интервалов от дня до года. Входным параметром является количество осадков за необходимый период времени, однако идеальным считается наличие данных минимум за 30 лет. Показатель рассчитывается как отношение (в %) фактического количества осадков к норме осадков за рассматриваемый период времени. Достоинство данного показателя заключается в простоте математических расчетов. Отрицательные стороны рассматриваемого показателя: трудно оценить недостаточность влаги для возникновения засухи [1–4].

2. Метод децилей осадков –представляет из себя деление значений количества осадков на градации (интервалы). Положительные качества: можно использовать для влажного и для сухого периодов, также для оценки метеорологических, гидрологических и сельскохозяйственных засух. Недостатком является, то, что метод не учитывает влияние температуры, также необходимы долговременные ряды данных, для того чтобы получить точные результаты [3; 5; 12].

3. Одним из широко используемых индексов является индекс аномальной аридности (AAI), в котором учитывается водный баланс, соответственно является отличным вариантом применения для сельского хозяйства. Вычисление индекса происходит для периодов от одной до двух недель по фактической эвапотранспирации и рассчитанной потенциальной эвапотранспирации, входными данными для которых являются значения температуры, ветра и солнечной радиации [4]. Достоинство данного индекса заключается в простоте расчетов, характеристика засухи определяется отклонением от нормы. Отрицательные стороны-индекс не применим к продолжительным периодам. Для районирования территории автор выделяет следующие критерии засухи, указанные в табл. 1.

Таблица 1

Категории засухи по данным индекса аномальной аридности

Категории засухи	Значение аномалии
Мягкая засуха	< 25 %
Умеренная засуха	26–50 %
Сильная засуха	> 50 %

4. Стандартизированный индекс осадков (SPI) – это метеорологический индекс для мониторинга засушливости, основанный только на количестве осадках, который является относительно простым в использовании и вычислении. Индекс был рекомендован Всемирной метеорологической организацией (ВМО) в 2009 г. для использования всеми национальными гидрометеорологическими службами. Фундаментальной силой такого индекса является его круглогодичность, т. е. он может быть рассчитан для различных временных масштабов от месяца до нескольких лет и то, что его данные могут быть сопоставлены в различных климатических регионах. Программа, которую используют для расчета SPI легкодоступна и проста в использовании. Однако у данного индекса есть и слабые стороны, так SPI может показывать только количественную оценку дефицита осадков и не подходит для характеристики водного баланса.

Положительные значения SPI характеризуют собой влажные условия. Отрицательные значения SPI представляют собой засушливые условия; чем ниже SPI, тем более сухим является исследуемый период времени. Классификационная шкала, предложенная автором, приводится в табл. 2 [6–8; 12].

Таблица 2

Категории засухи по данным стандартизированного индекса осадков

Категории засухи	Значение SPI
Мягкая засуха	от 0 до –0,99
Умеренная засуха	от –1,00 до – 1,49
Сильная засуха	от –1,50 до -1,99
Экстремальная засуха	менее –2,00

5. К одним из простых и рекомендуемых Всемирной метеорологической организацией для использования всеми национальными гидрометеорологическими службами для оценки условий увлажнения можно отнести гидротермический коэффициент Селянинова (ГТК), который был введен российским ученым-климатологом Г. Т. Селяниновым и характеризует уровень увлажненности территории. ГТК прост в расчетах, однако не учитывает почвенную влагу. Так входными данными являются значения температуры и количество осадков. Коэффициент представляет собой отношение суммы осадков (мм) за период со среднесуточными температурами воздуха выше + 10 ºС к сумме температур воздуха за тот же период, умноженной на 0,1. Полученные значения могут служить для мониторинга условий сельскохозяйственной засухи и учитываться в климатических классификациях. Автор предложил следующую категорию увлажненности, представленную в табл. 3 [3; 9].

Таблица 3

Категории увлажненности по данным гидротермический коэффициент Селянинова

Категории увлажненности	Значения ГТК	Категории увлажненности	Значения ГТК
Избыточное увлажнение	>2,0	Засуха	0,8–0,6
Умеренное увлажнение	>1,0	Средняя засуха	0,6–0,5
Засушливо	<1,0	Сильная засуха	0,5–0,4
Умеренная засуха	1–0,8	Очень сильная засуха	< 0,4

6. Индекс Д. А. Педя (S_i) является самым распространенным в постсоветском пространстве показателем для оценки и прогноза засух. Входными данными для изучения засух являются температура воздуха, и количество выпавших осадков, а точнее индекс представляет собой разность стандартизованных аномалий температуры воздуха и атмосферных осадков. При положительных значениях индекса рассматриваемый период относится с засушливым, а при отрицательных значениях – к влажному периоду.

7. Индекс интенсивности засухи Палмера (PDSI) является популярным индексом засухи, что позволяет следить за изменениями условий засушливости. Расчет индекса основан, в основном, на данных месячной температуры и количестве осадков, а также можно использовать данные влагоемкости почвы. Такой индекс применяется для мониторинга и выявления засухи, ее начала и конца, а также для оценки воздействия на сельское хозяйство. PDSI основан на концепции «запас-расход» влаги уравнения водного баланса и фактически используется для оценки длительных периодов аномально влажной или сухой погоды. Индекс представляет собой сумму текущей аномалии влажности и значений индекса в предыдущий период, чтобы включить влияние продолжительности засухи или влажного периода [4; 10]. Недостатком данного индекса является запаздывающая его способность к выявлению засух, которая достигает нескольких месяцев, следовательно, индекс сложно выявляет быстроразвивающиеся засухи. PDSI не учитывает снежный покров и промерзание почвы, что приводит к сезонным проблемам.

Так авторы выделяют 11 категорий индекса засухи, которые приведены в табл. 4.

Таблица 4

Категории влажности индекса PDSI

Категории влажности	Значения PDSI	Категории влажности	Значения PDSI
Экстремально влажная	> 4.00	Зарождающаяся засуха	–0,50 до –0,99
Очень влажная	3,00–3,99	Мягкая засуха	–1,00 до –1,99
Умеренно влажная	2,00–2,99	Умеренная засуха	–2,00 до –2,99
Слегка влажная	1,00–1,99	Сильная засуха	–3,00 до –3,99
Зарождающаяся влага	0,50–0,99	Экстремальная засуха	< –4,00
Около нормы	–0,49–0,49		

8. Для мониторинга засух в исследовании [10] был разработан индекс дистанционного зондирования, называемый индексом температурного состояния растительности (VTCI). Индекс может быть использован для мониторинга засухи на региональном уровне в течение определенного периода года (например, 10 дней), а также для изучения пространственного распределения засухи в регионе. VTCI связан не только со значениями нормализованного разностного вегетационного индекса (NDVI) в регионе, но и со значениями температуры поверхности земли с одинаковым значением NDVI. Пилотное исследование было проведено для мониторинга засухи в регионе Гуаньчжун на равнинах Лессового плато на Северо-западе Китая. Результаты показали, что VTCI лучше справляется с классификацией относительных уровней засухи для изучения распределения случаев засухи, чем NDVI.

Для выполнения данной работы, был выбран гидротермический коэффициент Г. Т. Селянинова, так как есть большой плюс в расчете данного индекса – полная доступность исходной информации для расчета и к тому же этот индекс является наиболее показательным метеорологическим индексом для параметризации засух, что подтверждается опросом Комиссией по сельскохозяйственной метеорологии ВМО национальных гидрометеорологических служб стран Центральной Азии (в том числе и Республики Казахстан) о наиболее частом использовании индексов засушливости [12].

Оценка атмосферной засухи

В работе рассчитан гидротермический коэффициент увлажнения Селянинова (ГТК) по территории Северного Казахстана, также выполнены статистический анализ засушливости на территории Северного Казахстана по пяти метеостанциям МС (Нур-султан, Костанай, Павлодар, Петропавловск, Щучинск) с помощью гидротермического коэффициента каждого месяца вегетационного периода 2016–2020 гг.

Гидротермический коэффициент ввел в науку российский ученый-климатолог Георгий Тимофеевич Селянинов, что характеризует уровень увлажненности территории и рассчитывается по формуле (1). Общий вид формулы представляет собой отношение сумм осадков R за период со среднесуточными температурами воздуха выше + 10 ºС, к сумме температур за этот же период.

$$ГТК = \frac{\sum R}{0.1 \sum t} \quad (1)$$

Автор выделяет следующие зоны увлажненности: район будет избыточно увлажненным при значении ГТК > 2; умеренно влажным при ГТК > 1; засушливым при ГТК < 1, а также при значении ГТК 1–0,8 – умеренно засушливо, 0,8–0,6 – засушливо, 0,6–0,5 отмечается средняя засуха, 0,5–0,4 – сильная засуха, < 0,4 наблюдается сильная засуха.

В рамках данной работы был высчитан ГТК по пяти метеостанциям за период 2016–2020 гг. Полученные значения ГТК представлены ниже в табл. 5–9.

Таблица 5

Значения ГТК по МС Нур Султан

МС	Год	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Среднее значение за вег. период
Нур-султан	2016	0,15	0	0	0,69	0,27	2,65	3,44	1,0
	2017	0,04	0,47	0,72	0,45	0,8	0,18	0,16	0,4
	2018	0	1,11	0,37	1,53	1,24	2,6	0,51	1,1
	2019	0,01	0,09	2,38	0,37	0,85	0,66	0,14	0,6
	2020	0,19	0,45	2,69	1,56	1,26	0,023	0	0,8

В соответствии с табл. 5 значение ГТК по МС Нур-султан за весь наблюдаемый период равняется 0,8 и данный период характеризуется умеренной засухой. Однако в 2016 и 2018 гг. отмечается умеренная влажность где значение ГТК больше 1 (1 и 1,1) соответственно. Также в отдельные месяцы всего периода отмечалась избыточная влажность в диапазоне значений ГТК (2,38–3,44). Очень сильная засуха наблюдалась в 2017 г. со значением 0,4 ГТК.

Таблица 6

Значения ГТК по МС Костанай

МС	Год	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Среднее значение за вег. период
Костанай	2016	0,6	0,04	0,91	1,14	0,15	1,24	0,2	0,6
	2017	0,1	0,23	1,39	1,14	0,59	0,13	0	0,5
	2018	0,04	0,33	0,75	0,27	1,22	0,24	0,1	0,4
	2019	0,02	0,18	0,17	0,33	0,64	0,49	0	0,3
	2020	0,02	0,71	0,33	0,28	1,08	0,11	0,18	0,3

В соответствии с табл. 6 значение ГТК по МС Костанай за весь наблюдаемый период равняется 0,4 и данный период характеризуется очень сильной засухой. Помимо этого, в отдельные месяцы всего периода отмечалась умеренная влажность в диапазоне значений ГТК (1,08–1,39).

Таблица 7

Значения ГТК по МС Павлодар

МС	Год	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Среднее значение за вег. период
Павлодар	2016	0,01	0,25	5,71	2,24	0,84	0,91	1,82	1,5
	2017	0,31	0,33	0,32	3,7	0,67	0,48	0,24	0,9
	2018	0,87	0,85	2,71	1,95	0,9	0,49	0,02	1,1
	2019	0,04	0,03	2,26	0,27	0,49	0,38	0,13	0,4
	2020	0,14	0,1	0,33	1,8	0,38	0,19	0,02	0,3

В соответствии с табл. 7 значение ГТК по МС Павлодар за весь наблюдаемый период равняется 0,8 и данный период характеризуется умеренной засухой. Однако 2016 и 2018 гг отмечается умеренная влажность где значение ГТК больше 1 (1,1 и 1,5) соответственно. Также в отдельные месяцы всего периода

отмечалась избыточная влажность в диапазоне значений ГТК (2,24–5,71). Очень сильная засуха наблюдалась в 2019–2020 гг. со значением 0,4 и 0,3 ГТК соответственно.

Таблица 8

Значения ГТК по МС Петропавловск

МС	Год	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Среднее значение за вег. период
Петропавловск	2016	0,04	0,23	1,47	1,12	0,2	0,55	0	0,5
	2017	0,02	0,2	0,68	1,24	0,27	0,14	0	0,4
	2018	0,03	0,33	0,7	0,33	1,72	0,2	0,11	0,5
	2019	0	0,1	1	0,7	0,5	0,4	0	0,4
	2020	0,2	0,6	0,3	0,5	0,5	0,2	0	0,3

В соответствии с табл. 8 значение ГТК по МС Петропавловск за весь наблюдаемый период равняется 0,4 и данный период характеризуется очень сильной засухой. Помимо этого, в отдельные месяцы всего периода отмечалась умеренная влажность в диапазоне значений ГТК (1,12–1,72).

Таблица 9

Значения ГТК по МС Щучинск

МС	Год	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Среднее значение за вег период
Щучинск	2016	0,26	0,14	1,48	2,75	0,62	0,44	0	0,8
	2017	0,02	0,08	0,13	1,75	0,12	0,04	0	0,3
	2018	0,11	0,28	0,8	1,8	2,04	0,02	0	0,7
	2019	0	0,07	1,03	0,68	0,63	0,43	0,03	0,4
	2020	1,41	0,12	0,42	0,82	0,39	0	0	0,5

В соответствии с табл. 9 значение ГТК по МС Щучинск за весь наблюдаемый период равняется 0,5 и данный период характеризуется сильной засухой. Помимо этого, в отдельные месяцы всего периода отмечалась избыточная влажность в диапазоне значений ГТК (2,04–2,75). Следует также отметить, что в такие месяцы как: июнь и июль каждого рассматриваемого года являются влажными, а остальные месяцы характеризуются средней засухой и очень сильной засухой.

В рамках данной работы были рассмотрены и оценены влажный период и период с очень сильной засухой. Если рассматривать 2016–2020 гг. и все пять МС, то можно отметить, что за весь рассматриваемый период повторяемость очень сильной засухи составила 58 %, а влажного периода 21 %, в том числе повторяемость избыточного влажного периода 7 %, а на остальную долю приходится умеренное увлажнение.

Если рассматривать отдельные годы, то наибольшая повторяемость очень сильной засухи по всей рассматриваемой территории северного Казахстана (апрель–октябрь) была в 2020 г. со значением 66 %.

Очень сильная засуха за рассматриваемые пять лет наблюдалась на МС Костанай и Петропавловск со значением ГТК 0,4, на остальных станциях засуха характеризовалась как средней и умеренной со значением от 0,5 до 0,8. Наибольшая повторяемость очень сильной засухи отмечается на МС Павлодар в 2020 г. (89 %) и на МС Щучинск в 2017 г. (86 %).

Несмотря на засушливость северной части Казахстана, в отдельные месяцы рассматриваемых 2016–2020 гг. наблюдались периоды как умеренного, так и избыточно увлажнения. Например, значение ГТК для влажного периода колеблется от 1 до 5,7. Максимальное значение ГТК (5,7) наблюдалось в июне 2016 г. на МС Павлодар. Наибольшая повторяемость влажного периода из рассматриваемых МС отмечается на МС Нур-султан (43 % и 57 %) в 2020 и 2018 гг. соответственно.

Таким образом согласно проведенному статистическому анализу по пяти метеостанциям (МС) северной части Казахстана (Нур-султан, Кокшетау, Павлодар, Петропавловск, Щучинск) в период с температурой воздуха выше + 10 ºС за 2016–2020 гг. было выявлено, что рассматриваемый район характеризуется засушливым, так как среднее значение ГТК за весь период и по всем МС менее 1.

Вывод

Северный Казахстан привлекает особое внимание ученных так как данная территория является крупнейшим зерносеющим регионом. Однако для стран Центральной Азии, либо для схожего по климатическим условиям региона нет единого разработанного индекса или показателя для определения засухи.

В данной работе для параметризации атмосферных засух рассматривались метеорологические индексы и показатели также индексы дистанционного зондирования. Индексы дистанционного зондирования уступают в параметризации засух метеорологическим индексам и показателям. Однако хорошие результаты показал индекс дистанционного зондирования VTCI, который является показательным для изучения и выявления атмосферных засух.

По результатам многочисленных исследований, наиболее показательными метеорологическими индексами для параметризации засух являются гидротермический коэффициент Г. Т. Селянинова, индекс Педя и SPI, что подтверждается опросом Комиссией по сельскохозяйственной метеорологии ВМО национальных гидрометеорологических служб стран Центральной Азии о наиболее частом использовании индексов засушливости [12].

Для выполнения данной работы использовался ГТК Селянинова для параметризации засух и было выявлено, что рассматриваемый район характеризуется засушливым, так как среднее значение ГТК за весь период и по всем МС менее 1.

Очень сильная засуха за рассматриваемые пять лет наблюдалась на МС Костанай и Петропавловск со значением ГТК 0,4, на остальных станциях засуха характеризовалась как средней и умеренной со значением от 0,5 до 0,8. Несмотря на засушливость Северного Казахстана, в отдельные месяцы рассматриваемых 2016–2020 гг. наблюдались периоды как умеренного, так и избыточно увлажнения. Так значение ГТК для влажного периода колеблется от 1 до 5,7. Где Максимальное значение ГТК (5,7) наблюдалось в июне 2016 г. на МС Павлодар.

Следует также отметить, что такие месяцы как: июнь и июль каждого рассматриваемого года являются влажными, а остальные месяцы характеризуются средней засухой и очень сильной засухой.

Список литературы

1. О связях климатических аномалий на территории России с явлением Эль-Ниньо – Южное колебание / Г. В. Груза, Э. Я. Ранькова, Л. К. Клещенко, Л. Н. Аристова // Метеорология и гидрология. 2002. № 5. С. 32–51.

2. *Groll M., Opp C., Aslanov I.* Spatial and temporal distribution of the dust deposition in Central Asia – results from a long term monitoring program // Aeolian Res. 2013. P. 49–62. https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2012.08.002

3. *Hao Guo, Anming Bao.* Spatial and temporal characteristics of droughts in Central Asia during 1966–2015. // Science of the Total Environment. 2018.

4. Changes of the Annual Precipitation over Central Asia in the Twenty-First Century Projected by Multimodels of CMIP5 / A. Huang, Y. Zhou, Y. Zhang, D. Huang, Y. Zhao, H. Wu. // J. Clim. 2014.

5. Изменение климата: Обобщенный доклад Межправительственной группой экспертов по изменению климата / под ред. Р. Т. Уотсона [и др.]. МГЭИК, Женева, Швейцария, 2007. 104 с.

6. *Issanova G., Abuduwaili J.* Aeolian Processes in the Arid Territories of Central Asia. Springer. 2017.

7. Global burned area and biomass burning emissions from small fires. / J. T. Randerson, Y. Chen, G. R. van der Werf, B. M. Rogers, D. C. Morton // J. Geophys. 2012.

8. *Клименко В. В.* Почему замедляется глобальное потепление? // Доклады Академии наук РФ. 2011. Т. 440, № 4. С. 536–539.

9. Practical Predictability of the Standardized Precipitation Index on Monthly and Sea sonal Timescales / A. Kulikovaa, E. N. Kruglovaa, D. B. Kikteva, V. G. Sal'nikov.

10. *Lioubimtseva E.; Cole R.* Uncertainties of Climate Change in Arid Environments of Central Asia. Rev // Fish. Sci. 2006. N 14. P. 29–49. https://doi.org/10.1080/10641260500340603

11. *Рысалиева Л. С., Сальников В. Г.* Исследование атмосферной засухи в Центральной Азии // Географический вестник = Geographical bulletin. 2021. № 2(57). С. 110–120. https://doi.org/10.17072/2079-7877-2021-2-110-120

12. World Meteorological Organization (WMO) and Global Water Partnership (GWP), 2016: *Handbook of Drought Indicators and Indices* (M. Svoboda and B.A. Fuchs). Integrated Drought Management Programme (IDMP), Integrated Drought Management Tools and Guidelines Series 2. Geneva.

УДК 53.01

Необходимые условия формирования Terrestrial Gamma-ray Flashes в грозовых облаках за счет механизмов обратной связи в динамике лавин релятивистских убегающих электронов

Е. М. Стадничук (yegor.stadnichuk@phystech.edu)[1,2], Д. И. Землянская (zemlianskay.d@phystech.edu)[1,3]

[1]*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Москва*
[2]*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва*
[3]*Институт ядерных исследований РАН, Москва*

Аннотация. В земной атмосфере наблюдается такое опасное природное явление как Terrestrial Gamma-ray Flashes (TGF). Одним из способов объяснения этого явление является наличие положительной обратной связи в динамике лавин релятивистских убегающих электронов (ЛРУЭ). Обратная связь может быть релятивистской: размножение ЛРУЭ за счет образование гамма-излучением позитронов или за счет обратного рассеяния гаммы. Также обратная связь в ЛРУЭ может быть «реакторной», в этом случае размножение лавин происходит за счет обмена тормозным гамма-излучением между различными областями сильного электрического поля внутри грозового облака. В настоящей работе представлены расчет и сравнение электрических полей, необходимых для существования бесконечной обратной связи, которая может послужить причиной TGF. Показано, что геометрия электрического поля вносит существенный вклад в физику убегающих электронов, а также что бесконечная «реакторная» обратная связь требует существенно более низкие значения величины электрического поля внутри грозового облака.

Ключевые слова: TGF, RREA, ЛРУЭ, убегающие электроны, релятивистская обратная связь, «реакторная» обратная связь.

В атмосфере Земли наблюдается загадочное природное явление – Terrestrial Gamma-ray Flashes (TGF) [1]. Возможная причина наземных гамма-вспышек – тормозное излучение ускоряемых крупномасштабными грозовыми электрическими полями релятивистских электронов [2]. Взаимодействие ускоряемых электронов с молекулами воздуха приводит к рождению дополнительных релятивистских электронов, что приводит к образованию так называемых лавин релятивистских убегающих электронов (ЛРУЭ) [3]. Большое количество высокоэнергичных частиц внутри грозовых облаков может получиться в следствие механизмов обратной связи в динамике ЛРУЭ [4]. Обратная связь в физике лавин приводит к их размножению, а при определенных условиях она может привести к электромагнитному взрыву – экспоненциальному росту количества высокоэнергичных частиц внутри грозового облака. Такой взрыв приводит к разрядке грозового электрического поля, а также гипотетически является источником TGF.

На сегодняшний день известно два вида положительной обратной связи. Релятивистская обратная связь появляется в динамике ЛРУЭ вследствие рождения позитронов тормозным гамма-излучением, а также в следствие разворота гаммы за счет комптоновского рассеяния на молекулах воздуха. Эти процессы приводят к рождению вторичных лавин убегающих электронов в области позади

первичных лавин, что приводит к самоподдерживающемуся размножению релятивистских частиц [4]. Второй вид обратной связи появляется в сложных грозовых электрических структурах: лавины усиливаются за счет обмена тормозным гамма-излучением между различными областями с сильным электрическим полем внутри грозового облака (рис. 1). Этот обмен приводит к цепной реакции, размножающей лавины релятивистских электронов во всем объеме грозового облака [5]. Этот механизм обратной связи, появляющейся вследствие неоднородной геометрии электрического поля, называется реакторной обратной связью.

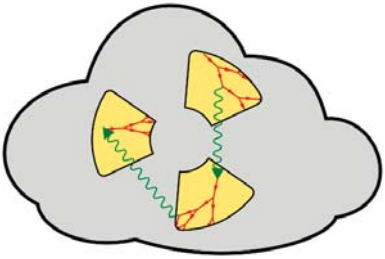


Рис. 1. Иллюстрация механизма реакторной обратной связи [5]. ЛРУЭ размножаются в следствие обмена их тормозным гамма-излучением между областями сильного электрического поля внутри грозового облака

В настоящей работе произведен рассчет необходимых условий для бесконечной обратной связи в физике лавин убегающих электронов. Ключевыми параметрами электрического поля грозового облака являются его геометрия, величина электрического поля, плотность воздуха и характерный размер одной из областей с сильным электрическим полем, формирующим ЛРУЭ. Вклад обратной связи в динамику убегающих электронов описывается коэффициентом обратной связи [4]. Он показывает относительный прирост количества релятивистских частиц за один цикл обратной связи. Если этот коэффициент больше 1, то ЛРУЭ становятся самоподдерживающимися, и количество релятивистских ччастиц внутри грозового облака растет. Если коэффициент обратной связи меньше единицы, то обратная связь лишь усиливает ЛРУЭ, но не меняет существенно их физику. Таким образом, необходимые условия бесконечной обратной связи – это плотность воздуха, величина электрического поля и характерный размер одной области с полем, при которых коэффициент обратной связи равен 1.

В настоящей работе получено теоретическое описание обратной связи в физике лавин релятивистских убегающих электронов. Это описание основано на построении матрицы операторов обратной связи, которая, действуя на вектор распределений релятивистских частиц в областях сильного поля в i-ом поколении обратной связи, получает распределения в i+1-ом:

$$\vec{A}^{i+1} = \hat{F}\vec{A}^{i} \tag{1}$$

Эта техника позволяет получать коэффициенты обратной связи как собственные значения матрицы операторов обратной связи. Таким образом, были

получены формулы для коэффициентов обратной связи для различных механизмов, что позволило вычислить условия внутри грозовых облаков, необходимые для бесконечной обратной связи и, как следствие, для формирования TGF. Результаты, полученные с помощью предложенного формализма, были верифицированы с помощью симуляции на GEANT4 [6]. На рис. 2 представлены необходимые условия формирования TGF лавинами релятивистских убегающих электронов за счет различных механизмов обратной связи. Позитронный механизм Дваера сравнивается с простейшей реакторной моделью, состоящих из двух областей с полем, ускоряющих электроны в сторону друг друга [7], с моделью сферического реактора, представляющего собой центральное сферически симметричное поле, ускоряющего электроны к его центру, и multicell reactor model, состоящего из большого количества ориентированных в различные стороны областей сильного поля [5].

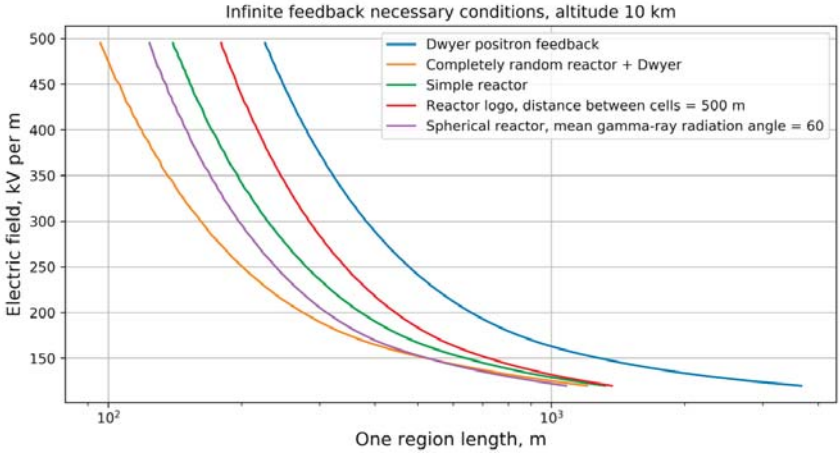


Рис. 2. Сравнение механизмов обратной связи в физике ЛРУЭ на примере условий, необходимых для того, чтобы их коэффициент обратной связи был равен 1

Рисунок 2 показывает, что неоднородная геометрия электрического поля требует существенно более низкие величины поля для образования TGF с помощью механизмов обратной связи. Вклад позитронной обратной связи оказался пренебрежимо малым в неоднородных на масштабах сотен метров геометриях поля.

Список литературы

1. First 10 months of tgf observations by asim / N. Ostgaard, T. Neubert, V. Reglero, K. Ullaland, S. Yang, G. Genov, S. Alnussira // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2019. Vol. 124, N 24. P. 14024–14036. URL: https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2019JD031214 https://doi.org/10.1029/2019JD031214

2. *Babich L. P.* Relativistic runaway electron avalanche // Physics-Uspekhi. 2020. Vol. 63, N 12. P. 1188–1218. https://doi.org/10.3367/ufne.2020.04.038747 doi:10.3367/ufne.2020.04.038747

3. *Gurevich A., Milikh G., Roussel-Dupre R.* Runaway electron mechanism of air breakdown and preconditioning during a thunderstorm // Physics Letters A. 1992. Vol. 165, N 5. P. 463–468.

4. Dwyer J. R. Relativistic breakdown in planetary atmospheres // Physics of Plasmas. 2007. Vol. 14, N 4. 042901. https://doi.org/10.1063/1.2709652 doi:10.1063/1.2709652

5. Relativistic runaway electron avalanches within complex thunderstorm electric eld structures / E. Stadnichuk, E. Svechnikova, A. Nozik, D. Zemlianskaya, T. Khamitov, M. Zelenyy, M. Dolgonosov. 2021.

6. Geant4 – a simulation toolkit / *S. Agostinelli, J. Allison, K. Amako, J. Apostolakis, H. Araujo, P. Arce, D. Zschiesch* // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2003. Vol. 506, N 3. P. 250–303. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900203013688, doi: https://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)01368-8

7. *Stadnichuk E., Zemlianskay D., Efremova V.* Simple “Reactor model” of relativistic runaway electron avalanches dynamics // EGU General Assembly Conference Abstracts, EGU21-13395.

УДК 551.581

Интенсивность метелей в Западно-Казахстанской области в XXI в.

М. Д. Стамбеков (stambekovmuhtar@gmail.com)

Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы

Аннотация. Рассмотрены метеорологические параметры формирования метелей в Западно-Казахстанской области за последние 20 лет. Приведены данные о продолжительности метелей, среднее многолетнее число суток с метелью, определено наибольшее число суток в год, повторяемость различных скоростей и направлений ветра.

Ключевые слова: опасные явления (ОЯ), метель, холодный период, физико-географические условия, природные риски, Западно-Казахстанская область.

Введение

С точки зрения наблюдаемого изменения климата, мониторинг опасных погодных явлений имеет важнейшее значение, как один из его ключевых характеристик. Опасные погодные явления – это явления, которые по интенсивности развития, продолжительности или моменту возникновения могут оказать угрозу жизни или здоровью граждан, а также нанести значительный материальный ущерб.

Из приведенного выше определения следует, что опасно не само явление, а его последствия для жизни человека и хозяйственной деятельности. Поэтому особенно важно знать закономерности и частоту возникновения опасных явлений как в крупных населенных пунктах, так и в промышленных зонах или на территориях с активной производственной деятельностью. Любое опасное явление по своей сути является источником стихийных бедствий.

Согласно последнему докладу МГЭИК [6], глобальное потепление, основанное на пяти сценариях, в ближайшем будущем приведет к значительному увеличению частоты и интенсивности опасных и экстремальных гидрометеорологических явлений.

Автор [10] рассматривает снижение вероятности стихийных бедствий как политическую цель или задачу, а также как наиболее важную стратегическую и

инструментальную меру, используемую для прогнозирования вероятности будущих бедствий, уменьшения текущего воздействия и повышения устойчивости экологических систем.

Стихийные бедствия, вызванные гидрометеорологическими явлениями, встречаются во всех частях земного шара. Часто они наносят значительный ущерб, вызывая различного рода жертвы и разрушения. Воздействие стихий оказывает серьезное влияние на устойчивое развитие стран. Интенсивное потепление последних десятилетий в умеренных и высоких широтах привело к таким последствиям, как сокращение отопительного сезона и увеличение продолжительности вегетационного периода [7]. В то же время в условиях потепления наблюдается увеличение числа экстремально жарких дней, дней с интенсивными осадками и сильными ветрами, с одновременным уменьшением экстремально холодных дней. Экстремальные климатические условия создают предпосылки для увеличения чрезвычайных ситуации.

Исследования Всемирной метеорологической ассоциации (ВМО) показали, что 2011–2020 гг. были самым теплым десятилетием за всю историю наблюдений при сохранении долгосрочной тенденции к изменению климата. Самые теплые шесть лет последовали с 2015 г., причем 2016, 2019 и 2020 гг. были одними из трех самых теплых лет [2].

Республика Казахстан в значительной степени уязвима к стихийным бедствиям, связанным с климатическими и погодными условиями, поскольку занимает обширную территорию с различными климатическими зонами: от очень жарких и сухих пустынных зон на юге и юго-западе до очень холодных степных и лесных зон на севере республики зимой. Восточные и юго-восточные территории Казахстана являются горными, и здесь происходят практически все виды стихийных бедствий, таких как: землетрясения, оползни, сели, лавины, землетрясения, штормовые ветра, сильные ливни, морозы и засухи [3].

Опасные и экстремальные метеорологические явления наблюдаются в Казахстане повсеместно [4], но особое внимание им уделяется только тогда, когда они могут перерасти в природные угрозы, представляющие опасность для деятельности человека, жилья, объектов инфраструктуры и транспорта, сельского и лесного хозяйства или других объектов экономической деятельности.

Сильные снегопады и метели, сопровождающиеся сильными ветрами, сильные продолжительные морозы, туманы, гололедица, поздние весенние заморозки – это те экстремальные метеорологические явления, которые характерны для территории Казахстана в холодный период года [5].

Материалы и методы

Анализ климатических особенностей погодных явлений в Западно-Казахстанской области проводился в соответствии с информацией, представленной в климатическом справочнике [8].

На территории Западно-Казахстанской области расположено 15 метеорологических станций (МС) РГП «Казгидромет» Министерства энергетики Республики Казахстан. Для характеристики климатических условий региона были использованы данные 10 метеорологических станций с непрерывным многолетним

рядом наблюдений: Январцево, Аксай, Уральск, Каменка, Шынгырлау, Жымпиты, Чапаево, Жалпактал, Жанибек, Тайпак.

После проведения критического контроля используемых данных и отбраковки некачественной информации оказалось, что наиболее достоверными данными являются данные о количестве дней с явлениями. Для них рассчитывались не только средние значения, но и стандартные отклонения, коэффициенты вариации, оценивалась точность полученных характеристик. В связи с тем, что рассматриваемые явления носят достаточно локальный характер, были использованы данные наблюдений с метеостанций с сериями наблюдений продолжительностью 20–25 лет.

Как правило, чтобы предсказать опасное явление в будущем, необходимо детально изучить это явление в настоящем. Следует отметить, что для таких явлений важно знать не только условия, при которых это уже наблюдается или возможно, но и набор различных критериев, которые привели к его формированию. Экстремальные метеорологические явления могут наблюдаться отдельно друг от друга и могут быть причиной возникновения других опасных явлений.

Краткое описание области исследований

Западно-Казахстанская область находится в северо-западной части Казахстана. На севере и западе граничит с пятью регионами Российской Федерации (Астраханская, Волгоградская, Саратовская, Самарская, Оренбургская), на юге – с Атырауской областью, на востоке с Актюбинской областью. Площадь области составляет 151,3 тыс. км^2. Протяженность территории области с севера на юг составляет около 350 км, а с запада на восток – более 500 км [1].

На территории Западно-Казахстанской области выделяются степные, сухостепные, полупустынные и пустынные природные зоны. Рельеф территории области низменный, высота над уровнем моря уменьшается с северо-востока на юго-запад области.

На севере и северо-востоке территории области расположены отроги Общего Сырта и Предуральское плато. Поверхность рельефа Общего Сырта понижается с севера (100–150 м) на юг (60–70 м). Предуральское (Эмбинское) плато занимает территорию между Прикаспийской низменностью и Мугоджарами. Его северо-восточная сторона приподнята (до 400–450 м), юго-западная постепенно понижается (до 100–150 м).

На юге, в пределах Прикаспийской низменности, находятся песчаные массивы Нарына. Самая высокая точка региона, гора Ичка, находится на северо-западе, ее высота над уровнем моря составляет 259 м. Большую часть территории занимает Прикаспийская низменность, чередующаяся с холмисто-скалистыми возвышенностями.

Результаты и обсуждение

Метели – это опасное метеорологическое явление, опасное для всех видов транспорта. При длительных метелях с сильным ветром затраты на расчистку автомагистралей, городских улиц и взлетно-посадочных полос возрастают. Отмена запланированных пассажирских и грузовых перевозок из-за метелей наносит еще больший ущерб транспортной экономике.

Метели вызывают перенос снега из одного района в другой, уплотняют его, что обусловливает неравномерное распределение водных ресурсов, снежного покрова по территории и неодинаковое промерзание почвы. Кроме того, метели способствуют образованию сильных заносов, срывающих работу авиации, нарушающих нормальную работу железнодорожного и других видов транспорта. За исключением поземка, метели обычно значительно понижают дальность видимости, в некоторых случаях даже до нескольких метров.

Пространственное распределение метелей (повторяемость, продолжительность, интенсивность переноса снега) во многом зависит от широты места, климатических, синоптических условий и физико-географических особенностей (степени защищенности населенного пункта, формы рельефа, экспозиции склона, высоты над уровнем моря) [9].

В Средней Азии, Казахстане и на юге Западной Сибири весьма интенсивные метели возникают при выходе южных циклонов (Южно-каспийского, Мургабского и Амударьинского), в зоне теплых фронтов при восточных ветрах, а также, когда они регенерируют на арктическом фронте

В этой статье автор рассмотрел количество дней с общими и слабыми метелями, т. е. как перенос уже выпавшего снега, так и его перенос в сочетании с падающим снегом. Эти явления проявляются на территории Западно-Казахстанской области в холодный период года. Тем не менее, в зависимости от циркуляционных и физико-географических условий, они могут проявляться по-разному как на территории, так и во времени.

Рельеф территории Западно-Казахстанской области оказывает большое влияние на пространственную и временную изменчивость распространения метелей. На севере и северо-востоке региона метели наблюдаются гораздо чаще, чем на юге и юго-западе.

Среднее многолетнее значение числа суток с метелью в Западно-Казахстанской области изменяется в интервале от 5,7 до 30,5 (табл. 1). Анализ распределения показывает, что наибольшее среднее число суток с метелью наблюдается на МС Жымпиты (30,5), наименьшее – на МС Январцево (5,7).

Таблица 1

Среднее число суток с метелью за 2000–2020 гг.

Метеостанция (МС)	Месяц					Общее число суток с метелью
	ноябрь	декабрь	январь	февраль	март	
Аксай	2,0	7,2	9,1	6,6	2,9	27,8
Уральск	0,8	2,4	3,4	2,9	1,6	11,1
Январцево	0,5	1,1	1,6	1,5	1,0	5,7
Каменка	1,5	4,8	7,0	5,1	2,9	21,3
Чапаево	1,0	1,5	2,4	2,2	1,1	8,2
Шынгырлау	0,9	2,3	3,6	3,7	1,4	11,9
Жымпиты	3,0	7,5	9,0	7,1	3,9	30,5
Урда	0,6	1,4	4,0	2,3	0,9	9,2
Тайпак	0,6	1,2	2,3	1,5	1,0	6,6
Жанибек	0,7	1,7	3,8	2,8	1,1	10,1

Наибольшее число суток с метелью отмечается на МС Аксай в январе (9,1), наименьшее – на МС Январцево в ноябре (0,5). В Январцево за всю зиму наблюдается наименьшее среднее число суток с метелью, увеличиваясь с ноября по январь.

Особенности распределения средних значений частоты метелей по территории и характеристики ее изменчивости из года в год в основном схожи. Максимальная изменчивость наблюдается в северных и северо-восточных регионах, где среднеквадратичные отклонения составляют до 5 дней, наименьшая – в южных, юго-западных районах области ($\sigma = 1,3$). Коэффициент вариации почти на всей территории не превышает 0,4.

Для представления возможных пределов, которых может достигать повторяемость метелей, было выбрано наибольшее число суток с метелью отдельно за один из рассматриваемых периодов наблюдения.

В табл. 2 приведены данные наибольшего числа суток с метелью за период 2000–2020 гг.

Таблица 2

Распределение наибольшего числа суток с метелью за 2000–2020 гг.

Метеостанция (МС)	Месяц					Общее число суток с метелью
	ноябрь	декабрь	январь	февраль	март	
Аксай	11 (2002 г.)	14 (2002 г.)	18 (2002 г.)	16 (2007 г.)	8 (2006 г.)	67
Уральск	3 (2001 г.)	9 (2001 г.)	13 (2005 г.)	13 (2009 г.)	5 (2006 г.)	43
Январцево	1 (2000 г.)	4 (2001 г.)	8 (2001 г.)	9 (2018 г.)	3 (2006 г.)	25
Каменка	5 (2002 г.)	14 (2002 г.)	19 (2002 г.)	13 (2010 г.)	8 (2005 г.)	59
Чапаево	5 (2002 г.)	7 (2012 г.)	8 (2012 г.)	10 (2003 г.)	4 (2013 г.)	34
Шынгырлау	3 (2016 г.)	6 (2012 г.)	10 (2012 г.)	11 (2003 г.)	6 (2018 г.)	36
Жымпиты	10 (2002 г.)	20 (2002 г.)	23 (2002 г.)	16 (2010 г.)	9 (2017 г.)	78
Урда	2 (2018 г.)	6 (2009 г.)	11 (2012 г.)	13 (2010 г.)	2 (2005 г.)	34
Тайпак	2 (2012 г.)	8 (2008 г.)	9 (2012 г.)	8 (2009 г.)	3 (2005 г.)	30
Жанибек	2 (2012 г.)	7 (2008 г.)	14 (2002 г.)	13 (2003 г.)	5 (2015 г.)	41

Из данных табл. 2 видно, что наибольшее число суток с метелью наблюдается на МС Жымпиты (23) в январе 2002 г., наименьшее – на МС Январцево (1) в ноябре 2000 г. В Январцево отмечается наименьшее число суток с метелью, при этом с ноября по февраль наблюдается их увеличение.

Если рассматривать сумму наибольшего числа суток с метелью за все три зимних месяца, то в среднем отмечается от 25 до 78 сут. Анализ распределения показывает, что общее наибольшее число суток с метелью отмечено на МС Жымпиты (78), наименьшее – на МС Январцево (25). Наиболее часто метели наблюдались в первое десятилетие XXI в.

В табл. 3 приведена средняя продолжительность метелей за рассматриваемый период (в часах).

Из данных табл. 3 видно, что наибольшая средняя продолжительность метелей отмечается на МС Жымпиты (70 ч) в январе, наименьшая – на МС Тайпак и Январцево (1 ч) в ноябре. Суммарная продолжительность метелей по пяти месяцам варьируется от 23 ч в Январцево до 218 ч в Жымпиты.

Таблица 3

Распределение средней продолжительности метелей за 2000–2020 гг. (ч)

Метеостанция	Месяц					Общая продолжительность метелей
	ноябрь	декабрь	январь	февраль	март	
Аксай	11	47	67	50	19	194
Уральск	3	11	21	15	5	55
Январцево	1	4	7	7	4	23
Каменка	8	31	60	42	17	158
Чапаево	3	7	12	11	4	37
Шынгырлау	5	17	23	22	10	77
Жымпиты	12	49	70	62	25	218
Урда	2	7	23	22	3	57
Тайпак	1	4	11	12	3	31
Жанибек	2	10	31	22	6	71

В табл. 4–5 представлены повторяемости различных скоростей и направлений ветра при метелях за период 2000–2020 гг.

Таблица 4

Повторяемость различных скоростей ветра при метелях, %

Метеостанция	Скорость ветра, м/с					
	менее 6	6–9	10–13	14–17	17–20	более 20
Аксай	1,1	20,6	53,1	20,1	5,0	0,1
Уральск	5,2	56,1	26,8	8,0	3,9	
Январцево	9,1	56,3	32,3	2,3		
Каменка	0,9	14,1	52,5	23,9	5,7	2,9
Чапаево	1,5	23,5	65,1	8,8	1,1	
Шынгырлау		12,5	48,6	35,1	3,8	
Жымпиты	9,5	40,1	38,4	9,5	1,9	0,6
Урда	4,0	47,0	43,5	5,5		
Тайпак	3,0	33,3	35,1	10,5	12,7	5,4
Жанибек	5,2	52,3	31,2	9,1	2,2	

Таблица 5

Повторяемость различных направлений ветра при метелях, %

Метеостанция	Направление ветра, румбы							
	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ
Аксай	2,0	4,5	9,3	18,3	31,9	23,0	7,4	3,6
Уральск	2,5	2,1	2,4	18,9	31,6	28,6	6,6	7,2
Январцево	10,4	3,7	8,4	15,8	28,2	16,1	8,1	9,4
Каменка	5,9	6,0	11,4	19,1	22,5	19,2	9,1	6,8
Чапаево	3,4	3,8	6,3	21,2	23,7	24,2	12,6	4,8
Шынгырлау	3,7	4,0	11,6	11,9	19,4	30,4	11,3	7,5
Жымпиты	3,5	4,5	8,0	18,3	24,1	24,0	10,7	7,0
Урда	8,2	13,5	13,3	11,5	12,4	14,1	16,7	10,3
Тайпак	8,5	2,5	5,9	16,9	16,4	23,2	18,4	8,2
Жанибек	8,9	9,6	14,2	13,6	13,9	19,5	12,8	7,4

Из табл. 4 видно, что за рассматриваемый период на территории Западно-Казахстанской области наиболее часто наблюдаются метели при скоростях ветра в интервале от 10 до 13 м/с на МС Аксай, Каменка, Чапаево, Шынгырлау и Тайпак. На МС Уральск, Январцево, Жымпиты, Урда и Жанибек преобладают скорости ветра от 6 до 9 м/с. Практически на всех рассматриваемых метеостанциях Западного Казахстана при метелях преобладают южные и юго-западные ветра. При этом наибольшая повторяемость наблюдается на МС Аксай (31,9 %) и на МС Уральск (31,6 %). Другие направления ветра можно считать незначительными. Характеристики ветра находятся в прямой связи с местными барико-циркуляционными условиями холодного периода, ветровая система здесь практически не искажается из-за орографических особенностей степных пространств Западно-Казахстанской области.

Заключение

Зимой при усилении азиатского антициклона территория Западно-Казахстанской области находится под влиянием его западного отрога. В этом случае наблюдается увеличение повторяемости южных и юго-западных ветров, что приводит к возникновению особо опасных метелей.

В среднем за год в Западном Казахстане отмечается до 30 дней с метелями. Наибольшее число дней с метелью в рассматриваемый период достигало 78.

Пространственное распределение среднегодового числа дней с метелью и средней суммарной продолжительности метелей в часах по территории области не равномерно. Наибольшие значения наблюдаются на МС Жымпиты, что объясняется большой открытостью территории.

За последнее десятилетие произошло уменьшение в 1,5–2 раза как числа дней с метелью, так и средней продолжительности метелей.

Значительное уменьшение повторяемости метелей на фоне снижения скорости ветра обусловлено изменением режима общей циркуляции атмосферы, а именно – малой повторяемостью восточной формы циркуляции, во время преобладания которой на территорию ЕТР и Западного Казахстана осуществляется вынос воздушных масс с северных морей.

Многолетняя тенденция к повышению температуры воздуха над Западным Казахстаном в зимние месяцы обусловила ослабление градиентов в поле приземного давления и, как следствие, уменьшение скорости ветра и повторяемости метелей.

Результаты исследования будут полезны для обеспечения организаций Западно-Казахстанской области современной информацией о климатических характеристиках метелей, для решения задач проектирования, строительства, ремонта и содержания автомобильных дорог региона.

Список литературы

1. Агроклиматические ресурсы Западно-Казахстанской области : научно-прикладной справочник / под ред. С. С. Байшоланова. Астана, 2017. 128 с.

2. Всемирная метеорологическая организация (ВМО). URL: https://public.wmo.int/ru/media (дата обращения: 17.10.2021).

3. Оценочный доклад об изменениях климата на территории Казахстана / С. А. Долгих, Р. М. Илякова, П. Ж. Кожахметов, Л. Н. Никифорова, Е. Е. Петрова, Е. Ю. Смирнова. Астана : Казгидромет, 2014. С. 7–25.

4. Ежегодный бюллетень мониторинга состояния и изменения климата Казахстана: 2019 год. Нур-Султан : Казгидромет, 2020. 61 с.

5. Ежегодники по стихийным гидрометеорологическим явлениям, наблюдавшимся на территории Казахстана. Издания с 1990 по 2015 г. РГП Алматы, Казгидромет.

6. МГЭИК, 2020 г.: Резюме для политиков. Содержится в публикации Изменение климата, 2020 г.: Физическая научная основа. Вклад Рабочей группы в Шестой доклад об оценке Межправительственной группы экспертов по изменению климата.

7. Оценочный доклад об изменениях климата на территории Казахстана / под ред. С. А. Долгих. Астана : РГП «Казгидромет», 2013. 55 с.

8. Справочник по климату Казахстана. Раздел атмосферные явления: 2013 год. Астана, РГП «Казгидромет», 2003. Вып. 5. 46 с.

9. *Таран И. В., Купянская Т. П.* Прогноз метели различной интенсивности, включая стихийные для Европейской территории СССР : труды Гидрометцентра СССР. 1989. Вып. 299. С. 22–24.

10. *Lavell A.* Technical Study in Integrating Climate Change Adaptation and Disaster Risk Management in Development Planning and Policy. Study undertaken for the Inter-American Development Bank, Washington, DC. 2019. 126 p.

Секция

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ АТМОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ

УДК 551.583.2

О признаках климатического опустынивания последних лет в районе Туралинских озер – г. Махачкалы

А. М. Абдурашидов (abdu6@mail.ru)[1], А. М. Дадашев (daggidromet@mail.ru)[2], С. И. Шапоренко (ser-shaporenko@yandex.ru)[3]

[1]*Адвокатская палата Республики Дагестан, Махачкала*
[2]*Дагестанский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, Махачкала*
[3]*Институт географии Российской академии наук, Москва*

Аннотация. Приморскую низменность Дагестана, как правило, включают в самый крайний юго-восточный европейский регион аридизации России. В интервале 1966–2020 гг. выделяются два климатических периода продолжительностью по 23–27 лет. Первый период – с положительными трендами увлажненности региона на фоне пониженных значений показателей, а второй – с отрицательными трендами на фоне относительно повышенного увлажнения. Последнее десятилетие текущего периода отличается специфической изменчивостью климата, характеризующейся ранее не отмечавшихся резким сокращением годовых объемов атмосферных осадков, снижением влажности воздуха, ростом испаряемости на фоне повышения температур. Только однонаправленная изменчивость основных параметров стала приводить к существенному климатическому опустыниванию в регионе, что сказывается на обводнении Туралинских озер.

Ключевые слова: аридизация, климатическое опустынивание, испаряемость, коэффициент увлажнения, тенденции.

Введение

Туралинские озера расположены рядом с южной окраиной Махачкалинско – Каспийской агломерации, которая, разрастаясь одноэтажной жилой застройкой, постепенно начинает их поглощать. Этот регион находится в зоне умеренно-континентального климата полупустынь. Исследования авторами на протяжении последних двух лет состояния пересыхающих Туралинских озер показали, что в регионе начали развиваться процессы аридизации, которые на данный момент по временному масштабу можно характеризовать как «климатическая изменчивость» [7]. Ее направленность по тенденциям некоторых метеорологических параметров имеет признаки, которые можно отнести к характеристикам климатического опустынивания по концепции А.Н. Золотокрылина [2; 3; 5]. Мониторинг изменчивости климата в данном регионе становится весьма актуальной

задачей определения момента возможного перехода характера процесса в необратимый, поскольку опустынивание, связанное с аридизацией, может вызвать весьма негативные последствия (наиболее часто – деградации земель). Как было показано авторами ранее, одно из них – недостаток водного питания Туралинских озер [7]. Цель данной работы – показать ход процесса климатической изменчивости и некоторые особенности колебаний метеорологических параметров за текущее десятилетие по сравнению за период с 1966 г. Следует отметить, что в статье почти не затрагивается «антропогенная составляющая» проблемы опустынивания, на счет которой имеются признаки гораздо более раннего воздействия на указанный процесс.

Использованные материалы

В работе использованы месячные значения метеорологических параметров в приземном слое атмосферы за период с 1966 по 2020 г. с сайта ВНИИГМИ-МЦД [1]. Данные за 2021 г. предоставлены с метеостанции Махачкала. Расчеты испаряемости выполнены по эмпирической формуле (учитывающей среднемесячные значения температуры и относительной влажности воздуха), предложенной Н. Н. Ивановым [4]. Обработка материалов осуществлена в программе Excel.

Основные параметры и их изменчивость

Отмеченные авторами ранее по среднемноголетним показателям процессы аридизации, ускорившиеся после экстремально многоводного 2009 г. [7], по данным за 2019 и 2020 гг. сохраняют свои основные тенденции (табл.). Остановимся на нескольких особенностях, которым ранее не было уделено достаточно внимания в контексте процессов опустынивания.

Температура воздуха средняя годовая в 2020 г. по сравнению с таковой в 2019 г. (самый теплый после 1966 и 2010 гг.) немного понизилась. Снижение на 0,1 ºС произошло за счет похолодания в теплый сезон. Но в холодный сезон потеплело (в обоих случаях на 0,5 ºС). Наиболее значительно (на 1,1 ºС) выросла температура в ноябре (табл. 1). Скорость потепления по тренду среднегодовой температуры за 2011–2020 гг. составила 1,33 ºС/10 лет, что гораздо выше скорости потепления в западных степных районах Ростовской области (0,8 ºС/10 лет), отмеченных как места с максимальной скоростью потепления за период с 1991 по 2016 г. [5].

Максимальные за год температуры с 1992 по 2004 г. демонстрировали стабильность, колеблясь около 35,2 ºС. Начиная с 2004 г. происходит рост этого показателя с градиентом 4,8 ºС/10 лет, продолжавшимся по 2011 г. С 2012 г. градиент роста снизился до 3,9 ºС/10 лет. Самыми жаркими месяцами чаще всего остаются июль и август. За последние 30 лет самое высокое значение температуры воздуха 40,2 ºС было зафиксировано в августе 2017 г.

Современные климатические изменения, связанные с глобальным потеплением, проявляются в росте экстремальности характеристик во многих регионах, что характерно и для Приморской низменности Дагестана.

Таблица

Среднемноголетние и за последние 2019 и 2020 гг. характеристики годовых и сезонных значений метеорологических параметров по метеостанции Махачкала

Сезоны, месяц	Период, годы	T, ºC	R, %	P, мм	И, мм	БУ, мм	КУ
Годовые значения	1966–2020	12,4	77	356,7	813,6	–457,0	0,44
	2009	12,7	79	610,7	721,3	–110,6	0,85
	2010–2014	12,9	77	397,6	850,0	–452,4	0,47
	2015–2019	13,3	73	323,0	988,9	–665,9	0,33
	2019	13,8	72	256,3	1060,8	–804,5	0,24
	2020	13,7	71	355,2	1064,0	–708,8	0,33
Теплый сезон года, апрель – октябрь	1966–2020	18,8	73	204,2	684,6	–735,0	0,30
	2009	18,4	75	362,0	604,3	–242,3	0,60
	2010–2014	19,6	73	223,9	717,1	–493,2	0,31
	2015–2019	19,7	68	154,9	827,8	–672,9	0,19
	2019	20,0	67	84,0	887,2	–803,2	0,09
	2020	19,5	66	138	873,0	–735,0	0,16
Холодный сезон года, ноябрь – март	1966–2020	3,4	83	152,5	128,6	21,6	1,19
	2009	4,7	85	248,7	107,8	271,6	2,31
	2010–2014	3,6	82	173,8	136,0	21,5	1,28
	2015–2019	4,4	80	168,1	166,4	–11,6	1,01
	2019	5,1	79	172,3	175,0	–7,0	0,98
	2020	5,6	78	217,2	180,0	–27,5	1,21
Ноябрь	1966–2020	7,7	81	37,4	35,8	1,61	1,04
	2009	9,6	86	138,9	30,2	108,7	4,60
	2010–2014	7,7	81	22,2	36,6	–14,4	0,61
	2015–2019	7,5	78	49,6	41,8	7,8	1,19
	2019	7,3	80	89,1	37,6	51,5	2,37
	2020	8,4	74	98,1	52,2	45,9	1,88

Примечание. Буквами в шапках колонок обозначены: T – температура воздуха приземная; R – относительная влажность воздуха; P – сумма осадков; И – испаряемость; БУ – баланс увлажнения; КУ – коэффициент увлажнения.

Для климатической аридизации отмечено свойственна цикличность в колебаниях характеристик [4; 5], которая придает ей свойства обратимости при возврате климата в первоначальное состояние. Именно это можно наблюдать с изменчивостью минимальной температуры в регионе. Для нее выделяются те же кратковременные периоды, что и для максимальных значений, но имеющие несколько иные тренды. В период с 1992 по 2004 г. происходил рост минимальных температур со скоростью 2,3 ºC/10 лет. В следующий период с 2004 по 2012 г. минимальные температуры стали быстро снижаться с градиентом почти – 11 ºC/10 лет, а с 2012 г. вновь стали расти на 16,8 ºC/10 лет. За последнее 30-летие минимальная температура –26,8 ºC наблюдалась в 2012 г.

Годовые суммы осадков. На основной аридной территории Европейской России в интервале с 1991 по 2016 г. доминировали отрицательные тренды осадков [5]. В регионе Махачкалы в этот период наблюдался слабый рост с градиентом 5 мм/10 лет, однако положительный тренд фиксируется исключительно благодаря экстремально многоводному 2009 г. (достоверность аппроксимации тренда близка к нулевому значению).

Если рассматривать многолетний ход годовых осадков за весь период, то можно выделить тренд роста с 1972 по 1992 г. с градиентом 63 мм/10 лет, который сменяется трендом снижения количества осадков (с 1992 по 2020 г.) со средним градиентом –21 мм/10 лет. В интервале с 2011 по 2020 г. градиент возрос по абсолютной величине до -97 мм/10 лет. Еще более резкое сокращение осадков наблюдалось с 2014 по 2020 г., когда градиент составил –176 мм/10 лет. При этом за пятилетку 2014–2019 гг. годовое количество осадков сократилось на 151 мм. Средняя многолетняя величина осадков в первый период равна 337 мм (ошибка среднего 16 мм), во второй период – 381 мм (ошибка 9,6 мм). Получается, что в целом период сокращения осадков более влажный, чем период их роста. Только в 2017 и 2019 гг. осадков выпало меньше, чем в среднем за 1972–1992 гг. (соответственно 298 и 256 мм). Таким образом сокращение годового количества осадков может и не отражать в полной мере дефицит увлажненности.

Сокращение осадков в последние два десятилетия происходило в основном за счет теплого сезона (с апреля по октябрь). С 1999 по 2020 г. градиент составил –50,5 мм/10 лет. Особенно резкое уменьшение в теплый сезон стало с 2009 г., когда градиент возрос до –152 мм/10 лет. В холодное время (с ноября по март) до сезона 2009/10 гг. сохранялся положительный тренд. Только с этого момента началось сокращение осадков в холодный сезон, градиент составил –45,5 мм/10 лет, хотя холодный сезон 2020/21 гг. выдался относительно многоводным с суммой осадков 265 мм.

Минимальное годовое количество осадков в 212 мм было зафиксировано в 1986 г., когда и в теплый период года выпало наименьшее количество осадков 80,7 мм. В последние годы количество осадков опустилось близко к экстремально низким значениям за счет их сокращения в оба сезона, но не перешло их.

Интенсивность климатического опустынивания помимо количества выпадающих осадков определяется и уменьшением повторяемости дней с осадками [4]. Сравнение временных рядов по метеостанции Махачкала показывает, что динамика повторяемости дней с осадками, чей суточный слой равен или более 1 мм, хорошо соответствует многолетней изменчивости величинам сумм осадков. Если рассматривать период с 1966 по 2020 г., то по тренду наблюдается слабое увеличение повторяемости с градиентом 0,15 %/10 лет. Фактически положительный тренд сменился отрицательным с 1983 г., т. е. индикатор опустынивания по повторяемости дней с осадками стал проявляться гораздо раньше, чем по изменчивости количества. Во второй половине 1980-х – начале 1990-х гг. градиент снижения повторяемости составлял… –0,2–0,4 %/10 лет. С 2003 г. он стал составлять –1,2 %/10 лет, с 2011 г. возрос по абсолютной величине до –3,4 %, а в период с 2014 по 2020 г. составил –7,9 %/10 лет.

Тренд повторяемости за теплый сезон, если рассматривать весь исследуемый период 1966–2020 гг., противоположен таковому за год. Он демонстрирует медленное уменьшение с градиентом около –0,1 %/10 лет. Медленное уменьшение повторяемости прерывалось в интервале между 1984 и 2004 г., когда наблюдался значительный рост повторяемости дней с осадками с градиентом 2,2 %/10 лет. После этого количество дней с осадками в теплый сезон стало опять

убывать. В интервале с 2004 по 2020 г. градиент повторяемости стал – 2,0 %/10 лет, а с 2013 г. он возрос по абсолютной величине до –14 %/10 лет.

Рост повторяемости количества дней с осадками за год в интервале 1966–2020 гг. был обусловлен главным образом увеличением повторяемости осадков в холодный сезон. Величина градиента для этого сезона составляет 0,5 %/10 лет, что значительно существеннее градиента противоположного знака за теплый сезон. В интервале с 1984 по 2004 г. в холодный сезон, в отличие от теплого, повторяемость дней с осадками убывала с градиентом –3,0 %/10 лет, что сказалось на годовой величине повторяемости осадков, которая также стала убывать. В этот период произошло как бы перераспределение осадков из холодного сезона в теплый. На рубеже веков межгодовая изменчивость повторяемости дней с осадками в холодный сезон показывала резкие флуктуации (от 8 до 26 % в год), после 2005 г. наметился устойчивый тренд ее снижения. Сначала градиент составлял – 1,5 %/10 лет, с 2009 г. он стал более плавный с градиентом –0,6 %/10 лет.

Влажность воздуха и испаряемость. В многолетней изменчивости средней годовой относительной влажности четко выделяются два 25-летних периода. В интервале с 1972 по 1996 г. наблюдался положительный тренд с градиентом 2,2 %/10 лет, а с 1996 по 2020 г. тренд снижения влажности с градиентом – 3,6 %/10 лет. В итоге с 1966 г. влажность значительно снизилась. В 2020 г. отмечен абсолютный минимум годовой влажности 71 % (табл. 1). Границы и направленность трендов для теплого и холодного сезонов совпадают с годовыми, но отличаются по величинам градиентов. В теплый сезон рост и снижение влажности происходят более резко по сравнению с холодным сезоном (соответственно градиенты составляют 2,6 и 1,4 %/10 лет; –4,4 и – 2,9 %/10 лет). В 2020 г. отмечены абсолютные минимумы месячных значений влажности в апреле и июне (соответственно 70 и 62 %).

Многолетний ход годовой величины испаряемости с 1966 г. зеркален влажности, с 2018 г. ее величина превышает 1000 мм, а в 2020 г. наблюдался абсолютный максимум в 1064 мм. В нем, как и в многолетнем ходе влажности, выделяются два сходных периода. С 1972 по 1993 г. происходило снижение испаряемости с градиентом –70 мм/10 лет, а с 1994 по 2020 г. – рост с градиентом 144/10 лет. Период роста по продолжительности и величине градиента значительно превышает период снижения испаряемости, что должно создавать предпосылки аридизации климата.

С 1966 по 2020 г. испаряемость в холодный сезон растет быстрее, чем в теплый (градиенты соответственно 4,1 и 5,5 мм/10 лет). Максимальное значение испаряемости за холодный сезон пришлось на 2015/16 гг. (187 мм), а за теплый сезон – на 2019 г. (887 мм). Два периода, сначала со снижением испаряемости, а потом ее ростом наблюдаются и для холодного, и для теплого сезонов. Они совпадают с изменчивостью годовых величин. С 1972 по 1993 г. в теплый и холодный периоды года градиенты составляли соответственно –65 и –9,8 мм/10 лет. Рост испаряемости, начавшийся с 1994 г. происходит в эти периоды с градиентами соответственно 120 и 25 мм/10 лет. Изменчивость испаряемости в теплый

сезон гораздо значительнее, чем в холодный, хотя температурные изменения существеннее в холодный период года.

Коэффициент увлажнения – интегральный показатель увлажненности территории, многолетний ход годовой величины которого имеет сходные черты с осадками и испаряемостью. В первый период с 1972 по 1993 г. его средняя многолетняя величина составляла 0,42 (ошибка 0,03), а градиент роста 0,12/10 лет. Во второй период с 1994 по 2020 г. средняя величина стала 0,48 (ошибка 0,02) при градиенте уменьшения –0,09/10 лет. С 2010 г. градиент тренда КУ увеличился до –0,20/10 лет. Таким образом, коэффициент увлажнения при снижении в первые две трети периода находился в области повышенных значений по сравнению с периодом роста с 1972 по 1993 г. И только в последнее десятилетие в среднем стал ниже (0,39). В 2019 г. наблюдалось минимальное годовое значение КУ, равное 0,24.

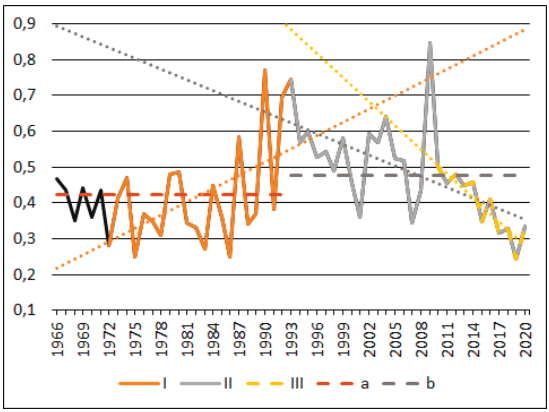


Рис. Многолетняя изменчивость коэффициента увлажнения в районе г. Махачкалы – Туралинских озер в разные временные интервалы: I – с 1972 по 1993 г.; II – с 1993 по 2020 г.; III – с 2010 по 2020 г. Мелким пунктиром показаны тренды для соответствующих трех интервалов. Крупным пунктиром показаны средние многолетние величины для двух интервалов (1972–1993 и 1993–2020 гг.)

Если сопоставить ход годового значения КУ с трендами по сезонам, то соответствие наблюдается с холодным сезоном. С сезона 1972/73 гг. по сезон 1994/95 гг. происходил рос с градиентом 0,47/10 лет, и с сезона 1994/95 гг. по 2020/21 гг. произошла смена знака тренда на убыль с градиентом –0,18/10 лет.

В многолетнем ходе величины КУ за теплый сезон выделяются три примерно 20-летних периода. С 1966 по 1986 г. – снижение с градиентом -0,04/10 лет, с 1986 по 2004 г. – рост с градиентом 0,09/10 лет и с 2004 по 2020 г. – опять убыль с градиентом –0,17/10 лет. В каждую фазу происходит двукратное увеличение «крутизны» градиента. В теплый период в 2019 г. КУ снизился до минимального значения 0,09.

О признаках опустынивания и современной динамике климатических параметров

Если сопоставлять два климатических периода, хорошо выделяющиеся по трендам основных показателей, а именно период с 1972 по 1993/1994 гг. и с 1994/1995 гг., получается, что для всего периода в целом, начавшегося в середине 1990-х гг., опустынивание почти не проявляется. Весь период целиком лежит в поле повышенных значений осадков и пониженных величин испаряемости по сравнению с первым климатическим периодом. При сопоставлении с другими данными, которые приведены в интервалах с другими границами, такое мнение как бы подтверждается. Например, в интервале 1982–2014 гг. в Черноморско-Каспийском регионе отмечали слабо выраженные тенденции увеличения осадков над морскими акваториями в зимние месяцы и их уменьшения круглый год над сушей [6]. По нашим данным в районе Махачкалы тенденции увеличения осадков были хорошо выражены, градиенты составляли для холодного сезона 12,5 %/10 лет, а для года в целом – 29,5 %/10 лет. Получается, что признаки аридизации климата по снижению количества атмосферных осадков для приморского Дагестана начали проявляться гораздо позже, чем для остальной территории Черноморско-Каспийского региона.

А. Н. Золотокрылин в работе [2, с. 224] отмечал, что в 1992–2001 гг., по сравнению с 1982–1991 гг., на Прикаспийской низменности наблюдалось ослабление климатического опустынивания. Это совпадает с «переломом» кривых РИК баланса увлажнения от длительной фазы нисходящей ветви к хорошо выраженному росту, особенно за холодный сезон и за год, как показано ранее [7]. Тренд роста увлажнения продолжался до экстремально многоводного 2009 г., после которого и наступила фаза современной аридизации.

Процесс климатической аридизации в регионе четко стал проявляться по описанным в работе параметрам только после эктремально влажного 2009 г., а в последнюю пятилетку он еще ускорился. Пока на положениях трендов мало сказывается и увеличение увлажнения, проявившегося в холодный сезон 2020/21 гг. Тем не менее, это сказалось на значительном увеличении коллекторно-дренажного стока в магистральном коллекторе и заполнении водой пересыхавшего оз. Большое Турали.

Вопрос имеет ли значение и какое в современном развитии процесса опустынивания антропогенная составляющая в данной работе нами подробно не рассматривается. Если принимать экологическое состояние Туралинских озер в качестве индикатора процесса [7], то определенную роль хозяйственной деятельности можно признать. Но она больше касалась непосредственно самих озерных акваторий, поскольку в результате развития орошаемого земледелия произошло резкое сокращение площадей их естественных водосборов, особенно оз. Малое Турали, за счет прокладки дренажных коллекторов, а также строительства объектов транспортной инфраструктуры.

Сельскохозяйственное освоение территории происходило в 1920–1930 гг., в то время на фоне фазы длительного похолодания (с конца XIX до середины XX в.), прервавшегося относительно кратковременным потеплением в 1930-х гг. Эту

изменчивость климата трудно отнести к процессу климатического опустынивания. Следовательно, антропогенная составляющая опустынивания, если и существует, скорее всего не связана с распашкой земель.

Выводы

Регион Приморской низменности Дагестана, где находятся Махачкалинско-Каспийская агломерация с Туралинскими озерами согласно предыдущим исследованиям, относится к юго-восточной европейской части России, охваченной процессами климатической аридизации и опустынивания. Анализ многолетней изменчивости отдельных климатических параметров – индикаторов климатической аридизации за период 1966–2020 гг., показал отсутствие достаточно явных факторов процесса в продолжении длительного времени. В последний климатический период, начавшийся с 1992/1993 гг., среднемноголетняя годовая величина коэффициента увлажнения выше, чем в 1966–1992/1993 гг. (соответственно 0,48 и 0,42). Только после экстремального по увлажнению 2009 г. началось резкое снижение баланса увлажнения, что связано с уменьшением влажности воздуха, увеличением испаряемости, снижением количества осадков, повышением температуры воздуха. Если ранее действие перечисленных факторов было разнонаправленным и различалось по сезонам, то в последнее десятилетие приняло черты однонаправленности.

Работа выполнена по госзаданию № 0148-2019-0007.

Список литературы

1. *Булыгина О. Н., Разуваев В. Н., Александрова Т. М.* Описание массива данных суточной температуры воздуха и количества осадков на метеорологических станциях России и бывшего СССР (TTTR) // Сайт ВНИИГМИ-МЦД. URL: meteo.ru

2. *Золотокрылин А. Н.* Глобальное потепление, опустынивание/деградация и засухи в аридных регионах // Известия РАН. Сер. Географическая. 2019. № 1. С. 3–13.

3. *Золотокрылин А. Н.* Климатическое опустынивание. М. : Наука, 2003. 246 с.

4. *Иванов Н. Н.* Об определении величин испаряемости // Известия Всесоюзного географического общества. 1954. Т. 86, № 2. С. 189–196.

5. Опустынивание засушливых земель России: новые аспекты анализа, результаты, проблемы. М. : Товарищество научных изданий КМК, 2009. 298 с.

6. *Торопов П. А., Алешина М. А., Семенов В. А.* Тенденции изменений климата Черноморско-Каспийского региона за последние 30 лет // Вестник МГУ. Сер. 5, География. 2018. № 2. С. 67–77.

7. *Шапоренко С. И., Дадашев А. М., Абдурашидов А. М.* Современные тенденции изменчивости климатических характеристик в районе Махачкалы и гидрологические последствия для Туралинских озер // Метеорология и гидрология. 2021. № 2. С. 99–109.

УДК 551.524.3+553.3

Климатические изменения на Северном полушарии в переходные сезоны года (на примере осени)

М. А. Алимпиева (alimpiewa@rambler.ru), С. В. Морозова (swetwl@yandex.ru), Е. А. Полянская (kafmeteo@mail.ru)

Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, Саратов

Аннотация. Рассматривается климатическая изменчивость в октябре. Отмечается, что во временном ходе приповерхностной температуры воздуха Северного полушария в этом месяце выделяются периоды климатической изменчивости, аналогичные выделяемым на полушарии, однако, имеются некоторые особенности. Делается вывод, что в октябре средние приземные температуры Северного полушария несколько росли, а средние годовые уменьшались.

Ключевые слова: климатическая изменчивость, временной ход температуры, барико-циркуляционный режим.

Современное состояние земной климатической системы рассматривается как глобальное потепление, причем рост приповерхностной температуры воздуха происходит со все увеличивающейся скоростью [8]. Характерной чертой современного потепления является его сезонность. Повышаются температуры зимних сезонов, весенние даты переходов средней суточной температуры через определенные пределы смещаются на более ранние сроки. Относительно летних сезонов в [2; 3] отмечается, что их вклад в настоящее потепление становится более значимым.

На фоне наблюдаемых климатических тенденций остается относительно малоизученными роль осенних сезонов, а и их вклад в настоящее потепление. Целью настоящей работы является оценка вклада осенних сезонов в прогрессивный рост температур. Поскольку температурный режим (фон температуры) формируется под влиянием барико-циркуляционного режима, то в нестоящей статье помимо временного хода температур рассмотрены барические поля в Атлантико-Евразийском секторе полушария на фоне наблюдаемых климатических тенденций. Укажем, что этот регион отличается повышенной погодно-климатической неустойчивостью.

За периоды климатической изменчивости приняты естественные климатические периоды состояния земной климатической системы, выделенные С. В. Морозовой [4]. Это малый ледниковый период Европе, первая волна глобального потепления, период стабилизации, вторая волна глобального потепления. В публикациях [5–7; 9–12] содержится физическое и статистическое обоснования их выделения. Считаем, что для выявления климатических особенностей целесообразнее делать привязку к естественным интервалам климатической изменчивости, а не к определенной продолжительности временным промежуткам.

На рис. 1 представлен временной ход приповерхностной температуры Северного полушария в центральном месяце осеннего сезона [13]. Как видно из рисунка, во временном ходе приземной температуры воздуха в октябре выделяются

те же самые естественные климатические периоды, что и на полушарии в целом – малый ледниковый период, стабилизация, первая и вторая волны глобального потепления.

Оценим статистическую значимость выделенных периодов и сравним ее со среднеполушарными характеристиками. Для статистического анализа выберем метод доверительных интервалов с использованием статистики Стьюдента при 5-% уровне значимости [1]. Результаты приведем в табл. Как видно из таблицы, в октябре в малый ледниковый период температуры несколько росли, в то время как на Северном полушарии среднегодовые температуры воздуха несколько понижались (α = 0,0060 и α= –0,0014 соответственно).

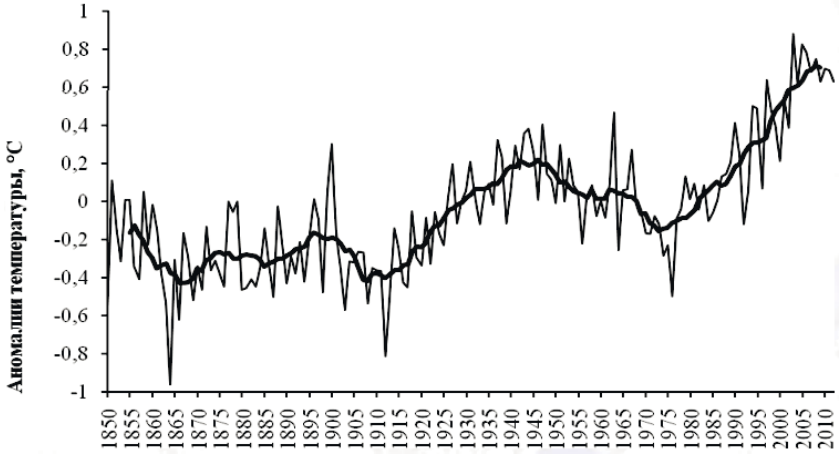


Рис. 1. Значения аномалии средней месячной температуры Северного полушария (°С) для октября по данным Отдела климатических исследований университета Восточной Англии. Жирной линией показано 11-летнее скользящее среднее

Таблица

Оценка статистической значимости изменений аномалий средней годовой температуры Северного полушария весной и осенью

Периоды, гг.	Статистические характеристики значимости изменений			Доверительные интервалы
	α	$\bar{x}$	σ	
год				
1) малый ледниковый (1850–1907)	–0,0014	–0,283	0,147	[–0,508; -0, 315]
2) первая волна (1908–1943)	0,0163	–0,185	0,194	[–0,240; -0,130]
3) стабилизация (1944–1974)	–0,0058	–0,020	0,124	[–0,078; 0,038]
4) вторая волна (1975–2016)	0,0240	0,356	0,320	[0,273; 0,439]
октябрь				
1) малый ледниковый (1850–1907)	0,0060	–0,266	0, 217	[–0,323; -0,209]
2) первая волна (1908–1943)	0,0196	–0,099	0,263	[–0,042; 0,136]
3) стабилизация (1944–1974)	–0,0125	0,047	0,190	[–0,22; 0,116]
4) вторая волна (1975–2016)	0,0277	0,345	0,370	[0,228; 0,462]

Также по данным таблицы можно заключить, что для средних годовых значений статистическая значимость изменений характерна для каждого климатического периода. В октябре значимость изменений средней приповерхностной температуры не обнаружена при переходе от первой волны глобального потепления к периоду стабилизации.

Для характеристики барико-циркуляционного режима рассматривался барический рельеф поверхности АТ-500 гПа [14]. Для этого уровня построены средние многолетние барические поля за следующие климатические промежутки – период стабилизации, первую (самую активную) фазу второй волны глобального потепления и во вторую (некоторое замедление темпов потепления)

При анализе особенностей средних многолетних полей геопотенциала в разные естественные климатические периоды в октябре, была выявлена нехарактерная тенденция – усиление степени меридиональности в активной фазе потепления и ее ослабление в фазе замедления. На рис. 2 представлены средние поля геопотенциала и поля отклонений геопотенциала в октябре в различные периоды. По рис. 2, *а*, где представлены данные за 1956–1974 гг., можно заключить, что на пространстве первого естественного синоптического района наблюдается слабая антициклоническая кривизна над Скандинавией, а над Восточной Европой и Западной Сибирью располагается хорошо выраженная ложбина с осью, почти параллельной Уральскому хребту.

Соответственно характеру изогипс (рис. 2, *г*) область отрицательных отклонений геопотенциала расположена над Северной Атлантикой и Западной Сибирью. Отклонения геопотенциальных высот от среднеширотных составляют в этой области –7–8 *гп. дам*. Очаг положительных отклонений довольно обширен, занимает почти всю Европу, за исключением ее южной части, и распространяется к северу на Норвежское и Гренландское моря. Отклонения геопотенциальных высот от среднеширотных в центре этого очага составляет 9–10 *гп. дам*.

В начале второй волны глобального потепления барическое поле несколько изменилось. Над севером Атлантики наблюдался хорошо выраженный барический гребень. Заметна ложбина над Восточной Европой с осью, проходящей по сороковому градусу восточной долготы. Таким образом, от периода стабилизации к началу второй волны глобального потепления наблюдалось западное смещение барических образований, что является нетипичным по сравнению с другими месяцами года. Описанную тенденцию можно проследить также по смещению очагов аномалий (рис. 2, *г*, *д*). Все проявившиеся в период стабилизации очаги отклонений имеют место, однако в активной фазе заметно их существенное смещение к западу. Если в период стабилизации линия нулевых значений геопотенциала над Восточной Европой проходила приблизительно по меридиану с долготой 50°, то в активной фазе потепления эта линия сместилась к меридиану 20° восточной долготы. При этом область отрицательных отклонений над севером Атлантики не прослеживается. Наибольшие отрицательные отклонения геопотенциала имеют место над Уралом и достигают –10–12 *гп. дам*. В очагах положительных отклонений значения геопотенциальных высот на 10–13 *гп. дам* выше среднеширотных (рис. 2, *г*, *д*).

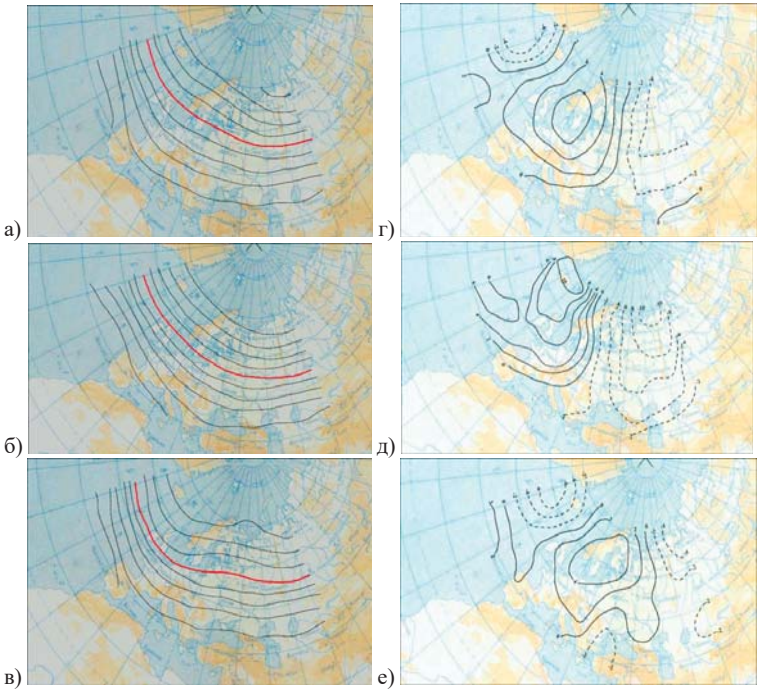


Рис. 2. Среднее многолетнее поле изогипс поверхности 500 гПа, октябрь: а) 1949–1974 гг., б) 1975–1995 гг., в) 1996–2010 гг. Красной линией показана осевая изогипса. Среднее многолетнее поле изаномал геопотенциала поверхности 500 гПа, октябрь: г) 1949–1974 гг., д) 1975–1995 гг., е) 1996–2010 гг.

В фазе замедления характер изогипс на карте АТ-500 вновь приобрел более зональные черты (рис. 2, *в*, *е*). Барическое поле средней тропосферы представляло собой систему мелких волн с хаотически расположенными очагами возмущенности. Однако в этой системе над Центральной Европой и Скандинавией вырисовывается пологий барический гребень, характерный для периода стабилизации. Циклоничность прослеживается над Черным морем и Северной Атлантикой.

Поля отклонений за этот климатический период (рис. 2, *е*) показывают обширный очаг положительных отклонений над центральной Европой, Скандинавией и северо-востоком ЕТР со значением около 6 *гп. дам*. Этот очаг по сравнению с предыдущим периодом существенно сместился к востоку. Область отрицательных отклонений геопотенциала появился над Атлантикой, значение в ее центре составляют – 6 *гп. дам*. Небольшие области слабых отрицательных отклонений геопотенциальных высот обозначились над югом ЕТР и Средней Азией. Область отрицательных отклонений, занимавшая в предыдущий климатический период Восточную Европу, отодвинулась за Урал. Таким образом, от активной фазы потепления к его замедлению наблюдается обратное, восточное смещение

структурных элементов ОЦА на среднем уровне тропосферы. При этом в последний рассматриваемый период характер барического поля на карте АТ-500 оказался аналогичным характеру в период стабилизации.

Динамика осевой линии ПВФЗ в эти три периода показывает отмеченную в главе 2 тенденцию, характерную для всего полушария: более северное ее расположение в относительно холодные периоды и более южное – в теплые. В период стабилизации осевая линия ПВФЗ в Атлантико-Евразийском секторе проходила от севера Великобритании на Прибалтику и далее по параллели 53° северной широты. В последующий более теплый период она проходила в целом южнее: над океаном в районе севера Британских островов, а над континентом – по параллели 50° широты. В период замедления темпов потепления она вновь резко продвинулась к северу, причем на участке долгот 0–40° достигла широты 65°.

Список литературы

1. *Гмурман В. Е.* Теория вероятностей и математическая статистика. М. : Высш. шк., 2003. 480 с.
2. *Морозова С. В., Левицкая Н. Г., Орлова И. А.* Климатические изменения в Нижневолжском регионе на фоне глобального потепления (на примере Саратова) // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Науки о Земле. 2013. Т. 13, вып. 1. С. 45–50.
3. *Морозова С. В.* Исследование циркуляции атмосферы в Атлантико-Евразийском секторе полушария на фоне настоящих климатических изменений летом (на примере июля) // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Науки о Земле. 2015. Т. 15, вып. 1.
4. *Морозова С. В.* Роль планетарных объектов циркуляции в глобальных климатических процессах. Саратов : Изд-во СГУ, 2019.
5. *Морозова С. В.* Температурно-влажностные особенности месяцев периода вегетации // География в Саратовском университете. Современные исследования : сб. науч. тр. Саратов : Изд-во СГУ, 2014.
6. *Морозова С. В.* Физико-статистический анализ современных климатических изменений в Атлантико-Евразийском секторе зимой (на примере января): руды ГМЦ. М. : Гидрометцентр России, 2015. Вып. 358.
7. *Морозова С. В.* Характер циркуляции атмосферы в атлантико-евразийском секторе полушария как индикатор климатических изменений на Русской равнине (на примере зимы) // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Науки о Земле. 2012. Т. 12, вып. 2.
8. *Морозова С. В., Алимпиева М. А.* Оценка вклада углекислого газа в наблюдаемые климатические изменения статистическими методами // Земля и космос : сб. Всерос. науч. конф. с междунар. участием к столетию акад. РАН К. Я. Кондратьева. Мономакс, 2020.
9. *Морозова С. В., Денисов К. Е., Молчанова Н. П.* Климатическая характеристика дат перехода средней суточной температуры воздуха через определенные пределы (на примере Саратова) // Сборник статей международной научно-практической конфернеции, посвященной 128-й годовщине со дня рожд. акад. Н. И. Вавилова. Саратов : СГАУ, 2015.
10. *Морозова С. В., Полянская Е. А.* Особенности циркуляционных процессов в Нижнем Поволжье зимой // Известия Саратовского университета. Серия Науки о Земле. 2012. Т. 12, вып. 1.
11. Variability of the circulation processes in the Lower Volga Region on the background of global climate trends / S. V. Morozova, E. A. Polyanskaya, G. F. Ivanova, N. G. Levitskaya, K. E. Denisov, N. P. Molchanova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (EES). 2018. Vol. 107.
12. Peculiarities of the global climate tendencies in the south-east Russian plains / S. V. Morozova., E. A. Polyanskaya, N. K. Kononova, N. P. Molchanova, A. P. Solodovnikov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 381. URL: https://iopscience.iop.org/issue/1755-1315/381/1
13. Climatic research unit. URL: https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/temperature/ (дата обращения: 19.10.2021).
14. Copernicus Europe's eyes on Earth. URL: https://climate.copernicus.eu/ (дата обращения: 19.10.2021).

УДК 504.054+504.055

Исследование концентраций радона в воздухе жилых помещений (на примере р. п Качуг, Иркутская область)

А. В. Ахтиманкина (anastasiya.ahtimankina@mail.ru), А. П. Таюрская (ann.tayurskaya21@gmail.com)

Иркутский государственный университет, Иркутск

Аннотация. Приведены результаты измерения эквивалентной равновесной объемной активности радона в жилых помещениях, расположенных на территории р. п Качуг Иркутской области. В качестве метода исследования применен метод электростатического осаждения на поверхность детектора заряженных частиц дочерних продуктов радона, реализованный в детекторе радона SIRAD MR-106N. Выявлено превышение, локализованное только в жилых домах, расположенных на одной и той же улице населенного пункта. На период проведения дальнейших исследований на данной территории даны рекомендации по снижению концентраций радона в воздухе жилых помещений.

Ключевые слова: радон, эквивалентная равновесная объемная активность, измерение.

Актуальность

Радон является радиоактивным газом без запаха, цвета и вкуса и образуется в процессе природного радиоактивного распада урана, который присутствует во всех горных породах и почвах, а также воде.

Высвобождаясь из грунта в воздух, радон распадается с образованием радиоактивных частиц. При вдыхании эти частицы осаждаются на клетках эпителия дыхательных путей, что чревато повреждением ДНК клеток и может привести к развитию рака легких.

Концентрация радона в атмосферном воздухе быстро падает до очень низкого уровня и, как правило, не представляет опасности. Согласно данным, опубликованным на сайте Всемирной организации здравоохранения, средний уровень концентрации радона в атмосферном воздухе колеблется в диапазоне 5–15 Бк/м^3 [8]. Однако внутри помещений, а также в плохо проветриваемых местах концентрация выше, причем наиболее высокие уровни концентрации наблюдаются в шахтах, пещерах и водоочистных сооружениях. В зданиях, например, в жилых домах, школах и офисных помещениях, уровни концентрации радона могут сильно варьироваться – от 10 Бк/м^3 до более 10 000 Бк/м^3. Учитывая свойства радона, можно сделать вывод, что находящиеся в таких зданиях люди, возможно, сами того не сознавая, живут или работают в условиях очень высокой концентрации радона.

Радон является одной из основных причин развития рака легких. По оценкам, радон вызывает от 3 до 14 % всех случаев рака легких в зависимости от среднего по стране уровня концентрации радона и распространенности курения [7].

Увеличение средней концентрации радона за длительный период времени на 100 Бк/м^3 увеличивает примерно на 16 % риск развития рака легких. Считается, что соотношение доза-ответ является линейным, т. е. риск развития рака легких возрастает пропорционально увеличению воздействия радона.

Большинство людей подвергаются наиболее сильному воздействию радона в жилых домах, где они проводят много времени. Однако рабочие места внутри зданий могут также являться источником неблагоприятного воздействия. Концентрация радона внутри зданий зависит от следующих факторов:

- геологические особенности местности, например, содержание урана и проницаемость подстилающих пород и грунтов;
- пути поступления радона в здание из грунта;
- выделение радона из строительных материалов;
- частота смены воздушных масс в помещении за счет поступления атмосферного воздуха, которая зависит от конструкции здания, привычек людей в отношении проветривания занимаемых ими помещений и герметичности здания.

Радон поступает в здания через щели в полах или на стыках полов и стен, неуплотненные технологические отверстия вокруг труб или кабелей, небольшие поры в стенах, возведенных из пустотелых бетонных блоков, полости в стенах, а также через внутренние водостоки и дренажные системы. Концентрация радона обычно выше в подвалах, цокольных помещениях и жилых помещениях, соприкасающихся с грунтом.

Нормирование

Основу правового регулирования в области обеспечения радиационной безопасности на территории РФ составляют: Федеральный закон от 09.01.1996 № 3-ФЗ «О радиационной безопасности населения», Федеральный закон от 30.03.1999 № 52-ФЗ «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения», СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности (НРБ – 99/2009).

Основными принципами обеспечения радиационной безопасности исходя из ФЗ № 3 являются [10]:

1. принцип нормирования – не превышение допустимых пределов индивидуальных доз облучения граждан от всех источников ионизирующего излучения;

2. принцип обоснования – запрещение всех видов деятельности по использованию источников ионизирующего излучения, при которых полученная для человека и общества польза не превышает риск возможного вреда, причиненного дополнительным к естественному радиационному фону облучением;

3. принцип оптимизации – поддержание на возможно низком и достижимом уровне с учетом экономических и социальных факторов индивидуальных доз облучения и числа облучаемых лиц при использовании любого источника ионизирующего излучения.

Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009 применяются для обеспечения безопасности человека во всех условиях воздействия на него ионизирующего излучения искусственного или природного происхождения [11].

В отношение радонового загрязнения НРБ-99/2009 вводит понятие эквивалентной равновесной объемной активности дочерних продуктов изотопов радона (ЭРОА, Бк/м^3) и понимает под ней взвешенную сумму значений активностей короткоживущих дочерних продуктов изотопов радона. Объемная же активность (ОА, Бк/м^3) – активность радона в одном кубическом метре воздуха [11].

При проектировании новых зданий жилищного и общественного назначения должно быть предусмотрено, чтобы среднегодовая эквивалентная равновесная объемная активность дочерних продуктов радона и торона в воздухе помещений не превышала 100 Бк/м^3 [10]. При невозможности снизить значения до нормативного уровня рассматривается вопрос о перепрофилировании здания или части помещений, или о сносе здания [10].

В эксплуатируемых жилых и общественных зданиях среднегодовая эквивалентная равновесная объемная активность дочерних продуктов радона и торона в воздухе жилых и общественных помещений не должна превышать 200 Бк/м^3. При более высоких значениях объемной активности должны проводиться защитные мероприятия, направленные на снижение поступления радона в воздух помещений и улучшение вентиляции помещений [11]. При невозможности в результате экономически обоснованных защитных мероприятий снизить значения одного или обоих показателей до нормативного уровня рассматривается вопрос о переселении жильцов и перепрофилировании здания или части помещений, или о сносе здания [10].

Если говорить о нормировании концентраций радона в зарубежных странах, то Международным агентством по атомной энергии разработаны основные нормы безопасности «Радиационная защита и безопасность источников излучения» (№ GSR Part 3) для обеспечения безопасности при использовании радиационных источников. Требование № 50 (Облучение населения, обусловленное присутствием радона в закрытых помещениях) рекомендует установление соответствующего референтного уровня для радона-222 в жилых домах и других строениях с высокой заполняемостью лицами из населения с учетом существующих социально экономических условий, в целом не превышающего связанную с радоном-222 среднегодовую концентрацию активности, равную 300 Бк/м^3 [5]. При переходе к значению ЭРОА радона этот уровень будет соответствовать 150 Бк/м^3 при использовании коэффициента равновесия К = 0,5 (в соответствии с рекомендациями российских документов) или 120 Бк/м^3 при использовании К = 0,4.

В Украине утверждены «Нормы радиационной безопасности Украины (НРБУ-97)», основанные на рекомендациях Международной комиссии по радиологической защите (МКРЗ). Согласно этим нормам, для существующих зданий приняты нормативные значения среднегодовых эквивалентных равновесных объемных активностей радона в помещениях, равные 100 Бк/м^3, а для строящихся – 50 Бк/м^3 соответственно. При больших значениях объемной активности радона должны проводиться защитные мероприятия, направленные на снижение поступления радона в воздух помещений и улучшение вентиляции помещений. Вопрос о переселении жильцов (с их согласия) и перепрофилировании помещений или сносе здания решается в тех случаях, когда невозможно снижение среднегодовой ЭРОА до значения менее 400 Бк/м^3 [6].

В Беларуси СанПиН «Требования к радиационной безопасности» устанавливает норматив 200 Бк/м^3 среднегодовой эквивалентной равновесной объемной радона в воздухе эксплуатируемых жилых помещений [7].

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод, что международные рекомендации нормирования радона в жилых помещениях, а также нормативы, установленные в Украине, имеют меньшие значения и являются более жесткими. Нормативы эквивалентной равновесной объемной радона в воздухе эксплуатируемых жилых помещений республики Беларусь и России численно совпадают.

Приборы и методы измерения

Исследование эквивалентной равновесной объемной активности радона было проведено с помощью детектора радона SIRAD MR-106N в период с 27 декабря 2020 г. по 11 февраля 2021 г.

Условия эксплуатации прибора предполагают измерения в капитальных жилых и других подобного типа помещениях при температуре окружающей среды от +10 до +35 °С, атмосферном давлении 630–800 мм рт. ст. и относительной влажности не более 65 % при температуре +25 °С [9]. Так как измерения были проведены в зимний период, то в связи с данными температурными условиями измерения в подвальных помещениях не были выполнены.

Определение ЭРОА основано на электростатическом осаждении на поверхность детектора заряженных частиц дочерних продуктов радона. Изделие оценивает активность радона в воздухе помещений по величине объемной активности радона с установленным значением коэффициента равновесия (К = 0,5) между радоном и его дочерними продуктами распада.

Оценка активности радона проводится одним детектором, а вычисление значения выполняется по разным алгоритмам.

В изделии предусмотрены три алгоритма вычисления значения активности радона [9]:

1) пороговый;

2) текущий;

3) усредненный.

Пороговый алгоритм оценивает значение уровня активности радона по изменению скорости образования альфа-частиц и дает оперативную информацию о его величине. Текущий алгоритм определяет значение уровня активности радона по количеству альфа-частиц за минимальный цикл регистрации 4 ч. Усредненный алгоритм определяет среднее арифметическое значение уровня активности радона за каждый период измерения по количеству зарегистрированных альфа-частиц в интервале от 4 до 3360 ч в зависимости от количества проведенных циклов регистрации.

В каждом обследуемом помещении проводится, как правило, одно обследование активности радона. При больших размерах помещения количество измерений увеличивается из расчета: одно измерение на каждые 50 м^2. Прибор устанавливался в помещении на 72 ч (цикл измерения прибора составляет 4 ч). При проведении обследований изделие следует устанавливать в местах с минимальной скоростью воздухообмена, чтобы полученные результаты характеризовали максимальные значения активности радона в данном помещении. При этом изделие следует располагать не ниже 50 см от пола, не ближе 25 см от стен и

50 см от нагревательных элементов, кондиционеров, окон и дверей. Изделие подсчитывает количество альфа-частиц и представляет результаты на дисплее в Бк/м^3 [9].

Территория исследования

Рабочий поселок Качуг является административным центром Качугского района, занимающего обширную территорию в бассейне Верхней Лены и ее многочисленных притоков. Площадь района составляет около 32 тыс. км^2. Находится на юго-востоке Иркутской области и граничит с юго-востока с Ольхонским, на северо-востоке с Казачинско-Ленским, на севере с Жигаловским районами, на западе – с Усть-Ордынским автономным округом [4].

Важным фактором, определяющим многие черты природных и лесорастительных условий района, является климат. Климат резко континентальный, с большими колебаниями температуры воздуха, с малым количеством осадков зимой, сравнительно обильными осадками летом и коротким безморозным периодом [4].

На территории Качугского района выявлены многочисленные месторождения рудных и нерудных полезных ископаемых, представляющих собой значительный потенциал для социально-экономического развития района. Территория района богата минеральными ресурсами, в первую очередь, строительными материалами и агрохимическими ископаемыми, по которым имеются разведанные и подготовленные к промышленному освоению месторождения. Широким спектром представлены агрохимические ископаемые: торф, фосфориты, гипсы, известняки и доломиты [4].

От широты пос. Качуг, расположенного в верховьях Лены до широты г. Усть-Кута с юга на север протягивается Лено-Ангарское плато, оно располагается в междуречье Ангары и Киренги, частично заходя на правобережье первой. Сибирская платформа имеет древний кристаллическим фундамент, сформированный более 1 млрд лет назад архейскими (первичными) и нижнепротерозойскими складчатыми комплексами. Она простирается от Северного Ледовитого океана до подножия Саянских гор и от Енисея до Лены. Границы ее совпадают с границами Среднесибирского плоскогорья. Фундамент Сибирской платформы покрыт мощным слоем осадочных пород, образующих так называемый осадочный чехол, своеобразный второй этаж. Осадочные породы накапливались в течение сотен миллионов лет, с кембрийского периода [3].

Качуг находится на палеозойских отложениях платформенного чехла Сибирской платформы. Присутствуют Кайнозойские отложения.

Населенный пункт расположен в пределах средней подсвиты Верхоленской свиты. Состав подсвиты алевро-песчаниковый. В составе кластического материала преобладает кварц (30–45 %), полевой шпат (10–28 %), присутствуют халцедон, карбонат, мергель, слюды, цемент кальцитовый. В составе обломочной части алевролитов также преобладают кварц (30 %), полевой шпат (12 %), цемент кальцитовый с примесью глинистого материала и гидроокислов железа [1].

Изучение материалов, опубликованных в официальных источниках, таких как государственный доклады «О состоянии и охране окружающей среды» и «О санитарно-эпидемиологической обстановке» в Иркутской области с 2008 по 2019 г. включительно, показало, что ни в одном из государственных докладов Качугский район не упоминается, как район с превышением радона в жилых помещениях.

Результаты и обсуждение

В рамках данной работы исследование эквивалентной равновесной объемной активности радона было проведено в 7 жилых помещениях п. Качуг (рис. 1).

Рис. 1. Карта-схема расположения объектов исследования

В 3 из 7 объектов ЭРОА радона превысила допустимый норматив в 200 Бк/м^3. На улице Восточная были обследованы два дома. В д. 4 кв. 1 измерения проводились в спальне, ванной и кухне. Превышения были выявлены во всех помещениях. Максимальное значение составило 485 Бк/м^3 в кухне, что в 2,4 раза больше установленного норматива. Минимальное значение – 119 Бк/м^3 было зарегистрировано в ванной (табл., рис. 1, 2).

В д. 3 кв. 2 на той же улице были проведены измерения в ванной и спальне. Здесь максимальное значение наблюдалось в ванной комнате – 510 Бк/м^3 (что в 2,6 раза больше допустимого значения). Минимальное значение также превысило норматив – 221 Бк/м^3 (см. табл., см. рис. 1, рис. 2).

Еще одно превышение было обнаружено по адресу ул. Краснова, д. 12а, кв. 1. Там максимальное значение ЭРОА радона достигло 210 Бк/м^3 (это единичное превышение норматива в данном доме). Минимальное значение – 50 Бк/м^3 (см. табл., см. рис. 1, 2).

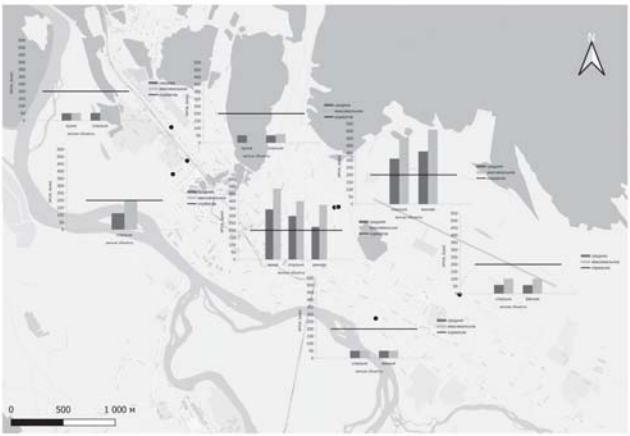


Рис. 2. Средние и максимальные значения ЭРОА радона по результатам измерений

Таблица

Объекты исследования эквивалентной равновесной объемной активности радона

№ п/п	Адрес	Кол-во спален	Кухня	Ванная	Наличие подвального помещения	Площадь помещения	Материал дома	Кол-во измерений
1	п. Качуг, ул. Восточная, д. 4, кв. 1	2	есть	есть	есть	68 м^2	дерево	54
2	п. Качуг, ул. Юбилейная, д. 32, кв. 11	3	есть	отсутствует	есть	68 м^2	дерево	36
3	п. Качуг, ул. Краснова, д. 4, кв. 1	2	есть	отсутствует	есть	45 м^2	дерево	36
4	п. Качуг, ул. Краснова, д. 12а, кв. 1	3	есть	есть	есть	72 м^2	дерево	35
5	п. Качуг, ул. Восточная, д. 3, кв. 2	2	есть	есть	есть	68 м^2	дерево	36
6	п. Качуг, ул. Дружбы, д. 6, кв. 2	2	есть	есть	есть	80 м^2	дерево	30
7	п. Качуг, ул. Верхнеленская, д. 10	3	есть	есть	есть	120 м^2	дерево	34

В остальных четырех объектах превышений допустимого значения ЭРОА радона обнаружено не было. По объектам № 2, № 3, № 7 среднее значение составило 51 Бк/м^3. По адресу ул. Дружбы, д. 6, кв. 2 также все значения находятся в пределах допустимых. Максимальная ЭРОА – 102 Бк/м^3 зарегистрирована в спальной и ванной комнатах (см. табл., см. рис. 1, 2).

Таким образом, повышенное содержание радона в помещениях фиксируется только в жилых домах, расположенных на ул. Восточной. Возможными причинами могут быть:

1. Высокое содержание радона в воде, подаваемой из личных скважин;

2. Некачественный фундамент и плохое обустройство подвальных помещений, на что может влиять возраст здания.

Вне зависимости от причины требуется дальнейшее обследование домов, особое внимание следует уделить жилым помещениях по ул. Восточная. Кроме того, следует применить альтернативные методы измерения, в частности метод угольной сорбции, реализуемый в измерительном комплексе Камера-01.

Рекомендации

В данных условиях до установления точной причины выявленных превышений, жителям рекомендуется придерживаться следующих рекомендаций, соблюдение которых позволит снизить содержание радона в атмосферном воздухе:

– более интенсивная вентиляция подпольного пространства;

– обустройство системы отвода радона в подвальном помещении или под монолитным полом на грунтовом основании;

– предотвращение поступления радона из подвального пространства в жилые помещения;

– устранение трещин и щелей в полах и стенах;

– улучшение вентилирования здания, особенно в контексте энергосбережения.

Пассивные системы смягчения воздействия радона позволяют снижать концентрацию этого газа внутри помещений более чем на 50 %. Добавление принудительной вентиляции обеспечивает еще более существенное уменьшение концентрации радона.

Список литературы

1. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1: 1 000 000 (третье поколение). Серия Ангаро-Енисейская. Лист N-48 – Иркутск. Объяснительная записка. СПб. : Картфабрика ВСЕГЕИ, 2009. 574 с.

2. *Жук И. В., Сафронова А. А., Конопелько М. В.* Радон в воздухе жилых помещений на территории Беларуси // Сахаровские чтения 2019 года: экологические проблемы XXI века : сборник материалов 19 Международной научной конференции. Минск, 2019. С. 256–259.

3. *Ноговицын В. Н.* Трансформация геосистем Лено-Ангарского плато // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле. 2016. С. 25–27.

4. Общие сведения о Качугском районе. URL: http://kachug.irkobl.ru/about/index.php (дата обращения: 28.03.2021).

5. Пособие к МГСН 2.02–97 Проектирование противорадоновой защиты жилых и общественных зданий.

6. Радиационная защита и безопасность источников излучения: международные основные нормы безопасности МАГАТЭ. Общие требования безопасности, часть 3, Вена. 2015. 121–123 с.

7. Радон и его воздействие на здоровье человека. URL: https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/radon-and-health (дата обращения: 19.10.2021).

8. Руководство по обеспечению качества питьевой воды, четвертое издание. URL: https://www.who.int/water_sanitation_health/publications/dwq-guidelines-4/ru/ (дата обращения: 19.10.2021).

9. Руководство по эксплуатации RADEX SIRAD MR-106N

10. СанПиН 2.6.1.2800-10 Гигиенические требования по ограничению облучения населения за счет природных источников ионизирующего излучения.

11. СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_90936/86d7666f55a98497e7879ea19e3c8e58535c9e5d (дата обращения: 27.03.2021).

УДК 551.555.9

Продолжительность летнего муссона на юге Приморского края

М. Г. Бухарова (buxarova_mg@dvfu.ru)

Дальневосточный федеральный университет, Владивосток

Аннотация. Исследуется продолжительность летней муссонной циркуляции на юге Приморского края.

Ключевые слова: летний муссон, изменение климата, свободная атмосфера.

Муссонная циркуляция оказывает существенное влияние на формирование климата юго-восточной части Дальнего Востока России. Муссоны – это устойчивые воздушные течения между сушей и океаном, которые характеризуются резкой сменой преобладающего направления ветра на противоположное от зимы к лету и наоборот [5].

Наступление летнего муссона над Приморским краем является крупномасштабным явлением, которое включает в себя изменения направления ветра, количества осадков, температуры воздуха и т. п. Современная и своевременная информация о последних изменениях в циркуляционном режиме дальневосточного муссона может иметь большое практическое значение, помогая в решении многих экономических и экологических проблем [1–4]. Целью данной работы является исследование продолжительности летних муссонных потоков в пограничном слое и в свободной атмосфере на юге Приморского края.

Материалы и методы исследования

В работе использовались данные об изменении скорости и направления ветра с высотой по результатам двухсрочного аэрологического зондирования на метеостанции Садгород (Приморский край) за май – август 1996–2020 гг. (www.weather.uwyo.edu), карты барической топографии Японского метеоагенства (www.jma.go.jp/jma). За муссонный, принимался воздушный поток, имеющий направление в диапазоне 30–180° (т. е. северо-восточный, восточный, юго-восточный и южный ветер) в слое тропосферы от поверхности земли до тропопаузы. Следуя выработанной методике выявления муссонного потока, были построены сводные таблицы с различными характеристиками муссонного потока в свободной атмосфере: включая нижнюю и верхнюю границу потока, среднюю и максимальную скорость, толщину, и продолжительность существования. В данной работе рассматривается только продолжительность муссонного потока.

Продолжительность летнего муссона

Для оценки продолжительности летнего муссона на юге Приморского края приведены графики изменчивости общей продолжительности дней с муссоном и аппроксимация кривых изменчивости при помощи линейного тренда (рис. 1). Для периода май – август прослеживается тенденция к увеличению продолжительности существования муссонного потока. Май и июль имеют устойчивую закономерность, на что указывает статистически значимый положительный тренд (коэффициент детерминации 0,187). В июне и августе закономерность не

устойчивая, так как линейный тренд статистически незначим, коэффициент детерминации линии этого тренда составляет 0,106, что меньше критического. Эти результаты указывают на устойчивую тенденцию к увеличению продолжительности существования муссона.

На протяжении мая – августа продолжительность летнего муссона за исследуемый период составила от 1260 до 2244 ч, т. е. в течение четырех летних месяцев в среднем в 58 % дней он фиксировался в тропосфере.

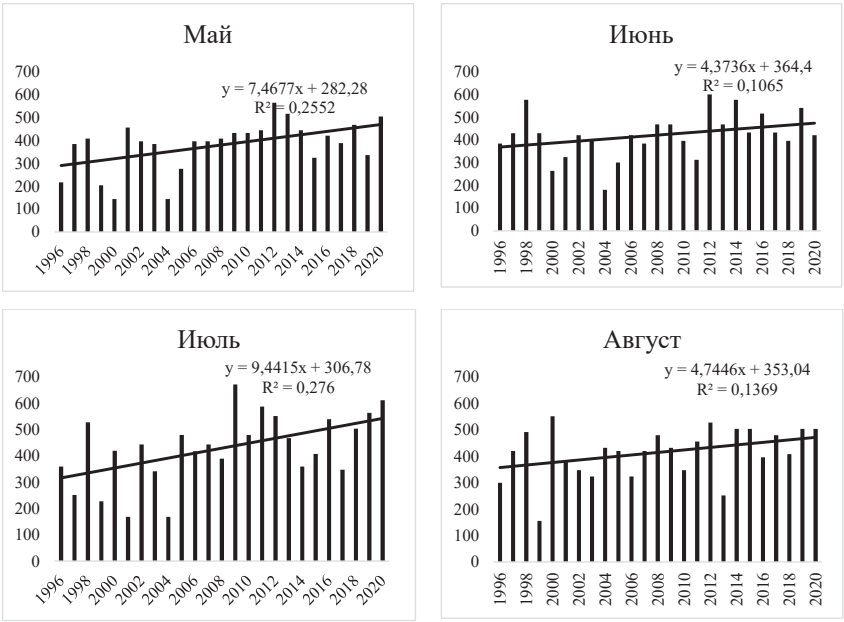


Рис. 1. Продолжительность летнего муссона за 1996–2020 гг.

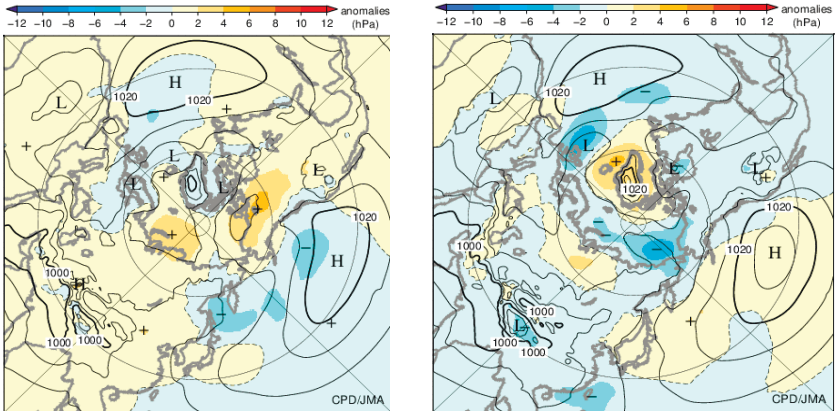
В мае муссон менее продолжителен в среднем 48 % дней от продолжительности месяца (144–564 ч). К июню поток становится более устойчивым и составляет 54 % дней (180–600 ч), в июле достигает максимального развития – 56 % дней (168–672 ч). В августе продолжительность муссона становится на уровне месяца мая – 48 % дней (156–552 ч) (табл.).

Таблица

	Май	Июнь	Июль	Август
Среднее число дней с муссоном	15	16	18	15
	48 %	54 %	56 %	48 %

Начиная с 2008 г. летний муссон становится более устойчивым, длительность его существования увеличивается и составляет от 54 до 90 % дней от продолжительности месяца, что на 20–30 % дней больше, по сравнению с периодом до 2008 г.

За весь исследуемый период 2004 и 2012 гг. оказались экстремальными по продолжительности муссона. В 2012 г. (рис. 2, *б*) муссон был наиболее развит (94 дня за период май – август), что было связано с усилением антициклогенеза над дальневосточными морями. В осредненном поле геопотенциала AT_{500} над Охотским морем располагался мощный гребень (аномалия 3–6 дкм), которому у земной поверхности соответствовал довольно интенсивный гребень гавайского антициклона. Дальневосточная депрессия располагалась западнее, чем обычно (отрицательная аномалия 3 дкм), обусловив повышенный циклогенез на востоке Монголии и в Забайкалье.



а *б*

Рис. 2. Среднее поле и аномалии приземного атмосферного давления за июнь – август 2004 (а) и 2012 (б) гг. (изогипсы проведены через 6 дкм)

В 2004 г. (рис. 2, *а*) летний муссон был выражен значительно слабее (всего 39 дней за период май – август). Аномально глубокая ложбина (AT_{500}) отмечалась над севером Охотского моря и полуостровом Камчатка (аномалия минус 3–6 дкм), над континентом (Забайкалье и северо-восток Китая) небольшие положительные аномалии геопотенциала. Среднее поле давления на уровне моря характеризовалось циклонами над Охотским и Беринговым морями с аномалиями давления до минус 7 дкм, и очагами положительных аномалий геопотенциала на континенте.

Список литературы

1. *Василевская Л. Н., Шкаберда О. А.* Особенности долгопериодной изменчивости температуры, осадков и сроков наступления второй стадии летнего муссона в районе залива Петра Великого // Вестник ДВО РАН. 2013. № 6. С. 71–82.

2. *Лисогурский Н. И., Петричев А. З.* Распространение муссона над Восточной Азией и степень его устойчивости // Метеорология и гидрология. 1980. № 5. С. 54–59.

3. *Новороцкий П. В.* Климатические изменения в бассейне Амура за последние 115 лет // Метеорология и гидрология. 2007. № 2. С. 43–53.

4. *Сорочан О. Г.* Некоторые соображения о природе летнего муссона в восточной Азии : труды ГГО. 1957б. № 71. С. 184–208.

5. *Хромов С. П.* Муссоны в общей циркуляции атмосферы. Л. : Гидрометеоиздат, 1956.

УДК 556.512(1-925.1)

Межгодовая изменчивость увлажнения территории Сибири по данным наблюдений

С. М. Гордеева (gordeeva@rshu.ru)[1,2], В. Н. Малинин[1], Ю. В.Митина[1]
Я. И. Ангудович[1]

[1] *Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург*
[2] *Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва*

Аннотация. Рассматриваются особенности крупномасштабной пространственной и временной изменчивости увлажнения (потенциальная эвапотранспирация, осадки, коэффициент эвапотранспирации) на российской территории Сибири за 1981–2015 гг. Источником исходной информации послужил архив ВНИИГМИ-МЦД. Для расчетов использовались 32 станции, расположенные в основном в долинах крупных рек. Для оценки потенциальной эвапотранспирации применен модифицированный метод М. И. Будыко. Выполнено районирование территории Сибири по межгодовым колебаниям характеристик увлажнения, что позволило выделить четыре региона, три из которых охватывают бассейны крупнейших рек: Оби, Енисея, Лены, а также Байкальский регион. Анализ трендов показывает, что суммарное испарение в Сибири растет только в бассейне Оби и в районе Байкала. Количество осадков, за исключением Байкальского региона, увеличивается также в бассейнах Енисея и Лены. Что касается коэффициента эвапотранспирации, значимый тренд выявлен только в районе Байкала и определяется увеличением испарения.

Ключевые слова: увлажнение, Сибирь, потенциальная эвапотранспирация, осадки, коэффициент эвапотранспирации, тренд.

Введение

Под абсолютным увлажнением обычно понимают разницу между количеством осадков (P) и испарением с подстилающей поверхности (E). Увлажнение формирует внутренние воды, поверхностные и подземные водохранилища и влияет на состояние биоценозов. Если $P > E$ в течение длительного времени, то отмечается чрезмерное увлажнение; если $E > P$, то это приводит к истощению запасов почвенной влаги и, как следствие, к засухе.

Из-за быстрого ускорения глобального потепления увеличивается количество как засух, так и наводнений. При этом увеличивается дифференциация увлажнения, т. е. засушливые районы, как правило, становятся еще более засушливыми, паводки также усиливаются [4]. Именно масштабные засухи и наводнения наносят значительный экологический и экономический ущерб. Поэтому выявление генезиса межгодовой изменчивости и построение моделей для долгосрочного прогноза характеристик увлажнения в условиях современного изменения климата имеет большое экологическое и экономическое значение.

При оценке разности $P–E$ наибольшую трудность вызывает оценка общего испарения, особенно с больших территорий, состоящих из сочетания различных типов земной поверхности. Учитывая сложность определения отдельных типов испарения, в расчетах часто используются полуэмпирические зависимости между общим испарением и его определяющими факторами. Для этой цели чаще всего используется значение потенциальной эвапотранспирации (E_0), которое

обычно понимается как максимально возможное испарение при заданных метеорологических условиях, когда влажность почвы не оказывает ограничивающего влияния на процесс испарения. Это значение дает представление о верхнем пределе испарения с земли, когда в почве нет недостатка влаги [3].

Потенциальная эвапотранспирация E_0 является основой для оценки различных показателей увлажнения. Наиболее универсальным показателем является коэффициент потенциальной эвапотранспирации E_0/P, который напрямую связан с $P–E$, общим испарением E и другими характеристиками увлажнения посредством различных полуэмпирических уравнений [8].

На текущем этапе наиболее подробное исчерпывающее описание изменчивости современного климата Сибири представлено в монографии [4]. Из-за своей огромной площади Сибирь разделена на 5 регионов: Западная, Центральная, Восточная Сибирь, Байкальская зона, Приамурье и Приморье. Показано, что значимые положительные тренды годовых температуры воздуха и количества осадков наблюдаются за период 1976–2012 гг. для всей территории Сибири, за исключением Восточной Сибири, где количество осадков со временем уменьшается [4]. Существующие карты среднемноголетних месячных значений различных параметров увлажнения (потенциальная эвапотранспирация E_0, коэффициент потенциальной эвапотранспирации E_0/P, относительное испарение E/E_0) по территории бывшего СССР [5] характеризуют климатические условия увлажнения до 1970 г. Для большей части Сибири они очень приблизительны из-за плохого покрытия гидрометеорологическими станциями, сложного рельефа и значительной пространственной неоднородности метеорологических характеристик, так что можно считать, что межгодовая изменчивость увлажнения в Сибири изучена недостаточно.

Цель данной статьи – выявить особенности пространственно-временной изменчивости увлажнения и по этим оценкам районировать сибирскую часть России.

Материалы и методы

Основным источником исходной метеорологической информации служил архив ВНИИГМИ-МЦД (http://aisori.meteo.ru/ClimateR), содержащий данные стандартных инструментальных наблюдений почти на 500 метеостанциях в России. В работе использовались данные о температуре воздуха, относительной влажности и осадках. Но поскольку значения осадков на станциях корректируются только на увлажнение осадкомеров, мы провели дополнительную коррекцию по учету систематических ошибок годового количества осадков по методике [2], в результате чего они увеличились на 8–20 %. Серьезной проблемой стала крайне низкая плотность сети станций, которые расположены преимущественно в долинах крупных рек и поэтому лишь приблизительно отражают условия увлажнения на обширных территориях между ними. Даже в южных регионах, где проживает большая часть населения Сибири, расстояния между станциями значительны. В результате без пропусков данных можно было выбрать только 32 станции. Также мы исключили территории Приамурья и Приморья из-за принципиального отличия ее климатических условий от других регионов Сибири.

Основным параметром увлажнения является потенциальная эвапотранспирация. Известно довольно много методов ее оценки, каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки. Сравнение для разных территорий не показывает очевидного преимущества какого-либо метода оценки эвапотранспирации над другими. На наш взгляд, применительно к территории России наиболее адаптирован комплексный метод М. И. Будыко [3], который является физически оправданным и может применяться для любой подстилающей поверхности. Метод Будыко основан на представлении о пропорциональности испарения с влажной поверхности земли дефициту влаги, определяемому температурой испаряющейся поверхности. Сравнительный анализ вклада отдельных элементов в оценку E_0 показывает, что эффектом облачности, используемым для определения радиационного баланса, можно пренебречь, поскольку температура и влажность связаны через дефицит влаги d. Следовательно, E_0 можно выразить через дефицит влаги.

Основным недостатком метода является то, что его можно использовать для расчета только долгосрочных среднемесячных значений E_0. Чтобы определить E_0 для конкретных месячных интервалов времени можно использовать гипотезу сопряженности пространственно-временных флуктуаций потенциальной эвапотранспирации и дефицита влаги [9], согласно которой испарение в конкретный i-й месяц на j-й станции определяется как:

$$E_{0ij} = \bar{E}_{0j}\,(d_{ij} / \bar{d}_j)^{\chi}, \qquad (1)$$

где $\bar{E}_{0j}$ и $\bar{d}_j$ – соответственно средние многолетние значения потенциальной эвапотранспирации и дефицита влаги на j-й станции. В то же время первое можно выразить как:

$$E_{0j} = <\bar{E}_0>(\bar{d}_j / <\bar{d}>)^{\chi}, \qquad (2)$$

где треугольные скобки обозначают пространственное усреднение, параметр χ представляет собой отношение пространственных (временных) коэффициентов вариации (С) потенциальной эвапотранспирации и дефицита влаги, т. е.

$$\chi = C_{<E0>} / C_{<d>} = C_{E0i} / C_{di}. \qquad (3)$$

Эта формула показывает, что временная изменчивость среднемесячных параметров потенциальной эвапотранспирации и дефицита влаги в определенной точке эквивалентна пространственной изменчивости средних многолетних значений тех же параметров за каждый месяц.

Для удобства расчетов проведена параметризация средних многолетних значений E_0. Для этого были использованы номограммы их зависимости от дефицита влаги для различных геоботанических зон России, построенные для каждого месяца теплого периода (апрель-октябрь) по комплексной методике и представленные в работе [7]. Полученные таким образом численные значения E_0 использовали для аппроксимации зависимости $E_0 = f(d)$ с помощью различных эмпирических формул. Наиболее универсальной функцией оказалась рациональная [6], обеспечивающая наиболее адекватную точность потенциального суммарного испарения и имеющая следующий вид:

$$E_0 = (a_0 + a_1 \bar{d})/(1 + a_2 \bar{d} + a_3 \bar{d}^2). \quad (4)$$

Для каждого месяца теплого периода (апрель-октябрь) и различных геоботанических зон определялись коэффициенты рациональной функции, коэффициент детерминации которой во всех случаях достиг $R^2 = 0{,}99$. Поскольку E_0 в зимний период принимается равной испарению со снега, для оценки среднемесячных значений можно использовать приближенную формулу $E_{0win} = 0{,}3nd$, где n – количество дней в месяце. В результате годовой цикл E_0 определяется только по данным о величинах дефицита влаги.

Значения отношения E_0/P рассчитаны для 32 метеостанций, расположенных в основном в долинах крупных рек Сибири и отнесенных к геоботанической зоне тайги (хвойные леса). Северная часть региона входит в тундровую зону, поэтому здесь не рассматривается. Среднемесячные значения дефицита влаги d рассчитывались по данным о температуре и относительной влажности воздуха независимо для положительных и отрицательных температур воздуха с использованием психрометрических таблиц.

Из-за огромной меридиональной протяженности Сибири климатические условия существенно различаются даже на севере и юге таежной зоны [4]. В первую очередь это касается продолжительности холодного сезона. Для более точного выявления снежного периода мы использовали информацию о месячной толщине снежного покрова в районе станции в окружающих ее ячейках сетки, взятых из реанализа ECMWF ERA5 (https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/10.24381/cds.68d2bb30?tab = overview). Если толщина снега была более 0,1 см, месяц относился к снежному периоду. Как выяснилось, продолжительность зимы составляет 10 и 8 месяцев для северных и южных районов Сибири соответственно. Для теплого периода долгосрочные среднемесячные значения E_0 сначала рассчитывались по формуле (4), а затем использовались для расчета потенциальной эвапотранспирации по формуле (1) для конкретных месячных периодов времени на конкретных станциях. Суммируя среднемесячные оценки E_0, легко получить ее годовые суммы и вычислить значения E_0/P. Следует отметить, что из-за использования реанализа ECMWF ERA5 длина временного ряда составила 35 лет (1981–2015 гг.).

В результате расчетов были получены матрицы размером 32×35 годовых значений потенциальной эвапотранспирации, осадков и коэффициентов увлажнения. Эти матрицы были использованы для районирования территории Сибири по характеру межгодовой изменчивости с использованием иерархической процедуры кластерного анализа. Мы использовали аналог евклидовой метрики $d' = 1–R$, где R – коэффициент корреляции между переменными. Оптимальным количеством классов оказалось 4 для всех трех регионов.

Результаты и их обсуждение

В табл. 1 приведены статистические параметры средних многолетних значений E_0 и дефицита влаги для сибирских станций. Нетрудно заметить, что на всех станциях Сибири теплый сезон проявляется только в июле и августе. В сентябре он наблюдается только на самых южных станциях. Рассчитанные значения

коэффициентов вариации E_0 и d позволили определить коэффициент χ, необходимый для расчета среднемесячных значений E_0.

Таблица 1

Распределение статистических параметров компонентов E_0 для станций Сибири за 1981–2015 гг.

Параметр	Июнь	Июль	Август	Сентябрь
Число станций	25	35	35	5
$<E_0>$, см	116,47	112,73	81,96	57,55
$C_{<E0>}$	0,08	0,12	0,12	0,18
$<d>$, мБ	6,09	5,90	3,95	2,59
$C_{<d>}$	0,25	0,26	0,23	0,25
$\chi = C_{<E0>} / C_{<d>}$	0,33	0,45	0,54	0,72

Анализ карт показал, что большая часть Сибири находится в зоне чрезмерного увлажнения, так как $P > E_0$. Недостаточное увлажнение наблюдается в основном в Забайкалье, на юге Бурятии и в Читинской области. Над равниной, в первую очередь в Западной Сибири, средняя многолетняя E_0 увеличивается довольно равномерно с севера на юг из-за закона широтной поясности, в северных регионах в среднем до 350–380 мм/год. Максимальные ее значения наблюдаются в Забайкалье, в районе Улан-Удэ, там E_0 достигает 580 мм/год. Для равнинной местности достаточно отчетливо видно доминирующее влияние температуры воздуха над испарением. Однако горный рельеф большей части Сибири оказывает на распределение E_0 значительное влияние. Автор [5] отмечает, что она уменьшается в среднем на 1–3 см на каждые 100 м подъема в зависимости от увлажнения местности. Такое уменьшение может быть значительным и составлять 30–60 см. Эти оценки были сделаны в 1976 г., но более поздних оценок нет. Очевидно, что построение карт E_0 и других характеристик увлажнения для территории Сибири с крайне неоднородным рельефом на основе данных всего 32 станций нецелесообразно, так как это создает огромные неопределенности, которые очень трудно количественно оценить и тем более контролировать.

Рельеф также очень сильно влияет на пространственное распределение осадков. Даже на относительно небольших территориях количество осадков может отличаться в 2 раза. Тем не менее, основной характер осадков на Западно-Сибирской равнине носит зональный характер и характеризуется общим уменьшением осадков к югу с увеличением количества осадков в предгорных районах. Развитие климата Восточной Сибири определяется его большой удаленностью от источников увлажнения в Атлантике и наличием горных хребтов, выступающих преградой на пути к Тихому океану. Здесь сохраняется общая тенденция уменьшения количества осадков с запада на восток с выделением значительно засушливых территорий.

На следующем этапе было проведено районирование территории Сибири по характеру межгодовых колебаний значений E_0, осадков и коэффициента потенциальной эвапотранспирации. Все три границы оказались близкими друг к другу, расхождения наблюдались в основном на некоторых пограничных стан-

циях. Поэтому было проведено комплексное районирование по всем характеристикам увлажнения, результаты которого представлены на рис. Легко видеть, что на территории Сибири можно выделить четыре региона, внутри которых сгруппированы станции. Три из них – бассейны крупнейших рек: Оби, Енисея и Лены, еще три станции, расположенные у Охотского моря, примерно относятся к Ленскому региону. Четвертый регион, Байкальский, представляет территорию вокруг оз. Байкал. Такие результаты показывают, что различия в межгодовой изменчивости увлажнения между речными водосборами заметно сильнее, чем внутри каждого из них. Следует отметить, что границы между регионами не проведены из-за небольшого количества станций. Внутри выявленных регионов корреляция годовых значений каждого параметра (E_0, P и E_0/P) между станциями выше, чем со станциями соседних регионов.

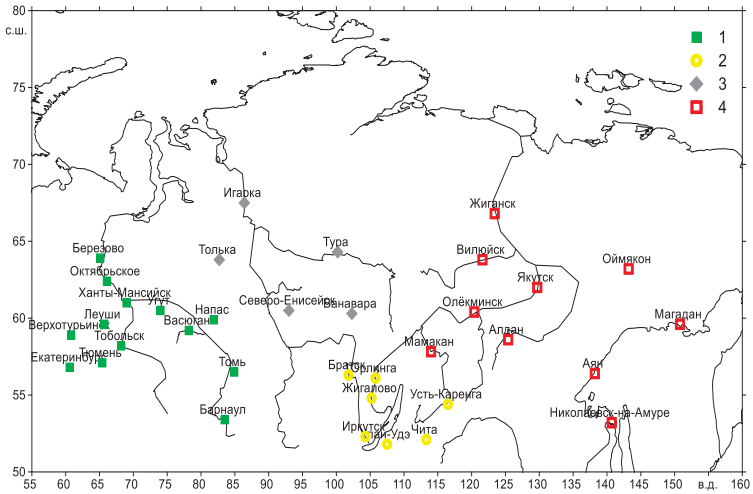


Рис. Районирование территории Сибири на 4 региона по межгодовой изменчивости потенциальной эвапотранспирации, осадков и коэффициента потенциальной эвапотранспирации за 1981–2015 гг.

В табл. 2 представлено распределение статистических характеристик для годовых значений компонентов увлажнения, усредненных по выбранным площадям за 1981–2015 гг. Как и ожидалось, наибольшая потенциальная эвапотранспирация характерна для самой южной зоны – региона Байкала. Самые низкие ее значения наблюдаются в бассейне Енисея.

Наибольшее количество осадков выпадает в бассейне Оби. Здесь до сих пор проявляется довольно сильное влияние Атлантики. Значительное количество осадков выпадает из-за местных циклонов. Доля осадков западносибирских циклонов составляет 40 %, европейских – 35%, остальная часть осадков приходится на циклоны, идущие с севера и юга [1]. В бассейне Лены вклад осадков из локальной области циклонообразования составляет более 80 % [1].

Меньше всего осадков выпадает в Байкальском регионе, особенно на юге Бурятии и в Читинской области, где преобладает континентальный тип климата, подверженный влиянию Сибирского антициклона. Прохождению циклонов здесь препятствует череда горных хребтов. Основная часть атмосферных осадков выпадает в летний сезон за счет воздушных масс атлантического происхождения [1].

Межгодовая изменчивость E_0 практически одинакова во всех 4 регионах. Коэффициент вариации 7–8 %. Межгодовая изменчивость осадков значительно выше, коэффициент вариации которых составляет от 11 % (бассейн Оби) до 16 % (регион Байкала). Вариабельность E_0/P еще выше, достигая 23 % в Байкальском регионе.

Таблица 2

Распределение статистических параметров компонентов E_0 по районам Сибири за 1981–2015 гг.

Параметр	Среднее	СКО	С	Линейный тренд	
				Коэффициент, год$^{-1}$	R^2
Бассейн Оби					
E_0, мм/год	444,01	34,38	0,08	0,97	**0,11**
P, мм/год	601,88	64,63	0,11	1,63	0,07
E_0/P	0,75	0,13	0,17	–0,0001	0,00
Бассейн Енисея					
E_0, мм/год	376,40	37,61	0,07	0,67	0,06
P, мм/год	442,62	56,11	0,13	2,40	**0,19**
E_0/P	0,73	0,14	0,19	–0,004	0,08
Бассейн Лены					
E_0, мм/год	407,96	28,11	0,07	0,35	0,02
P, мм/год	462,34	53,33	0,12	1,98	**0,16**
E_0/P	1,01	0,16	0,16	–0,004	0,06
Байкальский регион					
E_0, мм/год	472,11	32,31	0,07	1,89	**0,39**
P, мм/год	374,28	58,72	0,16	–1,26	0,05
E_0/P	1,47	0,34	0,23	0,015	**0,21**

В табл. 2 также показаны уравнения линейных трендов и коэффициент детерминации, определяющий вклад тренда в дисперсию исходного ряда. Значимые тенденции (по критерию Стьюдента при $\alpha = 0{,}05$) выделены жирным шрифтом. E_0 в Сибири растет, но эта тенденция значима только в бассейне Оби и в Байкальском регионе. Количество осадков, за исключением Байкальского региона, тоже увеличивается. Значительные тренды наблюдаются в бассейнах Енисея и Лены. Что касается E_0/P, то значительный тренд имеет место только в Байкальском регионе из-за быстрого роста E_0.

Выводы

Изучение изменчивости увлажнения территории Сибирской России представляет собой весьма комплексную задачу в связи с практически полным отсутствием стационарных метеостанций на большей части территории Сибири. В работе задействовано всего 32 станции, расположенные в основном в долинах

крупных рек. В результате расчетов были получены оценки потенциального эвапотранспирации, осадков и коэффициента потенциальной эвапотранспирации за 1981–2015 гг. Проведено комплексное районирование территории Сибири по характеру межгодовых колебаний годовых значений характеристик увлажнения. Показаны четыре региона, три из которых расположены в бассейнах крупнейших рек: Оби, Енисея, Лены. Четвертый регион – Байкальский – представляет собой территорию вокруг оз. Байкал.

Межгодовая изменчивость E_0 практически одинакова во всех 4 регионах. Коэффициент вариации составляет 7–8 %. Межгодовая изменчивость осадков значительно выше, их коэффициент вариации колеблется от 11 % (бассейн Оби) до 16 % (регион Байкала). Вариабельность E_0/P еще выше, достигая 23 % в Байкальском регионе.

Анализ тенденций показал, что потенциальная эвапотранспирация в Сибири растет, но эта тенденция значима только в бассейне Оби и в Байкальском регионе. Количество осадков, за исключением Байкальского региона, также увеличивается. Значительные тренды наблюдаются в бассейнах Енисея и Лены. Что касается потенциальной эвапотранспирации, то значительный тренд имеет место только в Байкальском регионе из-за быстрого роста E_0.

Финансирование. *Работа выполнена в рамках государственного контракта FSZU-2020-0009 «Исследование физических, химических и биологических процессов в атмосфере и гидросфере в условиях изменения климата и антропогенных воздействий».*

Список литературы

1. *Бабкин В. И.* Сток рек и циклоническая активность в бассейнах Оби, Енисея и Лены. М. : Научный мир, 2017. 545 с.

2. *Богданова Э. Г., Гаврилова С. Ю., Ильин Б.* Временные изменения атмосферных осадков в России по данным их скорректированных значений за 1936–2000 гг. // Метеорология и гидрология. 2010. № 10. С. 78–89.

3. *Будыко М. И.* Климат и жизнь. Л. : Гидрометеоиздат, 1971. 470 с.

4. Второй оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М. : Росгидромет, 2014. 1003 с.

5. *Зубенок Л. И.* Испарение на континентах. Л. : Гидрометеоиздат, 1976. 264 с.

6. *Малинин В. Н., Гордеева С. М., Гурьянов Д. А.* Простая параметрическая модель увлажнения Северо-Западного региона России для условий современного изменения климата // Ученые записки РГГМУ. 2014. № 36. С. 35–49.

7. Рекомендации по расчету испарения с поверхности суши. Л. : Гидрометеоиздат, 1976. 96 с.

8. *Смирнов Н. П., Малинин В. Н.* Водный баланс атмосферы как гидрологическая задача. Л. : Изд. ЛГУ, 1988. 189 с.

9. Interannual variability of moistening in the European Russia / V. N. Malinin, S. M. Gordeeva, Yu. V. Mitina, A. V. Kuleshova // Russian Journal of Earth Sciences. 2021. Vol. 21, N 3. ES3002. https://doi.org/10.2205/2020ES000753

УДК 551.510.42

Оценка эффекта сублимации ледяных кристаллов при метелях над поверхностью горного ледника на основе натурных данных и численного моделирования

Е. Д. Дроздов (drozdov.jeka@yandex.ru)[1], П. А. Торопов (tormet@inbox.ru)[1,2]
Д. В. Турков (turkovdv@yandex.ru)[2], А. А. Шестакова
(shestakova.aa.92@gmail.com) [3], Е. Е. Андросова (androsovaelizaveta@mail.ru)[1]

[1] *Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва*
[2] *Институт географии РАН, Москва*
[3] *Институт физики атмосферы РАН, Москва*

Аннотация. Впервые для ледников Центрального Кавказа выполнены оценки метелевого переноса на основе автоматизированных измерений с высокой временной дискретностью и применен численный алгоритм восстановления скорости сублимации кристаллов во время метелей. Показано, что сублимация кристаллов количественно сопоставима с потоками явного и скрытого тепла. Кроме того, вклад процесса метелевой сублимации может существенно влиять на суммарное испарение и, следовательно, на итоговую величину баланса массы горного ледника. Поэтому для достоверной оценки теплового баланса поверхности и баланса массы горного ледника в рамках численных моделей необходим учет процесса сублимации кристаллов льда во время метелей с перспективой развития соответствующих параметризаций. Также была выполнена верификация модели SPONSOR для условий метелей, показано, что данная схема в целом удовлетворительно воспроизводит компоненты теплового баланса.

Ключевые слова: сублимация кристаллов при метелях, тепловой баланс ледника, период аккумуляции, ледник Гарабаши, модель снежного покрова SPONSOR.

Введение

Горные ледники оказываются весьма чувствительными к современным изменениям климата и характеризуется существенными темпами деградации [8]. Процесс дегляциации приводит к значительному перераспределению водных ресурсов, изменению природных экосистем [9], повышению уровня Мирового океана [7], оказывает влияние на сельское хозяйство, благосостояние населения и рекреационную деятельность близлежащих регионов [12]. Поэтому учет горных ледников в современных моделях земной системы (а в перспективе и в моделях прогноза погоды) является весьма актуальной задачей. Это требует детального исследования взаимодействия нивально-гляциальной зоны и атмосферы. В частности, необходимо создание более полного алгоритма расчета баланса массы, основанного на физически обоснованных оценках компонент теплового бюджета ледника и пространственного распределения аккумуляции.

Для периода аккумуляции горного ледника уравнение теплового баланса снежной поверхности может быть записано в следующем упрощенном виде [2]:

$$Q = B + H + LE - Q_D - G \quad (1)$$

где Q – поток тепла в толщу ледника, B – радиационный баланс на поверхности, H – турбулентный поток тепла, LE – турбулентный поток водяного пара, Q_D –

поток тепла за счет молекулярной диффузии в снежно-фирновой толще, G – затраты тепла на возгонку водяного пара с поверхности кристаллов льда. Все указанные величины имеют размерность плотности потока: Вт/м^2.

В предыдущих работах [1; 2] было показано, что в сезон абляции для ледников Центрального Кавказа радиационный вклад в суммарный тепловой баланс составляет 50–80%, турбулентного теплообмена – 20–40 %, турбулентного потока водяного пара – 2–10 %. Для зимнего периода подобных оценок по данному региону ранее получено не было.

В то же время величина полного испарения с поверхности включает в себя не только турбулентный поток скрытого тепла LE, но и сублимацию кристаллов льда G как на поверхности снежно-ледового покрова, так и во время метелей. Под сублимацией здесь понимаются фазовые переходы «водяной пар – лед» (прямая сублимация), и «лед – водяной пар» (обратная сублимация, этот процесс в отечественной литературе нередко называется возгонкой). В рамках данной работы речь идет об обратной сублимации (лед – водяной пар).

Исследования для Антарктиды [5] показывают, что при сильных метелях и скоростях ветра более 10 м/с, данный процесс может оказывать вклад, сравнимый с потоками явного и скрытого тепла. Метелевая сублимация над прибрежными районами Антарктиды переводит в слой испарения более 10 % годовой суммы осадков [6] и является существенной составляющей баланса массы ледника покровного оледенения. В силу значительного сходства метеорологических условий покровных ледников высоких широт и высокогорного оледенения умеренных и субтропических широт логично предположить, что над горными ледниками Кавказа процесс метелевой сублимации также играет существенную роль. Таким образом, оценки скорости сублимации кристаллов над поверхностью горного ледника необходимы как на основе данных наблюдений, так и по результатам численного моделирования.

Методика исследований

Для оценки вклада сублимации ледяных кристаллов при метелях в высокогорных условиях Кавказа была развернута измерительная кампания на леднике Гарабаши (южный склон горы Эльбрус, высота 3870 м над уровнем моря) (рис. 1). Наблюдения проводились в сезон аккумуляции в период с 28.01.2020 по 05.02.2020.

Был использован акустический метелемер ISAW FlowCapt FC4 7, что позволило получить данные о скорости ветра на уровне 1 м, мгновенной и средней интенсивности потока ледяных кристаллов (величине метелевого переноса) в приповерхностном слое толщиной 1 м. Высокочастотная запись трех компонент скорости ветра на высоте 2 м осуществлялась с помощью акустического анемометра Gill. Прибор позволяет получать данные с частотой 20 Гц, с помощью которых на основе метода турбулентных пульсаций (eddy covariance) можно получить значения потоков импульса и явного тепла. Также с помощью автоматических метеостанций Davis и Hobo на уровнях 1 и 1,5 м над поверхностью снежного покрова на леднике Гарабаши выполнялись измерения температуры воз-

духа, скорости и направления ветра, и относительной влажности воздуха. Компоненты радиационного баланса были получены по данным балансомера Hukseflux NR01, установленного на уровне 1 м над поверхностью.

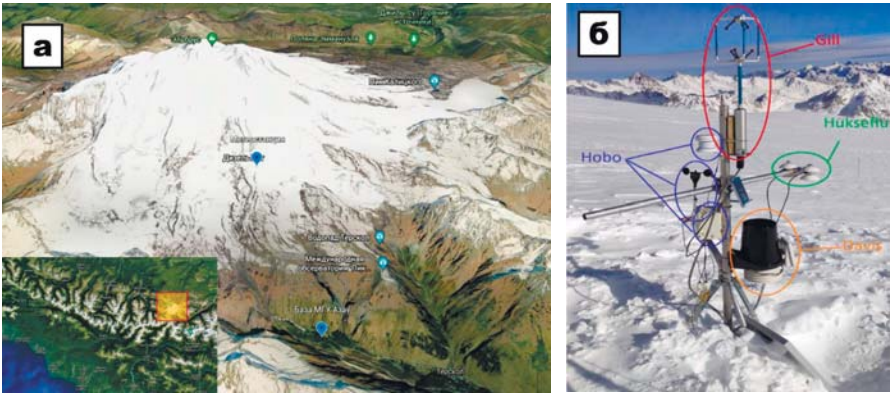


Рис. 1. Место проведения экспедиции и установки приборов (а); измерительный комплекс на леднике Гарабаши (б)

Алгоритмы расчета турбулентного потока явного тепла

На основе полученных данных были восстановлены значения и временной ход потока явного тепла на поверхности ледника. Раннее для сезона абляции было показано, что среди расчетных методов наиболее точным является метод аэродинамических формул, а прямой пульсационный метод может считаться «эталонным» [3]. Поэтому обработка данных наблюдений производилась в соответствии с указанными алгоритмами.

Метод *турбулентных пульсаций* (или прямой метод) основан на измерениях в приземном слое пульсаций трех компонент скорости ветра (u', v', w') и температуры T'. В таком случае потоки тепла могут быть вычислены по ковариациям между соответствующими величинами [10]:

$$H = c_p \rho \overline{w'T'}, LE = \rho \overline{w'q'} \quad (2)$$

Данные акустического анемометра Gill с частотой 20 Гц позволили применить данный метод.

Аэродинамический метод (или метод балк формул) является самым распространенным при оценках теплового баланса ледника. В общем виде турбулентные потоки тепла и влаги могут быть представлены как:

$$H = c_p \rho k (T - T_0), LE = L \rho k (q - q_0). \quad (3)$$

Таким образом, необходимы лишь измерения температуры и влагосодержания у поверхности (T_0, q_0) и на некотором уровне z над ней (T, q), а также значения коэффициента турбулентного теплообмена k, который может быть

определен через функцию объемного числа Ричардсона с использованием, например, следующих соотношений [11]:

$$k = \frac{\varkappa^2 u}{(ln\,{}^{z_2}/_{z_0})^2} f(Ri_b), f(Ri_b) = \begin{cases} (1-5Ri_b)^2, Ri_b > 0, \\ (1-16Ri_b)^{0.75}, Ri_b < 0, \end{cases}$$

$$\text{где } Ri_b = \frac{g}{T}\frac{{}^{dT}/_{dz}}{({}^{du}/_{dz})^2} \qquad (4)$$

Методика оценки сублимации кристаллов льда при метелях

Впервые для ледников Центрального Кавказа на основе данных об интенсивности потока твердых частиц был применен алгоритм расчета скорости сублимации кристаллов в метели.

Скорость сублимации в метели на заданной высоте может быть рассчитана как [5]:

$$S(z) = -\sum_r M_r \frac{\partial}{\partial r}\left[\frac{n_r}{4\pi r^2 \rho_p}\left(\frac{\partial m}{\partial t}\right)_r\right], \text{ где } \left(\frac{\partial m}{\partial t}\right)_r = \frac{2\pi r\left(\frac{q}{q_S}-1\right)}{\frac{\lambda_S}{k_T T N u}\frac{1}{\left(\frac{\lambda_S M_W}{R_g T}\right)}+\frac{1}{k_\upsilon q \rho_f Sh}} \qquad (5)$$

Скорость изменения массы сублимирующей частицы $\left(\frac{\partial m}{\partial t}\right)_r$ учитывает степень турбулизованности атмосферы в приземном слое, а также соотношение интенсивности процессов турбулентного теплообмена и молекулярной диффузии при тепло- и массообмене. Поэтому данная величина может быть определена через измеренные значения температуры и удельной влажности воздуха, а также по среднеквадратическому отклонению скорости ветра, полученному по акустическому анемометру Gill. Расчет массы частиц M_r с радиусом r производится с использованием непрерывного распределения частиц по размерам [5] на основе общей массы M частиц снега, измеренной метелемером ISAW FlowCapt.

Скорость сублимации в метели в выражении (5) определяется как плотность потока массы ледяных частиц и выражается в кг/м^2·с. Для затрат тепла на сублимацию кристаллов необходимо умножить данную величину на удельную теплоту сублимации.

Кроме того, на основе данных наблюдений была произведена верификация моделирования компонент теплового баланса для условий горного ледника Кавказского типа. В данной работе была выбрана модель снежного покрова SPONSOR [4] поскольку она ориентирована на задачи моделирования климата, однако использует упрощенные параметризации и экономична в реализации.

Результаты и обсуждение

По результатам наблюдений полный набор данных был доступен с 31 января по 5 февраля 2020 г., поэтому реализация численных алгоритмов и модели SPONSOR для восстановления потока явного тепла проводилась за данный период. При этом направление всех рассматриваемых в этой работе потоков определяется относительно поверхности.

Результаты моделирования по SPONSOR показывают высокую степень согласованности с расчетами по прямому методу (рис. 2). Исключение составляют ночные сроки 3 и 5 февраля, в которые разница значений достигает около 250–350 Вт/м^2 (в остальных случаях разница составляет не более 90 Вт/м^2). Однако в этих случаях значения по прямому методу не подтверждаются также и балк-формулами, поэтому могут считаться ошибочными.

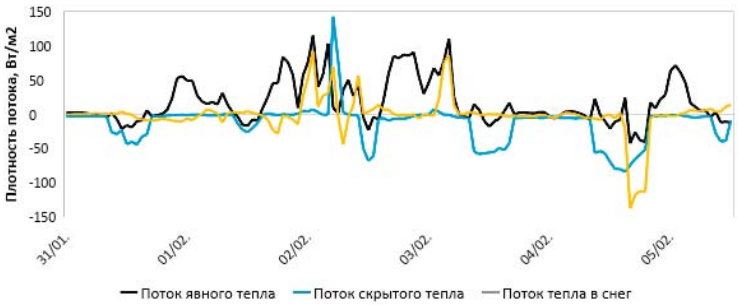
Рис. 2. Временной ход плотности потока явного тепла (Вт/м^2), рассчитанной разными способами

Результаты расчетов по балк-формулам хуже соотносятся с результатами метода турбулентных пульсаций по характеру изменчивости и, соответственно, по абсолютному значению. Среднее абсолютное отклонение от значений «эталонного» метода на 18 Вт/м^2 превышает ту же величину для модельных расчетов и составляет 52 Вт/м^2.

Таким образом, в условиях первого опыта применения для условий сезона аккумуляции горного ледника модель SPONSOR показала более точные результаты воспроизведения потока явного тепла на поверхности по сравнению с методом балк-формул. Среднеквадратическое отклонение от значений «эталонного» метода в 34 Вт/м^2 оказывается близким к точности измерений радиационных потоков в условиях горных ледников, составляющей $\pm$25 Вт/м^2 [2].

По модели SPONSOR были восстановлены значения потоков явного и скрытого тепла, а также потока тепла в толщу снега (рис. 3). Их значения варьируются от –150 до 150 Вт/м^2 за весь рассматриваемый период.

В ходе плотности потоков явного и скрытого тепла прослеживается суточная изменчивость, связанная с прогревом поверхности снежного покрова в дневное время и, соответственно, бóльшими затратами тепла на сублимацию ледяных кристаллов. Единственный случай, связанный с выделением тепла вследствие прямой сублимации (фазовый переход «водяной пар – ледяной кристалл»), наблюдался утром 2 февраля и скорее всего был обусловлен сильным ночным выхолаживанием при ясной погоде.



Ри.с 3. Временной ход плотностей потоков явного и скрытого тепла, а также потока тепла в снег, рассчитанных по модели SPONSOR

Молекулярный поток тепла в толщу снега изменяется мало, за исключением ночных и утренних сроков 2 февраля, утренних сроков 3 февраля и ночи с 4 на 5 февраля. 2 и 3 февраля поток положительный, так как дневная атмосфера в малооблачных условиях способствует прогреву подстилающей поверхности. Большой отрицательный поток в ночь с 4 на 5 февраля обусловлен мощной адвекцией холодного воздуха вслед за холодным фронтом и потоком тепла от поверхности в атмосферу.

Сублимационной компоненте теплового баланса ледника свойственна крайне неоднородная временная изменчивость (рис. 4). Заметно, что интенсивность сублимации кристаллов в метели в значительной степени определяется скоростью приземного ветра. Так, наиболее максимальный эффект сублимации наблюдался 2 февраля при наиболее сильных метелях. При этом наибольшей интенсивности процесс достигает при скоростях более 10 м/с со значениями до 70 Вт/м^2 (рис. 5), что сравнимо с основными компонентами теплового баланса. В то же время при тех же 10 м/с выявляются значения менее 10 Вт/м^2, что обусловлено малым дефицитом влажности и небольшой разностью температур «кристалл – окружающий воздух». Поэтому высокие значения скорости ветра являются необходимой, но не достаточной причиной значительных потерь тепла на сублимацию кристаллов.

Рис. 4. Временной ход потерь тепла на сублимацию кристаллов при метели и горизонтальной компоненты приземного ветра

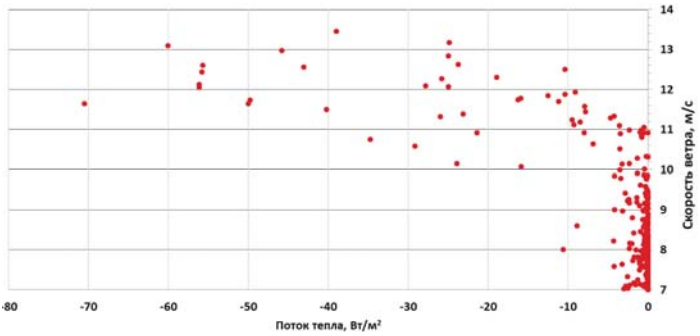


Рис. 5. График зависимости потерь тепла на сублимацию кристаллов при метели от скорости приземного ветра

Кроме того, сублимация кристаллов льда играет заметную роль в суммарном испарении и потерях снежной массы на поверхности. Расчет скорости сублимации позволяет отделить соответствующую компоненту от потока влаги за счет возгонки водяного пара с поверхности снежного покрова. По результатам расчетов модели SPONSOR и данным наблюдений (рис. 6) оказывается, что вклад процесса сублимации может превосходить поток влаги от поверхности и иметь определяющее значение в формировании суммарного испарения. При этом подобные случаи чаще наблюдаются в ночное время, когда испарение влаги невелико: например, в ночь с 1 на 2 и с 3 на 4 февраля при сильных метелях. А 3 февраля эффект от сублимации был значителен и в дневное время. Это указывает на необходимость разделения процессов испарения влаги и сублимации кристаллов льда и отдельный их учет в тепловом балансе и балансе массы горных ледников.

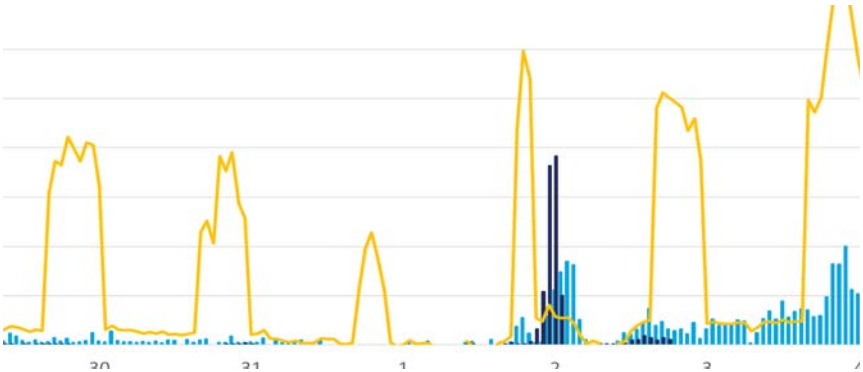


Рис. 6. График временной изменчивости затрат тепла на сублимацию кристаллов в метели по модели SPONSOR и по данным наблюдений и затрат тепла на испарение с поверхности льда по данным модели SPONSOR

В то же время результаты восстановления скорости сублимации по модели SPONSOR и по данным наблюдений значительно рознятся. По сравнению с прямым расчетным методом модель SPONSOR завышает интенсивность сублимации во время слабых метелей и занижает экстремальные значения при сильной метели 2 февраля. Однако ряд, полученный по данным наблюдений, ограничивается днем 3 февраля, что не позволяет провести более полное сравнение двух методов в условиях сильных метелей 3 и 4 февраля.

Выводы

На основе данных измерений и моделирования показано, что величина затрат тепла на сублимацию во время метелей достигает 70 Вт/м^2 (и это скорее всего не максимальные значения), т. е. сопоставим с остальными компонентами теплового баланса. Физически значимым процесс становится при скорости ветра более 10 м/с. Модель снежного покрова SPONSOR в целом адекватно оценивает компоненты теплового баланса и затраты тепла на сублимацию над горными ледниками. Полученные результаты позволяют говорить о необходимости отдельного учета затрат тепла на сублимацию в тепловом балансе и балансе массы горных ледников.

Авторы выражают благодарность научному сотруднику ИФА РАН А. Ю. Артамонову, а также студентам и магистрантам кафедры метеорологии и климатологии А. И. Варенцову, А. А. Мелик-Багдасаровой, Ю. И. Ярынич за техническую поддержку и помощь в полевых условиях. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 20-05-00176.

Список литературы

1. *Волошина А. П.* Метеорология горных ледников : Материалы гляциол. исслед. 2001. Вып. 92. С. 3–138.

2. Ледники и климат Эльбруса / В. Н. Михаленко [и др.]. СПб., 2020. 372 с.

3. Оценка компонентов теплового баланса ледника Джанкуат (Центральный Кавказ) в период абляции в 2007–2015 годах / П. А. Торопов [и др.] // Криосфера Земли. 2018. Т. 22, № 4. С. 42–54.

4. *Шмакин А. Б., Турков Д. В., Михайлов А. Ю.* Модель снежного покрова с учетом слоистой структуры и ее сезонной эволюции // Криосфера Земли. 2009. Т. 13, № 4. С. 69–79.

5. Snowdrift Sublimation in a Katabatic Wind Region of the Antarctic Ice Sheet / R. Bintanja // J. Appl. Meteorol. 2001. Vol. 40. P. 952–1966.

6. *Bintanja R.* Snowdrift suspension and atmospheric turbulence. Part I: Theoretical background and model description // Boundary-layer meteorology. 2000. Vol. 95, N 3. P. 343–368.

7. A reconciled estimate of glacier contributions to sea level rise: 2003 to 2009 / A. S. Gardner, G. Moholdt, J. G. Cogley, B. Wouters, A. A. Arendt, J. Wahr // Science. 2013. N 340. P. 852–857.

8. “High Mountain Areas,” in IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate (The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)) / Hock R., Rasul G. [et al.]. 2019.

9. *Matthews J. B. R. (ed.).* IPCC, 2018: Annex I: Glossary // Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. In Press

10. *Kaimal J. C., Gaynor J. E.* Another Look at Sonic Thermometry // Boundary-Layer Meteorol. 1991. Vol. 56. P. 401–410.

11. Comparison of heat balance characteristics at five glaciers in southern hemisphere / Y. Takeuchi, R. Naruse, K. Satow, N. Ishikawa // Global and Planetary Change. 1992. Vol. 22. P. 201–208.

12. *Tielidze L.* Introduction, Chapter in Glaciers of Georgia // Geography of the Physical Environment. Springer, 2017. P. 1–4.

УДК 551.524.36

Исследование температурных аномалий полярных областей

Е. М. Киселева (lizakiseleva01@mail.ru), О. В. Волобуева (ovvolobueva@rshu.ru)
Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург

Аннотация. Исследован температурный режим прибрежной и островной зоны Полярной области России. Рассмотрены отклонения от нормы температурных значений за серединные месяцы каждого сезона по данным метеостанций. Указаны синоптические процессы, приводящие к таким отклонениям.

Ключевые слова: климат, температура, отклонения, явления, исследования.

Арктика вносит значительный вклад в формирование климата на планете, является «пусковым механизмом» для процессов, протекающих в более южных широтах. Исследование Арктики – важная задача для современной науки, поскольку данный регион представляет из себя потенциально интересную область для развития деятельности человека, будь то рыболовство, судоходство, освоение шельфовой зоны и многое другое.

По данным Росгидромета, в 2020 г. на территории Российской Федерации отмечалось 1000 опасных гидрометеорологических явлений, включая агрометеорологические и гидрологические. Это на 97 явлений больше, чем в 2019 г., когда их было 903 [1]. Эта же тенденция сохраняется все последние годы. Увеличение количества опасных и неблагоприятных явлений говорит в том числе и о климатических изменениях, в частности об изменениях температурного режима.

Цель исследования – анализ температурного режима полярного региона России.

Основные задачи – проанализировать отклонения от нормы температуры по данным метеостанций, исследовать синоптические процессы, приводящие к данным отклонениям.

Для анализа были выбраны четыре пункта: Мурманск (номер станции-22113), Диксон (20674), Тикси (21824) и Уэлен (25399) (рис. 1).

Вы спросите, есть ли жизнь за Полярным кругом? Да, в городе Мурманске, административном центре, крупнейшем городе расположенным за Полярным кругом. Мурманск – неофициальная столица Восточной (Российской) части Лапландии.

Город вытянулся более чем на 20 км вдоль скалистого восточного побережья Кольского залива на нескольких террасах, в 50 к выхода в открытое море. Благодаря теплому Северо-Атлантическому течению Мурманск – незамерзающий порт, что выгодно отличает его среди северных портов России.

Мурманск знаменит тем, что он – трижды «самый»: большой, молодой и теплый в Заполярье. Уникален своим северным сиянием и полярной ночью, молодостью, неспокойным морем и сопками, закатами и рассветами, полярной растительностью и теплым Гольфстримом.

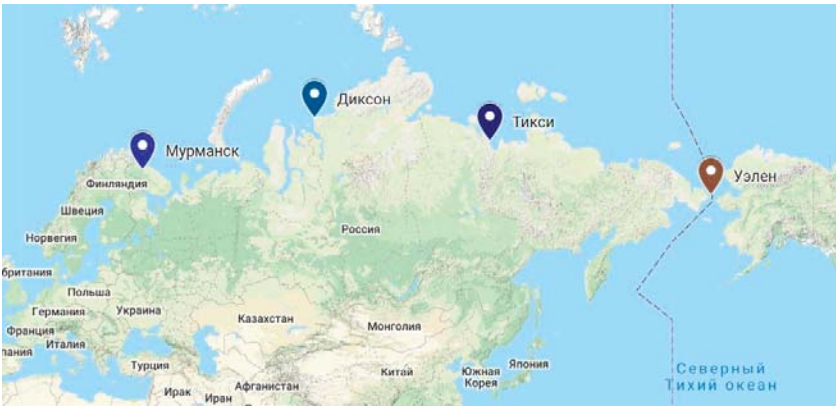


Рис. 1. Расположение выбранных для исследования пунктов наблюдения

Следующий пункт для исследования выбран поселок Диксон, расположенный на севере полуострова Таймыр. Это самая северная обитаемая часть России. Поселок расположен на побережье Енисейского залива, на западной оконечности берега Петра Чичагова полуострова Таймыр и на острове Диксон, разделенных проливом Вега.

Особенностями данной территории : полярный день длится обычно в период с 5 мая по 10 августа и полярная ночь – с 11 ноября по 1 февраля, неполные, сумеречные ночи (с 18 марта по 27 сентября), когда солнце не опускается ниже 18º. Район Диксона относится к арктическим пустыням, здесь климат намного суровее по сравнению с Мурманском.

Следующим по мере продвижения на восток стал поселок городского типа – Тикси, который расположился к востоку от устья р. Лены на берегу одноименной бухты в Море Лаптевых. Относится к районам Крайнего Севера. Тикси – центр Булунского улуса Республики Саха (Якутия), самый северный порт России, называемый также «Морские ворота Якутии». Морской порт служит перевалочным пунктом при доставке грузов на материк и при перевозке в бассейны Индигирки и Колымы. Транспортный поток с каждым годом увеличивается, и поселок постепенно возрождается после трудностей 1990-х гг.

Климат Тикси – суровый, арктический. Круглый год возможны заморозки и морозы. Полярная ночь в поселке длится 67 сут., с 19 ноября по 24 января, полярный день – 86 сут., с 10 мая по 3 августа.

Последним для исследования выбран пункт – село Уэлен, расположенное в Чукотском районе Чукотского автономного округа. Самый восточный населенный пункт России и Евразии. Село расположено в восточной части Чукотского полуострова, в непосредственной близости от мыса Дежнева. Климат – тундровый.

Для построения графиков и последующего анализа использовались базы данных вышеперечисленных метеостанций [2].

В табл. 1 показаны отклонения фактических температур от нормы за рассмотренные серединные месяцы каждого сезона на территории исследования.

Наиболее ярко влияние климата и циркуляционных факторов на погодные условия на территории России прослеживается на примере 2013 г., который, по данным Гидрометцентра России, входит в тройку наиболее неспокойных лет наряду с 2012 г. и с 2007 г. Были сделаны предположения о том, что и в Полярных областях наблюдалась такая же тенденция.

Как показал анализ, Мировой океан, который можно назвать основой изменения погоды и климата в целом, в 2013 г. на большей части акватории Северного полушария был теплее по сравнению со средними многолетними данными. Особенно высокой была температура поверхности океана в среднем течении Гольфстрима.

Повышенное тепло- и влагосодержание над океанами сопровождалось увеличением годовых сумм атмосферных осадков и увеличением повторяемости опасных явлений погоды. В 2013 г. на территории России отмечалось более 960 опасных гидрометеорологических явлений, из которых 455 нанесли значительный ущерб отраслям экономики и жизнедеятельности населения.

Таблица 1

Отклонения среднемесячных температур от климатической нормы по данным метеостанций за период 1990 по 2019 г.

Год	Январь				Апрель			
	Мурманск (норма) (–12,2°)	Диксон (норма) (–22,1°)	Тикси (норма) (–30,3°)	Уэлен (норма) (–15,6°)	Мурманск (норма) (0,2°)	Диксон (норма) (–11,8°)	Тикси (норма) (–12,9°)	Уэлен (норма) (–8,8°)
1990	–2,90	–6,40	–4	–8,6	2,30	0,5	–0,6	–0,3
1991		–4,70	1,1	–3,8	0,20	–6,1	–2,9	–3,4
1992	5,90	–4,20	1,2	–5,6	–3,70	–10	–7,2	–1,6
1993	5,20	0,40	2	–4,1	–1,70	–6,7	–3,8	–3,6
1994	0,40	–7,20	–3,5	–6,5	2,20		–7	–7,6
1995	6,30	1,30	–0,8	–5,8	0,00	4	–8	–3,8
1996	6,20	–2,40	–2,4	1,5	–2,40	–6,6	–5,6	–5,6
1997	1,60	–7,30	3,5	–5,2	–4,20	0,1	–0,9	0,3
1998	2,00	–2,30	0,1	–7,9	–3,20	–7	–7,6	–1,5
1999	–3,00	–5,20	–3	–8,9	0,00	–7	–10,6	8,1
2000	4,20	–5,60	–0,3	–8,2	–0,10	–3,6	–3,7	–5,9
2001	7,00	–8,60	0,7	–2,4	–0,80	–9,4	–5,5	–4,6
2002	2,60	–7,10	–2,5	–7,7	1,40	–4,7	–6,6	–0,8
2003	–3,70	–3,70	1,7	–3,5	–0,10	–4,9	–3,2	1,3
2004	3,30	–6,00	–1,6	0,6	1,10	–7,5	–8,7	–1,6
2005	5,30	1,70	2,9	–1,9	–0,50	–6,4	–2,2	–6,2
2006	5,10	–1,70	0,8	–8	2,00	–9,3	–14,7	–9,6
2007	3,50	3,10	5	–5,2	0,60	2,5	2	–1,9
2008	6,70	3,50	2,5	–6	–1,80	–2,7	–8,8	–2,7
2009	3,70	1,90	5,6	–5	–0,90	–3,8	–0,9	–3
2010	0,00	0,20	2,2	–7	1,80	–0,8	–2,3	–4,1
2011	0,90	–0,20	3,7	–0,5	2,30	0,8	2,2	–5,1
2012	2,70	4,70	1,2	–10,3	–0,10	–1	–7,3	–4,4
2013	5,70	–4,10	–3,8	–2,1	0,60	–2,8	–2,5	–2,1
2014	–1,20	–7,40	–3,9	0,6	0,00	–2	4,3	–1,9

Продолжение таблицы 1

Год	Июль				Октябрь			
	Мурманск (норма) (14,5°)	Диксон (норма) (6,6°)	Тикси (норма) (8,5°)	Уэлен (норма) (8,1°)	Мурманск (норма) (1,6°)	Диксон (норма) (–3,4°)	Тикси (норма) (–7,8°)	Уэлен (норма) (1,6°)
2015	0,40	–5,70	2,6	–0,5	1,10	2,3	–6,3	–4,2
2016	–4,30	4,60	4,7	0,4	2,00	2,6	–4,6	–2,7
2017	4,30	2,80	2,2	1,9	–1,90	–2,4	0,8	0,9
2018	2,80	3,00	–1,2	1,1	0,40	–4,6	–0,3	3,1
2019	0,00	–1,80	–1,1	–5,2	2,10	–2,1	2,2	0,8
1990	–2,10	–1,30	–1,80	–2,10	–0,6	–7	–1,8	–3
1991		–2,00	2,20	–0,90	–1,6	–5,1	–3,4	–0,9
1992	–3,30	–3,40	–1,20	–1,70	-5,6	–11,5	–5,7	–4,7
1993	–1,40	–4,20	–0,30	0,10	–2,8	–4,6	–4	–2
1994	–1,60	–6,60	–0,50	–2,70	–0,9	–1,2	–0,1	–8,1
1995	–3,70	–6,60	0,60	–2,40	–1,4	3,4	–0,6	–1,9
1996	–3,10	–0,40	–3,10	–0,60	1,1	–4,4	–3,7	–4,7
1997	–3,00	–1,70	0,10	–0,60	–1,4	3,4	2,2	–2,8
1998	–1,70	–0,90	–0,90	–1,40	–0,6	–12,9	–7,5	–1,6
1999	–1,40	–3,00	0,20	–1,60	1,9	–3,7	–4,8	–3,3
2000	–0,70	–2,60	–2,30	–2,60	3,6	–5,7	–4	–3,8
2001	0,00	0,00	2,90	–2,50	–1,6	–3,9	–4,7	–5,2
2002	–0,20	–1,10	–0,20	–1,00	–2,3	–2,9	–1,2	–0,5
2003	0,90	–4,50	0,60	–1,10	0,1	–4,8	–2,8	–1,4
2004	3,00	–0,60	–3,70	3,20	–0,1	–3,5	–7,1	–0,6
2005	–1,20	–1,60	–1,00	–1,40	2,6	–1,8	0,1	–0,9
2006	–2,60	2,20	–0,70	–1,60	–1,7	–7,6	–3,9	0,1
2007	–3,00	–0,80	0,00	1,50	3,5	0,5	–0,2	–1,3
2008	–2,60	–0,90	–2,00	–2,50	0,9	–1,8	0,6	–4,9
2009	–3,50	0,70	–2,60	–1,70	–1,2	–0,8	–1,1	–0,9
2010	–0,50	–3,00	4,10	–2,70	1,3	–0,8	–3,1	–0,7
2011	–0,40	–0,70	2,20	–2,20	2,5	0,5	–0,1	–1,4
2012	–2,20	2,10	3,00	–1,00	0,3	–1,9	–2,8	–1,7
2013	0,20	0,70	–2,20	–0,50	–0,5	–2,9	0	–0,5
2014	–0,90	–3,80	0,30	–1,40	–1,4	–3	0,8	–1,4
2015	–4,60	1,30	–0,80	–1,80	1	–2,8	–1	0
2016	1,60	3,40	–0,90	–0,20	1,9	2,6	0,8	2,6
2017	–0,30	0,80	–1,10	0,90	0,3	–0,5	–3,7	–1,1
2018	3,60	–1,70	0,50	0,20	–0,1	1,2	3,5	2,1
2019	–3,80	–0,80	0,60	2,40	–2,5	–1,9	0,3	–0,5

– ниже нормы

– норма

– выше нормы

– отклонение от нормы выше 6 °C

Внезапное стратосферное потепление, которое наблюдалось в полярных широтах Северного полушария в январе 2013 г. и привело к глобальной перестройке атмосферной циркуляции. Заток холодных арктических масс воздуха и продвижение их вглубь материка.

Проанализировав среднемесячные значения января (рис. 2), было выявлено, что барическое образование, а именно антициклон, образовавшееся в 2013 г. в полярных областях, продолжил свое продвижение юго-восточнее в сторону Сибири, где январь – февраль 2013 г. стал аномально холодным за последние десять лет [3].

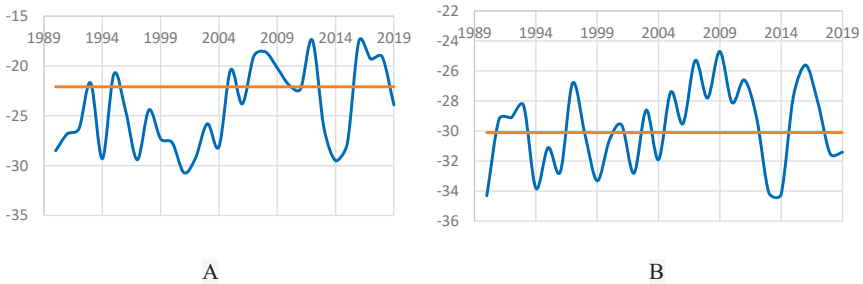


Рис. 2. Среднемесячный ход температуры января за период 1990–2019 гг. по данным метеостанций А) Диксон, В) Тикси

Анализ приземных и высотных карт января 2013 г. подтверждает предположение образования антициклона в полярных широтах (рис. 3) и аномального тепла на высотах (рис. 4).

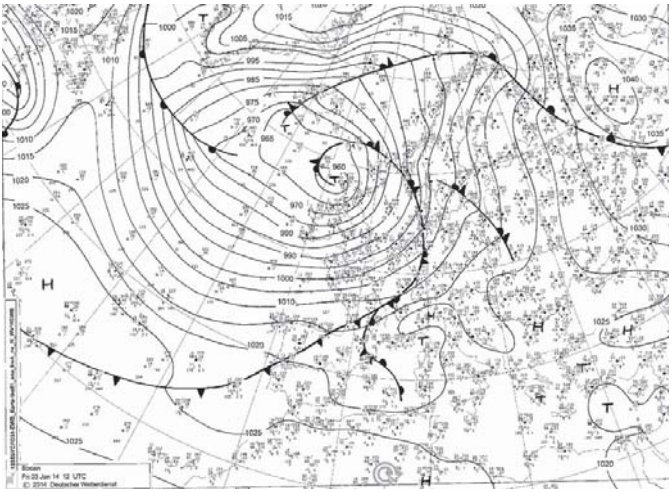


Рис. 3. Приземная карта погоды за 14.01.2013

Таким образом, 2013 г. характеризуется как аномальный в развитии погодных условий в большинстве регионов России. Одной из причин этого является аномальное развитие форм циркуляции, в частности преобладание блокирующих процессов, что, в свою очередь было связано с аномальным нагревом поверхности океана, которое наблюдалось на севере Атлантики и Тихого океана, т. е. в тех районах, где активно зарождаются циклоны.

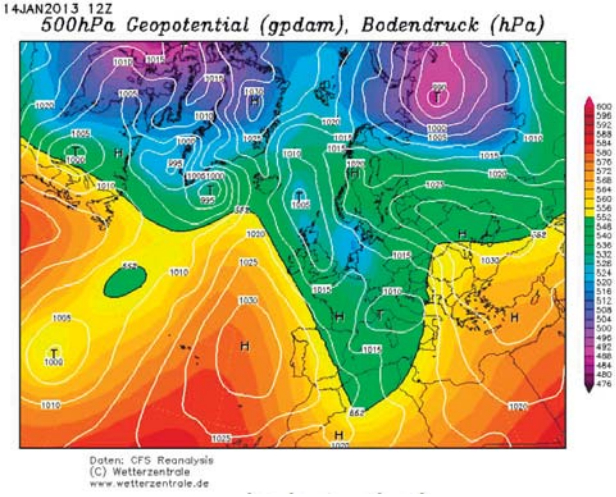


Рис. 4. Карта АТ-500 за 14.01.2013

Также помимо общепринятой тенденции на потепление климата, есть и другое проявление климатических изменений, а именно нестабильность. Изменение климата не происходит без определенных колебаний. Вероятно, во многом по этой причине сегодня более определенно можно говорить именно о нестабильности природно-климатических условий. Кроме того, прошло еще недостаточно времени, чтобы давать полную характеристику климатическому периоду последних десятилетий. В рассматриваемых вопросах Арктика на самом деле во многом непредсказуема [4].

Нельзя сказать однозначно, что наблюдается потепление климата. Так как изучая полярные области с запада на восток мы выявили, что в Мурманске наблюдаются колебания температуры примерно около нормы, нет никаких резких скачков максимумов или минимумов, ход плавный на протяжении всего рассматриваемого периода. Анализируя среднемесячные аномалии Диксона, были зачерчены экстремумы температур. Выявлена зависимость: «с продвижением на Восток наблюдается снижение повторяемости максимальных экстремумов». Рассматривая минимальные экстремумы в Тикси их повторяемость составила 40–83 %, а в пункте-Уэлен были отмечены гораздо более продолжительные периоды значений температуры ниже климатической нормы, которые составили 80–87 % от всего рассматриваемого периода с 1990 по 2019 г.

Таким образом, потепление климата можно назвать локальным явлением, а не планетарным. Все зависит строго от географического расположения данного пункта, но, чтобы доказать данное суждение необходимо провести еще ряд исследований с большим количеством станций в Восточной части Полярной области.

Список литературы

1. Информационные продукты (обзоры, доклады и др.). URL: http://www.igce.ru/performance/publishing/reports/

2. Специализированные массивы для климатических исследований. URL: http://aisori-m.meteo.ru/waisori/

3. Аномальные погодные явления в г. Иркутске в 2013/2014 гг. / И. В. Латышева, К. А. Лощенко, Е. В. Шахаева, Г. С. Сметанин // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле. 2014. Т. 7. С. 84–99.

4. *Ким Т. Е.* Влияние современных климатических изменений на жизнедеятельность населения прибрежных территорий Арктики на примере пгт Тикси и поселка Быковский Республики Саха (Якутия) // Общественные науки: вопросы и тенденции развития : сб. науч. тр. по итогам Междунар. науч.-практ. конф. Красноярск, 2014. 53 с.

УДК 551.524.3

Улучшение качества численного прогноза для города с помощью изменения коэффициентов подстилающей поверхности

Е. М. Ладохина (katur.job@mail.ru)[1,2], К. Г. Рубинштейн (k.g.rubin@googlemail.com)[1,3]

[1]*Гидрометцентр РФ, Москва*
[2] *ООО «МикроСтеп-МИС», Санкт-Петербург*
[3]*Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва*

Аннотация. Произведена оценка влияния параметров подстилающей поверхности города на качество прогноза приземных метеоэлементов путем сравнения численных прогнозов модели WRF с данными станционных наблюдений для Санкт-Петербурга и прилегающих территорий. Анализ результатов последовательного изменения параметров городской застройки показал, что увеличение параметра шероховатости улучшает качество прогноза приземной температуры, относительной влажности и скорости ветра для города. Уменьшение влагосодержания, альбедо и излучательной способности городской поверхности улучшает качество прогноза приземной температуры и относительной влажности. Ожидается, что совместное изменение коэффициентов городской застройки уменьшит суточную среднеквадратическую ошибку прогноза температуры на 0,16˚, влажности – на 1,66 %, и не ухудшит качество прогноза приземной скорости ветра.

Ключевые слова: WRF-ARW, численный прогноз, город, параметры городской застройки.

Развитие моделей численного прогноза погоды, увеличение вычислительных мощностей, рост пространственного разрешения данных о характеристиках подстилающей поверхности способствует заметному прогрессу прогнозов погоды для городских территорий.

В отечественных исследованиях улучшение качества прогноза для городов, прежде всего для Москвы, достигалось в основном за счет подбора оптимальных параметризаций подсеточных процессов. Однако, несмотря на удовлетворительные результаты численного прогноза с оптимальным выбором параметризаций в целом, оценки прогнозов недостаточно улучшались (например, [3; 6]). Это связано, скорее всего, с тем, что город занимает относительно небольшую территорию, но вносит возмущения в режим атмосферы над ним из-за особых свойств его подстилающей поверхности и антропогенных потоков тепла и влаги. Поэтому для исследования неблагоприятных погодных явлений, вызванных непосредственно влиянием городской застройки на циркуляцию атмосферы над ним, необходим учет процессов в городском приземном слое. Для этого разработаны параметризации процессов над городской поверхностью разной степени сложности, отличающиеся количеством параметров застройки и зон урбанизации, числом вертикальных уровней в городском подслое.

Тем не менее, использование параметризации городского пограничного слоя не универсально, поскольку оптимальные значения коэффициентов параметризации уникальны для каждого города. Преимущества использования специально подобранных характеристик обмена воздуха с поверхностью для конкретного города, в сравнении с использованием стандартных параметров, описаны во множестве исследований, (например, в [11; 12]). Так, для исследования городского острова тепла (ГОТ) Москвы, использовалась одноуровневая параметризация городской поверхности (SLUCM [9]) со стандартными параметрами застройки, что возможно стало одной из причин недостаточно точного воспроизведения ГОТ Москвы: отклонения между модельными и наблюдаемыми значениями температур достигали 5 °С [7]. Таким образом, определение оптимальных параметров городской поверхности является важной и актуальной задачей.

Выбор территории Санкт-Петербурга в данном исследовании обусловлен несколькими причинами. Мегаполис занимает второе место в России по численности населения, тем не менее, число работ по моделированию специфических погодных процессов, вызванных урбанизацией, для Санкт-Петербурга гораздо меньше, чем для Москвы, что может быть обусловлено сложным погодным режимом города, отличающимся частой сменой воздушных масс. Преимуществом также является наличие достаточного количества данных наблюдений для Санкт-Петербурга и прилегающих районов.

Методы исследования

Прогноз погоды для города осуществлялся с помощью модели WRF-ARW. Для достижения высокого пространственного разрешения использовалась область, покрывающая Балтийское море и часть ЕТР, с горизонтальным шагом сетки 9 км, и последовательно вложенными в нее областями 3 км для территории Ленинградской области и 1 км для Санкт-Петербурга с ближайшими окрестностями. По вертикали было задано 50 σ-уровней. Для описания мелкомасштабных атмосферных процессов использовались параметризации на основе анализа исследований [3; 5; 6]: коротковолновая и длинноволновая радиация – RRTMG,

микрофизика облаков – Thompson, планетарный пограничный слой – MYJ. Параметризация конвекции использовалась только для области с шагом 9 км по схеме Tiedtke.

Параметризация городской поверхности не использовалась, вместо этого представление городской застройки в модели производилось с помощью характеристик, используемых в схемах параметризации почвы и поверхности (СПП). Использование СПП для исследования чувствительности прогноза к изменению морфологических характеристик подстилающей поверхности города обладает рядом преимуществ в сравнении с использованием параметризаций городской застройки. Во-первых, в СПП намного меньше характеристик поверхности, которые следует изменять, во-вторых, не требуется разделять городскую поверхность на зоны по степени урбанизации местности, в-третьих, численные эксперименты без привлечения параметризации городской поверхности будут более вычислительно эффективными.

Выбору СПП было уделено особое внимание, поскольку процессы в почве и на поверхности в разных СПП заметно отличаются. В простых схемах некоторые характеристики представлены в виде констант, зависящих только от типа поверхности и сезона. В более сложных схемах эти характеристики зависят от множества факторов (процессов в атмосфере, времени суток). Для цели данной работы была выбрана 5-слойная схема температуропроводности [10], поскольку использующиеся в ней параметры подстилающей поверхности, есть и в параметризации городской застройки (коэффициенты тепловой инерции, теплоемкости и температуропроводности для крыш, стен и дорог). Для прогноза температуры (T) поверхности используется уравнение теплового баланса, в которое входит уравнение теплопроводности (1) для расчета величины притока тепла в почву:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{1}{C(\Theta)}\frac{\partial}{\partial \zeta}\left(-k_t(\Theta)C(\Theta)\frac{\partial T}{\partial \zeta}\right), \quad (1)$$

здесь t – время [с], ζ – произвольная глубина [м], C – объемная теплоемкость почвы [$Дж*м^{-3}*К^{-1}$], k_t – коэффициент температуропроводности [$м^2/с$], Θ – влагосодержание почвы [доля единицы объема почвы, занятая водой].

За счет того, что влагосодержание почвы в 5-слойной схеме определено набором констант, в уравнении (1) коэффициенты тепловой инерции, теплоемкости и температуропроводности будут также являться константами. Уравнение (1) можно привести к виду:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \left(-\lambda\frac{\partial T}{\partial \zeta^2}\right), \quad (2)$$

где $\lambda = k_t C$ – коэффициент теплопроводности почвы [$Дж*м^{-2}*К^{-1}*с^{-1/2}$].

В СПП Noah [8] влагосодержание меняется во времени и зависит от глубины слоя почвы, поэтому постоянные коэффициенты тепловой инерции, теплоемкости и температуропроводности не используются, температура поверхности рассчитывается более сложным образом. Упрощение уравнения (1) в 5-слойной схеме также делает ее самой вычислительно эффективной из СПП.

Таким образом, в работе была проведена оценка чувствительности прогноза к изменению параметров городской застройки в 5-слойной схеме температуропроводности. Помимо коэффициентов влагосодержания и тепловой инерции, также оценивалось влияние изменения параметров альбедо (α), излучательной способности (ε_s) и шероховатости (Z_0) на качество прогноза.

Городским островом тепла называется положительная аномалия приземной температуры в городе по сравнению с сельской местностью. Это один из наиболее хорошо описанных в литературе эффектов воздействия города на поля метеоэлементов. Предварительные результаты численных экспериментов приведены за период с 14 по 22 июня 2015 г., когда в Санкт-Петербурге наблюдались случаи интенсивного ГОТ по данным станции, отражающей погодный режим города [1].

Для определения воздействия изменения параметров городской застройки на прогностические поля эксперименты проводились по следующей схеме. Сначала был рассчитан контрольный эксперимент со стандартными значениями параметров за выбранный период времени: $\alpha = 0{,}15$, $\Theta = 0{,}1$, $Z_0 = 0{,}5$, $\lambda = 3{,}0$, $\varepsilon_s = 0{,}88$. Затем была проведена серия экспериментов с последовательным изменением параметров городской застройки: $\alpha = 0{,}05$, $\alpha = 0{,}3$, $\Theta = 0{,}05$, $\Theta = 0{,}2$, $Z_0 = 1{,}0$, $\lambda = 4{,}0$, $\lambda = 2{,}0$, $\varepsilon_s = 0{,}78$. Для каждого эксперимента оценивалось качество прогноза в сравнении с данными наблюдений за приземными метеоэлементами. По результатам оценки качества проведенных экспериментов были выбраны наиболее подходящие значения параметров и проведен новый эксперимент с одновременной заменой значений параметров городской застройки на новые.

Рис. 1. Станции с данными измерений

Для оценки качества прогноза приземных метеоэлементов станции с данными измерений были разделены на две группы – сельские (Rural) и городские (Urban). В группу сельских станций включено 14 пунктов в радиусе от 25 до 150 км от Санкт-Петербурга; в группу городских станций вошли пункты ОГМС «Санкт-Петербург» и Пулково (рис. 1).

Затем были рассчитаны среднее отклонение (СО), средняя абсолютная ошибка (АО) и среднеквадратическое отклонение (СКО) для каждой группы станций и для всех станций с данными измерений. Средние значения статистик за весь выбранный период сведены в таблицы (секция «Эксп. Ст. пар.»). Для оценки изменения качества прогноза при изменении параметров городской застройки были рассчитаны разности значений статистик из секции «Эксп. Ст. пар.» со значениями статистик для экспериментов с измененными параметрами застройки.

Результаты

Приземная температура. В ходе изучения результатов расчета статистик СО и СКО было обнаружено, что в срок 21:00 15-го июня модель одинаково неточно прогнозирует температуру для обеих групп станций. Причины больших отрицательных ошибок за этот срок требуют детального анализа, для цели данной работы этот срок был исключен из итоговых оценок качества прогноза в таблицах 1 и 2. Исключение срока 21:00 15-го июня позволило распознать относительно слабое влияние изменения параметров подстилающей поверхности на значения итоговых статистик, особенно в ночные часы.

Таблица 1

Статистики качества прогноза приземной температуры

Эксп.	Группа	Сутки			Ночь		
		СО	АО	СКО	СО	АО	СКО
Ст. пар.	Urban(1км)	-1,144	1,720	1,836	-1,589	1,941	2,080
	Rural (3км)	-0,755	1,556	1,825	-0,441	1,523	1,793

Из анализа СКО (табл. 1) следует, что модель лучше прогнозирует приземную температуру для станций в сельской местности и хуже для городских станций. Для обеих групп модель систематически занижает приземную температуру, сильнее – для городских станций, согласно результатам расчета СО.

Таблица 2

Разности статистик контрольного эксперимента и экспериментов с измененными параметрами для приземной температуры (городские станции)

Эксп.	Сутки			Ночь		
	$CO_{Ст}$ – CO_{new}	$AO_{Ст}$ – AO_{new}	$СКО_{Ст}$ - $СКО_{new}$	$CO_{Ст}$ – CO_{new}	$AO_{Ст}$ – AO_{new}	$СКО_{Ст}$ – $СКО_{new}$
$\alpha = 0,05$	**–0,13**	**0,08**	**0,06**	**–0,08**	**0,03**	**0,02**
$\alpha = 0,3$	0,25	–0,15	–0,17	0,18	–0,10	–0,13
$\Theta = 0,05$	**–0,16**	**0,08**	**0,08**	**–0,13**	**0,08**	**0,08**
$\Theta = 0,20$	0,19	–0,07	–0,08	0,15	–0,03	–0,06
$Z_0 = 1$	**–0,04**	0,00	0,00	**–0,10**	**0,04**	**0,04**
$\lambda = 4$	0,05	–0,03	–0,03	**–0,04**	**0,02**	**0,01**
$\lambda = 2$	0,04	–0,02	–0,03	0,18	–0,12	–0,14
$\varepsilon_s = 0,78$	**–0,06**	**0,02**	**0,02**	**–0,08**	**0,01**	**0,01**

Результаты расчета статистик качества прогноза для экспериментов с последовательным изменением параметров городской застройки сведены в табл. 2. Здесь и далее суточные оценки получены путем осреднения статистик за период

с 06 до 06 ГМТ (соответствует заблаговременности прогноза с 6 до 30 ч), ночные – с 18 до 06 ГМТ (соответствует заблаговременности прогноза с 18 до 30 ч).

Из анализа результатов таблицы 2 следует, что уменьшение альбедо, уменьшение влагосодержания, увеличение параметра шероховатости и уменьшение излучательной способности улучшило качество прогноза приземной температуры в сравнении с изначальным экспериментом. Наибольший эффект оказало изменение влагосодержания почвы до 0.05, выбранному согласно предположению о непроницаемости городских поверхностей и быстрому удалению излишков влаги системами городской канализации. Окончательный вывод о целесообразности уменьшения величины коэффициента влагосодержания будет сделан после оценки качества прогноза относительной влажности.

Меньший эффект оказало уменьшение альбедо до 0,05. Значение было выбрано исходя из таблицы коэффициентов альбедо для различных материалов [4] и предположения о задержке отраженной солнечной радиации городскими каньонами [4]. Помимо отраженной солнечной радиации предполагалось, что городские каньоны также должны задерживать ее излученную часть. Поэтому коэффициент излучательной способности был уменьшен до 0,78, что оказало наименьший, но все же положительный эффект на качество прогноза приземной температуры.

Улучшение качества прогноза при увеличении параметра шероховатости до 1,0 м наблюдается в основном ночью, что должно положительно сказаться на воспроизведении ночного ГОТ в модели. Поскольку значение коэффициента шероховатости напрямую влияет на скорость приземного ветра [8], то окончательное значение этого параметра для проведения нового эксперимента будет определено далее, после анализа качества прогноза скости приземного ветра.

Изменение коэффициента теплопроводности по результатам суточных статистик отрицательно повлияло на качество прогноза приземной температуры. Тем не менее, ночью при увеличении λ до 4,0 [$4{,}184*10^{2}*Дж*м^{-2}*К^{-1}*с^{-1/2}$], ошибка прогноза уменьшилась на 0,1 по результатам расчета СКО. В реальности коэффициент теплопроводности сильно зависит от влагосодержания почвы, которое в свою очередь меняется во времени. На основании данного эксперимента можно заключить, что теплопроводность городской поверхности увеличивается ночью и уменьшается днем в пределах от 3 до 4 [$4{,}184*10^{2}*Дж*м^{-2}*К^{-1}*с^{-1/2}$].

Скорость приземного ветра. По результатам предварительного анализа качества прогноза ветра оказалось, что модель сильнее завышает значения приземного ветра для сельских станций (СО = 2,029 м/с, СКО = 2,507 м/с), чем для городских станций (СО = 1,983 м/с, СКО = 2,504 м/с). Согласно предположению, приведенному в [2], в последние годы произошло «зарастание» станции Шлиссельбург, а при сравнении изначального эксперимента с данными измерений среднее СКО для этой станции составило 3,3 м/с –на 0,8 м/с больше, чем на других станциях. В связи с этим данные Шлиссельбурга были исключены из результатов и дальнейшего анализа прогноза скорости ветра (табл. 3 и 4).

Таблица 3

Статистики качества прогноза скорости приземного ветра

Эксп.	Группа	Сутки			Ночь		
		СО	АО	СКО	СО	АО	СКО
Ст. пар.	Urban (1км)	1,983	2,309	2,507	1,858	2,074	2,229
	Rural (3км)	1,940	2,167	2,422	1,768	1,995	2,249

Таблица 4

Разности статистик контрольного эксперимента и экспериментов с измененными параметрами для скорости приземного ветра (городские станции)

Эксп.	Сутки			Ночь		
	$CO_{Ст} - CO_{new}$	$AO_{Ст} - AO_{new}$	$СКО_{Ст} - СКО_{new}$	$CO_{Ст} - CO_{new}$	$AO_{Ст} - AO_{new}$	$СКО_{Ст} - СКО_{new}$
$\alpha = 0{,}05$	–0,13	–0,04	–0,08	–0,15	–0,02	–0,06
$\alpha = 0{,}3$	**0,09**	**0,11**	**0,09**	–0,05	**0,01**	–0,03
$\Theta = 0{,}05$	–0,10	–0,07	–0,09	–0,12	–0,09	–0,12
$\Theta = 0{,}20$	**0,07**	**0,10**	**0,10**	**0,01**	**0,06**	**0,04**
$Z_0 = 1$	**0,28**	**0,27**	**0,25**	**0,16**	**0,17**	**0,14**
$\lambda = 4$	**0,02**	**0,06**	**0,05**	–0,08	**0,02**	–0,02
$\lambda = 2$	–0,06	–0,02	–0,07	–0,10	–0,03	–0,09
$\varepsilon_s = 0{,}78$	–0,03	**0,02**	–0,02	–0,08	–0,03	–0,07

Из анализа СО и СКО (табл. 3) следует, что ошибки прогноза скорости приземного ветра в модели положительные и имеют приблизительно одинаковую величину как для городских, так и для сельских станций. Поскольку обеих групп модель систематически завышает скорость приземного ветра, наибольший эффект на улучшение качества прогноза приземного ветра оказало ослабление скорости набегающего потока воздуха за счет увеличения параметра шероховатости до 1 м (табл. 4). Таким образом, увеличение параметра шероховатости положительно сказалось на качестве прогноза приземной температуры и скорости ветра.

Анализ результатов других экспериментов показывает несогласованность изменения ошибок прогноза приземной температуры и скорости ветра: уменьшение альбедо, излучательной способности и влагосодержания увеличило ошибки прогноза скорости приземного ветра по данным СКО как ночью, так и в течение суток. Увеличение перечисленных коэффициентов наоборот положительно сказалось на качестве прогноза.

Приземная относительная влажность воздуха. Согласно результатам расчета статистик АО и СКО (табл. 5), суточные ошибки прогноза приземной влажности для сельских станций больше, чем для городских, а ночные – меньше. Исходя из значений СО следует, что модель систематически завышает относительную влажность для обеих групп станций.

Таблица 5

Статистики качества прогноза относительной влажности воздуха

Эксп.	Группа	Сутки			Ночь		
		СО	АО	СКО	СО	АО	СКО
Ст. пар.	Urban (1км)	7,990	9,336	9,994	10,194	11,088	11,943
	Rural (3км)	7,406	9,880	11,781	6,951	9,821	11,754

Анализ результатов экспериментов с измененными параметрами поверхности показывает согласованность изменения ошибок прогноза приземной температуры и влажности. Уменьшение альбедо, излучательной способности и влагосодержания уменьшило ошибки прогноза относительной влажности по данным СКО как ночью, так и в течение суток. Наибольшее влияние на качество прогноза оказало уменьшение влагосодержания почвы. Таким образом, значение $\Theta = 0{,}05$ можно считать оптимальным для проведения финального эксперимента с одновременным изменением параметров городской застройки.

Таблица 6

Разности статистик контрольного эксперимента и экспериментов с измененными параметрами для относительной влажности воздуха (городские станции)

Эксп.	Сутки			Ночь		
	$CO_{Ст} - CO_{new}$	$AO_{Ст} - AO_{new}$	$СКО_{Ст} - СКО_{new}$	$CO_{Ст} - CO_{new}$	$AO_{Ст} - AO_{new}$	$СКО_{Ст} - СКО_{new}$
$\alpha = 0{,}05$	**0,69**	**0,42**	**0,38**	**0,33**	**0,34**	**0,20**
$\alpha = 0{,}3$	–0,90	–0,64	–0,79	–0,76	–0,42	–0,65
$\Theta = 0{,}05$	**1,08**	**0,65**	**0,70**	**0,72**	**0,54**	**0,53**
$\Theta = 0{,}20$	–1,67	–1,08	–1,15	–1,17	–0,82	–0,91
$Z_0 = 1$	**0,48**	**0,35**	**0,39**	**0,68**	**0,60**	**0,66**
$\lambda = 4$	–0,14	–0,06	–0,12	–0,05	**0,15**	**0,06**
$\lambda = 2$	0,01	–0,09	–0,14	–0,70	–0,47	–0,62
$\varepsilon_s = 0{,}78$	**0,33**	**0,24**	**0,19**	**0,20**	**0,28**	**0,16**

Заключение

Подводя итог анализа результатов численных прогнозов с измененными параметрами поверхности, для финального эксперимента были выбраны следующие значения параметров городской застройки: $\alpha = 0{,}05$, $\Theta = 0{,}05$, $Z_0 = 1$, $\varepsilon_s = 0{,}78$. Ожидается, что качество прогноза приземной температуры согласно расчету СКО улучшится в среднем на 0,16 °, качество прогноза приземной влажности воздуха – на 1,66 %. Просуммировав значения ($СКО_{Ст} – СКО_{new}$) для скорости ветра ожидается, что положительное влияние увеличения параметра шероховатости компенсирует отрицательное воздействие изменения остальных коэффициентов на скорость приземного ветра. Ожидается, что ухудшения качества прогноза не произойдет, а его улучшение будет равно 0,06 м/с по результатам расчета СКО.

Чтобы оценить степень влияния изменения параметров городской застройки на качество прогноза для сельских станций, были рассчитаны разности статистик контрольного эксперимента и экспериментов с измененными параметрами, аналогичные приведенным в таблицах для городских станций. Просуммировав значения ($СКО_{Ст} – СКО_{new}$) предполагается, что качество прогноза в среднем ухудшится незначительно: на 0,03 ° для приземной температуры, 0,02 м/с для скорости ветра 0,07 % для относительной влажности воздуха.

Список литературы

1. *Ладохина Е. М., Рубинштейн К. Г., Цепелев В. Ю.* Определение периодов максимальной интенсивности острова тепла в Санкт-Петербурге для валидации модели численных прогнозов погоды в городе // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 2 (376). С. 109–125.

2. *Ладохина Е. М., Рубинштейн К. Г.*Анализ влияния мегаполиса Санкт-Петербург на осадки и ветер для валидации численного прогноза погоды // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34, № 1. С. 36–45.

3. *Мостаманди С. В., Тарабукин И. А., Дорофеев Е. В.* Развитие технологий сверхкраткосрочных и краткосрочных прогнозов опасных метеорологических явлений на основе анализа данных наблюдений и результатов численного прогноза гидродинамической модели WRF // Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. 2015. № 579. С. 178–204.

4. *Оке Т. Р.* Климат пограничного слоя. Гидрометеоиздат, 1982. 358 с.

5. *Смирнова М. М., Рубинштейн К. Г., Юшков В. П.* Оценка воспроизведения региональной моделью характеристик пограничного слоя атмосферы // Метеорология и гидрология. 2011. № 12. С. 5–16.

6. *Торопова М. Л., Русин И. Н.* Воспроизведение стратификации атмосферы с целью прогноза конвективных явлений при помощи мезомасштабной модели WRF-ARW // Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. 2019. № 593. С. 160–176.

7. . Моделирование городского острова тепла в период экстремальных морозов в Москве в январе 2017 г. / В. П. Юшков [и др.] // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55, № 5. С. 13–31.

8. *Chen F., Dudhia J.* Coupling an advanced land surface–hydrology model with the Penn State–NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity // Monthly weather review. 2001. Vol. 129, N 4. P. 569–585.

9. The integrated WRF/urban modelling system: development, evaluation, and applications to urban environmental problems / F. Chen [et al.] // International Journal of Climatology. 2011. Vol. 31, N 2. P. 273–288.

10. *Dudhia J.* A multi-layer soil temperature model for MM5 / Preprints, The Sixth PSU/NCAR mesoscale model users' workshop, 1996. P. 22–24.

11. *Jiménez Esteve B*. Land use in uence in WRF model. A high resolution mesoscale modeling over Oriental Pyrenees. 2016. 25 p.

12. Numerical study on effect of urban heating on local climate during calm inter-monsoon period in greater Kuala Lumpur, Malaysia / M. C. G. Ooi [et al.] // Urban climate. 2017. Vol. 20. P. 228–250.

УДК 551.583

Условия возникновения снежных гроз на территории России

И. В. Латышева (ababab1967@mail.ru)[1], М. В. Злыгостева (amc_chita@mail.ru)[2]
Е. В. Золотухина (musakutlarylet@bk.ru)[1]

[1]*Иркутский государственный университет, Иркутск*
[2]*Иркутский филиал ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета», Иркутск*

Аннотация. Статья посвящена исследованию синоптических условий образования снежной грозы на примере аэродрома Читы, которая отмечалась 24 марта 2021 г. при сочетании благоприятных факторов для быстрого развития конвекции. Указано, что гроза наблюдалась при прохождении динамически значимого атмосферного фронта, образования мезоциклона в средней тропосфере, низкого расположения уровней конденсации и кристаллизации в облаке и значительного повышения уровня тропопаузы. Сделан вывод, что существенный вклад в развитие вынужденной конвекции внес неоднородный рельеф местоположения аэродрома.

Ключевые слова: опасные явления для авиации, гроза, конвективная неустойчивость, тропопауза, атмосферный фронт, струйное течение.

Введение

Истоки научных исследований атмосферного электричества и гроз связаны с именами крупнейших физиков-теоретиков: М. В. Ломоносова, Б. Франклина, Далибара, Дж. Дж. Томсона и др. Начиная с работ Я. И. Френкеля, грозовые облака выделяют в качестве одного из основных источников электрического поля

в тропосфере и стратосфере. В настоящее время большое внимание уделяют исследованию сильных и продолжительных гроз, которые представляют большую опасность для пилотирования воздушных судов. В этой связи стоит упомянуть об условиях образования гроз в суперячейковых кучево-дождевых облаках.

Такие облака и нередко связанные с ними «сверхочаговые грозы» возникают при наличии в слое облакообразования высоких запасов энергии неустойчивости и больших вертикальных градиентов скорости ветра. Как правило, такие грозы представляют собой линию гроз с продолжительным, хорошо развитым фронтом порывов ветра вдоль передней линии фронта [1]. В качестве предикторов для прогнозирования таких атмосферных явлений рассматривают: значительный прогрев подстилающей поверхности (≥ 27–30 °С), сильная конвективная неустойчивость, необходимым условием также является ветер переменного направления, вызывающий вращение, что достигается при наличии сдвига ветра в средней тропосфере.

Известно, что грозы часто имеют мезомасштабную природу, что необходимо учитывать в районах со сложной орографией, включая наличие наветренных склонов гор, где получают развитие вынужденные восходящие токи. Кроме того, для образования грозового облака требуется много влаги (водяного пара), которой при одной и той же относительной влажности содержит значительно больше теплый воздух, чем холодный [8]. В этой связи возникновение мощных грозовых облаков, ливней и града связывают с адвекцией теплого богатого по абсолютному влагосодержанию воздуха и наличием интенсивных восходящих движений [6]. Следует помнить, что интенсивные грозы и град часто формируются, когда в средней и верхней тропосфере температурные градиенты существенно превышают величину влажноадиабатического. Эту характеристику состояния атмосферы отражают значения индекса LIFT (различие температуры окружающей среды и частицы, поднимающейся с уровня 500 м до уровня 500 гПа). Степень развития вынужденной конвекции при влажнонеустойчивой стратификации атмосферы зависит от толщины влажнонеустойчиво стратифицированных слоев. Эту характеристику состояния атмосферы отражают значения индексов TOTL (комплексная характеристика статической стабильности и влажности в слое 850–500 гПа) и индекс KIND (комплексная характеристика статической стабильности и влажности в слое 850–700 гПа) [7].

Современные методы исследования фронтальных гроз показали, что воздушные массы и параметры атмосферы в зоне грозовой деятельности характеризуются многослойностью [4]. Обнаружено существование «полосы доставки» влаги перед грозовым фронтом, которая имеет ограниченные поперечные размеры [5]. Применение радиолокационных и спутниковых данных позволяет уточнять положение, направление и скорость смещения фронтальных грозовых очагов [2; 3].

Результаты исследований

В условиях меняющегося климата возрастает вероятность образования зимних гроз. Одна из таких гроз отмечалась в г. Иркутске 3 декабря 2013 г. Ранее выполненный нами метеорологический и синоптический анализ позволил выде-

лить следующие факторы образования зимней грозы в Иркутске: мезомасштабный, адвективно-динамический и вихревой. Мезомасштабный характер зимней грозы в г. Иркутске заключался в ее локальном характере. Адвективно-динамический фактор в смене господствующей южной умеренной воздушной массы на арктическую и развитии вертикальных движений в зоне атмосферного фронта с вытеснением более холодным и сухим воздухом на высотах теплого и богатого по абсолютному влагосодержанию воздуха у поверхности Земли. Вихревой фактор проявлялся в наличии струйных течений в средней и верхней тропосфере. Также при образовании зимней грозы в г. Иркутске отмечены неоднородная горизонтальная адвекция по высотам и наличие задерживающего слоя выше пограничного.

В данной работе выполнено исследование образования снежной грозы, которая наблюдалась на аэродроме Чита 24 марта 2021 г. Аэродром Чита расположен в Читино-Ингодинской впадине, которая характеризуется абсолютными высотами, составляющими 750–850 м, и на склонах хребтов Яблоневый (с запада) и Черского (с востока), при впадении р. Читинки в р. Ингоду. Рельеф – слабохолмистый и равнинный. Минимальные высоты равны 638 м. Наивысшая отметка в черте г. Читы 1039 м (гора Чита). Всхолмленность дна впадины связана с расчленением поверхности надпойменных террас рек Читинки и Ингоды многочисленными падями и ложбинами. Уклоны поверхностей составляют 1–6°, крутизна склонов 8–16°. Борта впадины представляют собой крутые уступы (до 20–25°), сглаженные в нижней части широко развитыми пролювиально-делювиальными шлейфами. С севера впадина ограничивается хребтом Яблоновым, с юга хребтом Черского. Абсолютные высоты хребтов составляют 1000–1300 м. Относительные превышения над дном впадины равны 300–400 м.

Как показал синоптический анализ приземных и высотных карт погоды, в утренние часы за 00.00 ВСВ 24 марта 20221 г. погодные условия на территории Забайкалья определялись влиянием барической ложбины с севера, которая была направлена на южные районы Иркутской области, Бурятии и западные районы Забайкалья. Барическая ложбина была очерчена 1015 изобарой, с ней были связаны две фронтальные системы: арктическая и фронтальная система умеренных широт (рис. 1). Полярная фронтальная система проходила по территории Монголии. Контрасты температуры в зоне арктического и умеренного фронтов составляли 5–7 °С/100 км. Район аэродрома Чита находился в зоне взаимодействия барической ложбины с севера и барического гребня, барический градиент составлял 4 гПа/1000 км. На момент образования снежной грозы в 09.00 ВСВ на волне умеренного фронта образовался мезоциклон с центром восточнее г. Читы глубиной 1007 гПа. Значение градиента температуры в зоне умеренного фронта на карте АТ-850 гПа (1,5 км) составляли 6 °С/500 км, т. е. фронт был динамически значимым. Начиная с 07.30 ВСВ, на аэродроме отмечался поворот ветра (на 80°) с юго-западного на северо-западный. Происходило развитие кучево-дождевой облачности с высотой нижней границы до 900 м. В районе аэродрома отмечались ливневые осадки (снег с дождем) с ухудшением видимости до 9 км. Воздух в дневные часы прогрелся до 5 ºС.

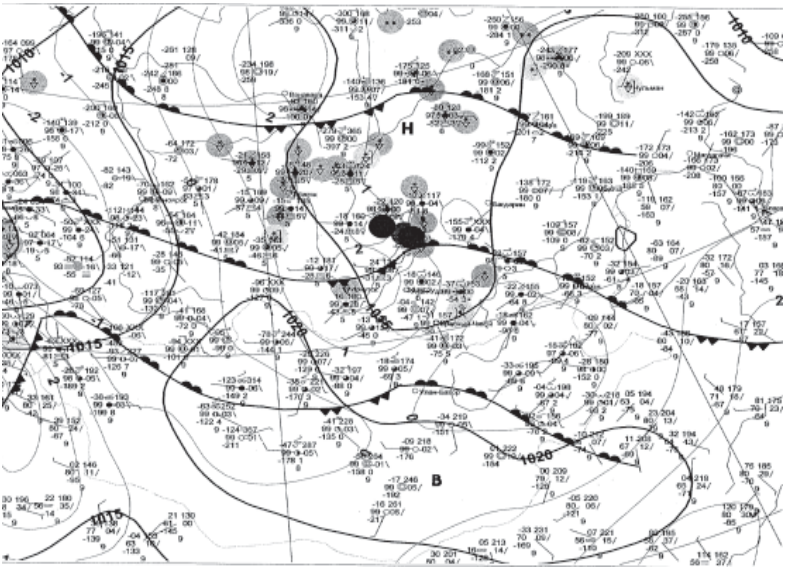


Рис. 1. Кольцевая карта погоды за 00.00 ВСВ 24.03.2021

Образование грозы происходило при смене теплой сухой (значения относительной влажности в пределах от 56 до 20 %, абсолютная влажность составляла 3,4–4,7 г/м^3) южной умеренной воздушной массы на северную умеренную по термодинамическим свойствам холодную и неустойчивую. На фронтальный характер снежной грозы в районе аэродрома указывает наличие температурных слоев инверсии. Первый слой приподнятой инверсии располагался на высоте 925 гПа, имел мощность 180 м, интенсивность 2 °С, второй слой – слой изотермии имел толщину 385 м. Тропопауза располагалась на высоте 9600 м, что указывает на интенсивный прогрев тропосферы на момент образования снежной грозы на аэродроме Чита. Высота нижней границы облаков составляла порядка 1400 м, изотерма –10 °С находилась на высоте 2 км, а изотерма –20 °С на высоте 3700 м (рис. 2).

В средней тропосфере на высоте 3 км район аэродрома Чита находился под влиянием передней части барического гребня, адвекции антициклонического вихря скорости (–0,5 с$^{-1}$), северо-западных потоков (300°– 50 км/ч). В термическом поле сказывалось локальной ложбины холода (–14 °С), слабобароклинной атмосферы, восходящих токов (–15 гПа/12 ч), относительно сухой воздушной массы (дефицит точки росы равен 6 °С). На высоте 5 км через районы аэродрома проходила ось динамически значимой высотной фронтальной зоны с градиентом геопотенциала 19 гп.дам/1000 км, которая сформировалась в результате взаимодействия холодного высотного циклона в районе Магадана и теплого барического гребня, направленного с районов Средней Азии на север Красноярского

края. В районе аэродрома наблюдалось влияние ложбины холода (–33 °С), северо-западных потоков (300°–60 км/ч), восходящих токов (–15 гПа/12 ч), сухой воздушной массы (дефицит точки росы равен 7 °С). На уровне изобарической поверхности АТ-300 гПа район аэродрома Чита находился под влиянием циклонической стороны струйного течения (260°–120 км/ч).

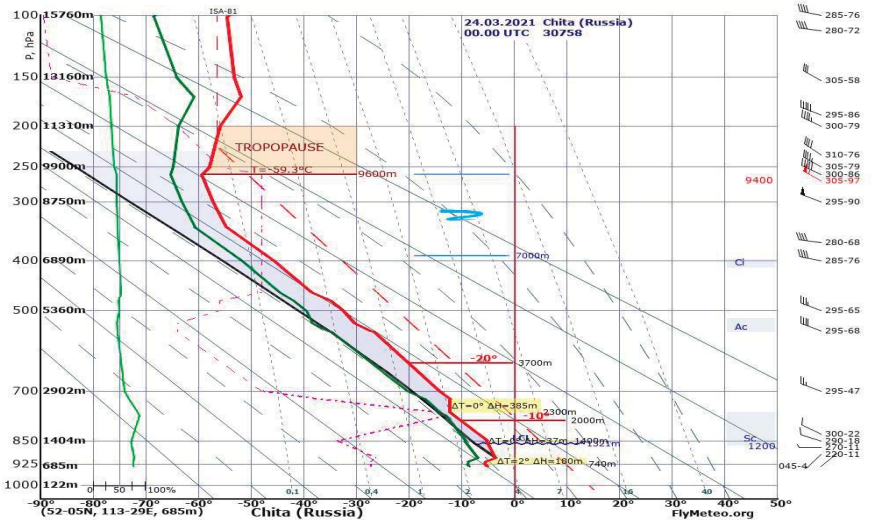


Рис. 2. Аэрологическая диаграмма за 00 ВСВ 24.03.2021 по данным FlyMeteo

Таким образом, развитие грозовой облачности было вызвано динамической конвекцией в зоне быстро движущегося холодного фронта, восходящими токами вблизи центра циклона (вершины волны) при наличии циклонической циркуляции у поверхности Земли. Большую роль при быстро движущемся атмосферном фронте даже при недостаточном насыщении воздушной массы влагой (дефицит точки росы в нижней тропосфере составлял 4 °С, в средней тропосфере 6 °С) играет низкое положение изотермы минус 10 °С ~2000 м, что благоприятствует образованию ледяной фазы осадков и быстрой электризации облачных частиц в кучево-дождевой облачности.

Выводы

Исследование метеорологических и синоптических условий формирования редкого и опасного для авиации явления погоды – снежной грозы на аэродроме Чита в марте 2021 г. показало, что развитие конвекции было связано с интенсивным предшествующим прогревом воздушной массы, на что указывает повышение высоты уровня тропопаузы. При прохождении динамически значимого холодного фронта умеренных широт и динамически значимой высотной фронтальной зоны и наличии мезоциклона в средней тропосфере накопленная энергия конвективной неустойчивости реализовалась в быстром развитии конвекции при

относительно низком расположении уровня конденсации и уровня кристаллизации в облаке и большой высоте уровня конвекции. Дополнительным фактором грозообразования послужили орографические вертикальные токи в условиях горного рельефа местности.

Список литературы

1. *Акселевич А. В.* Синоптическая и авиационная метеорология Ч. 2. М. : Воениздат, 1985. 222 с.

2. *Горбатенко В. П., Ершова Т. В.* Молния как звено глобальной электрической цепи. Томск : Изд-во ТГПУ, 2011. 204 с.

3. *Горбатенко В. П., Ершова Т. В., Константинова Д. А.* Пространственное распределение плотности разрядов молнии в землю над Западной Сибирью // Вестник Томского государственного университета. 2009. № 329. С. 251–255.

4. *Кошинский С. Д., Корулина Л. Г.* Пространственно-временная синоптическая характеристика дождливых периодов на юго-востоке Западной Сибири // Динамическая и синоптическая метеорология. Л., 1976. С. 6–14.

5. Диагностические исследования и моделирование процессов циклогенеза, фронтогенеза и погодных условий на различных стадиях развития циклона / Н. П. Шакина [и др.] // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра РФ. 2000. № 335. С. 3–25.

6. *Apostol L.* The Mediterranean cyclones – the role in ensuring water resources and their potential of climatic risk, in the east of Romania // Present Environment and Sustainable Development. 2008. Vol. 2. P. 143–163.

7. *Bocheva L.* A., Georgiev C. G., Simeonov P. Climatic study of severe storms over Bulgaria produced by Mediterranean cyclones in 1990-2001 period // Atmospheric Research. 2007. Vol. 83. P. 284–293.

8. *Kunz M.* The skill of convective parameters and indices to predict isolated and severe thunderstorms // Natural Hazards Earth System Sciences. 2007. Vol. 7. P. 327–342.

УДК 551.515.2

Многолетняя динамика максимальных сумм атмосферных осадков в Иркутской области

И. В. Латышева (ababab1967@mail.ru), А. В. Орлова (arinaorlova.2021@gmail.com)

Иркутский государственный университет, Иркутск

Аннотация. Обсуждаются причины формирования экстремальных осадков в условиях меняющегося климата. Проанализирована многолетняя динамика максимальных суточных сумм атмосферных осадков на севере и юге Иркутской области по данным метеорологических наблюдений во взаимосвязи с аномалиями крупномасштабных атмосферных полей и потоков влаги в средней тропосфере.

Ключевые слова: экстремальные осадки, максимальные суммы осадков, циклоны, потоки влаги, атмосферная неустойчивость, Иркутская область.

Введение

Первые десятилетия XXI в. характеризуются ростом средней годовой температуры воздуха на территории России и в большинстве регионов Северного полушария, а в отдельные годы на метеорологических станциях регистрируются экстремально высокие значения температуры воздуха и атмосферных осадков. Обращает внимание, что темпы роста средних годовых температур в России в среднем на 0,3 °С выше, чем в целом на планете. Как следствие, мы наблюдаем

высокую повторяемость опасных и особо опасных гидрометеорологических явлений в различных регионах земного шара [7].

Статистическая связь роста количества атмосферных осадков на фоне повышения глобальных и региональных температур обусловлена изменениями составляющих водного баланса подстилающей поверхности и атмосферы, что сопровождается усилением процессов испарения влаги, как благоприятных факторов для увеличения водности тропосферы. Теплый воздух в потенциале содержит большее количество водяного пара, которое задействовано в процессах облако- и осадкообразования. Кроме того, повышение запасов потенциальной энергии в атмосфере сопровождается увеличением термических и барических градиентов, как факторов цикло- и фронтогенеза. В результате на фоне повышения температуры подстилающей поверхности и приземного слоя атмосферы увеличивается вероятность развития облаков как внутримассового происхождения, особенно в теплое время года при реализации энергии конвективной неустойчивости, так и фронтальной облачности. Кроме того, возрастает вероятность увеличения интенсивности и продолжительности атмосферных осадков, с которыми связано возникновение таких опасных явлений, как паводки, наводнения, сели, градобития и др.

Таким образом, современные изменения климата в условиях роста средних температур тесно коррелируют с увеличением количества атмосферных осадков. Однако в случае длительно стационирующих блокирующих антициклонов ситуация меняется коренным образом. На фоне высокой испаряемости и господствующих нисходящих потоков воздух очень быстро удаляется от состояния насыщения влагой, поэтому неизбежны засушливые условия, а при сопутствующих крупномасштабных факторах в отдельные годы и продолжительные засухи с высокой вероятностью лесных пожаров. В последние годы на основе анализа эмпирических данных выдвинута гипотеза об уменьшении интенсивности осадков при повышении приземной температуры выше определенного порога [4].

Не менее простой будет ситуация, когда усиливаются затоки холодного воздуха, которые в летний период определяют адвективно-динамические и вихревые факторы развития южного циклогенеза на полярной или арктической ветви высотной фронтальной зоны, а в холодный период обострение атмосферных фронтов. Поэтому не случайно, что в отдельные аномально холодные зимы может регистрироваться максимум месячных сумм атмосферных осадков.

Учитывая наблюдаемую тенденцию увеличения повторяемости опасных погодных явлений в регионах России важно не только проводить регулярные исследования причин, их вызывающих, но и увеличивать заблаговременность их прогнозирования в условиях сравнительно редкой сети метеорологических станций и станций радиозондирования атмосферы. Однако на пути исследователя возникают трудности даже с определением термина экстремальных осадков. В настоящее время применяются три основных подхода к их определению. Первый основан на анализе пороговых значений, которые должны учитывать специфику орографии местности и региональных синоптических процессов. Чаще всего

оперируют значениями, превышающими 20 мм или 30 мм в сутки. Второй подход – метод моментов, когда такие осадки должны превысить 95 % процентную обеспеченность. В оперативной практике часто анализируют месячные или суточные максимумы атмосферных осадков.

Обоснование темы исследования

В настоящее время среди комплекса неблагоприятных метеорологических факторов в число лидеров по повторяемости на территории России по данным [9] входят сильный ветер и экстремальные осадки, на долю которых приходится порядка 50% случаев от общего количества опасных явлений погоды. Если статистическая значимость вклада линейного тренда в изменчивость числа случаев с сильным ветром не превышает в среднем 5%, то для осадков он составляет порядка 25 %. В годовом распределении выделяется летний период, когда возросло не только количество, но и интенсивность обложных и ливневых осадков, причем повторяемость ливней более значительно. За последние 25 лет количество сильных ливней возросло на 40%, а наиболее высокие темпы роста их интенсивности приходятся на последнее десятилетие. Наряду с ливнями отмечается рост числа и других явлений конвективного характера, таких как продолжительные грозы и сильный град [5].

Среди регионов России с максимальным ростом числа опасных явлений погоды выделяются Сибирский и Центральный Федеральные округа с годовым максимумом, приходящимся на летние месяцы в Сибири и переходные сезоны года на европейской части территории России. Для сравнения на территории Дальнего Востока выделяются зимний и весенний сезоны, что можно объяснить влиянием термической составляющей океана в это время года. Выделяют три типа изменений сумм осадков: монотонное увеличение или уменьшение экстремальных осадков при увеличении температуры, а также увеличение осадков, которое сменяется уменьшением при превышении некоторого порогового значения температуры [1].

В большинстве регионов России экстремальные суммы атмосферных осадков определяются мезомасштабными проявлениями крупномасштабных форм атмосферной циркуляции на фоне неоднородного рельефа, в первую очередь, это наличие гор и крупных водоемов. Роль горного рельефа проявляется в усилении восходящих потоков, количества орографической облачности и атмосферных осадков на наветренных склонах и нисходящих потоков и фёнового эффекта на подветренных склонах гор. Влияние крупных водоемов сказывается в изменении тепло и влагосодержания воздуха в зависимости от интенсивности сезонного прогревания и охлаждения водоемов. Не случайно, в условиях контрастного по высотам рельефа России преобладают ливневые осадки, среднее годовое количество которых в среднем на 27 % больше количества сумм обложных осадков [3]. Зоной повышенной повторяемости ливней могут быть крупные города, где их количество больше по сравнению с районами, удаленными от их влияния [6]. В качестве причины, вызывающей усиление конвекции над городом, рассматривают влияние городского острова тепла и наличие дополнительных ядер конденсации [8].

В последнее время для объяснения причин экстремальных осадков часто обращаются к термину «глубокой конвекции», предложенному Мэддоксом, когда для развития мощной конвективной облачности необходимо совпадение позиций приземного фронта, горизонтальной оси влаги вдоль течения нижних уровней, смещающейся с запада на восток ложбины на уровне 500 гПа и слабой дивергенции скорости ветра на верхних уровнях. Отмечается, что в настоящее время в Северном полушарии растет повторяемость одновременных выходов южных циклонов в теплое полугодие по четырем направлениям, 2–3 из которых непременно приходятся на Россию. Это ведет к выпадению обильных осадков в разных, далеко отстоящих друг от друга регионах и формированию в них наводнений [2].

Наличие большого числа факторов, определяющих образование атмосферной конвекции; сложность численного описания фазовых переходов влаги в атмосфере и генерации вертикальных движений; широкий диапазон линейных масштабов конвективных явлений, включая явления подсеточного масштаба, все это ограничивает возможности численного моделирования как эффективного инструмента исследования конвективных процессов и сказывается на успешности прогнозирования. Поэтому, на наш взгляд, проведение региональных исследований конвективных процессов, что определило цель и задачи представленной работы, является одной из составляющей улучшения качества прогнозов ливневых осадков.

Методика исследования

Для исследования многолетней динамики максимальных сумм атмосферных осадков выбраны метеорологические станции Иркутск и Ербогачен, расположенные соответственно в южном и северном районах Иркутской области. В теплое время года (IV–IX) для юга области характерны частые выходы циклонических образований с территории Монголии, вызывающие выпадение продолжительных осадков. В холодное время года (X–III) характерно влияние отрога Азиатского антициклона, наиболее выраженное зимой. Для синоптических процессов обширной территории Северного района характерно частое прохождение циклонов и ложбин с юго-запада, запада, северо-запада и севера с фронтальными разделами, проявляющимися в резкой смене температур, с частыми и нередко сильными осадками. В летний период возможно смещение фронтальной зоны с южной составляющей (через Забайкалье) вплоть до северо-восточной части района.

В работе рассматривалась многолетняя динамика максимальных сумм атмосферных осадков на указанных станциях. Временной ряд на ст. Иркутск был более продолжительным (1883–2021 гг.), на ст. Ербогачен более коротким (1945–2021 гг.). Для статистической оценки временных рядов рассчитывались среднее значения, в качестве меры изменчивости временного ряда использовались расчетные значения средних квадратических отклонений, а в качестве критериев оценки временных рядов на однородность центральные моменты третьего и четвертого порядка (асимметрия и эксцесс). Для оценки долговременных тенденций временных рядов месячных сумм атмосферных осадков и числа дней с грозой использовался трендовый анализ (линейный), значимость которого оценивалась по коэффициентам аппроксимации.

Результаты исследований

В исследуемый период 1883–2021 гг. на метеорологической станции Иркутск средние значения максимальных сумм атмосферных осадков, выпавших в течение суток, изменялись от 3 мм в январе и в феврале – период господствующего влияния Азиатского антициклона до 29 мм в июле – период максимальных значений температуры воздуха. На метеорологической станции Ербогачен в период 1945–2021 гг. они варьировали от 3 мм в январе и феврале до 17 мм/сутки в июле. Таким образом, средние значения максимальных сумм атмосферных осадков в г. Иркутске хорошо согласуются с годовым распределением средних значений температуры воздуха и косвенно отражают определяющий вклад прихода солнечной радиации в годовом распределении потоков влаги. Если же мы рассматриваем годовое распределение экстремальных значений суточных сумм атмосферных осадков, то максимум на ст. Иркутск отмечался в июне 1994 г. В этот период увеличение сумм атмосферных осадков наблюдалось над значительной частью Западной Сибири, югом Восточной Сибири, Монголией и Китаем при понижении атмосферного давления в высоких широтах, углублении Исландской депрессии и частом смещении атлантических циклонов вглубь материка (рис. 1, *а*). При норме осадков 62 мм в июне 1994 г. в Иркутске выпало 203 мм, что составило 328 % от климатической нормы. 28 июня 1994 г. количество осадков составило 114 мм и практически вдвое превысило месячную норму. Основные потоки влаги были направлены на территорию Иркутской области с Атлантики и Черного моря. На ст. Ербогачен максимум осадков в исследуемый период отмечался в июне 1962 г., когда отмечалась активизация не только атлантических, но и южных циклонов (рис. 1, *б*), а основные потоки влаги были направлены с центральной части Атлантики, Средиземноморья и Черного моря. 28 июня 1962 г. количество осадков на ст. Ербогачен составило 70 мм и практически вдвое превысило месячную норму.

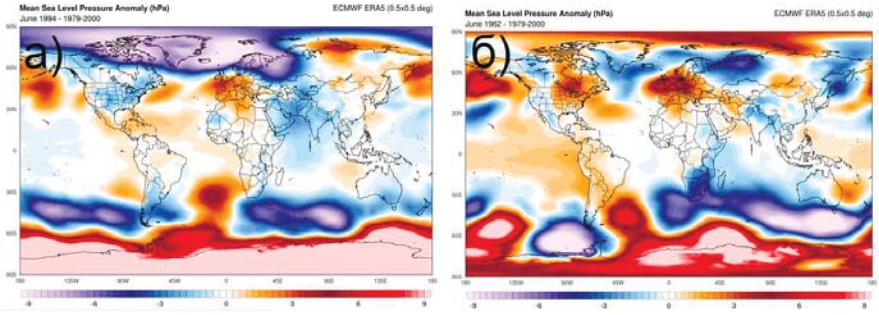


Рис. 1. Аномалии приземного давления в июне 1994 (а) и 1962 г. (б) по данным реанализа ERA5

Исследование многолетней динамики максимальных сумм атмосферных осадков в г. Иркутске за 138-летний период демонстрирует отсутствие значимых линейных трендов. В отдельные годы наблюдаются экстремальные значения, которые указывают на вклад региональных или крупномасштабных атмосферных процессов. При этом около 67 % экстремальных значений суточных максимумов осадков приходятся на период после 1970 г., и только в ноябре 1959 г. (13 мм), в мае 1884 г. (44 мм), в сентябре 1945 г. (61 мм) и в декабре 1902 г. (32 мм), они приходились на более ранний период. Обращает внимание увеличение максимумов осадков в зимние месяцы (январь и февраль) в годы ослабления Азиатского антициклона при усилении процессов подвижного циклогенеза с активными вторжениями теплого воздуха под передней частью высотных макроложбин. Существенно возросла изменчивость максимальных сумм выпавших осадков в августе и ноябре, что хорошо согласуется с периодами продолжительных волн тепла или холода (рис. 2).

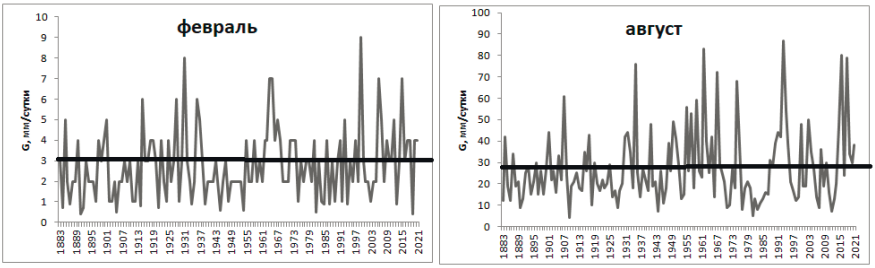


Рис. 2. Изменение максимальных сумм атмосферных осадков (мм/сутки) на метеорологической станции Иркутск в 1883–2021 гг. Линией показаны средние значения

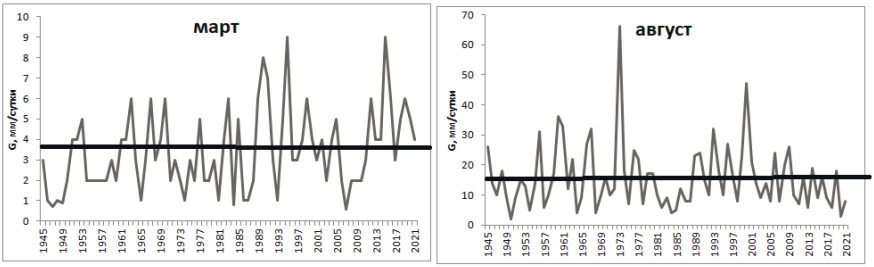


Рис. 3. Изменение максимальных сумм атмосферных осадков (мм/сутки) на метеорологической станции Ербогачен в 1945–2021 гг. Линией показаны средние значения

На севере Иркутской области по данным метеорологической станции Ербогачен порядка 50 % экстремальных значений приходится на период после 1990 г. В многолетней динамике максимальных значений суточных сумм атмосферных осадков аналогично южной станции Иркутск нет статистически значи-

мых линейных трендов. Можно отметить увеличение максимальных сумм атмосферных осадков в переходные сезоны года (март и ноябрь) в период сезонной перестройки крупномасштабных форм атмосферной циркуляции и уменьшение в августе на фоне увеличения частоты процессов блокирования, которые определяют высокую вероятность лесных пожаров на севере Иркутской области в последнее десятилетие (рис. 3).

Анализ синоптических процессов выпадения максимальных сумм атмосферных осадков за последние пять лет (2017–2021 гг.) показал, они носили примерно равновероятно внутримассовый и фронтальный характер. Примерно равновероятно при выпадении максимумов осадков отсутствие или наличие динамически значимой высотной фронтальной зоны с западными и северо-западными потоками и скоростями 20–90 км/ч, а также наличие и отсутствие струйного течения на высотах.

Выводы

Проведенное исследование показало, что в период инструментальных наблюдений на метеорологических станциях Иркутск и Ербогачен, расположенных в южном и северном районах Иркутской области, которые различаются региональными формами атмосферных процессов, не обнаружено значимых линейных трендов в изменениях суточных максимумов атмосферных осадков. В южных районах выявлена тенденция увеличения максимальных сумм атмосферных осадков в январе и феврале на фоне ослабления Азиатского антициклона и в августе при активизации подвижного южного циклогенеза. На севере Иркутской области в отдельные годы возрастают максимумы осадков в переходные сезоны года, прослеживается их уменьшение во второй половине лета на фоне усиления процессов блокирования. В последние десятилетия отмечается увеличение численных значений суточных максимумов осадков, что можно объяснить увеличением интенсивности ливневых осадков на фоне усиления вклада термической составляющей в развитии конвекции при внутримассовых процессах и фронтогенеза при адвекции холода на длительно прогретую подстилающую поверхность. Также нельзя не отметить вклад потоков влаги на высотах при усилении высотных фронтальных зон и связанных с ними струйных течений на высотах.

Список литературы

1. *Алешина М. А., Семенов В. А., Чернокульский А. В.* Связь экстремальных осадков с увеличением температуры: рост или уменьшение? // XIII Сибирское совещание и школа молодых ученых по климато-экологическому мониторингу. Томск, 2019. С. 9–10.

2. *Самохина О. Ф., Кононова Н. К.* Роль циркуляции атмосферы в повторяемости наводнений в России в 2012–2018 гг. // Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России : материалы II Всерос. науч.-практ. конф. Иркутск, 2019. С. 341–349.

3. Observed changes in convective and stratiform precipitation in Northern Eurasia over the last five decades / A. Chernokulsky, F. Kozlov, O. Zolina, O. Bulygina, I. Mokhov, V. Semenov // Environmental Research Letters. 2019. P. 14.

4. *Knist S., Goergen K., Simmer C.* Evaluation and projected changes of precipitation statistics in convection permitting WRF climate simulations over Central Europe // Climate Dynamics. 2018. P. 1–17.

5. *Lenderink G., Van Meijgaard E.* Increase in hourly precipitation extremes beyond expectations from temperature changes // Nature Geoscience. 2008. Vol. 1, N 8. C. 511.

6. *Pinto O. A., Pinto C. A., Ferro M. A. S.* A study of the long-term variability of thunderstorm days in Southeast Brazil // Journal of Geophysical Research. 2013. Vol. 118. P. 5231–5246.

7. *Semenov V., Bengtsson L.* Secular trends in daily precipitation characteristics: Greenhouse gas simulation with a coupled AOGCM // Climate Dynamics. 2002. Vol. 19, N 2. P. 123–140.

8. *Shepherd J. M., Stallins J. A., Jin M.* Urbanization: Impacts on clouds, precipitation, and lightning: Monograph on Urban Ecological Ecosystems / Jacqueline Peterson, Astrid Volder (eds). American Society of Agronomy-Crop Science Society of America–Soil Science Society of America, 2010. 354 p.

9. *Zolina O. G., Bulygina O. N.* Sovremennay aklimaticheskaya izmenchivost harakteristik ekstremalnyh osadkovv Rossii // Fundamentalnaya i prikladnaya klimatologiya. 2016. Vol. 1. P. 84–103.

УДК 551.583.13

Климатический режим ст. Восток

П. А. Мустаева (mustaeva.p@mail.ru), И. В. Латышева (ababab1967@mail.ru)
Иркутский государственный университет, Иркутск

Аннотация. Проанализирована многолетняя динамика средних месячных температур воздуха в районе антарктической станции Восток за период 1948–2021 гг. Выделены периоды наибольших скоростей роста и понижения температуры воздуха, рассмотрены метеорологические условия, определяющие формирование периодов потепления и похолодания на примере сравнительного анализа температурного режима между соседними десятилетиями. Сделан вывод, что в указанные периоды хорошо выражены различия полей атмосферного давления у поверхности Земли и на высотах, ветрового режима в зоне верхнетропосферных струйных течений и общего содержания озона.

Ключевые слова: Антарктида, ст. Восток, минимальные температуры воздуха, потепление, аномалии, парниковые газы, ледяной покров, атмосферные осадки, озон.

Введение

Антарктида является важным пунктом комплексных международных исследований, где в настоящее время осуществляют научно-исследовательскую деятельность 37 станций с общей численностью населения около 3000 человек. Станция России – Восток остается единственной внутриконтинентальной полярной станцией, где 21 июля 1983 г. была зафиксирована самая низкая температура на Земле –89,2 °С [7]. Анализ пузырьков воздуха из толщи антарктического льда, полученного на станции «Восток», позволил восстановить подробную динамику содержания в атмосфере таких парниковых газов, как углекислый газ и метан. Выявлено, что за 420 тыс. лет содержание парниковых газов менялись синхронно и циклически, аналогичную цикличность демонстрировала и температура воздуха [8]. С вероятностью примерно раз в 100 тыс. лет происходило повышение температуры и концентрации парниковых газов, после чего концентрации снижались, и наступал продолжительный период глобального похолодания, который сопровождался значительным увеличением массы ледников [9; 10]. Предполагают, что цикличность изменений температуры воздуха и содержания парниковых газов за последние 400 тыс. лет определялась так называемыми «циклами Миланковича» или регулярными изменениями орбиты Земли, прежде всего сочетанием прецессии и угла наклона оси Земли к эклиптике [3].

Существующие модельные прогнозы изменений климата в XXI в. основываются на увеличении концентрации углекислого газа в атмосфере и последующее за этим повышении средней температуры приземного слоя атмосферы на несколько градусов Цельсия. Однако изучение ледникового керна Антарктического ледникового покрова по данным станции Восток показало, что температурному режиму свойственны периодические колебания, а годовая амплитуда и межгодовые изменения температуры воздуха нередко превышали современные значения. Кроме того, нельзя не учитывать, что основным регулятором содержания углекислого газа в гидросфере, атмосфере и литосфере является океан, энергия которого при взаимодействии с атмосферой на порядки превышает энергию, которая обусловлена антропогенным влиянием. Таким образом, уникальность антарктического льда позволяет изучать проявления глобальных изменений климата на больших временных отрезках [1].

Главные климатообразующие факторы Антарктиды связаны с ее околополюсным расположением, большими высотами материка, высоким альбедо ледяного покрова (порядка 70–90 %) и влиянием океанической поверхности, окружающей материк [2]. Вследствие указанных факторов радиационный баланс за год для Антарктиды, за исключением скал и оазисов, отрицательный, хотя приходящие суммы прямой солнечной радиации в летние месяцы здесь достигают рекордно высоких показателей 1200 МДж/м^2. В атмосферной циркуляции проявляются как широтные, так и меридиональные составляющие ветровых потоков. У побережья Антарктиды в направлении зональных потоков перемещаются глубокие циклоны, которые оказывают отепляющее влияние на внутриконтинентальные районы. Также получают развитие стационарные циклоны. При развитии меридиональных форм атмосферной циркуляции усиливаются гребни антарктического антициклона в направлении к субтропической области повышенного атмосферного давления. В целом для Антарктиды антициклон является относительно устойчивым во времени барическим образованием, несмотря на то что его горизонтальная протяженность и местоположение центра антициклона меняются под влиянием подвижных циклонов. Антарктический антициклон усиливается за счет нисходящих потоков холодного воздуха, расположенного над ним до высот порядка 15 км высотного циклона или так называемого циркумполярного вихря.

Указанные циркуляционные особенности определяют преобладающий характер погоды, который проявляется в ослаблении ветров над центральной частью Антарктиды и их усилении до штормовых значений в области циркумантарктической депрессии, где часто отмечаются штормы и ураганы, которые нередко сопровождаются низовой метелью или поземком. Поступление со стороны материка к морю холодного воздуха, или так называемого стокового ветра усиливает термические и барические градиенты и поддерживает активность циклонов, которые смещаются вдоль побережья. Наиболее сложные погодные условия формируются, когда к побережью подходит циклон и теплый морской воздух проникает вглубь материка.

Результаты исследований

Объект исследования – российская антарктическая внутриконтинентальная научная станция Восток имеет координаты: 78°27′51″ ю. ш., 106°50′14″ в. д. Высота над уровнем моря: составляет 3460 м. Станция была основана 16 декабря 1957 г. во время 2-ой Советской Антарктической экспедиции. По данным за период 1973–2013 гг. средняя годовая температура воздуха на ст. Восток составила –55,3 °С. В годовом распределении минимальные значения средних температур отмечаются в августе и составляют –67,8 °С, а максимальные в декабре (–31,5 °С). Годовая амплитуда температуры воздуха относительно не высока (36,3 °С). Самым теплым летним днем на станции Восток за все время ее существования остается 16 декабря 1957 г., когда термометр зафиксировал температуру –13,6 °С. В условиях сухости воздуха и преобладания антициклонального типа погоды годовые сумм осадков в среднем составляют 18 мм и варьируют в течение года от 0,3 мм в феврале до 3 мм в марте. Среднегодовая скорость ветра равна 5,4 м/с, преобладающее направление ветра запад-юго-запад, а максимальная скорость ветра 27 м/с (97 км/ч). Характерно выпадение мелких ледяных кристаллов при ясном небе («ледяные иглы») в среднем в течение 247 дней в году. Возникновение ледяных кристаллов при безоблачном небе обусловлено адвекцией теплого относительно влажного воздуха на холодный материк [5].

В изменениях среднегодовой температуры воздуха за период 1957–2016 гг. на большинстве станций Антарктиды сохраняется положительный линейный тренд. Однако появление в последние десятилетия отрицательных тенденций свидетельствует о замедлении процесса потепления климата в Антарктиде [11]. Следует учитывать, что длина временных рядов метеорологических станций Антарктиды достигает порядка 60–70 лет, тогда как на Земле существуют естественные циклические изменения климата и других компонентов природной среды с периодами 40–60, 100, 1850, 42 000, около 100 000 лет и более длительные [6; 12]. Поэтому, скорее всего, что колебания климата, амплитуда которых значительно превышает современные значения, существовали всегда в пределах различных интервалов времени [4].

В работе исследованы многолетние данные по температуре воздуха в районе ст. Восток за период 1948–2021 гг., полученные по данным реанализа NCEP/NCAR. В исследуемый период средние значения варьировали от –64,5 °С в августе до –21,5 °С в декабре, что несколько выше значений, полученных ранее по данным самой метеорологической станции за период 1973–2013 гг. В исследуемый нами период максимальные значения средних месячных температур приходятся в январе на 1951 г., в феврале – 1949 г., в марте и августе – 1981 г., в апреле – 2002 г., в мае и июне – 2007 г., в июле – 2008 г., в сентябре – 2013 г., в октябре – 2021 г, в ноябре – 2008 г. и в декабре – 1953 г. Таким образом, в 58 % случаев максимальные значения средних месячных температур в период 1948–2021 гг. приходится на первые два десятилетия XXI в. В распределении минимальных значений средних температур, то в январе они приходятся на 2019 г., в феврале – 2008 г., в марте, июле и октябре – 1960 г., в апреле – 1974 г., в мае – 1976 г., в июне – 1965 г., в августе – 1958 г., в сентябре – 1982 г., в ноябре –

1983 г., в декабре – 1988 г. Таким образом, в отличие от максимальных, минимальные температуры воздуха на ст. Восток в большинстве случаев (58 %) приходятся в холодный период года на 1958–1974 гг., летом на 2008 и 2019 гг.

В таблице показаны средние значения температуры воздуха, рассчитанные по десятилетиям. В период с марта по август (холодный период года на ст. Восток) как самое теплое десятилетие выделяется период 2000–2009 гг., весной 2010–2019 г., а летом 1950–1959 гг. Как наиболее холодные десятилетия в холодный период года выделяются 1960–1969 гг., которые хорошо согласуются во времени с холодным десятилетием на территории Северного полушария. В летние месяцы как самое холодное десятилетие выделяется период 1990–1999 гг. Наиболее высокие средние значения годовой амплитуды температуры воздуха приходятся на первое рассматриваемое десятилетие (1950–1959 гг.), когда июль был одним из самых холодных, а январь самым теплым из рассматриваемых нами десятилетий.

Если рассматривать скорость изменения температуры воздуха, которую мы определяли как разность средних температур между соседними десятилетиями, то в большинстве случаев наиболее быстрый рост температур происходил в 2000–2009 гг. по отношению к предшествующему десятилетию (1990–1999 гг.). Только в марте и августе наибольшие скорости потепления падают на период 1980–1989 гг., а в октябре на 1970–1979 гг. В целом наиболее интенсивный рост средних температур происходил в мае в 2000–2009 гг. (на 5,4 °С по сравнению с предшествующим десятилетием). Наибольшие темпы уменьшения средних температур к значениям предшествующего десятилетия в зимние месяцы на ст. Восток приходятся на 2010–2019 гг., летом и осенью на 1960–1969 гг., а наибольшая скорость понижения средних температур отмечалась в июне 2010–2019 гг. (на 3,2 °С).

Таблица

Средние значения температуры воздуха в районе ст. Восток

Годы/ месяцы	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1950–1959	–18,5	–36,1	–53,6	–63,4	–64,3	–67,0	–66,7	–67,8	–65,0	–50,0	–32,6	–17,4
1960–1969.	–20,8	–35,7	–55,2	–65,1	–66,3	–66,5	–66,9	–68,1	–64,2	–51,5	–32,8	–21,4
1970–1979	–21,0	–36,3	–54,5	–63,2	–64,5	–64,2	–65,4	–66,0	–63,0	–49,3	–33,2	–22,0
1980–1989	–23,4	–38,3	–53,1	–61,8	–63,5	–62,8	–64,6	–63,9	–61,1	–50,4	–35,4	–23,6
1990–1999	–25,4	–37,7	–53,2	–61,3	–64,8	–61,4	–62,3	–63,1	–62,5	–50,9	–34,0	–24,4
2000–2009	–21,3	–36,2	–51,9	–58,5	–59,4	–60,0	–59,8	–61,5	–59,0	–48,9	–32,5	–20,3
2010–2019	–22,1	–36,9	–53,2	–59,7	–61,3	–63,2	–62,0	–61,9	–58,9	–47,4	–31,6	–21,3

Анализ аномалий метеорологических величин в периоды наибольшего повышения и понижения средних температур между десятилетиями в районе ст. Восток показал следующее. Период быстрого роста температур в мае 2000–2009 гг. сопровождался повышением средних температур над значительной частью Антарктиды (рис. 1, *а*), которое происходило на фоне углубления циркумантарктической депрессии (рис. 1, *б*). С адвективными выносами теплого и влажного воздуха в теплых секторах циклонов было связано увеличение сумм

выпавших осадков (рис. 1, *в*), уменьшение площади ледового покрова вдоль антарктического побережья (рис. 1, *г*). Интересно, что потепление в этот период сопровождалось увеличением общего содержания озона (рис. 1, *д*) на фоне повышения геопотенциальных высот верхней тропосферы и усиления ветра в зоне верхнетропосферных струйных течений.

Быстрое понижение зимних температур в Антарктиде на ст. Восток в июне 2010–2019 гг. по сравнению с предшествующим десятилетием происходило при уменьшении средних температур над большей частью материка (рис. 2, *а*) и ослаблении циркумантарктической депрессии (рис. 2, *б*), которое сопровождалось уменьшением количества атмосферных осадков (рис. 2, *в*) и увеличением площади ледового покрова (рис. 2, *г*). В отличие от рассмотренного выше периода потепления при похолодании над Антарктидой происходило значительное ослабление толщины озонового слоя (рис. 2, *д*), которое также сопровождалось понижением средних температур в верхней тропосфере.

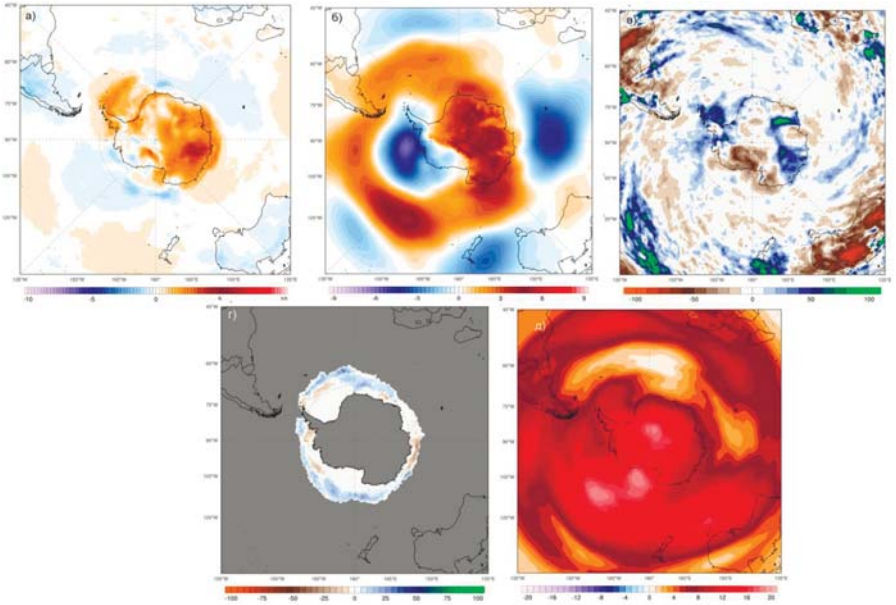


Рис. 1. Разность метеорологических полей: температуры воздуха (а) и атмосферного давления (б) у поверхности Земли, осажденной влаги (в), сплоченности ледяного покрова (г) и общего содержания озона (д) в мае 2000–2009 гг. и 1990–1999 гг.

Выводы

Современные тенденции изменений климатического режима в районе антарктической станции Восток характеризуются разнонаправленными тенденциями в зимние и летние месяцы. В зимние месяцы в последнее десятилетие отмечаются смена тенденций потепления на похолодание с наибольшей скоростью в

начале и в середине зимы на фоне усиления полярного антициклона и ослабления интенсивности ветровых потоков в зоне струйных течений вдоль побережья материка, что сопровождается увеличением площади ледового покрова и уменьшением степени комфортности климата. Как наиболее теплое десятилетие в исследуемый период (1950–2020 гг.) в холодное время года выделяется 2000–2009 гг., в теплый период 1950–1959 гг. Наибольшая скорость повышения температур происходит в мае 2000–2009 гг. на фоне усиления адвективных потоков тепла и влаги и значительного ослабления антициклонального вихря скорости внутри материка. Обращает внимание, что в теплые временные периоды отмечалось увеличение общего содержания озона, а в холодные его уменьшение, что указывает на необходимость более детального исследования процессов взаимодействия тропосферы и стратосферы в годы резкого роста и понижения температуры воздуха в Антарктиде.

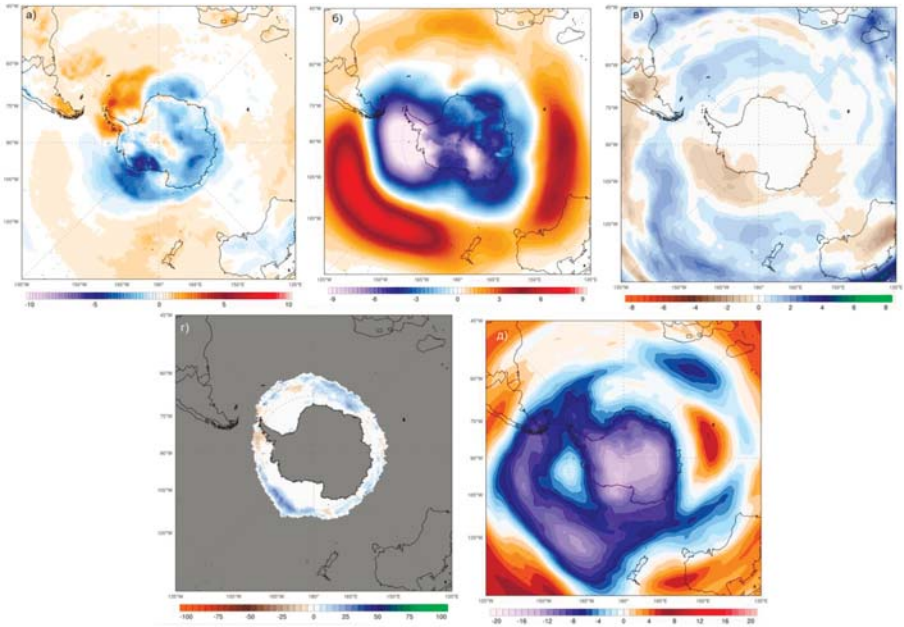


Рис. 2. Разность метеорологических полей: температуры воздуха (а) и атмосферного давления (б) у поверхности Земли, осажденной влаги (в), сплоченности ледяного покрова (г) и общего содержания озона (д) в июне 2010–2019 гг. и 2000–2009 гг.

Список литературы

1. *Анисимов О. А., Белолуцкая М. А., Лобанов В. А.* Современные изменения климата и природной среды в области высоких широт Северного полушария // Метеорология и гидрология. 2003. № 1. С. 18–30.

2. *Большиянов Д. Ю.* Пассивное оледенение Арктики и Антарктиды. СПб. : ААНИИ, 2006. 296 с.

3. *Веркулич С. Р.* Реконструкция голоценовых изменений климата в краевой зоне Восточной Антарктиды на основе изучения донных осадков озер и морских заливов // Известия РАН. Серия география. 2007. № 4. С. 38–43.

4. *Котляков В. М.* География в меняющемся мире. Избранные сочинения. Кн. 3. М. : Наука, 2001. 411 с.

5. *Мельчаков Ю. Л.* Современная физическая география: ретроспектива и тенденции. Екатеринбург : Уральский государственный педагогический университет, 2018. 300 с.

6. Палеоклимат полярных областей Земли в голоцене / под ред.: Д. Ю. Большиянова, С. Р. Веркулича. СПб. : ААНИИ, 2018. 204 с.

7. *Саватюгин Л. М., Преображенская М. А.* Полюс холода / под ред.: И. Е. Фролова, В. Я. Липенкова. СПб. : ААНИИ, 2008. 508 с.

8. *Baroni C., Orombelli G.* Holocene raised beaches at Terra Nova Bay, Victoria Land, Antarctica // Quaternary Research. 1991. Vol. 36. P. 157–177.

9. *Berger G. W., Doran P. T.* Luminescence-dating zeroing tests in Lake Hoare, Taylor Valley, Antarctica // J. Paleolimnology. 2001. Vol. 25. P. 519–529.

10. Palaeoclimatic significance of late Quaternary diatom assemblages from southern Windmill Islands, East Antarctica / H. Cremer, D. Gore, M. Melles, D. Roberts // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. 2003. Vol. 195. P. 261–280.

11. *Jouzel J., Masson V., Cattani O. I.* A new 27 ky high resolution East Antarctic climate record // Geophysical Research Letters. 2001. Vol. 28, N 16. P. 3199–3202.

12. *Roberts D., McMinn A., Zwartz D.* An initial palaeosalinity history of Jaw Lake, Bunger Hills based on a diatom-salinity transfer function applied to sediment cores // Antarctic Science. 2000. Vol. 12, N 2. P. 172–176.

Секция

ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ НА ТРАНСФОРМАЦИЮ ПРИРОДНЫХ И СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

УДК 528.9 (571.53)

Картографирование современных экзогенных процессов (на примере Центральной экологической зоны Байкальской природной территории)

З. В. Абрамова (www.ab.zina@gmail.com), З. О. Литвинцева (zoebuhun@mail.ru)
Иркутский государственный университет, Иркутск

Аннотация. Рассмотрены современные экзогенные процессы Центральной экологической зоны Байкальской природной территории (ЦЭЗ БПТ) и их генезис. Анализ литературных данных, наземных полевых исследований и материалов комической съемки стал основой выбора методики и способов картографирования экзогенных процессов района исследования. Проведено картографирование современных экзогенных процессов ЦЭЗ БПТ.
Ключевые слова: ЦЭЗ БПТ, экзогенные процессы, дешифровочные признаки.

Введение

Современные экзодинамические процессы широко развиты в пределах ЦЭЗ БПТ, которая располагается в пределах объекта Всемирного природного наследия ЮНЕСКО «Озеро Байкал». Их развитие напрямую связано с разнообразием как природных, так и техногенных факторов, которые в значительной мере влияют на интенсивность протекания современных экзогенных процессов. Среди них основными факторами являются: эндогенные процессы (в частности, тектонические движения), генезис и состав горных пород, рельеф (крутизна и экспозиция склонов), особенности климата, наличие многолетней мерзлоты, характер растительного покрова, поверхностные воды и инженерно-хозяйственная деятельность человека. Вышеперечисленные факторы непрерывно взаимодействуют друг с другом, образуя нить причинно-следственных связей.

Методика картографирования экзогенных заключалась в выделении ведущих процессов, где учитывается площадь их распространения, интенсивность развития и продолжительность непрерывного протекания. Комплексный анализ этих параметров позволяет объективно определить ведущий экзогенный процесс в пределах какой-либо территории. Недостатком такой методики является отсутствие достоверных данных о непрерывном протекании процессов, а также об их интенсивности. В связи с этим возникает необходимость использовать разновременные топографические и геологические карты, материалы ДЗЗ, а также данные полевых наблюдений.

Основная часть

При картографировании экзогенных процессов ЦЭЗ БПТ были выделены следующие классы: криогенный (мерзлотный), гравитационно-склоновый, криогенно-склоновый, склоновый гидрогенного сползания и течения, склоновый водно-эрозионный, гляциальный, береговой, эоловый, флювиальный, подземно-водный и фитогенный.

В основу карты современных экзогенных процессов был положен принцип выделения ведущего процесса, под воздействием которого возникает определенная форма рельефа и условия протекания второстепенных ему процессов. При генерализации основного процесса также отображены сопутствующие или локальные экзогенные проявления, что в значительной степени увеличило информационную емкость карты.

Пространственное отображение ведущих процессов было реализовано за счет определения основных форм рельефа, которые дали подробные сведения о современных экзогенных процессах.

На основе полученных данных в пределах района исследования выделены следующие формы рельефа: бугры пучения и термокарстовые западины (криогенный процесс), ниши срыва, обвальные, лавинные и осыпные конусы (гравитационно-склоновый), курумы и россыпи (криогенно-склоновый), овраги и промоины (склоновый водно-эрозионный), русла и поймы рек (флювиальный), торфяники (фитогенный), дюны и котловины (ячеи) выдувания (эоловый), абразионные уступы и пляжи (береговой), а также территории без яркого выражения в рельефе, иногда с гофрированными склонами (крип).

В исследовании были использованы для определения основных форм рельефа, в качестве исходных данных спутниковые снимки Landsat 7, 8 (которые имеют пространственное разрешение – 30 м), геологические и топографические карты масштаба 1:200 000 [2; 6], а также иные опубликованные материалы по данной проблеме. В 2016–2017 гг. проведены наземные полевые исследования.

Создание карты современных экзогенных процессов ЦЭЗ БПТ проводилось на основе классификации экзогенных процессов рельефообразования суши В. Б. Выркина [4], районирования ЦЭЗ БПТ по характеру и интенсивности протекания опасных экзогенных и береговых процессов В. М. Плюснина, И. Н. Владимирова [8]. Районирование состояло из 38 разнородных участков, где основными критериями выделения стали: морфология рельефа, особенности пространственно-временного развития обвалов и осыпей, эрозионных процессов, дефляции, лавин, курумов, селей, оползней и оползней-сплывов, фитогенных процессов, карста и некоторых других процессов наряду с ландшафтными характеристиками, а также характера горных пород и отложений. Также были использованы материалы Б. П. Агафонова, С. Вика, В. А. Пеллинена, Е. А. Козыревой и других авторов, исследовавших ЦЭЗ БПТ по данной проблематике [1; 3; 5].

Выделенные формы рельефа на основе дешифровочных признаков и дополнительных материалов позволили отобразить ареалы экзогенных процессов в пределах района исследования (рис.).

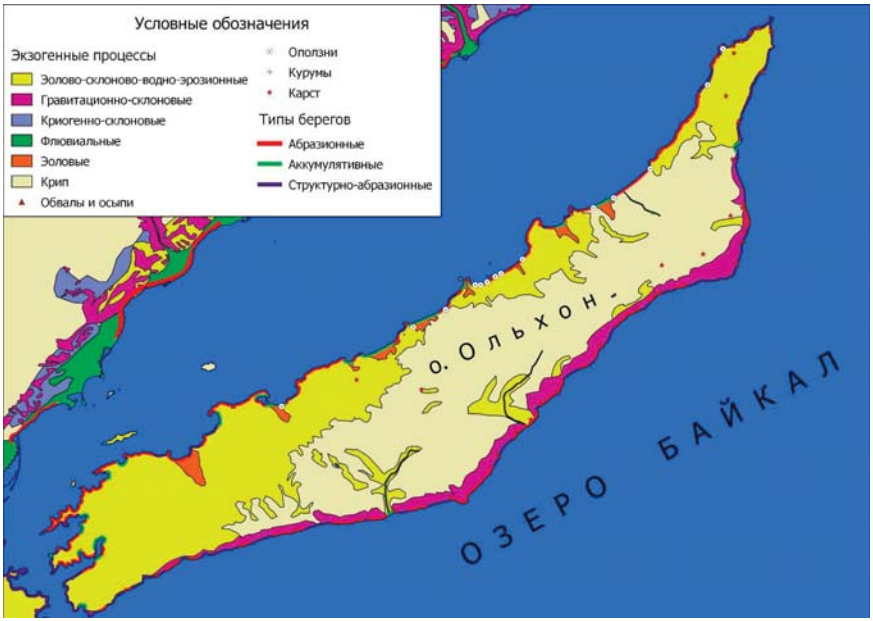


Рис. Фрагмент карты распространения современных экзогенных процессов ЦЭЗ БПТ в масштабе 1:200 000

На острове Ольхон и прилегающих территориях получили распространение следующие экзогенные процессы: эоловые, флювиальные, эолово-склоново-водно-эрозионные, гравитационно-склоновые, оползневые, криогенно-склоновые, криогенные, крип и некоторые другие.

Эоловые процессы дешифрируются на снимках в виде белых, бело-желтых пятен, отражающих слабо заросшие либо оголенные песчаные массивы. Чаще такие формы представлены в виде песчаных гряд и дюн, вытянутых в направлении от побережья в глубь территории (см. рис.).

Ареалы флювиального процесса (эрозии, аккумуляции временных и постоянных водотоков) приурочены к районам водотоков, пойм и озерно-аллювиальных равнин. На спутниковых снимках они легко распознаются по руслам рек, включающим меандры русел, излучины, межрусловые острова.

Водно-эрозионные процессы дешифрируются по характерным очертаниям (например, овражно-балочная сеть характеризуется древовидным рисунком изображения) и более светлому тону, отличному от задернованных поверхностей [9]. Основным ареалом процесса стали степные и лесостепные комплексы.

Хорошо дешифрируются гравитационно-склоновые процессы. Например, обвалы и осыпи определяются по степени освещенности, затененности склонов и характерным конусам выноса [7]. Обычно такие склоны имеют оттенки серого цвета, который указывает на отсутствие растительности.

Оползневые процессы на общем фоне рисунка выделяются, как инородные тела. В рельефе они выражены ступенчатым строением, прослеживаются наплывы, растительный покров разрежен. Дешифрируются по обнажению горных пород на стенке срыва, что подтверждается данными полевых исследований. Со временем оползни сглаживаются и теряют свою резкость по отношению к общему фону рисунка.

На космоснимках практически не дешифруются медленные криогенно-склоновые (солифлюкция, дефлюкция, десерпция, крип) и криогенные (термокарст, пучение грунтов, наледеобразования и другое) процессы. Поэтому, при картографировании ведущих экзогенных процессов рельефообразования важно применять не только анализ литературных данных и дешифрирование космоснимков, но данные наземных полевых наблюдений. В рамках подобной экспедиции на о. Ольхон был обнаружен крип, характеризующийся крипповыми террасами.

Заключение

Проведено картирование современных экзогенных процессов на основе анализа опубликованных данных, наземных полевых исследованиях, материалов космической съемки низкого и среднего разрешения (Landsat 7, 8). В рамках данной статьи, в качестве репрезентативного примера был выбран о. Ольхон и прилегающие к нему территории для наглядного представления распространения современных экзогенных процессов ЦЭЗ БПТ, в масштабе 1:200 000. Картографирование проведено с использованием программного обеспечения QGIS.

В прикладном аспекте результаты исследования могут быть использованы в качестве теоретической и практической базы для разработки программ по планированию снижения влияния экзогенных процессов на слабоустойчивые геосистемы ЦЭЗ БПТ, селитебные и прилегающие к ним территории.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований проект № 20-05-00253.

Список литературы

1. *Агафонов Б. П.* Распространение и прогноз физико-географических процессов в Байкальской впадине // Динамика Байкальской впадины. Новосибирск : Наука, 1975. С. 59–137.

2. База данных Государственных геологических карт. URL: http://webmapget.vsegei.ru/index.html (дата обращения: 19.06.2021).

3. *Вика С.* Ландшафты подвижных песков острова Ольхон на Байкале. Иркутск : Ин-т географии В. Б. Сочавы СО РАН, 1997. 63 с.

4. *Выркин В. Б.* Классификация экзогенных процессов рельефообразования. Новосибирск : Наука, 1986. С. 20–24.

5. *Козырева Е. А., Кадетова А. В., Рыбченко А. А.* Типизация и современное состояние берегов озера Байкал // Водные ресурсы. 2020. № 4. С. 453–465.

6. Охрана озера Байкал. URL: http://www.geol.irk.ru/baikal/terr/mterrmap/terrmapred2-2012/terrmap-cez-200-2012 (дата обращения: 19.06.2021).

7. Пермский государственный национальный исследовательский университет. URL: http://www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-posobiya/shikhov-gerasimov-ponomarchuk-perminova-tematicheskoe-deshifrovanie-i-interpretaciya-kosmicheskih-snimkov.pdf (дата обращения: 25.06.2021).

8. *Плюснин В. М., Владимирова И. Н.* Территориальное планирование Центральной экологической зоны Байкальской природной территории. Новосибирск : Гео, 2013. 407 с.

9. Студенческая библиотека онлайн. URL: https://studbooks.net/2319120/nedvizhimost/deshifrovochnye priznaki (дата обращения: 25.06.2021).

УДК 551.577.6:625.7/.8(476)

Оценка влияния опасных гидрометеорологических явлений на состояние автомобильных дорог Беларуси: результаты апробации методики расчета экономического эффекта

В. М. Лаппо (basil.lappo@gmail.com), Ю. А. Гледко (gledko74@mail.ru)
Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Рассмотрены опасные гидрометеорологические явления холодного периода года, влияющие на состояние автомобильных дорог Республики Беларусь. На примере участка автомобильной дороги Р-23 (Минск – Слуцк) проведена оценка экономического эффекта использования гидрометеорологической информации при эксплуатации автомобильных дорог, выявлены недостатки принятой методики.

Ключевые слова: опасные гидрометеорологические явления (ОЯ), неблагоприятные гидрометеорологические явления (НЯ), транспорт, дорожные измерительные станции (ДИС), гололед, скользкость, снегозаносимость, дорожное хозяйство, экономический эффект.

Дорожное хозяйство Республики Беларусь является сложной структурой, включающим в себя непосредственно сеть автодорог, а также поток транспортных средств, осуществляющих перемещение в личных и производственных интересах, и постоянно находится под влиянием погодных условий и климата. Главные преимущества автотранспорта – высокая маневренность, скорость и универсальность. Качество и эффективность работы автомобильного транспорта зависят от протяженности и состояния автодорожной сети, основу которой составляют дороги с твердым покрытием. Протяженность автомобильных дорог с твердым покрытием в Беларуси на 01.01.2020 составляет 89,1 тыс. км. Специфика работы автомобильного транспорта состоит в том, что в течение всего года транспортные операции осуществляются на открытом воздухе, кроме того, автомобильный транспорт обладает достаточной маневренностью, что в определенных ситуациях способствует выбору более благоприятного пути следования. Успешная работа автомобильного транспорта зависит также от правильной эксплуатации дорог, от их технического состояния, отвечающего современным требованиям скоростного оборота грузов, и, конечно, от эффективного специализированного метеорологического обеспечения [1].

Метеорологические наблюдения на автомобильных дорогах Беларуси производятся с помощью дорожных измерительных станций (ДИС), сеть которых распространена равномерно с незначительным сгущением на основных автомагистралях и транспортных коридорах. Дорожные измерительные станции получают данные о состоянии дорожного покрытия и окружающей атмосферы путем измерений. Системы размещаются на определенных участках дороги, при этом под дорожное полотно и на стойку устанавливают электронную измерительную технику, поскольку она позволяет осуществлять длительные автоматические измерения, регистрацию, передачу данных измерения на расстояние, а также ана-

лизировать и обрабатывать эти данные. Система содержит произвольное количество дорожных и центральных станций; их сеть может быть расширена по мере возможности и необходимости.

Вопрос об оценке влияния опасных метеорологических явлений на различные виды экономический деятельности в Республике Беларусь стоит остро, так как отсутствуют полноценные работы по данной проблеме. Данный вопрос, исходя из литературных источников, является хорошо изученным с точки зрения метеорологической составляющей, чему свидетельствует ряд работ академика В. Ф. Логинова, а также его коллег из института природопользования НАН Беларуси (А. А. Волчек, И. Н. Шпока). Также данным вопросом занимаются ведущие вузы Республики Беларусь: Белорусский государственный университет (БГУ) и Белорусский национальный технический университет (БНТУ). Сотрудники кафедры Общего землеведения и гидрометеорологии факультета географии и геоинформатики (ФГиГ) БГУ под руководством Ю. А. Гледко занимаются исследованием влияния метеорологических явлений на различные виды экономической деятельности и методов прогнозирования неблагоприятных и опасных метеорологических явлений. Сотрудники кафедры Автомобильные дороги факультета транспортных коммуникаций (ФТК) БНТУ под руководством Е. П. Ходан занимаются исследованием влияния метеорологических явлений на автодорожное полотно и методов борьбы с неблагоприятными метеорологическими явлениями [3].

В Беларуси теме влияния опасных гидрометеорологических явлений (ОЯ) на различные виды экономической деятельности посвящены работы М. Г. Герменчук, Д. А. Рябова и других [2, 4]. В России по данной проблеме опубликован ряд работ с указанием методик оценки влияния опасных метеорологических явлений на различные виды экономической деятельности [5–8]. В будущем стоит применить опыт российских коллег в условиях Республики Беларусь.

Наиболее сложные погодные условия для автомобильного транспорта складываются зимой и в переходные сезоны (табл. 1).

Таблица 1

Опасные метеорологические явления зимнего периода для автотранспорта

Явление	Критерии ОЯ	Вид ущерба и защитные меры
Метель	Скорость ветра более 15 м/с, видимость менее 200 м, продолжительность более 3 ч	Простой автотранспорта, закрытие трасс
Снегопады	Количество осадков более 30 мм, продолжительность более 3 ч	Ухудшение видимости, простой автотранспорта, расчистка трасс
Гололедные явления (гололедица)	Продолжительность более 3 ч	Простой автотранспорта, опасная дорожно-транспортная ситуация, посыпка дорог

Все метеорологические явления в зимний период опасны таким показателем как скользкость. Скользкость определяется снижением коэффициента трения с дорожным полотном. Зимняя скользкость зависит от частоты, интенсивности и продолжительности снегопадов, метелей и обледенения дорог, а также от температуры воздуха при которых данное метеоявление наблюдается. Каждый вид зимней скользкости определяется своим критерием и процессом образования (табл. 2).

Таблица 2

Виды скользкости и процессы ее образования

Вид зимней скользкости	Агрегатное состояние осадков	Процесс образования
Гололед	Жидкое	Замерзание дождя или измороси
Изморозь	Парообразное	Отложение льда при тумане в результате десублимации водяного пара и замерзание капель переохлажденного тумана
Иней	Парообразное	Тонкий слой ледяных кристаллов на поверхности дорожного покрытия, образующийся из водяного пара атмосферы
Рыхлый снег	Твердое	Во время снегопада или метели
Снежный накат	Твердое	Уплотнение рыхлого снега
Снежно-ледяной накат	Твердое	Замерзание переувлажненного снега

Гололедные явления наиболее опасный вид зимней скользкости, поэтому дорожные измерительные станции способны автоматически регистрировать ОЯ, тем самым своевременно информировать потребителей о сложившейся ситуации через информационное табло (при его наличии), а также передавать данные в информационный центр по каналам связи, что позволит в кратчайшие сроки провести мероприятия по профилактике или борьбе с данным метеорологическим явлением. ДИС определяет гололед и иней по вероятным условиям возникновения, полученные опытным путем, и подтверждает дорожными датчиками (табл. 3)

Таблица 3

Условия образования гололеда и инея на дорожном покрытии

Метеорологический элемент	Гололед	Иней
Температура воздуха	–2 – –12	1 – –7
Относительная влажность	83 – 100	86 – 100
Точка росы	–3 – –14	0 – –8
Температура поверхности покрытия	–2 – –11	0 – –8

Оценку влияния гидрометеорологического явления на определенный вид экономической деятельности можно определять через количественный показатель экономического эффекта. Экономический эффект, в свою очередь, определяется как фактически сбереженные материальные средства хозяйствующего субъекта в результате использования гидрометеорологической информационной продукции (данных о фактической погоде, прогноза или обобщенной климатической продукции) за вычетом затрат на приобретение этой продукции [6].

Оценка экономического эффекта проводилась по методике, разработанной сотрудниками Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации (ВНИИГМИ) и Воронежского государственного архитектурно-строительного университета (ВГАСУ) профессором Т. В. Самодуровой, доцентом Ю. В. Федоровой. Расчет матриц сопряженности производился по программе, разработанной доцентом Российского государственного гидрометеорологического университета (РГГМУ) А. А. Фокичевой. Программа для компьютерных расчетов разработана инженером ВГАСУ А. П. Гурьевым.

Оценка экономического эффекта проводилась на примере зимнего содержания автомобильных дорог Беларуси, по причине того, что в зимний период дороги особенно подвержены влиянию погодных условий. Зимнее содержание дорог – комплекс мероприятий по обеспечению безопасного и бесперебойного движения на автомобильной дороге в зимний период, включающий: защиту автомобильных дорог от снежных заносов, борьбу с зимней скользкостью, очистку автомобильных дорог от снега.

Методика рассчитана на два основных вида скользкости, которые наиболее часто вызывают дорожно-транспортные происшествия – снежный накат и гололедица. Расчет ведется по каждому виду отдельно, для этого составляется матрица потерь при образовании зимней скользкости.

Для расчета экономического эффекта требуются следующие исходные данные: наименование дороги, техническая категория дороги, интенсивность движения на изучаемом участке, принятый уровень содержания, протяженность участка дорожного полотна, стоимость противогололедных материалов, а также прогностическая и фактическая гидрометеорологическая информация. Прогностическая информации получена по данным Республиканского центра по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды, фактическую гидрометеорологическую информацию предоставляет автоматизированная система «Магистраль».

В программу расчета экономического эффекта исходные данные вводятся в ряд таблиц. В таблицу «База дорог» (рис. 1) вводятся: название автомобильной дороги, техническая категория, уровень содержания и интенсивность.

Название	Техническая категория	Уровень содержания в соответствии с РД 0219.1.18-2000	Интенсивность авт/сут
Р-23	I6	1	12281
Р-23(1)	I6	1	18062
Р-23(2)	I6	1	14236
Р-23(3)	I6	1	10945
Р-23(4)	I6	1	9 885

Рис. 1. Таблица «База дорог»

В таблицу «Исходные данные» (рис. 2) вносятся следующие исходные данные: продолжительность расчетного участка, вид зимней скользкости, прогнозируемая температура при образовании, стоимость 1 т противогололедных материалов, а также курс белорусского рубля (по отношению к российскому). В таблицу «Метеорологические данные» (рис. 3) вводится прогностическая и фактическая информация.

Особенность ввода метеорологических данных заключается в том, что значение «1» означает, что метеорологическое явления было спрогнозировано или

наблюдалось, а значение «0», что прогноз отсутствует или явление не наблюдалось. Данная особенность является недостатком данной методики. При неоднократной повторяемости явления на практике применялось суммирование экономических эффектов за каждый случай явления.

На практике расчет экономического эффекта от использования гидрометеорологической информации проводился для участка дороги Р-23 (Минск – Слуцк).

Исходные данные		*Стоимости материалов*	
Участок дороги	Р-23	Стоимость 1 т ПГМ, белорусские рубли	77
Протяженность участка	71,3	*Курс белорусского рубля(по отношению к российскому)*	
Прогнозируемый вид скользкозти в соответствии с ТКП - 100.2011	Снежный и снежно-ледяной накат	1 белорусский рубль	30,78
Прогнозируемая температура при образовании	от 0 до -2		

Рис. 2. Таблица «Исходные данные»

дата		прогноз	факт
месяц	число		
ФЕВРАЛЬ	1	1	1
	2	1	1
	3	1	1
	4	1	0
	5	1	1
	6	1	1
	7	0	1
	8	0	0
	9	0	0
	10	0	1
	11	0	0
	12	0	0
	13	0	0
	14	0	0
	15	0	0
	16	0	0
	17	0	0
	18	0	0
	19	0	0
	20	0	0
	21	0	1
	22	1	1
	23	1	1
	24	1	1
	25	1	1
	26	1	1
	27	0	0
	28	0	0

Рис. 3. Таблица «Метеорологические данные»

За наблюдаемый период с 1 февраля по 30 апреля 2017 г. для данного участка автодороги Республиканским центром по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды был дан прогноз 17 случаев выпадения снега, 14 случаев было подтвержден дорожными измерительными станциями, 2 случая было зарегистрировано, но не спрогнозировано. Прогноз о возникновении гололедицы был дан 21 раз при этом все случаи были подтверждены, однако 2 случая не были спрогнозированы. Все вышеперечисленные данные были внесены в программу расчета экономического эффекта от использования гидрометеорологической информации, результаты расчета представлены в табл. 4.

Таблица 4

Экономический эффект при прогнозировании гололедицы

Участок автодороги	Экономический эффект, BYN		
	Для государства	Для дорожной организации	Общий
Весь участок Р-23	248 750	53 390	302 140
1 подучасток	61 250	8800	70 050
2 подучасток	46 850	8690	55 540
3 подучасток	59 720	17 090	76 820
4 подучасток	57 970	18 800	76 770
Сумма	225 790	53 390	279 180

Таким образом, экономический эффект при прогнозировании гололедицы составляет 279 180 белорусских рублей. Адаптация автотранспортной системы к ожидаемой погоде является одним из важнейших показателей, характеризующих возможность эффективно использовать гидрометеорологическую информацию, тем самым экономить денежные средства на содержание автомобильных дорог в надлежащем состоянии.

При расчете экономического эффекта по методике, разработанной сотрудниками Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации (ВНИИГМИ) и Воронежского государственного архитектурно-строительного университета (ВГАСУ) профессором Т. В. Самодуровой, доцентом Ю. В. Федоровой, было выявлено ряд недостатков. Они делятся на два типа: недостатки методики и недостатки прогностической информации. К первому типу относятся: расчет затрат на проведение работ идет без учета площади дорожного полотна, не учтена специфика автодороги как линейного объекта, не учитывается продолжительность и интенсивность метеорологического явления, расчет идет только для явлений холодного периода года. Ко второму типу: не использование численных методов прогнозирования, отсутствие учета данных дорожных измерительных станций (ДИС) при составлении прогноза.

Список литературы

1. *Гледко Ю. А*. Обеспечение потребителей гидрометеорологической информацией : пособие. Минск : БГУ, 2017. 1 электронный оптический диск.

2. *Герменчук М. Г., Мельник В. И*. Оценки экономической эффективности обслуживания гидрометеорологической информацией отраслей экономики в Республике Беларусь // Природные ресурсы. 2007. № 3. С. 95–97.

3. *Леонович И. И.* Дорожная климатология : учеб. пособие для вузов по специальности 1-70 03 01 «Автомобильные дороги» и для инженерно-технических работников ДСТ, ДСУ, ДЭУ и других организаций. БНТУ, 2007.

4. *Рябов Д. А.* Об используемых методиках расчета экономической эффективности гидрометеорологического обеспечения отраслей экономики и предложения по приданию им официального статуса. Минск : РГМЦ, 2013.

5. *Хандожко Л. А.*, *Коршунов А. А., Фокичева А. А.* Выбор оптимального погодо-хозяйственого решения на основе прогноза гидрометеорологических условий // Метеорология и гидрология. 2003. № 1. С. 5–17.

6. *Хандожко Л. А.*, *Коршунов А. А.* Показатели влияния погодных условий на экономику: оценка коэффициента непредотвращенных потерь // Метеорология и гидрология. 2000. № 12. С. 14–23.

7. *Хандожко Л. А.* Экономическая метеорология : учебник. СПб., 2005. 489 с.

8. *Фокичева, А. А., Рыбанова А. Ю., Коршунов А. А.* Обеспечение гидрометеорологической безопасности в нестабильных климатических условиях на примере адаптации автотранспортной системы к неблагоприятной погоде // Метеорология и гидрология. 2014. № 11. С. 25–43.

УДК 556.16

Современные изменения речного стока в бассейнах рек Алдан и Вилюй

Л. С. Лебедева (lyudmilaslebedeva@gmail.com)[1]

Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, Якутск

Аннотация. В северных регионах России климат меняется интенсивнее, чем в умеренной зоне. Актуальными вопросами остаются оценка изменений речного стока северных рек. Целью исследования является оценить наличие и отсутствие статистически значимых трендов в рядах расходов воды по выборкам различной продолжительности на действующих постах на водосборе Вилюйского водохранилища и в бассейне р. Алдан. Наличие и отсутствие статистически значимого тренда зависит от продолжительности анализируемого ряда и охвата конкретных лет. Реки на водосборе Вилюйского водохранилища показывают меньше трендов расходов воды по месяцам, чем в бассейне р. Алдан. Причины изменений речного стока могут быть связаны с увеличением атмосферных осадков и температуры воздуха в осенне-зимний период, а также с деградацией криолитозоны и трансформацией поверхностных и подземных путей движения воды на водосборах.

Ключевые слова: речной сток, изменения стока, изменение климата, р. Алдан, р. Вилюй, стационарность временных рядов.

Введение

В северных регионах России климат меняется интенсивнее, чем в умеренной зоне. Температура воздуха в Восточной Сибири растет на 0,4–0,9 град/10 лет, наиболее интенсивно – весной и осенью [2]. Осадки также показывают тенденцию к увеличению. Актуальными вопросами остаются оценка изменений речного стока северных рек и описание механизмов этих изменений. По результатам Н. Л. Фроловой [4] годовой сток большинства арктических рек России увеличился на 4–18 % в 1976–2014 гг. в сравнении с периодом 1936–1975 гг. Оценка изменений речного стока северных рек осложняется недостатком данных. Практически отсутствуют ряды наблюдений длительностью более 60 лет, позволяющие судить о наличии или отсутствии трендов. Во многих исследованиях изменений водности северных регионов рассматриваются данные только

по замыкающим постам крупных рек, включая р. Лена. Лишь в некоторых работах анализируются изменения стока средних и малых рек [1; 5–7], которые могут показывать противоположные тенденции по сравнению с крупными реками [3]. Юмина и Терешина [5] показали, что годовой сток р Вилюй увеличивается с середины 1980-х гг., но притоки реки имеют различные тенденции.

При анализе гидрологических изменений пользуются различными методами оценки трендов. Хотя длина ряда во многом определяет результат статистического теста, ограниченность натурной гидрометеорологической информации приводит к тому, что во многих исследованиях сравниваются результаты анализа рядов различной продолжительности [6; 7], что затрудняет их интерпретацию. Наличие циклов водности различной продолжительности приводит к тому, что изменение длины анализируемого ряда даже на 1–2 года может изменить результат статистического теста.

Целью исследования является оценить наличие и отсутствие статистически значимых трендов в рядах расходов воды по выборкам различной продолжительности на действующих постах на водосборе Вилюйского водохранилища и в бассейне р. Алдан. Выбранные гидрологические посты находятся на незарегулированных реках на водосборах двух крупнейших притоков р. Лены.

Объекты исследования

В бассейне р. Алдан было выбрано 11 гидрологических постов с продолжительностью непрерывных рядов наблюдений за стоком от 69 до 92 лет (табл.). Медианное значение длины анализируемых рядов составляет 81 год. Площадь исследуемых водосборов варьируется от 613 до 696 000 км^2 с медианным значением 49 500 км^2. Минимальный, медианный и максимальный среднегодовой расход воды составляет 9,3, 199 и 5 408 м^3/с, среднегодовой слой стока – 100, 268 и 477 мм/год. На водосборе Вилюйского водохранилища площадью 141 150 км^2 функционирует восемь гидрологических постов, на которых измеряется расход воды в течение периода от 40 до 50 лет (табл.). Площади водосборов составляют от 850 до 57 300 км^2 с медианным значением 3 755 км^2. Минимальный, медианный и максимальный среднегодовой расход воды составляет 4,5, 16 и 380 м^3/с, среднегодовой слой стока – 105, 134 и 208 мм/год.

Методы

Стационарность временных рядов расходов воды была проверена относительно наличия монотонных трендов с помощью непараметрических критериев ранговой корреляции Манна-Кендалла и Спирмена со значением $p < 0{,}05$. В тех случаях, когда оба теста указывали на наличие тренда, 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 prewhitening). «Очищенные» ряды вторично тестировались с помощью непараметрического критерия Манна-Кендалла со значением $p < 0{,}05$ и делался окончательный вывод о наличии или отсутствии статистически значимого тренда [6; 7].

Таблица

Характеристики исследуемых водосборов и доли выборок расходов по месяцам с положительными, отрицательными трендами и их отсутствием

Река – пост	Код	Площадь водосбора, км^2	Среднемноголетний расход воды, м^3/с	Среднемноголетний слой стока, мм/год	Период наблюдений, годы	Количество выборок	Положительные тренды, %	Отрицательные тренды, %	Отсутствие трендов, %	Нет данных, %
Алдан – г. Томмот	3219	49 500	536	342	88	3180	23,4	0,3	76,3	0
Алдан – с. Усть-Миль	3222	269 000	2852	334	84	2484	39	0	61	0
Алдан – с. Охотский перевоз	3225	514 000	4362	268	92	3432	28,5	0	71,5	0
Алдан – ГМС Верхоянский перевоз	3229	696 000	5408	245	76	1776	50,3	0,1	49,6	0
Улахан-Ньымньыыр – р. п. Большой Нимныр	3234	1900	27	447	70	1260	66,9	0,1	33,0	0
Тимптон – р. п. Нагорный	3246	613	9	477	84	2592	2,7	0,3	72	25
Чульман – р. п. Чульман	3252	3840	54	442	69	1188	22,7	6,7	70,5	0,1
Аллах-Юнь – г. п. Аллах	3277	24 200	186	243	73	1512	19,6	6,2	74,2	
Амга – с. Буяга	3291	23 900	128	169	81	2268	24,2	0	75,8	
Амга – с. Амга	3292	56 800	199	111	79	2064	33,2	0	66,8	
Амга – с. Терють	3293	65 400	210	101	78	1968	47,7	0	52,3	
Вилюй – г. п. Усть-Амбардах	3310	57 300	379	208	50	504	25	0	75	0
Чуркуо –г. п. Лавинда	3579	4130	17	133	42	252	6	7	87	0
Улахан-Эдьэк – г. п. Дальний	3560	854	4,6	169	41	216	12	0	78	10
Чона – г. п. Чона	3334	21 000	82	124	43	288	0	16	84	0
Ичода – г. п. Майский	3625	2820	12	129	44	360	12	0	88	0
Дьэкиндэ – г. п. Улар	3597	1490	4,9	105	40	180	2	3	93	1
Ахтаранда – г. п. Сюрях-Хая	3341	11 600	50	136	42	252	29	0	71	0
Батыр – г. п. Ясный	3344	3380	15	137	48	504	10	0	87	3

В работе использовался подход смещающейся выборки. По каждому посту анализировались выборки расходов воды по месяцам продолжительностью 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85 и 90 лет. Для оценки устойчивости наличия или отсутствия тренда во времени анализировались все возможные выборки заданной продолжительности из массива наблюденных расходов по посту, т. е. ряды заданной продолжительности выбирались, начиная со всех возможных лет в массиве. По 8 постам на водосборе Вилюйского водохранилища с периодами наличия данных от 40 до 50 лет обработано 2 556 выборок расходов воды по месяцам продолжительностью 30, 35, 40 и 45 лет, а также 224 выборки максимальных и 170 выборок минимальных расходов. По 11 постам в бассейне р. Алдан обработано 23 724 выборок расходов воды по месяцам, а также 2565 выборки максимальных расходов и 2348 выборок минимальных расходов.

Результаты

Медианное значение доли положительных трендов в бассейне р. Алдан составляет 28,5 %, отсутствия трендов – 70,5 %, на водосборе Вилюйского водохранилища – 13,3 и 82,6 % соответственно. На всех исследованных постах наличие и отсутствие тренда зависит от продолжительности анализируемого ряда и охвата конкретных лет. Длинные ряды показывают больше положительных трендов, чем короткие. Чем позже (ближе к настоящему) последний год выборки, тем выше доля положительных трендов.

В бассейне р. Алдан небольшие водосборы, с одним исключением, показывают меньше положительных трендов, чем более крупные речные бассейны. Наименьший по площади водосбор, р. Тимптон – Нагорный (613 км^2), имеет только 3 % выборок с положительными трендами. Второй наименьший по площади водосбор, Улахан Нимныр – Большой Нимныр (1900 км^2), напротив, показывает возрастание стока на рекордной доле выборок – 67 %. Крупные бассейны р. Алдан – Верхоянский Перевоз (696 000 кв. км) и р. Амга – Терют (65 400 км^2) показывают примерно по 50 % выборок с положительными трендами и с отсутствием каких-либо трендов. Доля выборок с положительными трендами на остальных постах варьируется от 19 до 39%. На водосборе Вилюйского водохранилища наблюдается схожая тенденция – чем больше площадь водосбора, тем выше процент выборок с положительным трендом. Среди восьми исследуемых постов наибольшая доля положительных статистически значимых трендов зафиксирована на крупных реках – р. Ахтаранда – г. п. Сюрях-Хая (29 %) и р. Вилюй – г. п. Усть-Амбардах (25 %).

Распределение доли положительных трендов сезонно. В бассейне р. Алдан в июне сток практически на всех постах стабилен вне зависимости от продолжительности ряда и охвата определенных лет. Доля выборок с положительными трендами возрастает в рядах расходов с октября по апрель. Больше половины выборок за апрель показывают положительные тренды. На водосборе Вилюйского вдхр. больше всего трендов наблюдается в апреле, июле и с сентября по январь. На р. Ахтаранда-г.п. Сюрях-Хая положительные тренды преобладают в декабре и январе, а также фиксируются в апреле, июле, сентябре, октябре и ноябре. На р. Вилюй – г. п. Усть-Амбардах тренды наблюдаются в январе, апреле, сентябре,

ноябре и декабре. Выясненное увеличение зимнего стока согласуется с результатами существующих исследований [1; 4–7] и может объясняться более поздним замерзанием рек и повышением осадков осенью. Апрельские тренды могут относиться к более раннему вскрытию. Июльские тренды могут соответствовать увеличению летних дождей и деградации мерзлоты. Дополнительные данные и методы должны использоваться для тестирования этих гипотез. На р. Чона-г.п. Чона 16 % выборок показывают отрицательные тренды и не зафиксировано ни одного положительного тренда. Отрицательные тренды наблюдаются в основном в феврале и марте, реже – в январе, июне и декабре. Уменьшение стока на р. Чона может объясняться деградацией несплошной мерзлоты и изменением взаимодействия поверхностных и подземных вод. Все остальные исследуемые речные бассейны на водосборе Вилюйского водохранилища покрыты сплошной мерзлотой.

На водосборе Вилюйского водохранилища максимальные расходы стабильны на 78,5 % выборок, увеличиваются на 14 % и уменьшаются на 7,5 % выборок; в бассейне р. Алдана – 90 %, 3 % и 7 % соответственно. Минимальные расходы не меняются на 6 постах из 8 в бассейне Вилюйского вдхр., а на двух наиболее крупных реках (Вилюй и Чона) показывают противоположные тенденции. В отличие от водосбора Вилюйского вдхр., в бассейне р. Алдан минимальные расходы растут практически на всех рассматриваемых постах. Медианное значение доли выборок с положительными трендами – 45 %, отсутствия каких-либо трендов – 50 %.

Выводы

Наличие и отсутствие статистически значимого тренда зависит от продолжительности анализируемого ряда и охвата конкретных лет. Реки на водосборе Вилюйского водохранилища показывают меньше трендов расходов воды по месяцам, чем в бассейне р Алдан. В бассейне р. Алдан максимальные расходы более стабильны, а минимальные растут практически на всех постах. На водосборе Вилюйского водохранилища, напротив, несколько выше доля выборок максимальных расходов с трендами, но минимальные расходы стабильны на всех исследуемых реках, за исключением двух самых крупных. Общими закономерностями являются увеличением доли выборок с положительными трендами с увеличением площади водосбора, а также с длиной выборки. Причины изменений речного стока могут быть связаны с увеличением атмосферных осадков и температуры воздуха в осенне-зимний период, а также с деградацией криолитозоны и трансформацией поверхностных и подземных путей движения воды на водосборах.

Благодарности. *Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект №20-55-71005) и гранта Президента Российской Федерации №МК-5330.2021.1.5.*

Список литературы

1. *Георгиади А. Г., Кашутина Е. А.* Многолетние изменения годового и сезонного стока рек бассейна Лены // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2014. № 2. С. 71–83.

2. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020 год. М., 2021. 104 с.

3. *Румянцева Е. В., Шестакова Е. Н., Муждаба О. В.* Динамика водных ресурсов рек Арктической зоны Западной Сибири // Научный вестник Ямало-Ненецкого Автономного округа. 2017. № 3(96). С. 53–61.

4. Антропогенные и климатически обусловленные изменения стока воды и ледовых явлений рек российской Арктики / Н. Л. Фролова, Д. В. Магрицкий, М. Б. Киреева, С. А. Агафонова, Е. С. Повалишникова // Вопросы географии. 2018. № 145. С. 233–251.

5. *Юмина Н. М., Терешина М. А.* Многолетние изменения стока рек бассейна Вилюя // Вестник московского университета. Серия 5. География. 2017. № 6. С. 62–70.

6. Warming temperatures are impacting the hydrometeorological regime of Russian rivers in the zone of continuous permafrost / O. Makarieva, N. Nesterova, D. A. Post, A. Sherstyukov, L. Lebedeva // The Cryosphere. 2019. Vol. 13. P. 1635–1659.

7. *Tananaev N. I., Makarieva O. M., Lebedeva L. S.* Trends in annual and extreme flows in the Lena River basin, Northern Eurasia // Geophys. Res. Lett. 2016. Vol. 43, N 10. P. 764–772.

УДК 551.510.42:598.2(571.5)

Современное изменение климата Южного Предбайкалья и его влияние на динамику природных условий, плотность и структуру населения птиц

Ю. И. Мельников (yumel48@mail.ru)
Байкальский музей ИНЦ СО РАН, Иркутск

Аннотация. На основе многолетних работ (1968–2021 гг.) по изучению динамики плотности населения и видового состава фауны птиц Южного Предбайкалья показаны особенности их изменений в результате общего потепления климата. Формирование фауны птиц отличается высокой сложностью, обусловленной динамикой природных процессов. В наибольшей степени изменились водно-болотные экосистемы – их площадь сократилась, а видовой состав птиц явно обеднен. Фауна птиц лесных экосистем отличается более сложной динамикой. Резко увеличился их видовой состав, особенно в зимнее время. В оба сезона года основная часть новых видов относится к случайно залетным птицам. Несмотря на увеличение комфортности условий обитания, отмечено уменьшение общей плотности населения птиц в зимнее время. В летнее время плотность населения птиц изменяется циклически, без выраженного тренда и определяется процессами выселения птиц из Центральной Азии. В целом фауна птиц Южного Предбайкалья в настоящее время увеличилась более чем на 20,0 %.

Ключевые слова: Южное Предбайкалье, птицы, климат, среда обитания, изменения видового состава, численность, распределение, структура населения.

Введение

Современные изменения климата, связанные с его сильным потеплением, на территории Южного Предбайкалья выражены очень хорошо. Основная их причина – повышение солнечной активности, изменения в циркуляции атмосферы и смена зонального ее переноса на меридиональный [4]. Последние десятилетия отличались очень хорошо выраженным потеплением региона. Южные районы Предбайкалья имеют большую площадь лесостепи, наиболее остро реагирующей на потепление климата. Фауна птиц региона в предшествующий пе-

риод была хорошо изучена, что позволяет четко выделить процессы, ответственные за ее современные изменения. В данной работе рассматриваются особенности изменения природных условий в результате сильного потепления климата, прежде всего местообитаний птиц, и влияние этих процессов на динамику основных показателей их населения в регионе.

Район работ, материал и методика

Южное Предбайкалье охватывает крупный географический регион с разнообразными условиями, включающий полностью или частично Приленское и Лено-Ангарское южнотаежные плато, а также Иркутско-Черемховскую лесостепную котловину и Предбайкальский краевой прогиб [10]. На западе и востоке данной территории преобладают сосновые леса, более сухие на пологих водоразделах лесостепной котловины и влажные разнотравные и брусничные, местами с моховым и лишайниковым покровом на Приленском плато. На более влажных участках встречаются лиственнично-кедровые и кедровые леса, но большие по площади чистые леса из сосны сибирской (кедра) *Pinus sibirica* обычны только на Лено-Ангарском плато. Чистые лиственничники относительно редки, но по поймам рек характерны леса из ели сибирской *Picea obovata* и пихты сибирской *Abies sibirica* с примесью лиственницы сибирской *Larix sibirica* и кедра [10]. Повсеместно, особенно на старых вырубках, встречаются березово-осиновые леса. Чистые леса из березы повислой *Betula pendula*, более характерны для островных степей, встречающихся по югу Предбайкалья. Леса, с преобладанием осины *Populus tremula* отмечаются повсеместно, но нигде не достигают большой площади. Верховья рек и небольшие ключи, и реки обычно заняты болотами, заболоченными лесами или ерниками (различные виды кустарниковых берез), особенно на мерзло-болотных почвах [10].

Климатические условия этой территории в середине XX столетия хорошо показаны в нескольких работах [3; 5; 10], а современные их изменения рассматриваются в последних публикациях [1–4; 8–9; 13–15]. В целом количество выпадающих осадков на юге Предбайкалья увеличивается с запада на восток – от 300 мм до 500 мм в год, но на западе в лесостепной котловине их явно меньше, около 250–300 мм в год (Присаянье) [5]. Питание рек смешанное – снеговое и дождевое. По основной территории мерзлота распространена островами. Наиболее низкие температуры отмечаются в январе, а высокие в июле, однако в котловине оз. Байкал они смещаются на февраль и август. Суточные и годовые амплитуды приземной температуры воздуха очень велики от 30–35 °С на западе до 40–45 ° С на востоке. В целом климат Предбайкалья по разным участкам меняется от умеренно континентального до резко континентального. Преобладает западный перенос воздушных масс, но очень высока вероятность затоков холодного воздуха с севера и теплого влажного – с юга (муссоны) [5; 10]. Основным источником влаги являются воздушные массы, поступающие с Атлантического, Тихого и Индийского, а иногда и с Северного Ледовитого океанов. За два летних месяца выпадает более 50,0–55,0 % годовой суммы осадков. На протяжении первой половины прошедшего столетия в регионе отмечено незначительное потепление климата [3; 13], которое заметно усилилось к настоящему времени [8–9].

В основу работы положены учеты птиц, выполненные по стандартной методике [12], принятой в России. Учеты проводились на линейных маршрутах, охватывающих все разнообразие местообитаний пропорционально площади характерных местообитаний птиц или на ключевых участках (площадью до 50,0 км^2 и более), типичных для Южного Предбайкалья [14–15]. Расчет плотности населения птиц проводился на объединенный км^2, а структура населения рассчитывалась по четырем категориям птиц – доминантные (от 10,1 % от всей плотности населения), субдоминантные (от 5,1 до 10,0 %), фоновые (от 1,1 до 5,0 %) и второстепенные (от 1,0 % и меньше) виды, для всех типов или групп типов местообитаний. По окончании работ, длительностью от 5 до 10–12 лет в каждом районе исследований, рассчитывался средневзвешенный показатель плотности населения птиц [14–15]. При обработке материалов использовались стандартные статистические подходы или более специальные методы, наиболее полно характеризующие изучаемые параметры населения птиц [6]. Специальными обследованиями охвачено все Южное Предбайкалье, а период специальных исследований превышает 55 лет (1965–2021 гг.). На протяжении последних десятилетий, особенно в последнее, хорошо проявляется тренд к потеплению климата [1–2; 8–9; 14–15]. Это позволяет для первых анализов динамики населения птиц использовать только временной ряд любого признака. Его обработка дает возможность выявлять наиболее существенные связи между общей динамикой климатических факторов и основными структурными показателями динамики населения птиц.

Результаты и обсуждение

Современные изменения климата уже существенно сказываются на состояние природных экосистем Южного Предбайкалья. В ряде специальных работ показано, что потепление климата в северном полушарии Земли идет очень неравномерно. Наряду с районами, в которых изменения климата незначительно, существуют крупные регионы, отличающиеся очень сильным потеплением. К таким районам, прежде всего, относится Восточная Сибирь и территории, прилегающие к оз. Байкал. В среднем, по Северному полушарию Земли к настоящему времени потепление составило 0,7 °С/100 лет, но в Восточной Сибири оно достигает 1,9 °С/100 лет, т. е. в 2,7 раза больше [4; 14–15]. Во многом, это определяется тем, что в данном регионе затухают северо-западный (северо-атлантический) и юго-восточный (муссонный) переносы воздушных масс. В результате, при повышенной солнечной активности, когда начинает преобладать меридиональный перенос воздушных масс, на северной окраине Центральной Азии развиваются обширные, продолжительные и сильные засухи [4; 14]. На их интенсивность указывает один из первых исследователей, обративших внимание на развитие системы катастрофических засух в Центральной Азии во второй половине XX столетия. Нередко они охватывали всю территорию Монголии и значительные по площади районы Китая. Вероятность повторения засух такой силы составляет один раз в 100–600 лет [7]. В результате на эти периоды приходятся массовые выселения прибрежных птиц в северные районы, прежде всего, на южные окраины Восточной Сибири (конец 50-х – начало 60-х гг. прошедшего столетия) [14].

Собранные материалы подтверждают очень сильную реакцию птиц на современные изменения климата. Повышение приземной температуры воздуха и уменьшение увлажненности [3], в первую очередь, сказывается на качественной структуре водно-болотных биоценозов. Для лесостепных районов Южного Предбайкалья чрезвычайно характерными являются высоко продуктивные рогозовые озера, с преобладанием рогоза широколистного *Tipha latipholia*. Даже при относительно небольшой ширине рогозового бордюра (от 2–3 до 30–40 м), он значительно улучшает защитные и кормовые условия небольших озер. К настоящему времени, пойменные озера небольших рек и ключей пересохли, а на месте сохранившихся крупных озер сформировались рогозовые крепи с отдельными окнами открытой воды. Максимальная их продуктивность отмечалась в начале второй половины XX столетия и приходилась на период массового выселения птиц из Центральной Азии к северным границам ареалов в результате катастрофических засух [14]. По мере развития потепления озерные системы сильно обсохли и потеряли для птиц значение гнездовых стаций. Однако в период миграций, как весной, так и дождливой осенью они, по-прежнему, служат местами массовых остановок птиц на отдых и нажировку перед дальнейшими миграционными бросками к местам гнездовий или зимовок.

Первые этапы освоения прибрежными птицами новых участков ареалов сопровождались резким увеличением количество птиц влажных лугов и мелководий. Нередко они включали большое количество редких и малочисленных видов птиц, включенных в Красные книги России и Иркутской области. В это время обводненность региона была еще очень хорошей, что способствовало увеличению плотности населения и видового состава птиц прибрежных экосистем. В Южном Предбайкалье ранее было зарегистрировано 154 вида околоводных и водоплавающих птиц. В последствии, их количество увеличилось до 175 видов и основная часть новых птиц отмечалась только залетом. По мере смещения засух к северу и обсыхания водоемов, плотность населения птиц снизилась более чем в два раза, а их видовой состав сократился до 127 видов. При этом они полностью не исчезли с территории Восточной Сибири, но их ареал сейчас состоит из отдельных очагов – птицы осваивают только наиболее благоприятные участки ареалов. Исчезли или сильно сократили численность даже очень многочисленные ранее виды прибрежных лугов и мелководий: серая утка *Anas strepera*, красноголовый нырок *Aythya ferina*, широконоска *Anas acuta*, чирок-трескунок *Anas querquedula*, клоктун *Anas formosa*, касатка *Anas falcata*, фифи *Tringa glareola*, чибис *Vanellus vanellus*, черныш *Tringa ochropus*, большой улит *Tringa nebularia*, травник *Tringa totanus*, поручейник *Tringa stagnatilis,* турухтан *Philomachus pugnax*, дупель *Gallinago media*, лесной дупель *Gallinago megala*, большой веретенник *Limosa limosa*, азиатский бекасовидный веретенник *Limnodromus semipalmatus* и многие другие виды птиц. В настоящее время большинство из них в гнездовой период встречаются только отдельными экземплярами и небольшими группами. В то же время в периоды миграций на благоприятных для остановок на отдых и

нажировку участках эти виды являются обычными и многочисленными. Северные границы ареалов околоводных и водоплавающих птиц сдвинулись далеко на север, вплоть до Центральноякутской низменности и тундровой зоны.

В этот же период явно увеличилось количество птиц открытых пространств, и данный феномен часто связывают с антропогенным влиянием на природные экосистемы. Распашка лесостепных участков, массовое сведение лесов, формирование обширных безлесных пространств и новых крупных водохранилищ способствовали продвижению птиц к северу и востоку. Общепризнано, что деятельность человека способствует проникновению птиц в новые районы и освоению дополнительных участков ареалов. Однако данное явление нельзя рассматривать без учета общей динамики климата. Медленное и незначительное его потепление началось в Западной Европе в середине XVIII столетия или даже несколько раньше и этот процесс постепенно сдвигался на восток [14]. Именно на него указывают изменения в приземной температуре воздуха, зафиксированные на Южном Байкале и прилегающих территориях – она очень медленно повышалась [13]. Следовательно, пусковым механизмом продвижения птиц к северу и на восток, несомненно, являлось потепление климата, а антропогенное воздействие только облегчало его, формируя более пригодные местообитания в обширных таежных экосистемах. Для таких смещений границ ареалов характерны западные направления перемещений и очень медленное освоение птицами новых пригодных местообитаний (клинтух *Columba oenas*, вяхирь *Columba palumbus*, золотистая щурка *Merops apiaster*, обыкновенная галка *Corvus monedula*, грач *Corvus frugilegus*, серая ворона *Corvus cornix*, обыкновенный сверчок *Locustella naevia*, обыкновенная горихвостка *Phoenicurus phoenicurus*, зяблик *Fringilla coelebs*, обыкновенная зеленушка *Chloris chloris*, обыкновенная овсянка *Emberiza citrinella*, садовая овсянка *Emberiza hortulana* и др.), в то время как при резких климатических изменениях (засухи), наблюдались достаточно мощные импульсы освоения птицами новых пространств с юга и востока (серая цапля *Ardea cinerea*, огарь *Tadorna ferruginea*, хохлатый осоед *Pernis ptilorhyncus*, восточный болотный лунь *Circus spilonotus*, мохноногий курганник *Buteo hemilaseus*, степной орел *Aquila nipalensis*, немой перепел *Coturnix japonica*, серый журавль *Grus grus*, красавка *Anthropoides virgo*, белокрылая крачка *Chlidonias leucopterus*, голубая сорока *Cyanopica cyanus*, сибирская горихвостка *Phoenicurus auroreus*, сибирская чечевица *Carpodacus roseus*, обыкновенный дубонос *Coccothraustes coccothraustes*, ошейниковая овсянка *Emberiza fucata*, рыжая овсянка *Ocyris rutilus* и др.).

Необходимо отметить и общее запустение сельскохозяйственных земель. Бывшие обширные пашни, остатки хорошо развитого зернового хозяйства прошедшей эпохи, на более влажных местах заросли молодым сосняком, а склоны южных ориентаций зарастают разнотравьем, с преимущественным развитием сорной и рудеральной растительности. Население птиц здесь смешанное, при высоком видовом разнообразии. Одновременно встречаются птицы открытых пространств и лесных экосистем, хотя обилие их относительно невысокое. Здесь довольно часто отмечаются новые виды, ранее не зарегистрированные на территории Южного Предбайкалья.

Существенные изменения наблюдаются и в населении птиц лесных экосистем. Они заметно различаются по сезонам года. В летний период линейная связь между плотностью населения птиц и общей тенденцией к потеплению климата отсутствует. Коэффициент детерминации незначительный – $R^2 = 0{,}06$ и недостоверный, $p < 0{,}05$. Однако хорошо выявляется достаточно значимая связь на основе полиномиальной регрессии 6 степени (рис. 1). Хорошо видно, что пики обилия птиц приходятся на периоды ярко выраженного потепления климата – годы с более высокой приземной температурой воздуха в начале гнездового сезона [9]. Снижение температуры приземного слоя воздуха ведет к уменьшению плотности населения птиц.

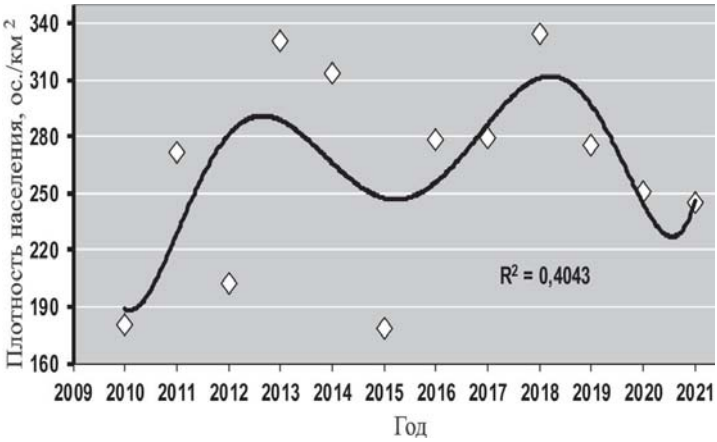


Рис. 1. Уровень связи плотности населения птиц лесных экосистем с общим трендом потепления климата в летний период

Линейный тренд между количеством видов и общей тенденцией к потеплению климата также отсутствует, но хорошо выявляется высокая и достоверная полиномиальная регрессия 6 степени (рис. 2). Коэффициент детерминации выбирает 72,0 % общей изменчивости признаков – $R^2 = 0{,}72$, $P < 0{,}01$, т. е. тенденция к увеличению количества видов по мере потепления климата является нелинейной. В настоящее время она уменьшается, что, очевидно, обусловлено снижением общих темпов потепления климата и отсутствием экстремальных засух в Центральной Азии. Массовые выселения птиц лесных экосистем наблюдались в первой половине текущего десятилетия (рис. 2), когда отмечалось повышение частоты проявления засушливых периодов климата [2], а в настоящее время с большой вероятностью наблюдается начало развития нового цикла повышенного уровня обводнения территории в южных регионах Азии [1; 9].

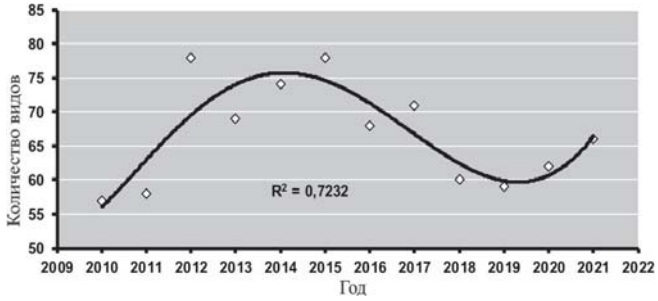


Рис. 2. Связь количества видов, зарегистрированных в лесных экосистемах, с общей тенденцией к потеплению климата на территории Южного Предбайкалья

В орнитологических работах часто подчеркивается высокая связь между плотностью населения птиц и их видовым богатством. Однако данная связь не так однозначна, как кажется, и зависит, в большей степени, от обилия конкретных видов в разных экосистемах. Проверка данного вывода на материалах по летнему населению птиц показала, что между этими признаками существует незначительная отрицательная корреляция – $r = –0,23$. Однако она оказалась недостоверной – $t_{10} = –0,74 < 2,2 = t_{st}$, $P > 0,05$. Очевидно, это, во многом, связано с высокой случайностью попадания в учеты новых, обычно очень малочисленных, видов, выселяющихся из южных регионов Азии.

В зимний период выявлен средний уровень линейной связи между плотностью населения птиц и общей тенденцией к потеплению климата. Данная связь уменьшается по мере развития общей тенденции к потеплению климата. В данном случае надо иметь в виду, что тенденция к потеплению климата сейчас заметно уменьшилась, что может отражаться и на уровне связи данных показателей. Коэффициент детерминации данных признаков выбирает 48,0 % общей их изменчивости и достаточно высоко достоверен – $R^2 = 0,48$, $P < 0,05$. Связь между количеством видов и общей тенденцией к потеплению климата имеет такую же зависимость и уровень связи, как и предыдущий параметр. Количество видов уменьшается по мере развития тенденции к потеплению.

Корреляция плотности населения и количества зарегистрированных видов достаточно высокая, что, очевидно, отражает большую суровость зимних условий и более определенный уровень связи между признаками – $r = 0,72$, $t_{10} = 3,3 > 3,2 = t_{st}$, $P < 0,01$. В это время здесь возможно обитание ограниченного количества птиц и появление нового, даже немногочисленного, вида, сразу заметно отражается на общей плотности населения птиц. Кроме того, в Южном Предбайкалье наблюдаются массовые миграции птиц на холодные зимовки с более северных территорий. В годы высокого обилия кормов они могут значительно повышать общую плотность населения птиц зимнего леса, даже при невысоком количестве зимующих видов. Надо отметить, что потепление климата ранее наблюдалось в позднезимнее и ранневесеннее время (февраль – март), а сейчас смещается на летний период (июль – август) [1].

Наиболее заметным феноменом, характерным для позднезимнего периода, является интенсивная сублимация снежного покрова. Положительные температуры в дневное время приводят к тому, что снежный покров исчезает на южных склонах гор до начала интенсивного снеготаяния. Даже при большой глубине снежного покрова (до 1,0 м) он полностью сходит здесь к середине марта, но русла ключей и небольших рек остаются сухими. Вода появляется только в апреле, когда значительные запасы снегового покрова исчезают в результате интенсивной сублимации.

Динамика плотности населения, как в летний, так и зимний сезоны, во многом определяется изменениями в структуре населения птиц. В обычных условиях доминантные виды птиц, количество которых обычно составляет 2–3, и лишь иногда 1 или 4 вида, формируют основную плотность населения в летний период. Однако в отдельные летние сезоны плотность населения субдоминантных птиц может быть выше (2017 г.). В то же время, общая плотность населения фоновых птиц обычно выше, чем у субдоминантных видов. Наименьшая общая плотность населения наблюдается у второстепенных видов птиц, хотя они включают основную часть видов конкретных местообитаний (от 58,0 до 85,0 %) (табл. 1). Увеличение количества второстепенных видов птиц в последние десятилетия обусловлено массовыми выселениями к северным границам ареалов в результате сильных и даже катастрофических засух и длительных засушливых периодов в Центральной Азии. Основная часть таких видов относится к залетным и отличается очень низкой численностью. Поэтому новые виды в летний период не оказывают заметного влияния на общую плотность населения птиц лесных экосистем. Наибольшую роль в процессах динамики плотности населения птиц играют наиболее многочисленные виды, формирующие группу доминантных и, отчасти, субдоминантных и фоновых видов птиц.

Таблица 1

Динамика структуры населения птиц лесных экосистем Южного Предбайкалья в период хорошо выраженного тренда к потеплению климата (летний период)

Группа обилия	Плотность населения по годам, ос./км^2											
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Доминатные	76,5	117,0	70,0	138,3	121,7	63,0	140,2	74,2	125,8	116,0	73,9	112,5
Субдоминантные	37,4	30,7	40,8	51,3	71,8	51,4	15,1	96,9	98,6	56,8	59,4	31,8
Фоновые	62,0	96,3	61,5	106,8	74,9	39,0	88,5	71,9	79,4	71,9	84,7	74,6
Второстепенные	4,6	27,4	29,6	34,1	45,2	24,8	34,4	36,7	30,3	30,9	32,9	26,3
Общая плотность	180,5	271,4	201,9	330,5	313,6	178,2	278,2	279,7	334,1	275,6	250,9	245,2
Количество видов	61	58	78	69	74	78	68	77	60	59	62	66

В зимний период преобладание доминантной группы птиц над остальными группами обилия выражено значительно сильнее. Лишь в единичных случаях субдоминантные птицы могут превышать по общей плотности населения доминантные виды, количество которых нередко превышает число субдоминантных

видов (табл. 2). Общая плотность населения фоновых птиц обычно ниже, чем у субдоминантных птиц, но в отдельные годы данная закономерность может нарушаться. Доля плотности населения второстепенных видов в общей структуре зимнего населения птиц незначительна, хотя общее количество видов в этой группе обилия, как и в летний период, может быть очень высоким (табл. 2). Доминирование по плотности населения немногих многочисленных видов птиц в зимний период выражено значительно сильнее, чем в летний период, но количество видов почти в два раза меньше.

Хорошо видны различия в структуре населения птиц в летний и зимний периоды. Доля новых зимующих видов выше в зимний период (до 30,0 % и более). Однако почти все эти виды не являются новыми для региона и отмечались здесь ранее в гнездовой и миграционный периоды. Ранее, они никогда не оставались здесь на зимовку, но в последние десятилетия выраженного потепления климата многие из них стали отмечаться в зимний период. Численность таких птиц невысока, и они останавливаются на локальных, более благоприятных участках, отличающихся высоким обилием кормов. Как правило, это плодоядные и семеноядные виды, использующие в пищу ягоды и плоды деревьев и кустарников, в большом количестве остающихся в садоводствах, прежде всего яблоня ягодная *Malus baccata* и рябина сибирская *Sorbus sibirica*. Важно здесь то, что ранее эти виды никогда не отмечались в Южном Предбайкалье на зимовках. В настоящее время здесь стали обычными встречи практически всех видов дроздов, особенно рябинника *Turdus pilaris*, чернозобого *Turdus atrogularis* и краснозобого *Turdus ruficollis* дроздов, дрозда науманна *Turdus naumanni*, сибирского дрозда *Zoothera sibirica*, обыкновенной зеленушки *Chloris chloris*, зяблика *Fringilla coelebs* и сибирской чечевицы *Carpodacus roseus*.

Таблица 2

Динамика структуры населения птиц лесных экосистем Южного Предбайкалья в период хорошо выраженного тренда к потеплению климата (зимний период)

Группа обилия	Плотность населения по годам, ос./км^2											
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Доминатные	77,6	94,7	94,1	92,7	73,5	58,3	72,3	69,0	78,4	46,4	55,9	51,6
Субдоминантные	26,6	10,1	32,3	23,4	14,0	60,2	4,9	27,1	7,2	-	17,9	30,7
Фоновые	23,3	29,9	19,3	19,6	15,3	25,6	11,1	24,8	18,9	13,0	13,0	18,5
Второстепенные	6,4	10,6	7,1	6,2	7,7	8,3	7,1	7,8	6,5	5,1	4,2	5,7
Общая плотность	133,9	145,3	152,8	141,9	102,8	152,4	95,4	128,7	111,0	64,5	91,0	106,5
Количество видов	39	41	40	34	40	43	35	38	36	33	33	35

Заключение

Современное потепление климата в Южном Предбайкалье привело к значительным изменениям в качественной структуре местообитаний птиц. Для водоплавающих и околоводных птиц они значительно ухудшились и, главное, резко сократились по площади. Вследствие этого для них характерны массовые

выселения к северным границам ареалов. Плотность их населения в южных регионах сильно сократилась, но резко увеличилась к северу, вплоть до Центральноякутской низменности и зоны тундры. Такие перемещения для них являются одной из основных адаптаций к обитанию в крайне неустойчивых и часто меняющихся озерно-болотных экосистемах. Они осваивают интразональные водно-болотные угодья и встречаются во всех природных зонах и высотных горных поясах. Для них характерна очень высокая изменчивость видовых комплексов на местах пролета и в новых районах гнездования, высокая динамичность пространственной структуры и ареалов, отличающихся большими размерами. В этой группе птиц смещение границ ареалов к северу и югу является одним из основных принципов освоения неустойчивых местообитаний.

Плотность и структура населения лесных птиц являются более консервативными показателями. Тем не менее, у них также наблюдается смещение границ ареалов к северу, но в менее выраженной форме. Более показательны изменения в плотности населения птиц, снижающейся по мере потепления климата. Структурные изменения в их населении связаны с реакцией отдельных групп видов птиц на интенсивное давление факторов отбора. Поэтому, для выявления их механизмов нужен специальный анализ видов, формирующих основную структуру населения птиц лесных экосистем. В целом можно утверждать, что динамика плотности и структуры околоводных и водоплавающих птиц в современный период определяется состоянием водно-болотных экосистем южных районов Азии. Эти же показатели у лесных птиц определяются климатическими изменениями на местах обычного гнездования, хотя также просматривается некоторое смещение их ареалов к северу. Очевидно, лесные птицы выбирают для зимовок более оптимальные температурные условия и потепление климата выше определенного предела не является для них благоприятным фактором.

Список литературы

1. Мезомасштабные особенности климатических изменений на побережье оз. Байкал / С. Ж. Вологжина, И. В. Латышева, С. В. Латышев, К. А. Лощенко, С. В. Олемской // Вестник ЗабГУ. 2019. Т. 25, № 8. С. 6–13.

2. Исследование влияния метеорологических факторов на возникновение и распространение лесных пожаров в Иркутской области / Л. В. Голубева, И. В. Латышева, К. А. Лощенко, А. С. Щеблыкин // Известия ИГУ. Сер. Науки о Земле, 2017. Т. 22. С. 30–40.

3. *Густокашина Н. Н.* Многолетние изменения основных элементов климата на территории Предбайкалья. Иркутск : Изд-во ИГ СО РАН, 2003. 107 с.

4. Влияние солнечной активности на температуру тропосферы и поверхности океана / Г. А. Жеребцов, В. А. Коваленко, С. И. Молодых, К. Е. Кириченко // Известия ИГУ. Серия Науки о Земле, 2013. Т. 6, № 1. С. 61–79.

5. *Жуков В. М.* Климат. Природное районирование // Предбайкалье и Забайкалье. Природные условия и естественные ресурсы СССР. М. : Наука, 1965. С. 91–126.

6. *Закс Л.* Статистическое оценивание. М. : Статистика, 1976. 599 с.

7. *Кошеленко И. В.* Засухи и борьба с ними. Обзор. Обнинск : ВНИИГМИ-МЦД, 1983. Вып. 4. 56 с

8. *Кочугова Е. А.* Изменчивость зимних минимальных температур воздуха в Предбайкалье // Известия ИГУ. Серия Науки о Земле. 2015. Т. 13. С. 98–110.

9. *Лощенко К. А., Латышева И. В.* Региональные особенности синоптических процессов на территории Иркутской области в 2000–2013 гг. // Известия ИГУ. Серия Науки о Земле. 2015. Т. 11. С. 38–54.

10. Природное районирование: Предбайкалье и Забайкалье. Природные условия и естественные ресурсы СССР / Л. И. Мухина, В. С. Преображенский, Г. М. Томилов, Н. В. Фадеева. М. : Наука, 1965. С. 323–377.

11. *Попов В. В.* Залетные виды птиц Иркутской области // Природа Внутренней Азии. 2019. № 1(10). С. 55–77.

12. *Равкин Е. С., Челинцев Н. Г.* Методические рекомендации по комплексному маршрутному учету птиц. Репринт. М. : Изд-во ВНИИ охраны природы и заповедн. дела Госкомприроды СССР, 1990. 33 с.

13. *Шимараев М. Н.* Некоторые особенности многолетнего хода гидрометеорологических элементов : Лимнология придельтовых пространств Байкала (Селенгинский район). Л. : Наука, 1971.

14. *Mel'nikov Yu.* Large-scale modern climate change and reactions of steppe birds of Inner Asia IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci. 2021. Vol. 817. 012066

15. *Mel'nikov Yu.* Modern climate changes and dynamics of density and structure of bird population of South Baikal of forest ecosystems in winter period IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci. 2021. Vol. 848. 012140.

УДК 551.513.2

Оценка связи значений урожайности озимой пшеницы на территории Ростовской области с характером глобальных атмосферных циркуляций в Северном полушарии Земли

И. А. Смирнов (ivan-2-2-99@yandex.ru), Е. А. Дронова (edronova@rgau-msha.ru)
РГАУ-МСХА им. К. А. Тимирязева, Москва

Аннотация. Представлены значения урожайности озимой пшеницы на территории Ростовской области за 1955–2019 г. Приведены результаты и анализ их сопоставления с преобладающими за период формирования продуктивных органов данной сельскохозяйственной культуры типами атмосферных циркуляций по Б. Л. Дзердзеевскому

Ключевые слова: урожайность озимой пшеницы, ЭЦМ, атмосферные циркуляции.

По данным Росстата, Ростовская область является одним из лидеров по сбору зерна озимой пшеницы на территории РФ, и в целом эти показатели имеют тенденцию к повышению [4]. Важной является всевозможная оценка агрометеорологических, агроклиматических и прочих условий роста и развития данной зерновой культуры как и в течение вегетационного периода, так и всего года в целом.

В данной статье приводятся результаты анализа связи средней урожайности озимой пшеницы в ц/га по территории Ростовской области с атмосферными циркуляционными процессами в северном полушарии Земли.

Понятно, что на формирование урожая зерновых, как следствие и значения урожайности, влияет множество факторов – температура, осадки, влажность воздуха, воздействие засух и суховеев, уровень агротехники, внесения удобрений и т. д. Но конкретно здесь была поставлена цель оценить связь урожайности озимой пшеницы именно с циркуляциями атмосферы в масштабах северного полушария в период формирования продуктивных органов данной сельскохозяйственной культуры.

Для удобного и наглядного сопоставления циркуляций атмосферы с урожайностью была использована классификация циркуляций атмосферы Северного полушария, составленная Б. Л. Дзердзеевским, основной единицей которой является элементарный циркуляционный механизм, сокращенно ЭЦМ. Главным признаком, на котором основана эта классификация, является наличие или отсутствие блокирующих процессов на полушарии, их направление, расположение и количество. Каждый из типов ЭЦМ обозначен определенным сочетанием цифр и букв [1; 3].

Оценка была произведена за 1955–2019 гг. Данные по урожайности за эти годы были сопоставлены с количеством дней с ЭЦМ определенного типа, подсчитанными за период с апреля по май [4; 5]. Данные месяцы были выбраны в связи с тем, что именно на них приходится формирование основных продуктивных органов озимой пшеницы, осредненные по данным за 2002–2019 гг. даты наступления фаз выхода в трубку и цветения пришлись на 13 апреля и 25 мая соответственно [4].

Результаты анализа представлены в табл. 1, где по исследуемым годам приведены значения урожайности озимой пшеницы в ц/га и три наиболее часто повторяющихся за апрель – май типа ЭЦМ с указанием в скобках числа дней с ними за эти месяцы.

Таблица

Урожайность озимой пшеницы на территории Ростовской области и наиболее часто отмечавшиеся за период с апреля по май типы ЭЦМ по годам

Год	Урожайность ц/га	Преобладающие ЭЦМ (число дней за апрель-май)
1955	12,5	8бл (7); 8а, 7бл (5); 7аз, 7ал, 12вз, 12бл (4)
1956	10,3	12а, 7ал (8); 7бл (7); 7аз, 12вл (6)
1957	14,1	7ал (16); 8а, 9б (7); 6, 10а (6)
1958	18,4	12бл (10); 7ал, 8вл (8); 12вл (7)
1959	11,4	9а (12); 7бл, 12бл, (7); 10а (6)
1960	16,3	12а, 13л (8); 8вл, 10а (7); 9б (5)
1961	15,8	12бл (10); 12а (8); 12бз (6)
1962	20,8	2а (11); 12а (10); 9а (6)
1963	9,9	12а (10); 10а (8); 13л (6)
1964	15,2	13л (18); 7ал, 12г (7); 2а (6)
1965	8,9	9а (11); 10а, 12а (7); 12вз (6)
1966	23,1	13л (11); 9а, 12г (7); 7ал (5)
1967	13,6	13л (14); 12а (7); 2б, 12вз (6)
1968	17,8	12а (19); 2а (9); 7бл (6)
1969	13,1	9б, 12 вл (11); 12а (10); 8а (8)
1970	21,2	12а (13); 7ал (8); 2а, 12вл (7)
1971	18,9	2а (13); 7бл, 13з (7); 12г (6)
1972	13,9	8а (10); вт (9); 2а (7)
1973	27,3	12а (14); 9а, 12бл (10); 3 (7)
1974	25,5	10б (9); вт, 12а (8); 2а (7)
1975	16,1	12а (16); 8вл, 13з (6); 3, 4б, 4в (5)
1976	24,6	12а (11), 2а, 13з (6); 12бл (5)
1977	21,7	8а (10); 12г, 13л (9); 10б, 12а (6)
1978	29,9	12а (15); 8а (13); 12г (9)
1979	17,8	12бл (13); 12а (9); 2в (6)
1980	19,4	4б (12); 8гз (10); 8бл (7)

Окончание табл.

Год	Урожайность ц/га	Преобладающие ЭЦМ (число дней за апрель-май)
1981	21,8	9а (10); 2а (7); 13л (6)
1982	19,2	3 (12); 2б (8); 4б, 8бл (7)
1983	24,7	7бл, 12бл (9); 3, 2б (8); 8гл (7)
1984	20,6	13л (21); 10а (10); 9а (8)
1985	19,0	4в (7); 4б, 8а, 9б (6); 3, 9а (5)
1986	23,1	13л (9); 2б, 8а, 12а (6); 10б, 13з (4)
1987	23,7	13л (8); 9б (7); 5а (6)
1988	27,9	12а (8); 4б, 9а (6); 3, 12вл (5)
1989	31,9	13л (18); 10б (8); 9а (7)
1990	37,7	13л (29); 9а (8); 7бл, 8а, 12а, 12бз, 12г (3)
1991	29,4	13л (26); 8а (9); 2а (7)
1992	30,7	13л (30); 10б (7); 1а (4)
1993	29,4	12бл (16); 12а (13); 12вл (9)
1994	25,1	12а (16); 9а, 12бл (6); 10а, 13л (5)
1996	15,0	12а (17); 11г (8); 7ал (7)
1997	19,3	13з (15); 12а (14); 13л (12)
1998	18,4	13л (17); 12а, 12бл (10); 9а (5)
1999	22,3	13л (11); 12а (8); 8а (7)
2000	21,1	13л (28); 12а (9); 9б (5)
2001	30,1	12а (20); 9а (10); 9б, 13з (6)
2002	30,1	13л (19); 12а (9); 8а, 9а (8)
2003	17,7	12а (16); 13л (13); 12бл (7)
2004	35,6	12а (13); 12бл (9); 12вл (6)
2005	30,2	9а (15); 13л (10); 3 (7)
2006	29,0	9а (20); 12а (16); 13л (8)
2007	19,9	13л (16); 12а (10); 3, 12бл (8)
2008	33,9	12а (22); 12бл (9); 13л (8)
2009	25,7	12вл, 13л (14); 12а (12); 10а, 13з (6)
2010	26,7	12а (15); 9а (13); 13л (5)
2011	29,1	12а (25); 8вл (6); 12бл, 12г (5)
2012	22,9	12а (26); 9а, 9б (6); 13л (5)
2013	23,1	12а (23); 13л (14); 9а, 12г (6)
2014	33,1	13л (7); 10б, 13з (6); 10а, 12а (5)
2015	32,3	12а (29); 12бл (12); 13л (7)
2016	38,8	12а (33); 12бл (16); 13л (6)
2017	44,3	12а (27); 9а (14); 12бл (8)
2018	35,6	13л (24); 12а (14); 12бл (4)
2019	35,5	12а (40); 9а (7); 12бл (6)

По данным таблицы (табл.) и графику (рис.) можно сказать, что ЭЦМ типа 12а, характеризующийся в северном полушарии наличием четырех арктических вторжений и четырех зон прорыва южных циклонов, одна из которых зачастую захватывает и территорию Ростовской области, отмечался наиболее часто за апрель – май в 22 годах из 65 лет исследуемого периода [2]. При этом в 11 из таких лет отмечался рост урожайности озимой пшеницы на 5–18 ц/га по сравнению с предыдущим годом, в 5 – падение на 5–13 ц/га, в остальные 6 лет значение урожайности менялось незначительно по отношению к предыдущему году.

ЭЦМ типа 13л являлся вторым по числу повторений лет, где он был наиболее часто встречающимся за период с апреля по май – 17 лет. Этот тип ЭЦМ характеризуется отсутствием серьезных блокирующих процессов в северном полушарии и циклоничностью над Арктикой [2]. При этом рост урожайности на 5–15 ц/га по сравнению с предыдущим годом отмечается только в 5 случаях из этих 17 лет, падение на 5–10 ц/га можно проследить в 4 случаях, в остальные годы такие колебания менее 5 ц/га.

Для дальнейшего анализа оценим связь типов циркуляций и урожайности по десятилетним периодам. Но первым рассмотрим период с 1955 по 1970 г., где урожайность в среднем имеет незначительный рост по тренду. Здесь преобладающие типы ЭЦМ от года к году разнятся из-за чего выделить какую-то закономерность проблематично. Однако наиболее серьезные приросты или падения урожайности по сравнению с предыдущим годом зачастую отмечаются при ЭЦМ типа 12а и 13л, например увеличение на 14,2 ц/га в 1966 г. относительно 1965 г. при ЭЦМ типа 13л с повторяемостью в 11 дней за апрель – май.

Для наглядной иллюстрации динамики урожайности озимой пшеницы по годам ниже приведен график (рис. 1).

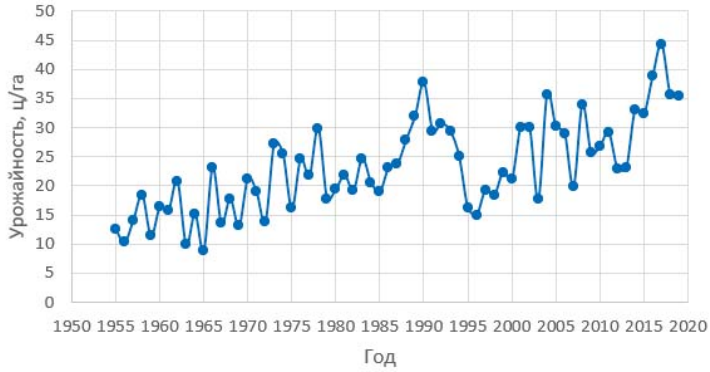


Рис. Урожайность озимой пшеницы, Ростовская область, ц/га, 1955–2019 гг.

Далее в 1970-х гг. рост урожайности озимой пшеницы в среднем по тренду становится более ощутимым. С точки зрения приростов и падений урожайности по отношению к предыдущему году ЭЦМ типа 12а, как преобладающий по числу дней с ним за апрель – май, встречается чаще (5 из 10 лет), в то время как 13л почти не встречается даже в тройке наиболее преобладающих типов ЭЦМ по годам.

В первую половину 1980-х гг. наблюдается картина, чем-то напоминающая 1955–1960 гг., с весьма разнящимися от года к году преобладающими типами ЭЦМ, а средний уровень урожайности хоть и падает по сравнению с прошлым десятилетием, но не имеет серьезных колебаний. Во второй половине 1980-х гг. урожайность озимой пшеницы начинает постоянно расти, а преобладающим типом ЭЦМ по повторяемости становится 13л.

В 1990 г. в Ростовской области была зафиксировано одно из наивысших значений урожайности за исследуемый период – 37,7 ц/га, прирост по сравнению с 1989 г. составил 5,8 ц/га, а преобладающим типом ЭЦМ за апрель – май стал 13л – 29 дней. Однако после этого в 1990-е гг. значения урожайности озимой пшеницы значительно упали, вплоть до 15 ц/га в 1996 г., что можно связать с осложнением хозяйственно-экономической обстановки того десятилетия в Ростовской области и в России в целом. И хоть здесь преобладали по повторениям за апрель – май ЭЦМ типов 13л и 12а, а также близких по смыслу типы, например 13з и 12бл, быть уверенными, что они обусловливали низкую урожайность озимой пшеницы в регионе по указанной выше причине стопроцентно нельзя.

В 2000-е урожайность озимой пшеницы в среднем по тренду начала возрастать, однако здесь также стали отмечаться более существенные перепады ее значений между двумя соседними годами (например, рост этого показателя на 17,9 ц/га между 2003 и 2004 г. при преобладании ЭЦМ типа 12а). Этот тип вновь выходит в лидирующие позиции по повторяемости и в большей степени обусловливает именно прирост урожайности, а также чаще стали отмечаться ЭЦМ типа 9а, которые характеризуются наличием двух-трех блокирующих процессов в северном полушарии и трех прорывов южных циклонов, и, как и ЭЦМ типа 13л, в этом десятилетие более характерны для лет, где урожайность по сравнению с предыдущим годом снижается [2].

2010-е гг. кроме роста значений урожайности озимой пшеницы до рекордных значений, например 44,3 ц/га в 2017 г., характеризуются преобладанием в апреле-мае дней с ЭЦМ типа 12а. Дни с таким видом ЭЦМ стали отмечаться почти каждый год по 20, 30, а то и 40 раз, чего раньше не наблюдалось, а урожайность при этом по отношению к предыдущему году практически всегда стала прирастать. Единственное существенное снижение урожайности за это десятилетие произошло в 2018 г. на 8,7 ц/га, при преобладании в апреле – мае дней с ЭЦМ 13л.

В общих чертах можно сделать вывод, что рост урожайности озимой пшеницы по сравнению с предыдущим годом на территории Ростовской области, особенно в последние 20 лет, отмечается часто при преобладании в северном полушарии Земли за период с апрель по май ЭЦМ типа 12а, а снижение при типах 13л и 9а, второй из которых стал чаще отмечаться в XXI в.

Однако считать результаты, полученные в ходе такого анализа, как основополагающие в формировании значений урожайности озимой пшеницы, не стоит, и желательно, для более наглядной оценки, дополнительно рассмотреть влияние на урожайность и других агрометеорологических показателей, или же выявить закономерности, произведя сопоставление с результатами аналогичного анализа по другим субъектам РФ.

Список литературы

1. *Барашкова Н. К. Кужевская И. В., Поляков Д. В.* Классификация форм атмосферной циркуляции : учебное пособие. Томск : Изд-во Том. ун-та, 2015. 124 с.

2. *Кононова Н. К.* Классификация циркуляционных механизмов Северного полушария по Б. Л. Дзердзеевскому / отв. ред. А. Б. Шмакин. РАН, Ин-т географии. М. : Воентехиниздат, 2009. 372 с.

3. *Кононова Н. К.* Особенности циркуляции атмосферы Северного полушария в конце XX – начале XXI века и их отражение в климате. М. : Институт географии РАН.

4. Бюллетени о состоянии сельского хозяйства. URL: https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13277 (дата обращения:18.09.2021)

5. Колебания циркуляции атмосферы северного полушария в XX – начале XXI века. Типизация циркуляции атмосферы северного полушария по методу Дзердзеевского Б. Л., М. : Ин-ут географии РАН. URL: http://atmosphericcirculation.ru (дата обращения:18.09.2021).

УДК 556.535.5,551.506

Анализ многолетней изменчивости температуры воздуха холодного периода в низовьях Печоры как фактора ледового режима

А. Э. Сумачев (a-sumachev@mail.ru)[1], Л. С. Банщикова (balju@rambler.ru)[2], С. А. Агафонова (sv_ice@list.ru)[3]

[1]*Санкт-Петербургский Государственный университет, Санкт-Петербург*
[2]*Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург*
[3] *Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва*

Аннотация. Рассмотрен климат низовьев Печоры и его изменения за период 1950–2020 гг. По 9 метеостанциям проанализированы среднемесячные значения температур воздуха, а также суммы температур за холодный период года и основные фазы ледового режима.

Ключевые слова: температура воздуха, ледовый режим, Печора.

Рассматриваемая территория – нижнее течение р. Печоры от впадения р. Цильмы и до устьевого створа. На всем протяжении Нижняя Печора имеет обширную долину и пойму, русло песчано-илистое, неустойчивое, изрезано многочисленными протоками и старицами; его ширина достигает 2–3 км и более. В 188 км от устья река делится на Большую и Малую Печору, ниже по течению в 144 км рукава соединяются, а затем на 130 км от устья вновь разбивается на рукава, образуя дельту шириной до 45 км [5].

Устьевая область р. Печоры является экономически и стратегически важной территорией Арктической зоны РФ, здесь расположен транспортный узел Урало-Печорской Арктики – морской и речной порт Нарьян-Мар. Кроме того, Печорская Губа и дельта р. Печоры являются важными рыб хозяйственными объектами.

Активное освоение устьевой области р. Печоры обусловлено открытием газовых и нефтяных месторождений непосредственно в устьевой области и прилегающих к ней районах Большеземельской и Малоземельской тундры. Оно может быть ограничено гидрологическими условиями в пределах исследуемого участка, в том числе ледовыми явлениями, которые наблюдаются здесь порядка восьми месяцев в году.

Ледовый режим, как совокупность ледовых явлений, формируется под воздействием ряда факторов основной из которых – это теплообмен масс воды, а

затем и льда с атмосферой. Для образования тех или иных ледовых явлений помимо среднесуточных температур воздуха, важными являются и значения абсолютных максимумов и минимумов, особенно на начальных стадиях ледового режима и в переходные периоды [1; 2].

На многих реках европейской части Арктической зоны России, в том числе и в низовьях р. Печоры, сроки наступления периода отрицательных температур сместились, что приводит к более позднему установлению ледостава При этом наблюдается значимое уменьшение длительности ледостава за счет смещения сроков замерзания на более поздние и сроков вскрытия на более ранние. Общее снижение длительности ледостава составляет от 12 до 4 дней в селах Усть-Цильма и Оксино соответственно. Изменился и период весеннего ледохода. Максимальный ледоходный уровень воды, в зависимости от погодных условий и характера вскрытия наблюдается либо в середине, либо в конце период очищения ото льда. В устьях крупных притоков не редки случаи, когда наблюдаемый максимум отмечается при вторичном ледоходе, в начале ледохода максимальные уровни формируются редко и, как правило, связаны с заторами льда [6].

Оценка многолетних изменений температуры воздуха за период ледовых явлений позволит оценить их влияние на различные фазы ледового режима на рассматриваемом участке р. Печоры.

Материалы и методы

В работе рассмотрены локальные изменения климата низовьев р. Печоры за холодный период. В качестве исходной информации приняты данные о среднемесячной температуре воздуха с октября по апрель по 9 наиболее репрезентативным метеостанциям за период с 1950 по 2020 г. (рис. 1)

Выбранный период наблюдений на гидрологических постах и метеорологических станциях является достаточным для расчета основных гидрологических и метеорологических характеристик, в том числе обеспеченных. Так как наиболее полные наблюдения за ледовым режимом начались с 1950 г., то общий период непрерывных наблюдений составляет 70 лет с 1950–1951 гидрологического года по 2019–2020 гидрологический год (расчетное гидрологическое полугодие принято с октября одного года по май следующего года). Разбиение всего периода наблюдений на базовый и контрольный выполнено с учетом нарушения стационарности рядов наблюдений, таким образом, базовый период выбран с 1950 по 1980 г., контрольный с 1981 по 2020 г.

Однородность рядов оценена при помощи критериев Стьюдента и Фишера. Для оценки линейных трендов использовался критерий значимости выборочного коэффициента корреляции (R). Гипотеза об отсутствии тренда не опровергалась при уровне значимости $2\alpha = 10$ %, если выполнялось условие $|R| < t2\alpha\sigma R$. Критическое значение коэффициента корреляции при данной длительности рядов наблюдений может быть примерно оценено $R_{крит} \approx 0{,}23$. Приведение рядов метеорологической и гидрологической информации к многолетнему периоду выполнено методом построения регрессионной зависимости за совместный период наблюдений с привлечением данных наблюдений пунктов-аналогов в однородном районе при условии $R > 0{,}70$.

Рис. 1. Метеорологические станции исследуемой территории

Результаты

Хронологический график хода средней за холодный сезон температуры воздуха показал статистически значимый положительный тренд на всех рассмотренных метеостанциях по отношению к базовому периоду (рис. 2). Самой холодной из рассмотренных метеостанций является Хорей-Вер, наиболее теплой Усть-Цильма и Индига. Среднее значение температуры воздуха за многолетний период составило –9,3 °С, среднеквадратическое отклонение 1,9 °С. Наибольший вклад в рост температуры воздуха холодного периода вносят октябрь, февраль, март и май, именно за эти месяцы отмечаются статистически значимые тренды и нарушение однородности рядов по критерию Стьюдента (табл. 1, рис. 3).

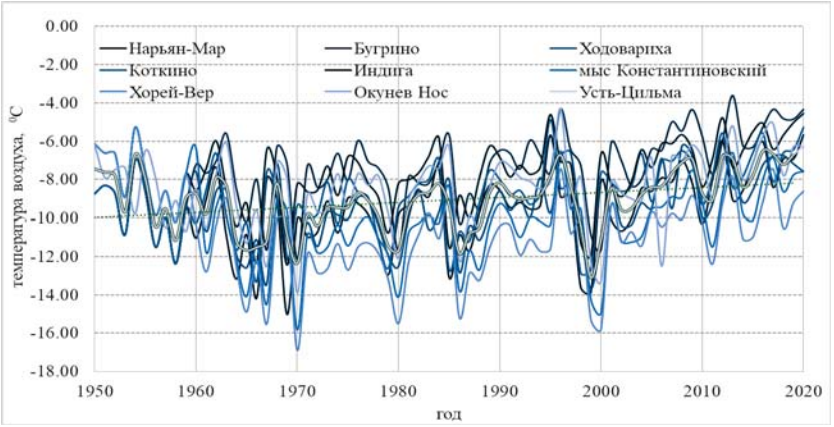


Рис 2. Хронологический график хода средней за холодный период температуры воздуха за 1950–2020 гг.

Таблица 1

Статистические характеристики осредненных рядов среднемесячных температур воздуха

Характеристика	X	XI	XII	I	II	III	IV	V	X—V
Ср. знач 1950–2020	–1,2	–8,7	–12,9	–16,9	–16,5	–11,9	–6,4	0,2	–9,3
Ср. знач 1950–1980	–2,0	–9,0	–13,1	–17,1	–17,3	–13,3	–6,8	–0,4	–9,9
Ср. знач 1981–2020	–0,5	–8,5	–12,8	–16,7	–15,9	–10,8	–6,0	0,7	–8,8
СКО 1950–2019	2,7	3,9	4,7	4,4	5,0	4,7	3,9	2,6	1,9
СКО 1950–1980	2,5	4,1	5,1	3,4	4,5	5,0	3,9	2,3	1,7
СКО 1981–2019	2,7	3,8	4,5	5,0	5,3	4,1	3,8	2,7	1,9
C_s	–0,49	–0,24	–0,49	0,04	–0,41	–0,43	–0,11	0,13	–0,57
C_v	3,97	0,47	0,38	0,27	0,31	0,42	0,79	5,32	0,22
$D_1/D_2(F)$	1,17	1,17	1,27	2,11	1,34	1,51	1,07	1,37	1,26
Критерий Фишера 2a = 10 %, $F_{кр} = 1,76$	–	–	–	+	–	–	–	–	–
T	–2,5	–0,7	–0,3	–0,6	–1,4	–2,6	–1,4	–2,5	–3,0
Критерий Стьюдента 2a = 10 %, $T_{кр} = 1,67$	+	–	–	–	–	+	–	+	+
R	0,26	0,17	0,12	0,03	0,15	0,30	0,23	0,30	0,38
Значимость 2a = 10 %	+	–	–	–	–	+	–	+	+

Для более детального анализа многолетней вариации температуры воздуха и ее влияния на ледовый режим рек были проанализированы суммы отрицательных температур воздуха в различном диапазоне (суммы температур ниже 0, –5 и –15 ºС). Так, суммы температур воздуха ниже 0 ºС характеризуют весь ледовый режим в целом, включая осеннее ледообразование, ниже –5 ºС — процесс образования ледового покрова, ниже –15 ºС характеризуют уже исключительно нарастание ледового покрова.

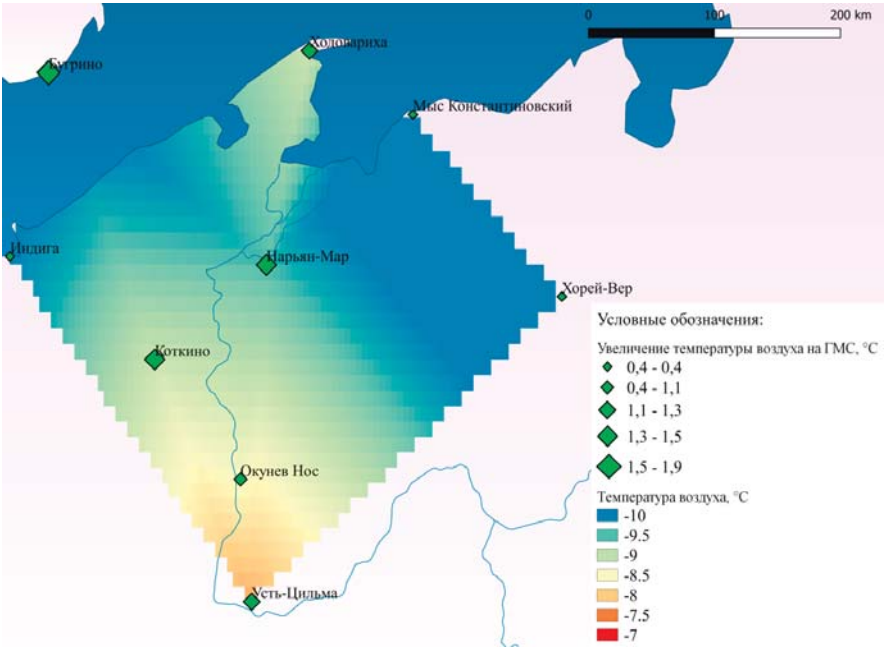


Рис. 3. Средняя за холодный сезон температура воздуха и ее изменение

Анализ этих величин по месяцам показал схожие тенденции к уменьшению по модулю отрицательных температур воздуха во всех рассмотренных диапазонах, но лишь за весенние месяцы года тренд оказался статистически значимым при коэффициенте корреляции от 0,25 до 0,33, что привело к статистически значимому увеличению температуры воздуха за все гидрологическое полугодие.

Повсеместное повышение температуры воздуха отразилось не на всех фазах ледового режима. Первичные ледовые явления наблюдаются в диапазоне отрицательных температур воздуха от 0 до –28 ºС, при этом связь сроков появления льда с уровнем воды не выражена. Вариация сумм отрицательных температур воздуха, при которых наблюдаются первичные ледовые явления объясняется выносом в отдельные годы плавучего льда с участков реки, расположенных выше по течению.

На процесс образования устойчивого ледового покрова существенное влияние оказывает уровень воды, так при высоких уровнях воды необходимы большие по модулю суммы отрицательных температур воздуха. Данная связь является линейной при коэффициенте корреляции, рваном –0,63. Например, для ГМС Усть-Цильма при размахе колебаний уровня воды в период образования устойчивого ледостава от 84 до 448 см над нулем поста, размах отрицательных температур воздуха составляет от –28 до –186 ºС.

Весной тепловой баланс ледяного покрова становится положительным и начинается процесс его таяния. Устойчивому переходу температуры воздуха через 0 ºС всегда предшествует ряд, иногда достаточно продолжительных оттепелей. По данным наблюдений, последний день устойчивого ледостава отмечается при положительных температурах воздуха, когда сумма положительных температур воздуха достигает 2–100 ºС.

На начало разрушения ледового покрова и приведение его в движение оказывает влияние множество факторов, основные из которых изначальная прочность ледового покрова и степень его тепловой деградации к моменту повышения уровней воды. Точные значения температуры воздуха для разрушения устойчивого ледостава завит от гидрологических условий протекания процессов вскрытия.

После серии подвижек наступает фаза весеннего ледохода. В начальной стадии ледохода на участке ниже гидрологического поста Усть-Цильма периодически происходят заторы льда, которые, впрочем, не представляют серьезной угрозы, так как формируются лишь на низких уровнях воды при средней сумме положительных температур порядка 60 ºС. Высшие уровни воды за период ледохода формируются при сумме положительных температур воздуха от 32 до 178 ºС. Длительность весеннего ледохода при этом может достигать 14 и более дней.

Выводы

Наблюдаемые климатические изменение и прежде всего рост температуры воздуха в холодный период является важным фактором сокращения продолжительности периода с ледовыми явлениями в низовьях Печоры. В среднем по территории за холодный сезон температура воздуха увеличилась на 1,08 °С, что является статистически значимым. Изменение циклональной деятельности привело к снижению числа аномально холодных лет и повышению средней минимальной температуры воздуха. Значимые изменения температур воздуха в октябре, феврале, марте и мае. Что касается сумм отрицательных температур воздуха, то значимые тренды отмечены только для весенних месяцев.

Список литературы

1. *Агафонова С. А., Банщикова Л. С.* Заторы и зажоры на реках Арктической зоны России // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов : тр. Всерос. Науч.-практ. Конф. с междунар. участием. Пермь : ПГНИУ, 2019. Т. 1. С. 32–36.

2. Ледовый режим и опасные гидрологические явления на реках арктической зоны европейской территории России / С. А. Агафонова, Н. Л. Фролова, А. Н. Василенко, В. А. Широкова // Вестник Московского университета. Серия 5, География. 2016. № 6. С. 41–48.

3. *Бузин В. А.* Зажоры и заторы льда на реках России. СПб. : ГГИ, 2015. 240 с.

4. *Борщенко Е. В., Мишин Д. В., Горелиц О. В.* Комплексные исследования гидрологического режима устьевой области реки Печора // Четвертые Виноградовские чтения. Гидрология от познания к мировоззрению. 2020. С. 1054–1059.

5. *Мацук А. М., Мацук М. А.* Река Печора в человеческой истории: XVI–XX века // Материалы Комплексной Печорской экспедиции. 2016. С. 134–141.

6. *Сумачев А. Э., Банщикова Л. С.* Ледовый режим реки Печора и особенности прогнозирования высшего уровня ледохода // Гидрометеорология и экология. 2020. № 61. С. 446–459.

УДК 551.578.4:625.7(571.53)

Изменение объема снегопереноса на автомобильных дорогах Иркутской области

Д. М. Яковлева (dariam0404@yandex.ru), Е. А. Кочугова (kochugovae@mail.ru)
Иркутский государственный университет, Иркутск

Аннотация. Рассмотрен автомобильный транспорт как климатозависимая отрасль экономики. Проанализированы перевозки грузов по видам транспорта в Иркутской области. Изучена метелевая деятельность на севере Иркутской области. Проанализирована многолетняя динамика метелевой детельности. Рассмотрена динамика объема снегопереноса на участке автомобильной дороги Тулун-Братск.

Ключевые слова: изменение климата, метелевая деятельность, метелевой ветер, снегоперенос, зимнее обслуживание дорог.

Транспорт – одна из наиболее климатозависимых отраслей экономики. Транспортный сектор особенно уязвимым по отношению не только к экстремальным явлениям катастрофических масштабов (наводнения, селевые потоки), но и к изменениям климата (росту средних температур, увеличению суточных сумм осадков, деградации вечной мерзлоты и др.), поскольку их проявления могут иметь самые разнообразные последствия для транспортной инфраструктуры и транспортных служб [4].

В основном перевозка грузов по территории Иркутской области осуществляется автомобильным транспортом. Этим видом транспорта осуществляются местные, а также межрегиональные грузовые и пассажирские перевозки, обеспечивая высокую маневренность, сохранность грузов. Ежегодный объем перевозки грузов автомобильным транспортом составляет 5300–5400 млн т, что значительно превышает объем грузов, перевозимый железной дорогой (рис. 1) [6]. Учитывая большой объем грузоперевозок на север Иркутской области, снижение скорости движения автомобилей, усложнение условий движения, вследствие метеорологических условий, в том числе метелевой деятельности, негативно отражается на экономике области.

В этой связи при существующей экономической ситуации особую важность приобретает задача обоснования необходимых ресурсов на зимнее содержание дорог с учетом меняющегося климата. Ее решение требует научного подхода к проблеме зимнего содержания дорог, обоснованного определения объемов работ по снегозащите и снегоочистке, на основе расчета количества снега, отложения которого следует предотвратить или убрать в течение зимы, а также после прохождения метели.

Следовательно, целью работы стало изучение изменчивости метелевой деятельности, и связанной с ней снегопереноса на севере Иркутской области, оказывающих влияние на содержание автомобильной трассы в зимний период. Оценка изменения объема снегопереноса была выполнена на примере участка дороги Тулун – Братск. Исходным материалом для исследования послужили данные наблюдений срочного разрешения с сентября по май за период с 1977 по 2017 г. за атмосферными явлениями (вид, продолжительность), скоростью и направлением ветра.

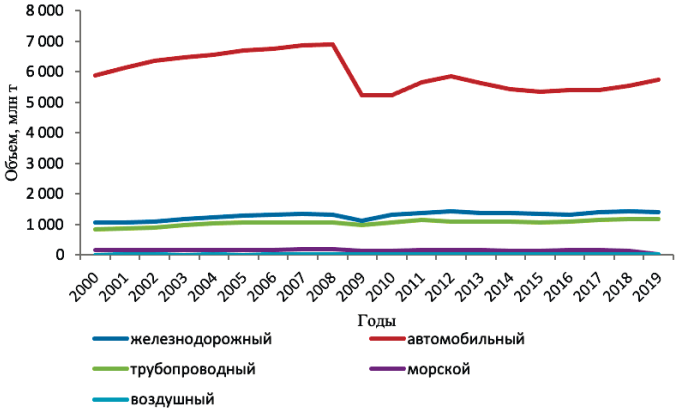


Рис. 1. Перевозки грузов по видам транспорта в Иркутской области

К зимнему периоду относится временной интервал со среднесуточными температурами воздуха ниже 0 °С. Продолжительность этого периода на севере Иркутской области колеблется от 180 до 205 дней. В районе г. Братска он составляет около 176 дней. Этот период года является самым сложным для эксплуатации дорог и организации движения [1].

В Иркутской области метелевая деятельность осуществляется при формировании и разрушении сибирского антициклона, который начинает развиваться осенью и разрушается весной. Возникновение метели обычно происходит при увеличении барических градиентов. Метели наблюдаются при выходе полярных циклонов на районы области, при нырянии циклонов и при движении с запада на восток старых полярнофронтовых циклонов, расположенных своими центрами на 55–65° с. ш. Наиболее сильные ветры и метели наблюдается при северо-западных вторжениях арктических масс воздуха. При прохождении ныряющих циклонов по северу области метели наблюдаются в западных и северных районах. При прохождении полярных циклонов метели распространяются по южным и западным районам области, при этом в северных районах метели в это время отсутствуют [5].

Проанализировав метелевую деятельность, можно отметить, что в среднем за год на территории Иркутской области наблюдается от 1 до 50 дней с метелями. Для их распределения характерны следующие особенности: на защищенных горных долинах и на лесных полянах они отмечаются 1–2 дня; на возвышенных открытых местах, в широких открытых ветром речных долинах, на открытых горных склонах и на открытых побережьях, мысах оз. Байкал – 24–50 дней; на остальной территории – около 10–20 дней в год.

Временное распределение метелей неравномерно. Среднее число дней с метелью на рассматриваемом участке дороги Иркутской области представлено в таблице. Анализируя данные таблицы, можно выделись район с частыми метелями – Нижнеилимский. Не более двух раз месяц они наблюдаются в Усть-Кутском районе. В годовом ходе числа дней с метелями максимум наблюдается в декабре. На большей части рассматриваемых станций в этот месяц метели наблюдались каждые 5–6 дней. Крайне редко метели фиксировались в сентябре и мае.

Таблица

Среднее число дней с метелью

Станция	IX	X	XI	XII	I	II	III	IV	V	Год
Тулун		0,8	6	5	5	4	4	1		25
Тангуй		0,6	4	5	4	4	4	1	0,2	23
Братск	0,05	2	3	4	3	2	3	0,9		18
Илимск		2	4	4	4	4	6	4	0,5	28
Нижнеилимск		0,8	4	6	5	3	6	2	0,1	27
Усть-Кут	0,6	1	2	2	2	2	0,6	0,1		10

Главным источником снежных отложений на дороге, затрудняющих движение автомобильного транспорта, является снегоперенос. Объем снегопереноса – это количество снега, переносимого ветром [3]. Для его расчета необходимы данные наблюдений суточного разрешения. Их выборка производилась из таблиц архива ВНИИГМИ-МЦД [2]. Отбор данных осуществлялся при следующих ограничениях: атмосферные явления – снег, мокрый снег, все виды метелей; скорость ветра – более 5 м/с; температура воздуха – ниже 0 °С. Направление ветра при расчетах принимается по 16 румбам.

Количество переносимого снега за W_t за время действия t метелевого ветра, позволяет найти расчетная формула Д. М. Мельника, описанная в [3]:

$$W_t = C \cdot V^3 \cdot t, \quad (1)$$

где С – коэффициент пропорциональности, величина которого зависит от плотности снега в метелевых условиях (для районов Сибири равен 0,00026); V – скорость метелевого ветра.

Многолетняя динамика объема снегопереноса для автомобильной трассы Тулун-Братск испытывает значительные колебания (рис. 2 и 3). Например, в 1980 г. на участке дороги от станции Тулун до станции Братск на 1 м дороги были сильные снегопереносы объемом 1,67 м³ в Тулуне и 1,31 м³ в Братске. В последние годы объем снегопереноса уменьшился, что означает ослабление опасных ситуаций из-за метелевой деятельности на данном участке автомобильной дороги. Максимальные объемы снегопереноса наблюдались на станциях Тулун (2,5 м³) и Братск зимой 1989/90 г. (1,81 м³).

Расчеты показали, что самые продолжительные метели длились около 9 ч, и наблюдалась они в марте 1985 и 1989 гг. вблизи станции Тулун, вблизи станции Братск – в октябре – ноябре 1984 г.

Рис. 2. Динамика объема снегопереноса в зимние месяцы на ст. Тулун за период с 1997 по 2017 г.

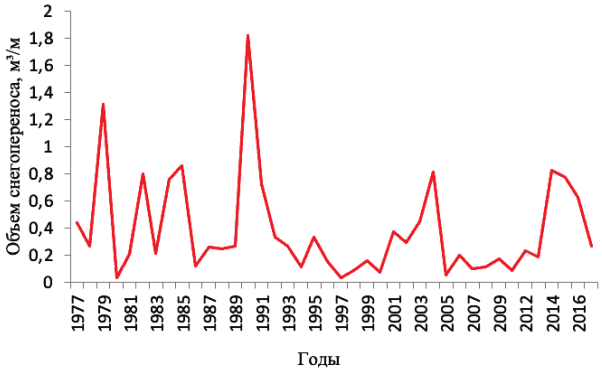


Рис. 3. Динамика объема снегопереноса в зимние месяцы на ст. Братск за период с 1997 по 2017 г.

Анализ динамики прохождения метелей показывает, что в течение зимнего периода наблюдается несколько «всплесков» метелевой деятельности. Эти несколько метелей и играют основную роль в образовании снегоотложений на дороге. Следовательно, стоит необходимость учитывать вероятность появления метелей с экстремальными параметрами.

К тому же при существующей экономической ситуации особую важность приобретает задача обоснования необходимых ресурсов на зимнее содержание дорог с учетом меняющегося климата. Ее решение требует научного подхода к проблеме зимнего содержания дорог, обоснованного определения объемов работ по снегозащите и снегоочистке, на основе расчета количества снега, отложения которого следует предотвратить или убрать в течение зимы, а также после прохождения метели.

Список литературы

1. Иркутская область (природные условия административных районов) / Н. С. Беркин, С. А. Филиппова, В. М. Бояркин, А. М. Наумова, Г. В. Руденко. Иркутск : Изд-во: ИГУ, 1993. 304 с.

2. Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных (ВНИИГМИ-МЦД). URL: http://meteo.ru/data (дата обращения: 02.09.2021).

3. Зимнее содержание автомобильных дорог : методические указания / сост.: А. Г. Воронков, К. А. Андрианов. Тамбов : Изд-во Тамбов. гос. техн. ун-та, 2008. 36 с.

4. Научный словарь-справочник по техническим и гуманитарным дисциплинам // Транспорт и климатические условия. URL: https://spravochnick.ru (дата обращения: 15.09.2021).

5. Справочник по климату СССР // Иркутская область и западная часть Бурятской АССР : Облачность и атмосферные явления. Вып. 22. Ч. 5. Л. : Изд-во Гидрометеорологическое, 1969. 221 с.

6. Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Иркутской области // Протяженность автомобильных дорог общего пользования : сайт. URL: https://irkutskstat.gks.ru (дата обращения: 01.10.2021).

Секция

СОВРЕМЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ

УДК 528.88:556.021.06:004.78

Информационная система спутникового мониторинга окружающей среды сопредельных территорий Республики Беларусь и Российской Федерации (ГИС СОЮЗ)

С. В. Тасенко (s.tasenko@meteorf.ru)[1], С. А. Кузьмич (zamnormir@ hmc.by)[2]
В. Ю. Алексеев (v.alekseev@meteorf.ru)[1], В. В. Дерюгина (z-victoria@yandex.ru)[1]
Е. Е. Зубченок (gid1@ hmc.by)[2], В. А. Кровотынцев [1], А. В. Кухарский (kuha@mail.ru)[1], А. А. Невский (ar.nevskij2013@yandex.ru)[1], Т. Л. Позняк (orap9@hmc.by)[2]

[1] Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета», Москва
[2] Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды, Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Представлена система мониторинга окружающей среды сопредельных территорий Республики Беларусь и Российской Федерации «ГИС СОЮЗ», предназначенная для осуществления эффективного контроля выбросов в атмосферу загрязняющих веществ, пожарной обстановки, состояния водной среды и растительного покрова, мониторинга гидрологической ситуации и раннего оповещения о наводнениях. Система «ГИС СОЮЗ» реализована с использованием Веб-ГИС-технологий и позволяет в единой информационной среде интегрировать наземную и спутниковую информацию, получаемую от двух территориально удаленных организаций. Использование системы в режиме, близком к реальному времени, позволяет получить быстрый доступ ко всем видам информации для принятия своевременных управленческих решений.

Ключевые слова: спутниковые изображения, Веб-ГИС-технологии, ГИС СОЮЗ, мониторинг окружающей среды, наводнение, пожарная обстановка, состояние водной среды, состояние растительного покрова.

В рамках реализации программы Союзного государства «Развитие системы гидрометеорологической безопасности Союзного государства» на 2017–2021 гг. создана информационная система космического мониторинга окружающей среды сопредельных территорий Республики Беларусь и Российской Федерации «ГИС СОЮЗ». Система является совместной разработкой Федерального государственного бюджетного учреждения «Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета» (Россия) и Государственного учреждения «Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды» (Белоруссия). Данная система является территориально-распределенной информационной системой, состоящей из 2 сегментов

(белорусского и российского), каждый из которых обеспечивает космический мониторинг окружающей среды своих сопредельных территорий.

Российский сегмент информационной системы предназначен для решения задач мониторинга окружающей среды для сопредельных областей (Псковской, Смоленской и Брянской) по пяти направлениям:

1) картирование наводнений, в том числе на малых реках;
2) мониторинг выбросов в атмосферу загрязняющих веществ;
3) мониторинг пожарной обстановки;
4) картирование состояния водной среды;
5) картирование состояния растительного покрова.

Белорусский сегмент информационной системы предназначен для решения задач мониторинга окружающей среды для сопредельных областей (Витебской, Могилевской и Гомельской) по двум направлениям:

1) картирование наводнений, в том числе на малых реках;
2) мониторинг выбросов в атмосферу загрязняющих веществ.

В качестве исходной спутниковой информации в информационной системе используются спутниковые данные среднего и высокого пространственного разрешения, получаемые с российских и зарубежных космических аппаратов (КА) Метеор-М (КМСС), Канопус-В (ПСС, МСС), БКА (ПСС, МСС), Landsat-8 (OLI), Terra/Aqua (MODIS), Sentinel-1a и -1b (SAR), Sentinel-2a и -2b (MSI).

В российском сегменте для каждого направления были созданы или усовершенствованы технологии обработки спутниковых данных с применением собственного специализированного программного обеспечения.

Специализированное программное обеспечение картирования наводнений, в том числе на малых реках, предназначено для мониторинга наводнений и обеспечивает решение следующих задач: обнаружение и контроль затопленных участков рек в период половодий и паводков; определение границ зон затопления при наводнениях; оценка площадей затопления и анализ их динамики; обнаружение и контроль заторов и зажоров на реках; создание специализированных карт районов затопления при наводнениях [6]. Выделение границ зон затопления (затопленных участков поймы рек и районов переувлажненных почв) при наводнениях реализуется путем двухэтапного метода выделения водных объектов, основанного на использовании специального алгоритма кластеризации и дерева решений, построенного с использованием средних значений спектральных характеристик кластеров. Более подробно алгоритм описан в работах [2; 3; 9].

Специализированное программное обеспечение мониторинга выбросов в атмосферу загрязняющих веществ предназначено для обеспечения контроля загрязнения воздуха и решает следующие задачи: обнаружение дымовых шлейфов, возникающих, в том числе в результате выбросов тепловых электростанций, а также крупных промышленных предприятий; создание аннотированных спутниковых изображений районов выбросов в атмосферу загрязняющих веществ. Обнаружение выбросов в атмосферу загрязняющих веществ осуществляется путем выявления дымовых шлейфов на основе экспертного анализа исходных спутниковых изображений, получаемых в панхроматическом, многоспектральном и комплексированном режимах (совмещение панхроматического и многоспектрального снимков). При этом выполняется работа по отличию дымовых шлей-

фов в результате выбросов в атмосферу загрязняющих веществ от лесных пожаров путем установления принадлежности выброса к конкретному источнику загрязнения на основе геоинформационного анализа данных [4; 6].

Специализированное программное обеспечение мониторинга пожарной обстановки предназначено для картирования дымовых шлейфов и гарей от лесных пожаров и решает следующие задачи: обнаружение дымовых шлейфов и гарей от лесных пожаров; оценка площадей гарей и анализ их динамики; создание аннотированных цветосинтезированных изображений районов дымовых шлейфов и гарей от пожаров [1; 6]. Обнаружение дымовых шлейфов и гарей в результате пожаров осуществляется путем автоматизированного выявления горячий точек на спутниковых данных, получаемых в панхроматическом, многоспектральном (различные комбинации каналов) и комплексированном режимах (совмещение панхроматического и многоспектрального снимков), с последующим экспертным анализом и отбраковкой «ложных» точек.

Специализированное программное обеспечение картирования состояния водной среды предназначено для мониторинга водных объектов и решает следующие задачи: обнаружение и контроль антропогенных и природных загрязнений (включая нефтяные пленки, зоны интенсивного «цветения вод», речные выносы и др.); анализ динамики водной среды; построение обобщенных карт состояния и загрязнения водной среды. Обнаружение антропогенных загрязнений (включая нефтяные пленки) и районов интенсивного «цветения вод», как индикатора экологического неблагополучия водных объектов, осуществляется путем экспертного анализа дешифрирования основных гидрологических характеристик и параметров загрязнения водной среды. Построение данных о динамических структурах на водной поверхности, состояния и загрязнения водной среды осуществляется в программном комплексе PlanetaMultisat (разработка ФГБУ «НИЦ «Планета») с использованием набора инструментальных средств [5; 7].

Специализированное программное обеспечение картирования состояния растительного покрова предназначено для мониторинга растительного покрова и обеспечивает решение следующих задач: построения карт классов растительности, категорий земель, в том числе сельскохозяйственного назначения, участков леса с различными преобладающими породами [6]. Выделение типов растительности осуществляется путем контролируемой классификации (классификации с обучением) многоспектральных спутниковых изображений в программном комплексе PlanetaMonitoring (разработка ФГБУ «НИЦ «Планета») [8].

Результаты тематической обработки спутниковых данных по вышеперечисленным 5 направлениям с помощью настольного и серверного программного обеспечения ГИС автоматически приводятся к необходимому виду для их дальнейшего использования, погружаются в базу данных, преобразуются в веб-сервисы. С помощью веб-интерфейса пользователя информационной системы «ГИС СОЮЗ» веб-сервисы в режиме реального времени становятся доступны потребителям (рис. 1–4). При этом интерфейс пользователя можно открыть через обычный веб-браузер без использования дополнительных программных средств.

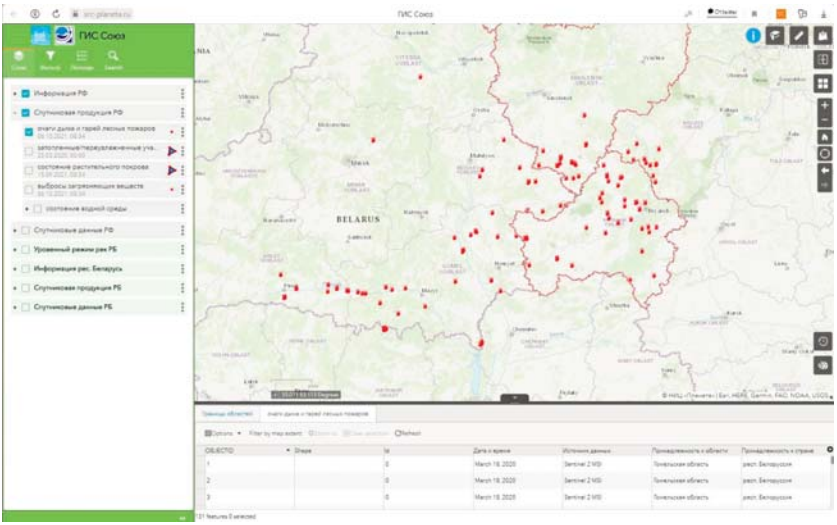


Рис. 1. Представление информации о пожарной обстановке по результатам интерпретирования спутниковой информации в интерфейсе пользователя системы «ГИС СОЮЗ». В период с 01.01.2020 по 30.10 2021 был установлен 131 очаг возгорания на сопредельных территориях Беларусь и Российской Федерации

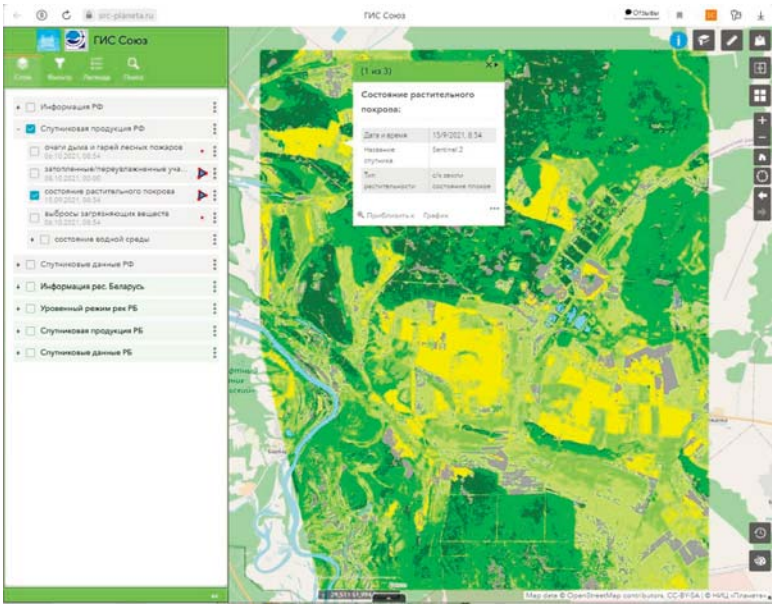


Рис. 2. Представление информации о состоянии растительного покрова по результатам интерпретирования спутникового изображения Sentinel-2 от 15 сентября 2021 г. 8:54 UTC в интерфейсе пользователя системы «ГИС СОЮЗ»

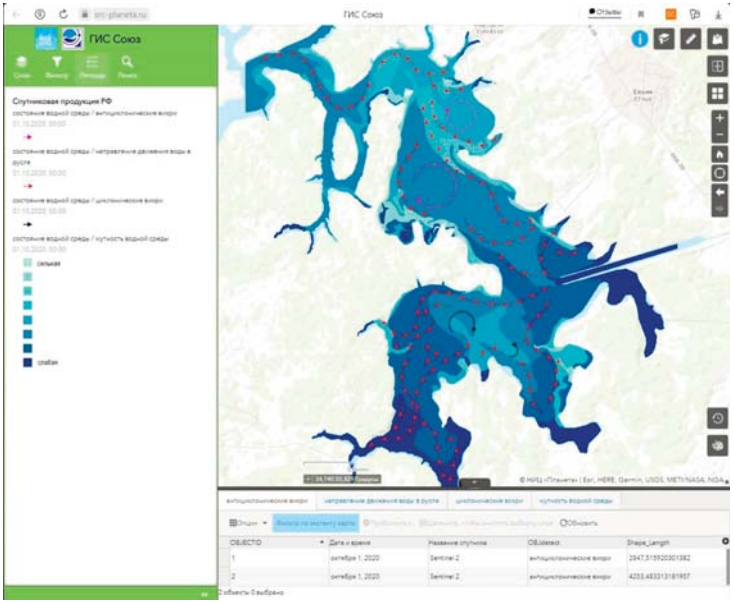


Рис. 3. Представление информации о состоянии водной среды Вазузского вдхр. по результатам интерпретирования данных КА Sentinel №2 (от 1 октября 2020 г.) в интерфейсе пользователя системы «ГИС СОЮЗ»

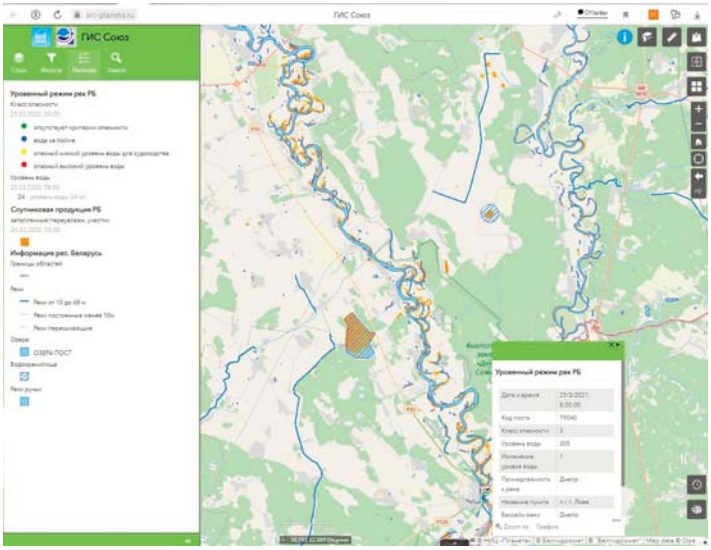


Рис. 4. Представление комплексной информации о гидрологической ситуации на р. Днепр по данным гидропостов Белгидромета и результатам интерпретации спутникового изображения Sentinel-2 от 25 марта 2020 г. в интерфейсе пользователя системы «ГИС СОЮЗ»

Информационная система «ГИС СОЮЗ» реализована на платформе ArcGIS (ESRI). В качестве СУБД используется БД Microsoft SQL Server 2014. Интерфейс пользователя был разработан на языке программирования Java Script API ArcGIS.

Аналогичным образом реализованы технологии обработки спутниковых данных для решения задач белорусского сегмента информационной системы «ГИС СОЮЗ». Все результаты тематической обработки удаленно подгружаются в зеркальную базу данных и веб-сервисы, реализованные особым образом на российской стороне. Отличительной особенностью белорусского сегмента является дополнительное использование наземных данных с гидропостов Белгидромета совместно с результатами обработки спутниковых изображений для обнаружения и мониторинга наводнений (рис. 4).

Белорусский и российский сегменты в системе «ГИС СОЮЗ» объединяются на уровне веб-приложения, к которому подключаются веб-сервисы. Пользователь, имея идентификационный доступ к веб-интерфейсу, видит общую картину состояния окружающей среды для сопредельных территорий Республики Беларусь и Российской Федерации. При этом результаты в системе «ГИС СОЮЗ» могут представляться в виде цифровой карты, таблиц, анимаций, графиков, оформляться в печатном и электронном виде. Кроме того, система также выполняет функцию обмена данными между организациями – Научным-исследовательским центром космической гидрометеорологии «Планета» и Государственным учреждением «Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды». Непосредственно из веб-интрефейса можно выбрать необходимый набор данных за требуемый период времени и скачать в виде шейп файлов, kml-файлов, таблиц.

В заключение можно отметить, что система «ГИС СОЮЗ» обладает высокой оперативностью и быстродействием представления информации пользователям. Она позволяет интегрировать в едином интерфейсе данные с разных территориально удаленных друг от друга организаций без временных затрат на пересылку информации. В системе в максимальной степени применена автоматизация технологических процессов. Для доступа к данным не требуется специализированное программное обеспечение. Просмотр и скачивание информации можно получить с любых устройств, оснащенных веб-браузером (ноутбуков, планшетов, смартфонов). Таким образом не только потребители получают оперативную информацию, но и обеспечивается быстрый обмен данными и продукцией между российской и белорусской организациями.

Информационная система «ГИС СОЮЗ» рассчитана на органы исполнительной власти и управления, а также широкий круг потребителей.

Список литературы

1. Космический мониторинг опасных природных явлений на территории России / В. В. Асмус, Г. М. Иоффе, Л. С. Крамарева, В. А. Кровотынцев, О. Е. Милехин, И. А. Соловьева // Метеорология и гидрология. 2019. №11. С. 20–32.

2. Ансамблевый алгоритм кластеризации больших массивов данных / И. А. Пестунов, В. Б. Бериков, Е. А. Куликова, С. А. Рылов // Автометрия. 2011. Т. 47, № 3. С. 49–58.

3. «ГИС Амур»: система мониторинга, прогнозирования и раннего оповещения о наводнениях / А. В. Фролов [и др.] // Метеорология и гидрология. 2016. № 3. С. 5–21.

4. Космический комплекс оперативного мониторинга техногенных и природных чрезвычайных ситуаций «Канопус-В» с космическим аппаратом «Канопус-В» № 1 / под ред.: К.А. Боярчука, С. Н. Волоква, А. В. Горбунова, С. Г. Казанцева, Л. А. Макриденко, Р. С. Салихова. М. : ВНИИЭМ, 2011. 109 с.

5. Компьютерные технологии формирования гидрометеорологических карт по спутниковым изображениям / А. А. Воронин [и др.] // Исследование Земли из космоса. 2009. № 4. С. 24–35.

6. Справочник потребителя спутниковой информации / под ред.: В. В. Асмуса, О. Е. Милехина. СПб. : Гидрометеоиздат, 2005. 114 с.

7. Спутниковый мониторинг загрязнения российского сектора Черного и Азовского морей в 2003–2007 гг. / А. И. Бедрицкий [и др.] // Метеорология и гидрология. 2007. № 11. С. 5–13.

8. Технология мониторинга процессов опустынивания на основе спутниковых данных / О. Н. Григорьева, Н. В. Елисеев, Н. П. Иванова, В. А. Кровотынцев // Вопросы обработки и интерпретации данных дистанционного зондирования Земли / Труды НИЦ «Планета». СПб. : Гидрометеоиздат, 2005. № 1 (46). С. 173–186.

9. Технология обработки данных с космических аппаратов «Канопус-В», «Ресурс-П» и «Метеор-М» для мониторинга и картографирования паводковой ситуации / С. А. Рылов, О. Г. Новгородцева, И. А. Пестунов, О. А. Дубровская // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли : материалы II Междунар. науч. конф. Красноярск, 2015. С. 207–212.

УДК 556.16

Новая методика расчета теплового стока неизученных рек (на примере рек Северо-Востока России)

Д. В. Магрицкий (magdima@yandex.ru)

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва

Аннотация. Изложена новая методика расчета теплового стока неизученных рек на основе пионерной Карты модуля теплового стока рек, построенной по данным 145 постов на реках Северо-Востока азиатской части России. Предложены конкретные рекомендации по оценке годового теплового стока неохваченных наблюдениями средних по размеру рек, его внутригодового распределения, по оценке теплового стока в устьях больших рек. Проведен анализ и сравнение разных подходов по расчету теплового стока, предложенных автором и сторонними специалистами. Среди новых материалов, помогающих расчетам, также карты среднемесячных температур воды, зависимости температуры воды и теплового стока от средней высоты водосбора, районирование территории Северо-Востока АТР на 10 высотно-термических зон и др.

Ключевые слова: река, пост, тепловой сток, методика расчета.

Речные воды вместе с наносами, растворенными химическими веществами и биологическими субстанциями переносят аккумулированную тепловую энергию (или теплоту), русловой транзит которой образует так называемый *тепловой сток* реки. Он неотъемлемая часть речного стока в комплексном его понимании. Накопленная и переносимая реками теплота, ее изменения по длине реки и в течение года определяют термический режим реки, влияют на ледовые условия, скорость и характер химических процессов, возможности растворения и разрушения тех или иных химических соединений, самоочищающую способность рек и в целом на гидроэкологическое состояние рек. В районах распространения многолетнемерзлых пород тепловой сток – важный фактор переформирования

речных русел и берегов, ускоряющий термоэрозию. Именно для холодных районов страны роль теплового стока многократно возрастает. Накопленное большими реками и переносимое далеко на север тепло оказывает свое воздействие на климат арктических и приарктических территорий, ледовые условия и тепловой баланс прибрежной зоны арктических морей, состояние аквальных биоценозов. Необходимо помнить, что это районы промыслового вылова рыбы, Северного морского пути с постоянно растущим грузооборотом и расширением навигационного сезона за счет сокращения ледовитости арктических морей, активно развивающейся нефте- и газодобычи на шельфах Баренцева, Карского и Лаптевых морей.

Первые оценки количества тепловой энергии, поставляемой северными реками России в арктические моря, были получены еще в 1914 г. В. Б. Шостаковичем [13]. В СССР к рассмотрению теплового стоку приступили в 1930-х гг., во время активного освоения Российской Арктики, расширения гидрометеорологической сети и изучения вопроса влияния тепловой энергии, переносимой большими реками, на ледовые условия как самих рек, так и арктических морей [1; 3 и др.]. Основными объектами исследований были, главным образом, большие реки и их замыкающие створы.

Новым и очень важным этапом в понимании факторов и закономерностей изменчивости теплового стока, в получении новых оценок стала подготовка и издание в 1960–1970-х гг. монографической части справочника «Ресурсы поверхностных вод СССР», не имевшего аналогов в мире. К этому моменту количество постов в стране и объем данных наблюдений за температурами и расходами воды существенно увеличились. Предварительно были разработаны методические рекомендации по расчетам и структуре описания в «Ресурсах поверхностных вод СССР» основных элементов гидрологического режима рек, среди которых были рекомендации по подготовке разделов «Термический и ледовый режим рек» с указаниями по расчетам и анализу теплового стока рек [9].

Одновременно или практически сразу за третьим этапом начался четвертый этап в изучении теплового стока – с 1960-х по 1980-е гг. Он был обусловлен необходимостью оценить влияние масштабного гидротехнического строительства, планировавшегося межбассейнового перераспределения стока больших североевропейских и западносибирских рек на ледово-термический режим их низовьев, устьев и прибрежной зоны морей. В этот период изучением теплового стока североевропейских и сибирских рек занимались В. С. Антонов [12], Ю. А. Ёлшин [4; 5], В. В. Иванов и А. Н. Куржунов [6; 7], Т. В. Одрова [10], Г. А. Орлова [11] и др.

Новые данные, значительные климатические изменения, особенно в Арктике, и реакция на них водных объектов, новые гидротехнические объекты, вопросы экономического и экологически безопасного развития Российской Арктики, Севморпути, добычи нефти и газа на арктическом шельфе и другие задачи потребовали актуализации данных по тепловому стоку северных рек страны. Правда это произошло уже в XXI в. силами как отечественных, так и зарубежных специалистов [2; 8; 14; 15]. И опять же за некоторым исключением основной ак-

цент в изучении был сделан на тепловом стоке главных рек, по данным на замыкающих створах, оценках его величины, внутригодовых и многолетних колебаниях теплового стока. Тогда как остальные реки и территории, особенно не охваченные стационарными наблюдениями так и остались «в тени». Мало того, в теории расчетов теплового стока нового почти ничего не появилось.

В 2021 г. автором в рамках грантов РФФИ №18-05-60021 (Арктика) и РНФ № 21-17-00181 (бассейн Лены) было выполнено комплексное исследование термического состояния рек Северо-Востока АТР, его климатически обусловленных и антропогенных изменений. Для всех рек, имевших гидропосты с данными по температуре и расходам воды, был оценен тепловой сток; разными средствами охарактеризованы его изменения в течение года, за многолетний период, по территории региона, с изменением средней высоты водосбора, после ввода в строй водохранилищ и т. п. Информационной основой для работы послужили электронные массивы гидрометеорологической информации (вплоть до 2012–2018 гг.): по температуре воздуха и осадкам на 34 метеостанциях, среднедекадным и среднемесячным расходам воды на 145 гидропостах, температуре воды на 231 посту, а также многослойная ГИС и определенные с ее помощью границы и морфологические параметры речных водосборов. Одним из важных и новых результатов этой работы стало разработка инструментов и обоснование методики расчета теплового стока для условий отсутствия данных и для оценки стока теплоты, выносимого реками в устья и арктические моря России. Она успешно была опробована на примере рек Северо-Востока АТР, включающего северные районы Республики Саха (Якутия), Чукотский АО и север Магаданской области. Регион находится полностью в зоне вечной мерзлоты, отличается суровым климатом и дефицитом тепла, обилием многочисленных рек – от самых малых до крупнейших как Лена.

Тепловой сток (с декадной и месячной дискретностью) рассчитывался по формуле из [8; 9]:

$$W_T = c_p \rho t W \,, \qquad (1)$$

где c_p – удельная теплоемкость воды (кДж/(кг·°С)), ρ – плотность воды (кг/м^3), t – средняя за декаду или месяц температура воды (°С), W – объем стока воды (м^3) за декаду или месяц. Тепловой сток за год получен суммированием декадных или месячных величин. Для приведения рядов к единому многолетнему периоду были рассмотрены связи теплового стока с температурами и расходами воды (Q), и сделан вывод о доминирующем влиянии именно стока воды на тепловой сток. Теснота связей $W_T = f(Q)$ характеризуется коэффициентами корреляции от 0,8 до 0,95, возрастая у рек в бассейнах Яны и Индигирки, в верховьях Колымы, т. е. с переходным (между тянь-шанским и восточно-сибирским) типом водного режима, а также в нижней части бассейна р. Вилюй.

История вопроса

Для решения задачи оценки теплового стока неизученных рек или «доведения» теплового стока на замыкающем створе (ЗС) до устьевого створа реки ранее уже предлагалось несколько подходов, в том числе с участием автора.

Первый хорошо проработанный подход подробно разобран в работе В. В. Иванова и А. Н. Куржунова (ААНИИ) [6] на примере решения задачи определения среднемноголетнего теплового стока, поступающего в Обско-Тазовскую губу с разных участков ее побережья. Согласно ему, водно-балансовыми и стандартными гидрологическими расчетами оценивалась средняя многолетняя величина водного стока рек на неохваченной гидрометрической сетью территории, включая участки водосборов больших рек (Оби, Пура, Таза, Надыма) ниже их замыкающего створа (ЗС). Далее, исходя из предполагаемого (по рекам-аналогам) внутригодового распределения стока воды годовая норма стока разносилась по месяцам теплого сезона года и сопоставлялась со среднемесячными температурами воды, определенными также по рекам-аналогам. Это позволяло рассчитать месячные и годовую величины теплового стока. Для главных рек полученные для неохваченных мониторингом участков водосбора (ниже ЗС) величины теплового стока суммировались с величиной W_T в ЗС, чтобы оценить тепловой сток в устье – на выходе в море (залив).

Это наиболее понятный относительно простой в исполнении подход. Но он имеет два недостатка. Первый связан с тем, что стандартными методами статистических и гидрологических расчетов мы получаем для неизученных рек и территорий среднемноголетние месячные расходы и температуры воды, а не за каждый год. По ним рассчитываемая за год величина теплового стока, по оценкам автора, на несколько процентов больше W_T, рассчитанной по ежегодным данным. И какой-то связи с длиной периода, размером и положением реки не видно. Например, для р.Анабар (пост Саскылах) разность составила 4,2 %, р. Малая Куонамка (Джалинда) – 8 %, р. Буур (Пур) – 6,5 %, р. Лены (Кюсюр) – 0,25 %, р. Омолой (Намы) – 0,9 %, р. Яны (Джангкы) – 2,1 %, р. Индигирки (Воронцово) – 0,95 %, р. Колымы (Среднеколымск) – 2,3 %. Второй, более серьезный недостаток, связан с расчетом W_T для устьевого створа рек или морского края дельт. Для рек, текущих с юга на север, характерно продольное увеличение стока воды и снижение (с определенного участка) температуры воды. Первое обусловлено боковой приточностью на участке ЗС–ВД, второе – закономерным уменьшением в северном направлении радиационного баланса и температуры воздуха. В результате действительная интенсивность продольного увеличения W_T может быть меньше расчетной, а с определенного участка W_T может даже снижаться, о чем говорится в [7; 8; 15]. Особенно это имеет значение для меридиональных рек, замыкающие створы на которых сильно удалены от устья, и вдольрусловая трансформация W_T определяется не столько боковой приточностью (ввиду ее малых величин), сколько заметными изменениями температуры воды.

Второй подход, как раз не имеющий второго недостатка, был реализован в более поздней работе А. Н. Куржунова [7] для устьевого участка Енисея ниже ЗС. Продольное изменение величины теплового стока ниже по течению Игарки было получено на основе рассчитанных для постов Усть-Порт (вершина дельты)

и Сопочная Карга (Енисейский залив) среднемесячных расходов воды и реально измеряемой на этих постах температуры воды. Результаты расчетов наглядно показали, что сток теплоты Енисея уменьшается от Игарки по направлению к дельте на 10–15 %, а к Енисейскому заливу – почти в 2 раза. Это происходит, несмотря на существенное увеличение водного стока, которое в годовом измерении оценено в 45 км^3/год (1936–2015 гг.), или 7,7 % величины водного стока на посту Игарка. Результаты расчетов величин теплового стока на замыкающем створе, в вершине дельт и на выходы рек в море, полученные автором, доказали этот тезис. Например, тепловой сток рек Оленек, Яна и Индигирка на участке замыкающий створ – море способен уменьшаться на 25 %, 10 % и 8,5 % соответственно. Это верно, если данные постов ниже по течению от ЗС и вблизи от моря репрезентативны.

Третий подход реализован в работах Ю. А. Ёлшина [4; 5]. Им предложено находить средний многолетний тепловой сток рек по формуле:

$$W_T = 0{,}20qF\,, \qquad (2)$$

где q – средний многолетний модуль годового стока воды, л/с·км^2, F – площадь водосбора, км^2, 0,20 – коэффициент теплового стока, единый для большинства рек за рядом исключений, которых в действительности немало, и они требуют введения в формулу 2 корректирующих коэффициентов, в том числе на среднюю высоту водосбора. Коэффициент был определен Ю. А. Ёлшином по данным с 1380 пунктов. Для рек водосборов морей Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского он больше 0,20 – соответственно 0,23, 0,32 и 0,21 (в среднем). Это позволило Ю. А. Ёлшину впервые обоснованно оценить приток теплоты во все моря Российской Арктики, дифференцировать его по отдельным участкам арктического побережья и по месяцам года, оценить числовые характеристики годового стока теплоты и рассмотреть их кривые обеспеченностей.

Четвертый подход представляет собой набор региональных зависимостей вида $W_T = f(W)$ и $W_T = f(F)$. Он предложен автором в ранних работах [2; 8] для арктических и приарктических территорий РФ. Зависимости имеют линейный характер и довольно тесную связь ($r > 0{,}98$), так как, как уже ранее отмечено, в формировании теплового стока рек главную роль играет водный сток. Устойчивая и тесная связь, существующая между W_T и размерами водосбора реки, вытекает из известной зависимости W от F. Эти зависимости были использованы автором при оценке выноса реками теплоты с межбассейновых водосборных территорий и бокового притока в главные арктические реки ниже их ЗС. Были рассчитаны (по состоянию на начало 2000-х гг.) величины суммарного годового теплового стока в моря Российской Арктики. На рис. 1 для рек Северо-востока АТР приведены уже обновленные зависимости $W_T=f(W)$ и $W_T=f(F)$ с учетом новых данных и добавленных постов. Как оказалось, единая зависимость $W_T=f(W)$ может быть применяться для больших и крупнейших рек Российской Арктики. Она приведена в [2].

Главный недостаток этого подхода – в использовании данных постов, главным образом, располагающихся существенно южнее тех территорий, для которых требовалось оценить W_T. Чем севернее (относительно постов) расположен

рассматриваемый район, тем более завышенной получится по этим зависимостям величина теплового стока. Второй недостаток – пока незнание четких границ районов, в пределах которых эти зависимости следует применять.

Все перечисленные подходы вида готовых рекомендаций так не получили.

В настоящей работе предлагается ***пятый подход*** для расчета теплового стока рек на неохваченных гидрометрической сетью территориях Северо-востока АТР.

Новая методика расчета теплового стока неизученных рек

Она совершенно новая, ранее никем не применявшаяся и даже нее предлагавшаяся. Она близка к стандартным методам расчета водного стока, подробно изложенным еще в СНиП 2.01.14-83 (на смену ему пришел СП 33.101.2003) и разработанных под него карт и региональных зависимостей. В ее основе «Карта модуля годового теплового стока ($\times 10^9$ кДж/км^2)» (рис. 2), построенная автором по данным 112 постов, отвечающая условиям периода 1950/1955–2018 гг. Рассматривались только зональные реки, т. е. средние по размеру с площадью водосбора от 1000 до 50 000 км^2. При создании карты многолетние ряды ежегодных величин W_T приводились (разными способами) к единому периоду. При расчете самих ежегодных величин W_T привлекались месячные расходы и температуры воды. Вычислялись среднемноголетние модули годового теплового стока M_T, как отношение годового теплового стока к площади водосбора. Они относились к центрам водосборов, замыкаемых стоковыми постами. Это решение объясняется тем, что как уже ранее отмечено, существенно бóльшую роль на тепловой сток оказывает именно водный сток и его размер. Изолинии модуля теплового стока проводились методом линейной интерполяции и с учетом рельефа, влияние которого в гористых районах хорошо идентифицируется посредством связи $W_T = f(H_{ср})$, где $H_{ср}$ – средняя высота водосбора над уровнем моря.

Таким образом, был получен весь набор инструментов и необходимые знания, чтобы сформулировать основные положения Методики расчета теплового стока для неохваченных стационарными наблюдениями арктических и приарктических территорий и средних рек.

1. Оценить величину годового теплового стока неохваченных сетью наблюдений можно несколькими способами. Первый метод (№ 1), довольно простой и приблизительный, – по серии региональных зависимостей вида $W_T = f(W)$, $W_T = f(F)$ и $W_T = f(H_{ср})$, актуализированных автором в 2021 г. (рис. 1). Его недостатки изложены выше. Метод № 2 – определение годовой величины W_T как суммы месячных величин. Последние, в свою очередь, рассчитываются по средним месячным расходам и температурам воды. Расходы воды рассчитываются стандартными методами, изложенными в СП 33-101-2003. Температуры воды рекомендуется узнавать несколькими способами: 1) по данным постов на реках-аналогах, 2) по картам среднемесячных температур воды (они автором построены, пример такой карты приведен на рис. 3), 3) в горных районах – по зависимостям $t = f(H_{ср})$, которые автором также обоснованы после предварительного разделения региона на 10 высотно-термических зон, 4) по данным метеонаблю-

дений за температурой воздуха с использованием региональных переходных коэффициентов – от среднемесячной температуры воздуха к температуре воды. Автором обнаружено, что этим методом мы получаем несколько завышенные величины годового теплового стока – в среднем на 5 %.

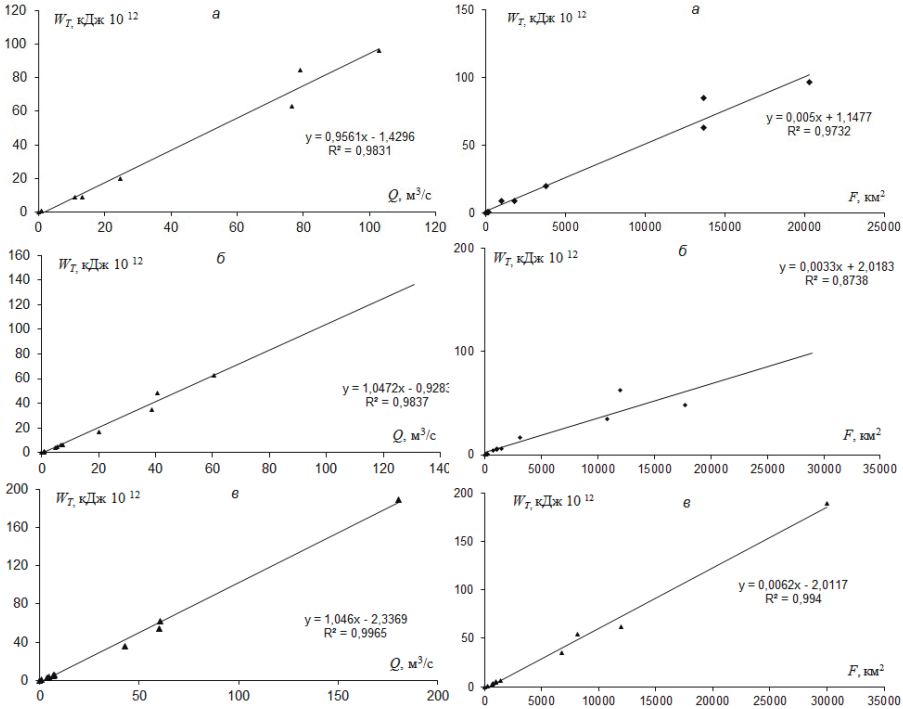


Рис. 1. Региональные зависимости суммарного за год стока теплоты (W_T) средних по размеру рек от средних многолетних среднегодовых расходов воды (левая колонка) и от площади водосбора (правая колонка). А – реки западного сектора побережья моря Лаптевых (между Хатангой и Омолоем), б – реки между Омолоем и Колымой, в – реки к востоку от Колымы

Метод № 3, как основной, – использование Карты модуля годового теплового стока (рис. 2). Но более уверенные результаты, как полагает автор, дает реализация нескольких независимых методов. При этом следует помнить, что каждый последующий год необходима проверка адекватности применяемых инструментов на независимом и новом материале.

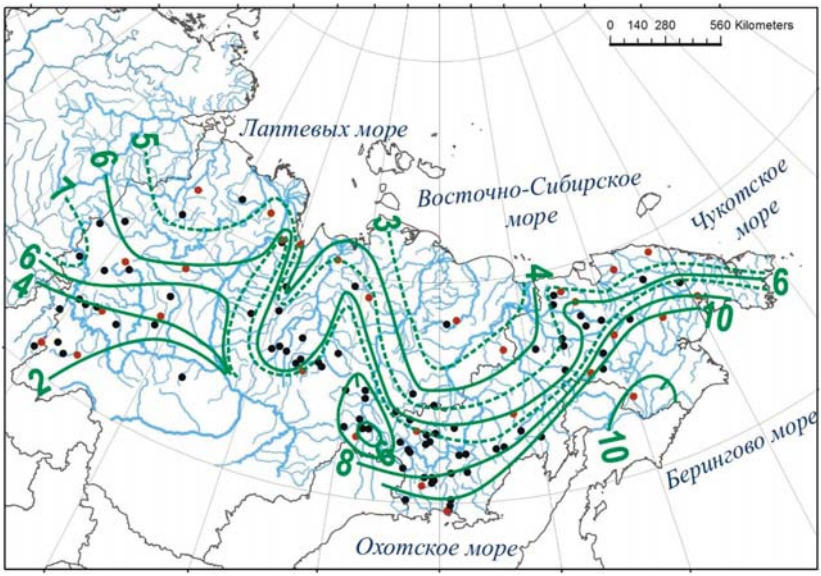


Рис. 2. Карта модуля годового теплового стока ($\times 10^9$ кДж/км^2) зональных рек Северо-востока АТР. Точками обозначены центры водосборов охваченных наблюдениями рек; коричневым цветом – центры водосборов рек с очень непродолжительными на них гидрологическими наблюдениями

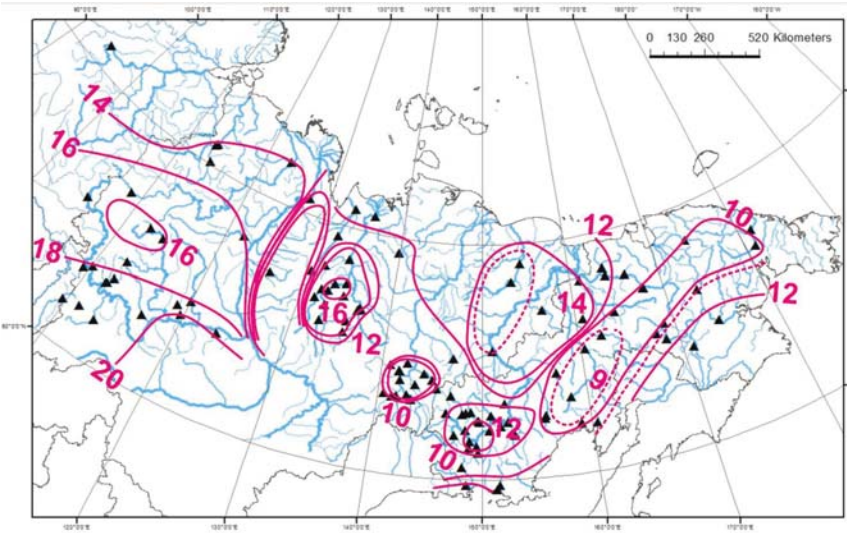


Рис. 3. Средняя температура воды в июле в реках Северо-востока АТР. Карта построена по данным за период с 1955 по 2012 г.; треугольниками обозначено местоположение гидропостов

2. Поскольку перечисленные инструменты создавались на основе среднемесячных расходов и температур воды (из-за их доступности), для повышения точности определяемого годового теплового стока необходимо осуществить переход к величине годового теплового стока W_T (дек.), отвечающего расчетам по декадным значениям. Для этого предлагаются региональные обобщения пересчетных коэффициентов $K_{d/m}$= W_T(дек.)/W_T(мес.) в виде авторских карт. Одна из них приведена на рис. 4.

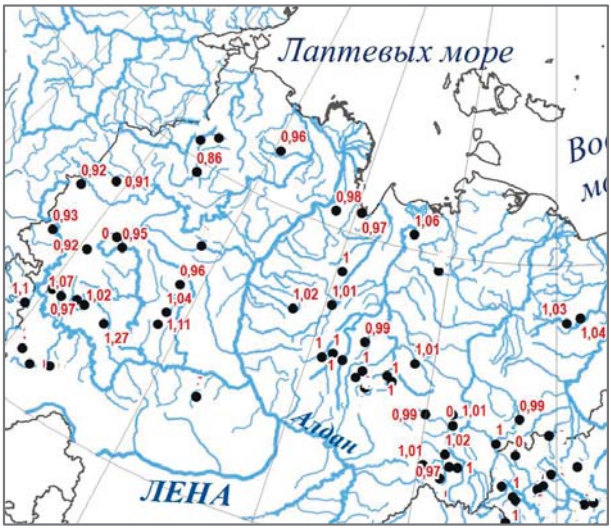


Рис. 4. Карта пространственной изменчивости переходных коэффициентов ($K_{d/m}$) от величин теплового стока за год, полученных по месячным расходам и температурам воды, к годовому тепловому стоку, рассчитанному по декадным расходам и температурам. $K_{d/m}$ отнесены к центрам водосборов рек, замыкаемых гидропостами

3. Внутригодовое распределение теплового стока (по месяцам теплого сезона года) можно получить либо Методом № 2, либо используя данные рек аналогов.

4. Расчет W_T больших рек, текущих на север, на участках ниже замыкающего створа (самого нижнего стокового поста) и в устье, можно выполнить двумя способами. Первый – это суммирование W_T на замыкающем створе и притоков, впадающих ниже по течению. W_T притоков оценивается или по данным постов, либо выше описанными методами. Этот подход не совсем корректен, поскольку тепловой сток в северном направлении может уменьшаться из-за снижения температуры воды. И, по сути, мы получаем некую верхнюю границу искомой величины W_T. Второй способ, более надежный, предполагает расчет W_T в искомом створе по средним месячным расходам, рассчитанным по СП 33-101-2003, и температурам воды, реально измеренным на самом нижнем уровенном посту. Пример его реализации содержится в работе [7].

Список литературы

1. *Антонов Н. Д.* Количество тепла, вносимое реками в Карское море // Труды ААНИИ. 1936. Т. 35. С. 23–50.

2. Геоэкологическое состояние арктического побережья России и безопасность природопользования. М. : ГЕОС, 2007. 585 с.

3. *Зайков Б. Д.* Речной сток в море Лаптевых и Восточно-Сибирское и количество переносимого им в эти моря тепла // Труды Арктического института. 1936. Т. 35. С. 51–84.

4. *Ёлшин Ю. А.* Тепловой сток рек европейской территории СССР // Метеорология и гидрология. 1981. № 9. С. 85–93.

5. *Ёлшин Ю. А.* Тепловой сток в моря Северного Ледовитого океана // Водные ресурсы. 1988. № 5. С. 63–68.

6. *Иванов В. В., Куржунов А. Н.* Тепловой сток рек в Обско-Тазовскую губу // Труды ААНИИ. 1980. Т. 358. С. 102–110.

7. *Куржунов А. Н.* Тепловой сток Енисея в устьевой области // Труды ААНИИ. 1984. Т. 394. С. 66–74.

8. *Магрицкий Д. В.* Тепловой сток рек в моря Российской Арктики и его изменения // Вестник Московского университета. Сер. 5, География. 2009. № 5. С. 69–77.

9. Методические рекомендации к составлению справочника по водным ресурсам // Термический и ледовый режим рек. Вып. 9. Л. : ГГИ, 1961. С. 3–47.

10. *Одрова Т. В.* Изменение режима рек Енисея и Ангары в результате зарегулирования стока // Влияние ГЭС на окружающую среду в условиях Крайнего Севера. Якутск, 1987. С. 84–95.

11. *Орлова Г. А.* Изменение термического режима Енисея и Оби ниже водохранилищ Красноярской и Новосибирской ГЭС // Пути преобразования речного стока на юге Сибири. Новосибирск, 1984. С. 23–39.

12. Советская Арктика. Моря и острова Северного Ледовитого океана. М. : Наука, 1970. С. 155–156.

13. *Шостакович В.* Температура рек Сибири и количество переносимого ими в Северный Ледовитый океана тепла // Записки по гидрографии. 1914. Вып. 33. С. 123–152.

14. *Lammers R., Pundsack J., Shiklomanov A.* Variability in river temperature, discharge, and energy flux from the Russian pan-Arctic landmass // Journal of Geophysical Research. 2007. Vol. 112. G04S59 1-15.

15. Features and evaluations of spatial and temporal changes of water runoff, sediment yield and heat flux in the Lena River delta / D. V. Magritsky, N. I. Alexeevsky, D. N. Aybulatov, V. V. Fofonova, A. Gorelkin // Polarforschung. 2018. Vol 87, N 2. P. 89–110.

Секция

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

УДК 551.501.7

Лидарная прозрачнометрия слабо замутненной атмосферы

А. П. Бобровский (kafedra_phys@rshu.ru), Н. В. Дьяченко (nat230209@yandex.ru), В. В. Косцов (kostsov1@yandex.ru), Е. Ю. Михтеева (mikhteeva.elena@mail.ru), И. А. Потапова (potapovaira@yandex.ru), А. Л. Скобликова (kafedra_phys@rshu.ru), П. П. Хлябич (khlyabich@mail.ru), Т. Ю. Яковлева (yakovtat@yandex.ru)

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург

Аннотация. Предложен и проанализирован новый метод обработки лидарных данных без использования итераций. Сформулированы алгоритмы определения фоновой засветки и коэффициента ослабления.

Ключевые слова: фоновая засветка, слабо замутненная атмосфера, коэффициент ослабления, приборная погрешность, трасса зондирования.

Введение

Использование лидаров предполагает решение проблемы интерпретации лидарной информации, которая усложняется при зондировании слабо замутненной атмосферы. В частности, при измерении и интерпретации сигналов обратного рассеяния малой мощности существенно возрастает роль фоновой засветки.

Целью настоящей работы является развитие методов, изложенных в [1–4; 14; 15], необходимых для обработки эхо-сигналов при зондировании атмосферы в условиях повышенной прозрачности воздуха.

Известно, например, из [5; 11–13], что обработка лидарных данных проводится с использованием метода последовательных приближений. Это негативно сказывается на оперативности обработки. В настоящей работе предлагается метод, свободный от данного недостатка.

Итерационная обработка эхо-сигналов

Обработка лидарных данных выполняется на основе решения лидарного уравнения, которое связывает сигнал обратного рассеяния с коэффициентом ослабления и коэффициентом обратного рассеяния.

В случае слабо замутненной оптически однородной атмосферы, когда коэффициенты ослабления и обратного рассеяния постоянны вдоль трассы зондирования, лидарное уравнение можно записать в виде:

$$P_i = P_* + \frac{B}{R_i^2}\exp\left(-2\sigma R_i\right), \quad (1)$$

где

$$B = A\beta. \quad (2)$$

A – постоянная лидара, β – коэффициент обратного рассеяния, σ – коэффициент ослабления, P – мощность сигнала обратного рассеяния, P_* – мощность солнечного излучения, рассеянного атмосферой в направлении на приемное устройство лидара, R – расстояние между лидаром и i-м рассеивающим элементом.

Задача состоит в том, чтобы найти неизвестные постоянные P_*, B, σ. Для того чтобы найти их величины с минимальной погрешностью, можно использовать метод наименьших квадратов. В таком случае следует минимизировать сумму:

$$\delta^2 = \sum_1^n (P_* + \frac{B}{R_i^2}\exp\left(-2\sigma R_i\right) - P_i)^2, \quad (3)$$

а это предполагает применение, в том числе, итерационного процесса из-за нелинейности задачи.

Обработка эхо-сигналов без итерационного процесса

В данном методе предлагается наряду с уравнением (1) рассмотреть уравнения

$$P_{i+1} = P_* + \frac{B}{R_{i+1}^2}\exp\left(-2\sigma R_{i+1}\right), \quad (4)$$

$$P_{i+2} = P_* + \frac{B}{R_{i+2}^2}\exp\left(-2\sigma R_{i+2}\right). \quad (5)$$

С учетом уравнений (1), (4), (5) можно получить:

$$\frac{(P_i - P_*)R_i^2}{(P_{i+1} - P_*)R_{i+1}^2} = \frac{(P_{i+1} - P_*)R_{i+1}^2}{(P_{i+2} - P_*)R_{i+2}^2} = \exp\left(2\sigma h\right), \quad (6)$$

где h – шаг,

$$h = R_{i+1} - R_i. \quad (7)$$

С учетом уравнений (6), вместо суммы (1) можно минимизировать сумму

$$\delta_*^2 = \sum_1^n a_i P_*^2 + b_i P_* + c_i, \quad (8)$$

где

$$a_i = R_{i+1}^4 - R_i^2 R_{i+2}^2, \quad (9)$$

$$b_i = (P_i + P_{i+2})R_i^2 R_{i+2}^2 - 2P_{i+1}R_{i+1}^4, \quad (10)$$

$$c_i = P_{i+1}^2 R_{i+1}^4 - P_i P_{i+2} R_i^2 R_{i+2}^2. \quad (11)$$

При этом для расчета фоновой засветки получается уравнение

$$P_*^3 + aP_*^2 + bP_* + c = 0, \quad (12)$$

где

$$a = \frac{3\sum_{1}^{n} a_i b_i}{2\sum_{1}^{n} a_i^2}, \qquad b = \frac{\sum_{1}^{n} (2c_i + a_i) a_i}{2\sum_{1}^{n} a_i^2}, \qquad c = \frac{\sum_{1}^{n} b_i c_i}{2\sum_{1}^{n} a_i^2}. \tag{13}$$

Решение Кардано уравнения (12):

$$P_* = a_* + b_* - \frac{a}{3}, \tag{14}$$

где

$$a_* = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{Q}}, \qquad b_* = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{Q}}, \tag{15}$$

$$Q = (\frac{p}{3})^3 + (\frac{q}{2})^2, \; p = -\frac{a^2}{3} + b, \; q = 2(\frac{a}{3})^3 - \frac{ab}{3} + c. \tag{16}$$

Результаты определения фоновой засветки в качестве примера для $R_0 = 2{,}5$ км представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты определения фоновой засветки для $R_0 = 2{,}5$км

ΔR,км	1	4	6	8
P_* /10 шум	38,06	37,65	37,15	37,12

Результаты определения фоновой засветки для $R_0 = 10{,}5$ км представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты определения фоновой засветки для $R_0 = 10{,}5$км

ΔR,км	0,5	1	2	2,5
P_* /10 шум	36,97	36,99	36,99	36,99

Следует отметить наличие систематической погрешности для $R_0 = 2{,}5$ км и ее отсутствие для $R_0 = 10{,}5$ км.

Определение коэффициента ослабления

Задача определения коэффициента ослабления состоит в том, чтобы найти неизвестную постоянные σ с минимальной погрешностью. В таком случае следует минимизировать сумму:

$$\delta^2 = \sum_{1}^{n} (C - S_i - 2\sigma \int_{R_0}^{R_i} S dR)^2, \tag{17}$$

где $S = (P - P_*)R^2$.

При этом для расчета коэффициента ослабления получается равенство

$$\sigma=\frac{1}{2}\frac{\sum_{1}^{n}S_i\sum_{1}^{n}\int_{R_0}^{R_i}SdR-n\sum_{1}^{n}(S_i\int_{R_0}^{R_i}SdR)}{n\sum_{1}^{n}(\int_{R_0}^{R_i}SdR)^2-(\sum_{1}^{n}\int_{R_0}^{R_i}SdR)^2}. \quad (8)$$

Недостаток метода – существование погрешности численного интегрирования [6–10]. В настоящей работе предлагается новый метод, свободный от данного недостатка. Предлагается рассмотреть систему уравнений

$$P_1=P_*+\frac{B}{R_1^2}\exp\left(-2\sigma R_1\right), \quad (9)$$

$$P_2=P_*+\frac{B}{R_2^2}\exp\left(-2\sigma R_2\right), \quad (10)$$

$$P_n=P_*+\frac{B}{R_n^2}\exp\left(-2\sigma R_n\right), \quad (11)$$

$$P_{n+1}=P_*+\frac{B}{R_{n+1}^2}\exp\left(-2\sigma R_{n+1}\right), \quad (12)$$

Суммирование уравнений системы дает

$$\sum_{1}^{n}(P_i-P_*)R_i^2=B\exp\left(-2\sigma R_1\right)\left\{1+\exp\left(-2\sigma h\right)+...+\exp\left(-2\sigma(n-1)h\right)\right\}. \quad (13)$$

Если обозначить

$$S_n=1+\exp\left(-2\sigma h\right)+...+\exp\left(-2\sigma(n-1)h\right), \quad (14)$$

то

$$S_n=\frac{1-\exp\left(-2\sigma nh\right)}{1-\exp\left(-2\sigma h\right)}, \quad (15)$$

причем

$$\sum_{1}^{n}(P_i-P_*)R_i^2=\frac{(P_1-P_*)R_1^2-(P_{n+1}-P_*)R_{n+1}^2}{1-\exp\left(-2\sigma h\right)}. \quad (16)$$

Таким образом, следует минимизировать сумму

$$\sum_{j=1}^{n}\left\{C-(P_{j+1}-P_*)R_{j+1}^2-\Delta\sum_{1}^{n}(P_i-P_*)R_i^2\right\}, \quad (17)$$

где C – неизвестная постоянная,

$$\Delta=1-\exp\left(-2\sigma h\right), \quad (18)$$

поэтому

$$\sigma=-\ln(1-\Delta)/2h. \quad (19)$$

Для постоянной Δ получается равенство:

$$\Delta = \frac{\sum_{j=1}^{n} S_{j+1} \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{j} S_i - n \sum_{j=1}^{n} S_{j+1} \sum_{i=1}^{j} S_i}{n \sum_{j=1}^{n} (\sum_{i=1}^{j} S_i)^2 - (\sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{j} S_i)^2}, \quad (20)$$

где

$$S_{j+1} = (P_{j+1} - P_*) R_{j+1}^2 \quad (21)$$

$$S_i = (P_i - P_*) R_i^2 \quad (22)$$

Результаты определения коэффициента ослабления для $R_0 = 2{,}5км$ представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты определения фоновой засветки для $R_0 = 2{,}5км$

$\Delta R, км$	2	4	6	8	10
σ км$^{-1}$ (8)	0,066	0,083	0,083	0,098	0,107
σ км$^{-1}$ (19), (20)	0,067	0,084	0,085	0,101	0,115

Анализ представленных данных показывает, что приближенный метод достаточно точен.

Заключение

Обработка лидарных данных обычно проводится с использованием метода последовательных приближений. Это негативно сказывается на оперативности обработки.

В настоящей работе предложен метод, свободный от данного недостатка. Задача решена для фоновой засветки.

Предложены новые алгоритмы вычисления коэффициента ослабления.

Список литературы

1. Лидарное зондирование атмосферного аэрозоля / А. Д. Егоров, И. А. Потапова, Ю. Б. Ржонсницкая, В. А. Драбенко // Метеорологический вестник. 2013. Т. 5, № 2. С. 42–51.

2. *Егоров А. Д., Потапова И. А.* Лидарные исследования прозрачности атмосферы // Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. 2004. № 553. С. 131–142.

3. Методы лидарного зондирования аэрозольных загрязнений атмосферы импульсами конечной длительности / А. Д. Егоров, И. А. Потапова, Ю. Б. Ржонсницкая, А. А. Ошуркова // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2011. № 18. С. 48–56.

4. Модель процесса экстремального рассеяния света частицей атмосферного аэрозоля / И. А. Потапова, А. П. Бобровский, Н. В. Дьяченко, Ю. Б. Ржонсницкая, Н. А. Саноцкая, А. Л. Скобликова, Т. Ю. Яковлева // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 5. С. 376–383.

5. *Егоров А. Д., Потапова И. А., Ржонсницкая Ю. Б.* Обращение слабых сигналов обратного рассеяния // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2011. № 22. С. 144–148.

6. *Потапова И. А.* Оценка инструментальных погрешностей лидарных измерений атмосферных характеристик // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2009. № 9. С. 86–91.

7. Оценка погрешностей результатов лидарного зондирования слабо замутненной атмосферы / А. Д. Егоров, И. А. Потапова, Ю. Б. Ржонсницкая, Н. А. Саноцкая // Оптический журнал. 2013. Т. 80, № 3. С. 58–60.

8. *Егоров А. Д., Потапова И. А., Ржонсницкая Ю. Б.* Оценка случайных погрешностей лидарных измерений атмосферных характеристик // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2011. № 17. С. 51–55.

9. Систематические и случайные погрешности обращения лидарных сигналов малой мощности // А. Д. Егоров, И. А. Потапова, Д. В. Привалов, Ю. Б. Ржоненицкая // Депонированная рукопись. № 1230-гм2005 16.12.2005

10.*Егоров А. Д., Потапова И. А., Привалов Д. В.* Систематические погрешности обращения лидарных сигналов малой мощности // Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. 2006. № 555. С. 30–34.

11.Патент на изобретение RU 2495452 C2, 10.10.2013. Способ дистанционного оптического зондирования слабо рассеивающей атмосферы / А. Д. Егоров, И. А. Потапова, Ю. Б. Ржонсницкая, Н. А. Саноцкая. Заявка № 2011143951/28 от 31.10.2011.

12.Патент на изобретение RU 2439626 C2, 10.01.2012. Способ определения прозрачности атмосферы / А. Д. Егоров, И. А. Потапова. Заявка № 2009144060/28 от 27.11.2009.

13.Патент на изобретение RU 2441261 C1, 27.01.2012. Способ оптического зондирования атмосферы / А. Д. Егоров, П. А. Блакитная, И. А. Потапова, Ю. Б. Ржонсницкая, Н. А. Саноцкая. Заявка № 2010143286/28 от 22.10.2010.

14.Atmospheric aerosol measurements and reliability problem: new results / A. D. Yegorov, I. A. Potapova, Yu. B. Rzhonsnitskaya, N. A. Sanotskaya, A. V. Shchadin // International Journal of Remote Sensing. 2014. Vol. 35. P. 5750–5765.

15.Method for solving the inverse problem of lidar sounding of a weakly turbid atmosphere / I.A.Potapova, A. P. Bobrovsky, N. V. Dyachenko, Yu. B. Rzhonsnitskaya, N. A. Sanotskaya, E. Yu. Mikhteeva, P. P. Khlyabich, V. V. Kostsov // Journal of Instrument Engineering. 2021. Vol. 64, N 5. C. 384–391.

УДК 556.5

Измерение расхода воды с помощью ADCP в период ледостава

С. В. Бузмаков (s.buzmakov@hydrology.ru), А. В. Юхно, А. А. Зорина
А. С. Лубенцов

Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург

Аннотация. Обозначено, что измерение расхода воды в период ледостава является трудоемкой, технически сложной задачей. Появление акустических допплеровских профилографов течений (ADCP) и первых методических указаний по производству измерения расхода воды с их помощью подо льдом открыло новые возможности для усовершенствования и оптимизации процесса измерений. Приведены результаты сравнительных измерений расходов воды и скоростей течения для рек Обь, Нева и Оредеж, полученные различным оборудованием. По результатам сформированы первые выводы и выявлены основные особенности применения ADCP в период ледостава.

Ключевые слова: измерение расхода воды, скорость течения, ледостав, ADCP, гидрометрическая вертушка, сравнительные наблюдения.

Введение

На сети гидрологических станций и постов Росгидромета появилось большое количество (более 130 шт.) акустических доплеровских профилографов течений (ADCP). На данный момент времени они используются для измерений исключительно в теплое время года. Хотя в ряде зарубежных стран профилографы широко применяются и в период ледостава. Использованию ADCP в зимних

условиях в Российской Федерации препятствует отсутствие официально утвержденной методики измерения и боязнь гидрометров за потерю дорогостоящего оборудования. Основная цель данной статьи – показать преимущества и недостатки использования ADCP для измерения расхода воды в период ледостава.

Методологическая основа

Если методика измерения расхода воды гидрометрической вертушкой давно разработана и испытана [1–3], то по применению профилографов методических рекомендаций практически нет. Единственным исключением является [4], который был разработан на основе программного обеспечения лишь одного производителя приборов (Teledyne RD) и не включает в себя алгоритм измерений в период ледостава.

В США и Канаде профилографы широко применяются для подледных измерений скоростей течений, разработана методическая база [5]. В [5] описан процесс измерения расхода воды в условиях ледостава от стадии подготовки оборудования к измерениям и производства всех необходимых предварительных процедур, до непосредственных практических рекомендаций по работе оборудования и ПО профилографов основных моделей (ReverSurveyor S5, M9 и Teledyne RD RiverRay, RioGrande, River и Stream Pro). Несомненно, это Руководство [5] является основным из нормативно регламентирующих документов, описывающий процесс измерения расходов воды с помощью ADCP подо льдом, и может являться прототипом для будущего отечественного аналога.

В настоящее время двумя ведущими производителями профилографов разработано специализированное ПО для обработки результатов измерения расходов воды подо льдом. Для SonTek это RiverSurveyor Stationary Live (далее RSSL), а для Teledyne RDI – Section by Section Pro (далее SxS Pro). С его помощью в автоматическом режиме происходит экстраполяция скоростей течения за пределы промерных вертикалей, рассчитываются площади между ними и частные расходы воды с дальнейшим суммированием. Производитель Rowe, стремительно набирающий позиции на рынке ADCP пока не имеет такого ПО, но, по заверению разработчиков, оно находится в стадии апробации.

Материалы и методы исследования

Измерение расходов воды производилось согласно [1], а также опыту использования ADCP Геологической службой США (USGS) [6]. Согласно данной методике датчик ADCP (трансдьюсер) должен погружаться в воду под лед (ниже внутренней кромки льда или шуги) для того, чтобы ледяной покров или шуга не препятствовали расхождению лучей от датчика в водную среду (рис. 1).

Для того чтобы опустить профилограф под лед, нужно иметь штангу необходимой (превышающей максимальную толщину ледяного покрова) длины с жесткими креплениями для датчика. Во всех датчиках ADCP имеются отверстия с резьбовой насечкой для крепления винтами. Помимо жесткого крепления, также желательно обвязать крепление профилографа страховочной веревкой, на случай если сама штанга выскользнет из рук гидрометра во время измерения. Штанга должна быть изготовлена из цветных немагнитных металлов (титан,

алюминий) или пластика для исключения воздействия на компас ADCP. На штангу можно также закрепить пузырьковый уровень воды для лучшего горизонтирования прибора в воде. Датчик должен соединяться с полевым компьютером только при помощи кабеля напрямую или через модуль питания и связи PCM. Использование канала связи Bluetooth под водой невозможно.

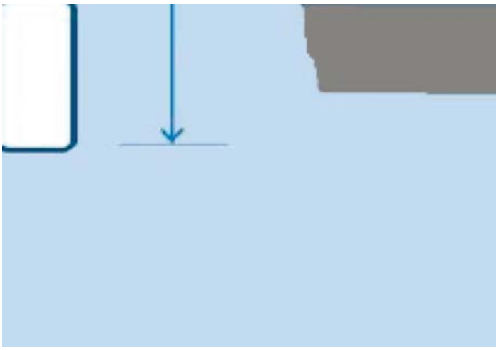


Рис. 1. Схема измерения ADCP подо льдом

Измерение расхода воды, как и при использовании гидрометрической вертушки, начинается с разметки скоростных и промерных вертикалей. Поскольку габаритные размеры профилографа с креплением меньше, чем у вертушки с хвостом, вполне достаточно обычного бура диаметром шнека в 10 дюймов. При этом отпадает необходимость в выпиливании или высверливании больших майн, как делается при опускании вертушки на тросе с грузом, а все промерные вертикали можно считать скоростными.

Перед началом измерения необходимо опустить трансдьюсер ADCP в холодную воду для температурной акклиматизации на период до 30 мин (рекомендуемый в [1]), очистить края лунок от зазубрин и прочих шероховатостей поверхностей льда, способных повредить кабель, и только затем начать производство измерений.

Измерения проводятся последовательно от одной лунки (скоростной вертикали) к другой. Датчик опускается ниже внутренней кромки льда, после чего начинается посылка и сбор пингов (ансамблей). Всего должно поступить 30 действительных ансамблей, как правило, это происходит за 40 секунд измерений. В зависимости от условий среды, типа профилографа, метода осреднения скорости и ориентирования прибора, а также программного обеспечения, время измерения может увеличиваться. Обязательно фиксируется глубина погружения датчика над уровнем воды, а также толщина ледяного покрова и слоя шуги. Рабочая глубина определяется самим профилографом.

Первичный акустический преобразователь (трансдьюсер) между измерениями на скоростных вертикалях, как правило, помещается в ведро с водой. Модуль питания и связи (PCM) прячут под одежду или устанавливают в обогревае-

мый контейнер (переносную термосумку). Требования по минимальной температуре эксплуатации ADCP для профилографов ведущих производителей (SonTek, Teledyne и Rowe Tech) устанавливаются по температуре хранения (по сути, переноса между вертикалями) на отметках –10, –20 и –30 ºС соответственно, при этом не установлено градаций отдельно для трансдьюсера и блока PCM. Это автоматически означает, что при соблюдении двух условий переноса оборудования между лунками, приведенных выше, охлаждение трансдьюсера и PCM до этих значений происходить не будет даже при самых низких температурах, до –35 ºС. Примеры использования ADCP при таких температурах встречаются по отзывам пользователей ADCP, поступающим в ЛГП ГГИ [7] и форум USGS [6].

Также в руководствах по эксплуатации указано, что хранение прибора при температуре ниже минимальной установленной в течение продолжительного времени (свыше 30 мин) может привести к неотвратимой поломке прибора, поэтому неукоснительное выполнение условий термической эксплуатации ADCP является залогом его корректного функционирования.

После того как измерения на всех скоростных вертикалях были выполнены, программное обеспечение само рассчитывает расход воды. Если в ходе измерений были внесены некорректные расстояния или неверные коэффициенты, в режиме постобработки данные ошибки могут быть исправлены, расход воды автоматически пересчитается.

Приборная база

Основными производителями профилографов на мировом и отечественном рынке являются три компании – SonTek, Teledyne RD и Rowe Tech. Единственный отечественный профилограф течений «Арго» не имеет специализированного ПО для работы в подледном режиме, поэтому рассматриваться не будет. Цены на базовый комплект (без плавсредств) варьируются от 45 500 до 55 500 евро. Если же добавить к этому плот или самоуправляемую лодку, комплект GPS, то цена такого комплекта будет в 1,5–2,5 раза выше. Стоит отметить и высокую стоимость комплектующих. Так, например, один стандартный кабель для профилографа RiverRay может стоить около 1250 евро, что продиктовывает необходимость бережного отношения и продуманного механизма крепления профилографа к штанге, защищающего кабель как от перегибов, так и от механических повреждений.

Если же говорить о специализированном крепеже профилографов и штангах, то на рынке присутствует единичное предложение от американской фирмы HyQuest Solutions. Комплект стоимостью около 2600 евро включает в себя крепления для StreamPro, RiverRay, RiverSurveyor M9/S5, вертушки Redback RB1, саму 4 секционную штангу с общей длиной 2 м, ориентирующую насадку, переносные сумку и кейс. Также возможно заказать крепления для каждого из профилографов в отдельности у производителей, но финансовая эффективность такого решения весьма сомнительна. На практике, самостоятельное изготовление такого универсального крепления с отверстиями сразу под все типы профилографов является недорогостоящей и довольно простой с технической точки зрения операцией.

Технически все описываемые профилографы позволяют измерять скорости течения в диапазоне от -5 до 5 м/с с возможностью его расширения до 20 м/с, этот параметр идентичен для всех основных моделей ADCP. Погрешность измерения скорости для высокочастотных профилографов (более 2000кГц) составляет 1 %±2 мм/с, для средне- и низкочастотных (300–1200 кГц) 0,25 %±2 мм/с.

Диаметр трансдьюсера у самых мелкогабаритных моделей (Teledyne StreamPro, SonTek RS5) составляет 3,89 и 5,85 см соответственно. Тогда как средне- и низкочастотные модели имеют диаметр от 12,8 (SonTek M9/S5) до 22,6 см (Teledyne RioGrande).

Изучаемые объекты

В основе исследования лежат единичные сравнительные измерения скорости течения и расходов воды устройствами различных типов, проведенные на реках Нева, Обь и Оредеж в зимний сезон 2020–2021 гг.

Гидрометрический створ на р. Неве располагался в поселке имени Свердлова. Ширина русла – 300 м, средняя скорость течения – 0,80 м/с, максимальная глубина – 10,7 м, толщина ледяного покрова – 0,43 м, шуга отсутствует, температура воздуха в день измерения -2/-4 ºС. Измерения скорости течения гидрометрической вертушкой и электромагнитным датчиком производилось с троса на 13 скоростных вертикалях в 72 точках. Профилографами RiverRay и RiverSurveyor M9 измерено 13 скоростных вертикалей. Расчет расхода производился в программах RSSL и SxS Pro методом «секций».

Измерения на р. Оби проводилось в трех створах – протоках Вартовская и Чехлоней, а также в контрольном створе в 350 м ниже слияния этих рукавов. Общее количество скоростных вертикалей – 46. Ширина русла в контрольном створе – 787 м, максимальная глубина – 16,2 м, максимальная толщина льда – 1,13 м, средняя скорость течения – 0,31 м/с, шуга наблюдалась лишь на одной прибрежной вертикали одного из створов, температура воздуха в день измерения –1/–3˚С. Профилограф RiverSurveyor M9 также опускался в лунки на специализированной штанге под нижнюю кромку льда. Расчет расхода производился в программе RSSL методом «секций».

Измерение расхода воды на р. Оредеж происходило в створе выше бывшего пешеходного моста на базе практик РГГМУ. Ширина русла – 16,4 м, максимальная глубина – 1,53 м, толщина ледяного покрова – 0,26 м, средняя скорость течения – 0,18 м/с, шуга отсутствует, температура воздуха на момент измерения колебалась от –3 до –13 ºС. На створе было разбито 8 скоростных вертикалей, на каждой из которых измерялась скорость течения с помощью трех средств измерения: вертушки гидрометрической ИСВП ГР-21М1, электромагнитного измерителя скорости водного потока ИСВП Посейдон-1 и ADCP RiverRay. Расчет расхода производился в программе SxS Pro методом «секций».

Анализ результатов сравнительных полевых исследований

На р. Неве в створе пос. им. Свердлова, где производились измерения скоростей течения четырьмя средствами измерений (СИ), в итоге получены сопоставимые результаты. Максимальное относительное расхождение между ними составило 11,1 % (между ГР-21М1 и ADCP River Ray). Для всех остальных

средств измерения расхождение не превысило 5 %, что позволяет сделать предположение о систематической ошибке в сторону занижения значений скоростей течения профилографом River Ray для данного измерения. Причиной этого может быть большая разница в векторах направлений нормальной и истинной скорости потока на скоростных вертикалях. Данный вопрос требует дальнейшего изучения. В табл. 1 представлены итоговые результаты измерений.

Таблица 1

Сравнение значений расходов воды, полученных на р. Нева различными СИ

Параметр	ГР-21М1	Поссейдон-1	River Ray		M9	
			Прямой	Обратный	Прямой	Обратный
F, м^2	2340	2340	2467	2423	2444	2435
$V_{ср}$, м/с	0,815	0,817	0,712	0,676	0,835	0,762
Q, м^3/с	1909	1914	1756	1638	2041	1857
Итог Q	1909	1914	1697		1949	

Стоит отметить и разницу в продолжительности измерения тем или иным СИ расхода воды. Так, совокупно на измерение расхода воды профилографом ушло 1 ч 35 мин (прямой и обратный ход), тогда как измерение вертушкой многоточечным способом заняло порядка 6 ч. Переход от многоточечного к основному методу измерения позволил бы сохранить порядка 2 ч. Тем не менее выгода в производительности измерения расхода воды с помощью ADCP все равно оставалась бы существенной.

На рис. 2 представлен поперечный профиль русла реки с распределением разностей в измеренных скоростях течения различными датчиками. Основные различия наблюдаются в придонном слое. Если отклонение значений по профилографу можно объяснить отсутствием непосредственных измерений в придонной «слепой зоне», то отклонение данных электромагнитного датчика и гидрометрической вертушки не имеет однозначной трактовки. По мнению авторов, это явление может быть объяснено тем, что кососструйность течения вблизи дна выше, что повышает погрешность обоих средств измерения. Эпюры скоростей (рис. 3) также имеют схожий, местами полностью идентичный характер, как на стрежне, так и у берегов.

В ходе полевых испытаний на р. Оби возникали проблемы различного генезиса:

1. Отказ внутренней памяти профилографа. Проблема возникает из-за непредвиденных сбоев и отключения ноутбука в процессе измерения. При этом в памяти ПО сохраняется измерения на предыдущей от момента отключения вертикали, но многократное повторение сбоя может привести к ошибке чтения внутренней карты памяти прибора. Проблема решилась форматированием внутренней карты памяти с помощью специального меню в ПО RSSL). Также необходимо быть бдительным к попаданию влаги на незащищенные элементы ноутбука (разъемы, входы), следить за его зарядом.

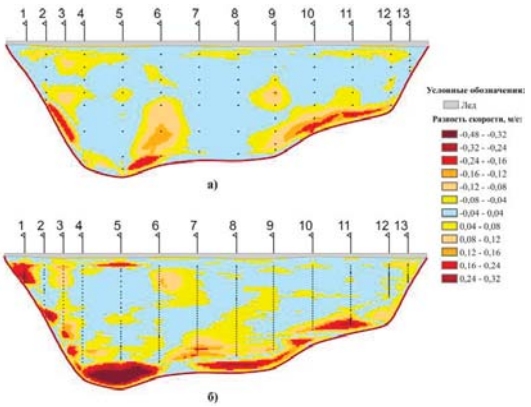


Рис. 2. Графически представленная разность скоростей течения для р. Невы – пос. им. Свердлова между: а) ГР21-М1 и Посейдон-1, б) ГР21-М1 и RiverSurveyor M9

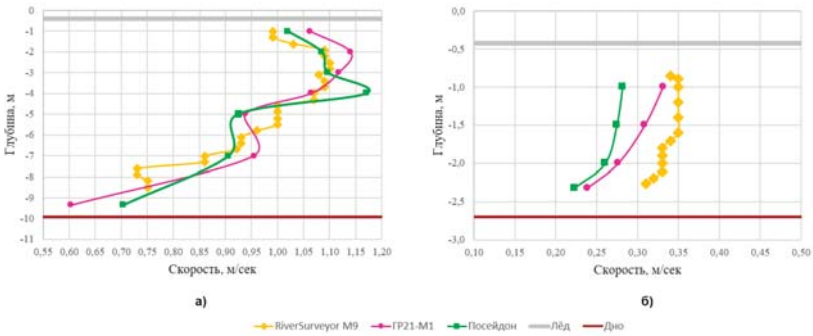


Рис. 3. Распределение скоростей течения по глубине на скоростной вертикали: а) № 4, b) № 13 для р. Невы – пос. им. Свердлова

2. Задание азимутального угла створа для данного типа профилографа определяет точность регистрируемых значений скоростей течения (при неправильном задании угла значения могут быть отрицательными). Азимутальный угол может быть введен и после производств измерений, а скорости при этом пересчитываются автоматически.

3. Быстрый разряд внешнего аккумулятора при производстве работ при отрицательных температурах воздуха (всегда необходимо иметь запасные внешние источники питания и корректные зарядные устройства к ним).

Таким образом, максимальной производительности удалось достичь в последний из полевых дней, когда прямой и обратный ход измерения в створе р. Обь – слияние удалось выполнить всего за 86 мин. Результаты измерения расходов воды приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты измерения расходов воды на р. Обь

Створ	Расход воды, м^3/с	Площадь сечения, м^2	Глубина, м		Скорость течения, м/с			Ширина русла, м
			Средн.	Макс.	Средн.	Мин.	Макс.	
Прямой ход (от уреза правого берега к урезу левого)								
1. Вартовская	1070	4615	11,7	20,0	0,23	–0,02	0,34	396
2. Чехлоней	1225	3182	10,9	16,7	0,38	–0,08	0,67	297
3. Обь (слияние)	2435	7935	10,0	16,2	0,31	0,05	0,56	787
Обратный ход (от уреза левого берега к урезу правого)								
1. Вартовская	1080	4619	11,9	20,0	0,23	0,04	0,35	396
2. Чехлоней	1200	3175	10,4	16,7	0,39	–0,08	0,63	297
3. Обь-слияние	2320	7930	10,2	16,3	0,29	0,04	0,55	787

Сумма расходов по протокам отлична от расхода воды после их слияния на 3,99 %, разница между прямыми и обратными ходами не превышает 5 % для каждого из створов, что говорит о высокой точности произведенных измерений. Дополнительно в рамках производимых работ был оценен вклад экстраполяции скоростей течения ПО ADCP в верхней части эпюры.

«Мертвая зона» профилирования по каналу скорости в верхней части эпюры (где скорости не измеряются, а экстраполируются) для ADCP в створе протоки Вартовская составляла от 3,25 до 11,5 %. При этом экстраполяция эпюры скорости под ледяным покровом всегда являлось сложной гидравлической задачей. В связи с чем в верхней части потока на каждой из вертикалей до горизонта 3 м были произведены детальные измерения скоростей течения СИ «Посейдон». ПО RSSL позволяет пользователю варьировать части эпюр скоростей течения, которые были экстраполированы, изменяя два параметра – k и процент используемых ячеек. Таким образом для протоки Вартовская были пересчитаны каждая из скоростных эпюр, получены новые частные (на вертикали) и общий расходы воды. Максимальная разница для расходов на вертикали составила 4,41 %, минимальная 0,09 и в среднем составила 1,32 %. Для общего расхода разница составила всего 0,52 % (1084 м^3/с до пересчета и 1078 м^3/с после).

Результаты показывают, что, несмотря на довольно значительные «слепые зоны» в скоростном поле сверху и снизу потока, экстраполяционные механизмы, заложенные в ПО RSSL, позволяют нивелировать их влияние на конечный результат путем грамотной автоматической экстраполяции.

На самой маловодной из изучаемых рек, р. Оредеж, расход воды оценивался с помощью сразу трех СИ. Измерения происходили в достаточно морозный день, при температуре воздуха от –5 до – 15 ºС. Измерения вертушкой и Посейдоном выполнялись детальным способом. Сравнительная характеристика полученных расходов воды приведена в табл. 3.

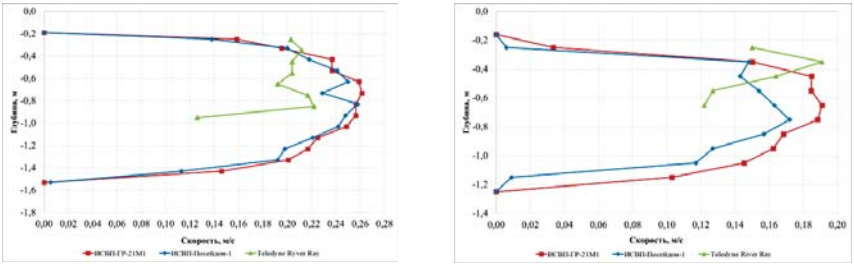
Таблица 3

Сравнение полученных расходов воды на р. Оредеж

Средство измерения	F, м^2	$V_{ср}$, м/с	Q, м^3/с
ИСВП ГР21М1	13,7	0,155	2,12
ИСВП Посейдон-1	13,7	0,130	1,78
Teledyne RDI River Ray	13,2	0,156	2,07

Расхождение полученных расходов воды по Посейдону от ГР-21М1 довольно существенно (16 %) и не укладывается в нормативную точность в 5 %, по ADCP – 2,36 %.

На рис. 4, *а*, *б* отображены скоростные эпюры по р. Оредеж на максимальной и средней по глубине скоростных вертикалях. Как видно из рисунков, RiverRay имеет слепую зону по глубине, которая особенно значительна на малых водотоках. Этим объясняется наименьшая из полученных площадей живого сечения у River Ray. На всех полученных эпюрах вертушка ГР-21М1 показывала повышенные скорости течения, в сравнении с остальными СИ, вследствие этого расход также выше.



а *б*

Рис. 4. Скоростные эпюры р. Оредеж: а – скоростная вертикаль № 5 с максимальной глубиной русла; б – скоростная вертикаль № 3 со средней глубиной русла

Выводы

Ниже представлены основные преимущества и недостатки измерения расхода воды в зимних условиях при помощи ADCP, в сравнении с классическими измерениями гидрометрической вертушкой.

1. Последовательность действий при измерении расхода воды в период ледостава четко определена. Основные производители профилографов уже выпустили специализированное программное обеспечения для измерений в таких условиях.

2. При соблюдении всех требований к методике измерений точность расчета расхода воды при помощи ADCP сопоставима с вертушечными измерениями.

3. Затраты времени на измерение с помощью ADCP значительно ниже. Это выражается как во время самих измерений (меньшее количество точек измерений), во время подготовительных работ (бурение лунок с меньшим диаметром отверстий), так и во времени обработки результатов (расход воды считается автоматически).

4. Трудозатраты ниже. На больших реках отсутствует необходимость в перетаскивании большого количества подсобного оборудования между скоростными вертикалями и опускании датчика с грузом до дна водотока.

5. Наибольшая эффективность применения ADCP достигается при измерении расходов воды во время ледостава на больших реках. На средних реках

метод эффективен только при использовании профилографов с малым диапазоном глубины профилирования (Teledyne RD Stream Pro и SonTek RS5). Для малых рек метод не имеет ощутимых преимуществ перед традиционными СИ.

6. Датчик ADCP обязательно должен быть термически акклиматизирован перед началом измерений.

7. Гидрометр должен быть хорошо ознакомлен с методикой работ и интерфейсом программного обеспечения. Рекомендуется проводить обучающие работы на реальных объектах в теплый период года.

8. Повышен риск выхода из строя оборудования. Если устройство гидрометрической вертушки просто и понятно, то починить ADCP на месте работ не представляется возможным.

9. Не рекомендуется использовать при большом количестве скопившейся подо льдом шуги. Прибор можно будет не достать из-подо льда.

10. Для измерений необходима специализированно штанга.

11. Всегда необходимо иметь с собой запасной источник питания.

12. Особое внимание стоит уделять бережному обращению с соединительным кабелем ADCP: избегать перегибов, механических повреждений. Стоимость кабеля довольно высока, а производство работ без него невозможно. Необходимыми мерами в связи с этим являются разработка крепления к штанге, предусматривающее свободный выход кабеля на поверхность, обработка стенок лунки от зазубрин и шероховатостей перед началом измерения на вертикали.

13. Помимо основного комплекта оборудования необходимым является наличие надежного защищенного ноутбука, обеспечивающего бесперебойную работу в течение длительного времени (не менее 3 ч) в условиях сильных морозов, повышенной влажности, выпадения осадков в виде снега.

14. Особенности, описанные в пунктах с 8 по 13, свидетельствуют о том, что измерение расходов воды с помощью ADCP подо льдом сопряжено с использованием большого числа технически сложного и дорого оборудования, при выходе из строя которого измерить расход воды не удастся. Рекомендуется всегда иметь запасной вариант для измерения расхода воды.

Список литературы

1. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 2. Гидрометеорологические наблюдения на постах. Ч. 2. Гидрологические наблюдения на постах. Л. : Гидрометеоиздат, 1975. С. 133–139.

2. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 6. Гидрологические наблюдения и работы на речных станциях и постах. Ч. 1. Гидрологические наблюдения и работы на больших и средних реках. Л. : Гидрометеоиздат, 1978. С. 131–133.

3. РД 52.08.163-88. Дополнение к Наставлению гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 6. Гидрологические наблюдения и работы на речных станциях и постах. Ч. 1. Гидрологические наблюдения и работы на больших и средних реках. Л. : Гидрометеоиздат, 1989. С. 12–14.

4. РД 52.08.767-2012. Расход воды на водотоках. Методика измерений акустическими доплеровскими профилографами Stream Pro и Rio Grande. СПб. : ФГБУ «ГГИ», 2012. 63 с.

5. *Campbell P.* Standard operating procedures for under ice discharge measurements using ADCP's. // Water Survey of Canada, 2015. 45 p.

6. USGS Hydroacoustic Forum. URL: https://hydroacoustics.usgs.gov (дата обращения: 17.09.2021).

7. Страница ЛГП ГГИ на Официальном сайте ФГБУ «ГГИ». URL: http://www.hydrology.ru/ru/structure/laboratoriya-gidrologicheskih-priborov-lgp (дата обращения: 12.10.2021).

УДК 551.510.42

Оценка точности измерения метеорологической дальности

Н. О. Григоров (grigorov46@mail.ru), В. С. Никитина (victoriaflint01@gmail.com)
РГГМУ, Санкт-Петербург

Аннотация. На основе уравнений Кошмидера и Бугера – Ламберта рассчитывается зависимость трансмиссометров от длины базы и метеорологической дальности видимости. Зависимость имеет максимум, положение которого зависит как от МДВ, так и от длины базы. Получены соотношения между этими величинами, позволяющие рассчитать погрешности трансмиссометра и оптимальную длину базы.

Ключевые слова: трансмиссометры, метеорологическая дальность видимости, чувствительность, погрешность.

На основе уравнений Кошмидера и Бугера – Ламберта легко вывести формулу для чувствительности трансмиссометра – прибора для определения метеорологической дальности видимости [1]:

$$S = \frac{d\frac{J}{J_0}}{dL} = \frac{d}{dL}\left(\varepsilon^{\frac{l}{L}}\right) = -\varepsilon^{\frac{l}{L}} \cdot \ln\varepsilon \cdot \left(\frac{l}{L^2}\right) \quad (1)$$

где J – измеренная яркость светового луча, J_0 – исходное значение яркости луча, вышедшего из источника, l – расстояние до базы (в данном случае имеется в виду расстояние, проходимое лучом света в мутной атмосфере, т. е. вдвое большее, чем расстояние между фотометрическим блоком и отражателем), ε – порог контрастной чувствительности глаза, в исследованиях принятый равным 0,03, L – метеорологическая дальность видимости [2].

По формуле (1) были проведены вычисления чувствительности для l от 1 до 500 м и для L = 30 м, 50 м, 100 м, 200 м, 500 м, 1000 м, 2000 м, 5000 м, 10 000 м. По результатам вычислений были построены графики. Установлено, что при L = 30 м максимум чувствительности наблюдается, когда l = 8 м, чувствительность равна 0,12 $м^{-1}$, а при L = 10 000 м максимум чувствительности наблюдается, когда l = 2858 м, чувствительность равна $3{,}6 \cdot 10^{-5}$ $м^{-1}$. Иными словами, при увеличении МДВ максимальная чувствительность снижается и наблюдается при большем значении длины базы.

Далее по формуле (1) были проведены расчеты чувствительности в зависимости от МДВ в диапазоне L от 1 до 5000 м и l = 10 м, 20 м, 50 м, 100 м, 200 м, 500 м. По результатам вычислений установлено, что при l = 10 м максимум чувствительности наблюдается, когда L = 20 м, чувствительность равна 0,02 $м^{-1}$, а при l = 500 м максимум наблюдается, когда L = 730 м, чувствительность равна 0,000298 $м^{-1}$. Сделан вывод, что при увеличении расстояния до базы максимум чувствительности сдвигается в сторону увеличения МДВ.

Для более тщательного изучения соотношения между длиной базы и МДВ были найдены максимумы функций $S(l)$ и $S(L)$:

$$\frac{dS}{dl} = \ln\varepsilon \cdot \varepsilon^{\frac{l}{L}} \frac{1}{L^4}\left(\frac{\ln\varepsilon \cdot l}{L} + 1\right) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{dS}{dL} = \ln \varepsilon \cdot \varepsilon^{\frac{l}{L}} \frac{1}{L^3} \left(\ln \varepsilon \cdot \frac{l}{L} + 2 \right) = 0 \quad (3)$$

Из уравнений (2) и (3) было получено соответственно:

$$L = 3{,}5l \quad (4)$$

$$L = 1{,}75l \quad (5)$$

Данные соотношения подтверждают расчеты, сделанные по формуле (1).

Полученные значения чувствительности позволили рассчитать погрешность трансмиссометра. За основу были взяты опубликованные технические характеристики ФИ-4 [3] и с их помощью рассчитана абсолютная погрешность измерения светового потока фотометра, которая в дальнейшем считалась постоянной. С учетом значений чувствительности и ее зависимости от МДВ, была рассчитана абсолютная погрешность измерения дальности видимости.

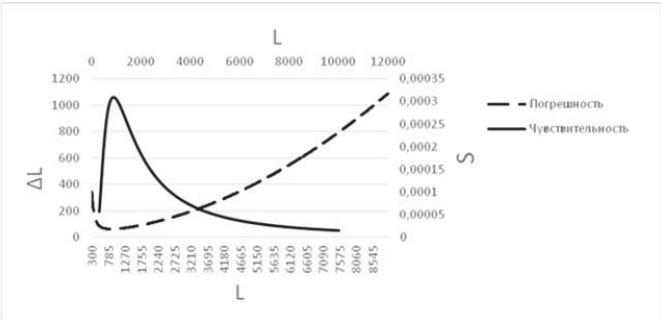


Рис. Зависимость чувствительности трансмиссометра S и погрешности измерения дальности видимости ΔL от МДВ при постоянной базе 200 м

Список литературы

1. *Григоров Н. О., Никитина В. С.* Исследование чувствительности и погрешности трансмиссометров // Современные проблемы гидрометеорологии и устойчивого развития Российской Федерации : сборник тезисов Всесоюзной научно-практической конференции, 14–15 марта 2019 г. СПб. С. 72–73.

2. *Григоров Н. О., Восканян К. Л., Саенко А. Г.* Методы и средства гидрометеорологических измерений. Метеорологические приборы. СПб. : РГГМУ, 2012. 306 с.

3. Технические характеристики ФИ-4. URL: https://all-pribors.ru/opisanie/49487-12-fi-4-52445 (дата обращения: 21.09.2021).

УДК 551.508.8

Сравнительный анализ консолидированных данных малогабаритных датчиков о состоянии окружающей среды и данных стандартных измерений на метеорологической станции

В. П. Евстигнеев (vald_e@rambler.ru), П. Н. Кузнецов (PNKuznetsov@sevsu.ru), Д. Ю. Воронин (voronin@sevsu.ru), В. А. Наумова (vnaumova51@mail.ru)
Севастопольский государственный университет, Севастополь

Аннотация. Приведены результаты параллельных измерений параметров окружающей среды с использованием набора датчиков BME280, AHT20, DHT22 и стандартных наблюдений на метеорологической станции «Севастополь». Показано, что наилучшее качество воспроизведения хода параметров продемонстрировал датчик BME280. Исследование проведено при использовании разработанного авторами аппаратно-программного стенда для комплексного мониторинга метеорологических параметров окружающей среды, позволяющий производить сравнительное тестирование нескольких датчиков с передачей данных на WEB-сервер.

Ключевые слова: малогабаритный датчик, температура воздуха, влажность воздуха, атмосферное давление, мониторинг окружающей среды.

Неотъемлемой частью экологического мониторинга является система климатического мониторинга, основной задачей которой является измерение основных метеорологических параметров для изучения и анализа атмосферных явлений и процессов, характеризующих соответствующее состояние погоды. Наибольший интерес представляет собой мониторинг опасных событий, при развитии которых метеорологические элементы могут достигать своих аномальных значений.

Одним из примеров негативного метеорологического риска является явление аномальной жары. Это явление оказывает целый комплекс неблагоприятных воздействий на человека, например, на когнитивные и физические способности [1; 2] вплоть до увеличения смертности [3]. Города и городские районы особенно уязвимы к экстремальным температурам из-за эффекта «острова тепла», который в будущем будет только усиливаться [4]. Поскольку бóльшая часть человечества проживает в городах, изучение мезо- и микромасштабного распределения метеорологических характеристик на городском пространстве становится важной актуальной научно-исследовательской задачей, имеющей конкретное прикладное значение. Пространственное распределение метеорологических характеристик является довольно неоднородным и испытывает большую изменчивость внутри городского пространства. Основной метод картирования метеопоказателей в городах – прямые контактные *in situ* измерения в конкретных локациях города [5] с последующей статистической интерполяцией с учетом дополнительных ковариантных факторов (например, возвышение и тип подстилающей поверхности). Измерения на станциях, проводимые гидрометеорологической службой, являются довольно редкими и не освещают быстро протекающие динамические процессы в сложных орографических условиях. Кроме того, высокая стоимость обслуживания таких станций на практике ограничивает плотность метеорологической сети.

Растущая цифровизация привела к разработке и стандартизации протоколов связи, таких как LoRaWAN (Long Range Wide Area Network), а также к производству и развертыванию недорогих датчиков для приложений «умного дома». Такие недорогие датчики получили широкое распространение, например, в виде частных метеорологических станций, которые все чаще приобретаются частными лицами для измерения таких метеорологических параметров, как температура, влажность и осадки. Использование информации от таких недорогих датчиков имеет большой потенциал для увеличения пространственного охвата измерений метеохарактеристик в городских районах. Благодаря данным частной сети датчиков можно преодолеть вышеперечисленные проблемы. Поэтому нами была поставлена задачи оценки достоверности воспроизведения метеорологических параметров малогабаритными датчиками в сравнении со стандартными наблюдениями на метеорологической станции. Основная цель – оценить потенциал их использования для построения дополнительной сети мониторинга окружающей среды для оперативного мезо(микро)масштабного картирования городского пространства.

Технические характеристики, локация размещения и метод первичной обработки данных

Для проведения эффективного вариантного анализа предлагаемого подхода потребовалось, кроме анализа литературных источников, спроектировать и реализовать программно-аппаратный стенд для проведения натурных экспериментов. Параметры альтернативных датчиков сравнивались с эталонными значениями, получаемыми при помощи сертифицированных, поверенных приборов, размещенных на метеорологической станции. Измерения метеорологических параметров были выполнены согласно ГОСТ Р 58712-2019 «Автоматизированная метеорологическая измерительная система».

Параллельный мониторинг состояния окружающей среды выполнялся в Севастопольском регионе и проводился в период с 30.07 по 15.08.2021 на Павловском мысу на территории метеорологической станции Севастополь. Высота установки стенда с датчиками соответствовала высоте расположения стандартных термометров в будке на метеорологической площадке. Датчики фиксировали результаты измерений с частотой 15–20 секунд. Информация с датчиков передавалась на сервер с последующей визуализацией и записью данных по таким параметрам как температура воздуха, влажность и, отдельно по датчику BME280, атмосферное давление. Структурно-функциональная схема измерительного стенда приведена на рис. 1.

Климатическое исполнение измерительного стенда соответствует требованиям ГОСТ 15150-69 по группе УХЛ (умеренный и холодный климат) и Т (тропический климат), а также соответствуют требованиям ГОСТ РВ 20.39.304-98, что гарантирует способность в автономном режиме обеспечивать измерения метеорологических величин даже в полевых условиях на неподготовленных площадках.

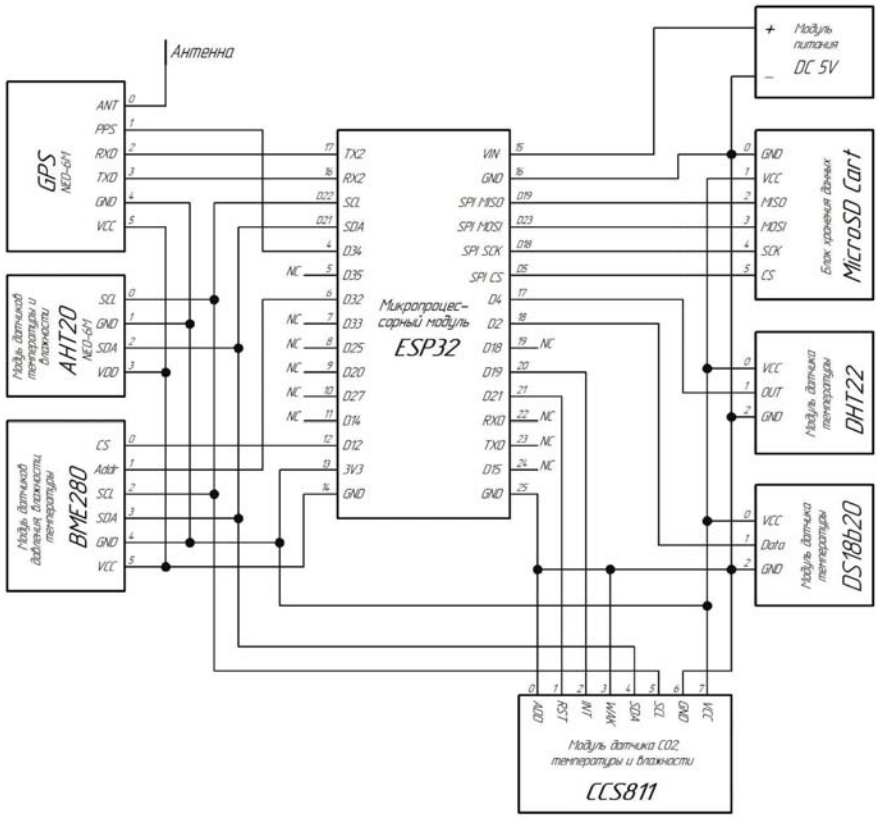


Рис. 1. Структурно-функциональная схема измерительного стенда

Для измерения основных метеорологических параметров в модуле был установлен набор датчиков: BME280, AHT20 и DHT22. Датчик BME280 является датчиком нового поколения, производимый фирмой Bosch Sensortec. Он позволяет производить измерения температуры, влажности, а также атмосферного давления. По сравнению с первыми датчиками серии (BMP085 и BMP180) он имеет лучшие характеристики и меньшие размеры, а также имеет встроенный гигрометр. Датчик BME280 является цифровым, имеет заводскую калибровку и поддерживает возможность подключения по двум интерфейсам – I2C и SPI. Согласно технической документации, его разрешающая способность при измерении температуры составляет 0,01 ºС, точность измерения влажности не более 3 %, а давления около 1 гПа. Кроме довольно высокой точности, преимуществами датчика является низкое потребление тока (3,6 мкА при частоте опроса 1Гц), долгосрочная стабильность и высокая надежность. Диапазон измерения температуры находится в пределах от –40 до 85 ºС.

Датчик AHT20 также является цифровым датчиком нового поколения и позволяет производить измерения температуры и влажности. Заявленная производителем точность измерения температуры составляет ±0,3 ºС, а влажности ±2 %. Одной из важнейших особенностей работы датчика является высокая энергоэффективность, по заверениям производителя, до 3 раз превосходящая датчиков предыдущего поколения. Рабочий диапазон измерения температуры датчика также находится в пределах от –40 до 85 ºС.

Датчик DHT22 относится к цифровым датчикам старого поколения, основанный на использовании чувствительного емкостного датчика и NTC-термистора. При производстве каждый датчик DHT22 подвергается калибровке с сохранением поправочного коэффициента в памяти. Необходимость такой процедуры обусловлена тем, что компоненты, входящие в него, имеют не одинаковые выходные параметры. Вследствие этого для получения более точных результатов необходимо учитывать эту особенность, посредством предварительного считывания данного параметра и вводя соответствующую поправку. Основными преимуществами данных датчиков являются небольшие размеры, низкое энергопотребление и стоимость, высокая дальность передачи данных (до 20 м). Диапазон измерения температуры составляет от –40 °С до 80 °С; точность измерения: 0,5 °С. Точность измерения влажности составляет 2 %.

Тестирование измерительного стенда в натурных условиях показало, что его реальное энергопотребление существенно превышает расчетные значения. Вследствие этого была проведена дополнительная работа по его параметрической оптимизации. Данная работа была декомпозирована на три составляющих – программную, схемотехническую и архитектурную. При выполнении программной оптимизации выполнялись процедуры, направленные на использование в программном коде алгоритмов, ускоряющих вычисление математических операций. Кроме этого в базовый код прошивки микроконтроллера была добавлена функция, позволяющая адаптивно переключаться между режимами энергопотребления процессора от «нормального» до «глубокого сна» с пробуждением по таймеру.

При выполнении архитектурной и схемотехнической оптимизации производилось измерение энергопотребления стенда в зависимости от типа используемой памяти микроконтроллера, а также от его производительности. Оценка производительности и энергоэффективности микроконтроллера при выполнении данных этапов работ осуществлялась посредством тестового пакета ULPBench, а также USB-тестера. В результате проведенной работы было принято решение в качестве промежуточного буфера использовать встроенную в микроконтроллер SPI Flash память с файловой системой SPIFFS вместо внешней памяти. Также была снижена тактовая частота микроконтроллера с 240 до 80 МГц.

Результаты тестов показали, что проведенный комплекс оптимизационных работ позволил более чем в 2 раза улучшить показатель энергопотребления, что позволило увеличить время автономной работы стенда с 10 до 21 дня.

В качестве первичного обобщения данных мониторинга было выполнено сравнение рядов данных по датчикам и данных ежечасных метеорологических

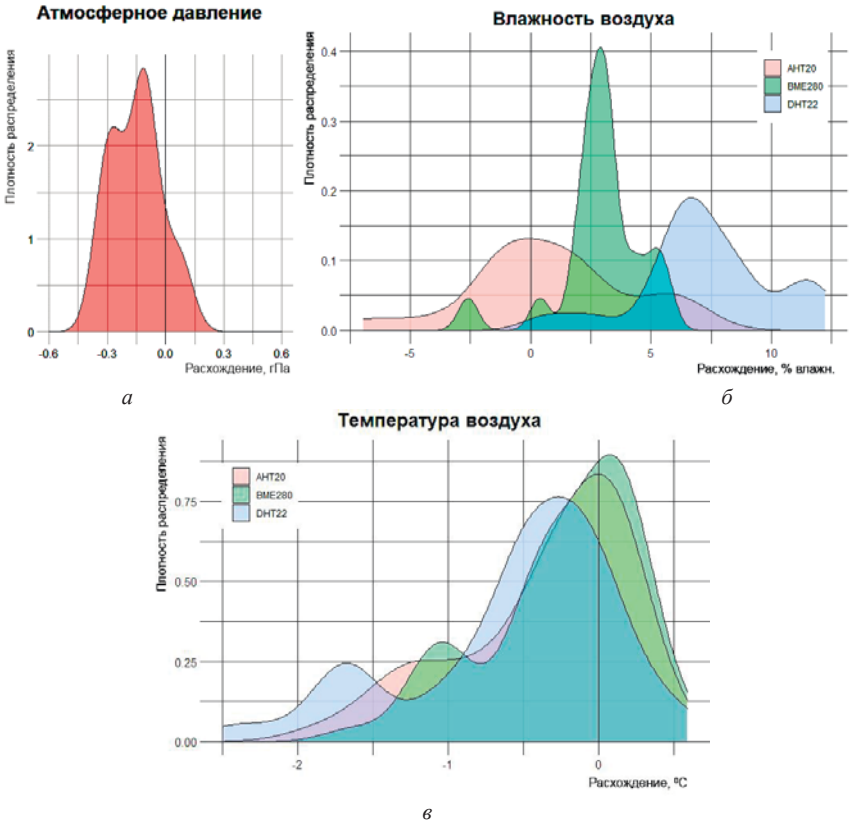
наблюдений за температурой воздуха по термографу, ежесрочных (измерения каждые 3 ч) данных измерения характеристик влажности воздуха и атмосферное давление (BME280). Учитывая специфику обработки данных измерений на метеостанции – лент термографа, снятие показаний с термометров и барометра – более «частые» данные датчиков решено было осреднить за малые промежутки времени в пределах каждого целого часа. Промежуток времени осреднения составил ±5 мин относительно целого часа. В результате таких манипуляций был получен ряд согласованных значений параметров как по станционным данным, так и по данным датчиков.

Результаты

Сравнение рядов данных комплекса датчиков и измерений на метеорологический станции проводилось по следующе схеме. На первом этапе выполнено сравнение кривых плотностей распределения расхождений между датчиками и данными метеостанции. Построение кривой плотности распределения расхождений выполнено путем ядерной оценки плотности по данным исходных эмпирических кривых частот распределения ошибок. Использована нормальная ядерная функция с шириной полосы сглаживания равной 3/2 от среднеквадратического отклонения выборки. В этой связи флуктуации выборочных оценок относительных частот в градациях сглажены.

Результаты сравнения представлены на рис. 2. Для датчика BME280 из рис. 2, *а* видно занижение величины атмосферного давления, однако величина расхождений достаточно мала, из чего можно вывод о хорошем воспроизведении хода атмосферного давления указанным датчиком. По элементам влажности и температуры воздуха (см. рис. 2, *б*, *в*) результаты не столь однозначны. Из рис. 2, *б* следует, что датчики BME280, DHT22 завышают значение влажности в отличие от AHT20, среднее расхождение по которому близко к 0. Это свидетельствует о наличии в первых двух датчиках систематических погрешностей. Тем не менее, эта погрешность может быть устранена путем добавления соответствующей средней невязки. Важной характеристикой является уширение кривых распределений. Например, датчик дал более широкий диапазон разброса значений, что говорит о несостоятельности данных этого датчика для воспроизведения хода влажности воздуха, несмотря на то что среднее расхождение близко к нулю. В противоположность AHT20 диапазон изменчивости расхождений для датчика BME280 существенно более узкий. При условии устранения (даже на программно-аппаратном уровне) систематической погрешности этот датчик выглядит более предпочтительным.

По температуре воздуха результаты несколько иные. Датчик DHT22 в среднем занижает значения температуры воздуха, а датчики AHT20 и BME280 имеют медианное значение расхождения близкое к 0. Распределения существенно асимметричны, что определяется вероятно фактором неравномерного нагрева корпуса стенда днем и охлаждения ночью. Тем не менее, диапазон разброса расхождений для датчиков AHT20 и BME280 примерно совпадают.



а *б* *в*

Рис.2 Диаграммы плотности распределения расхождений в измерениях по датчикам и на метеорологической станции по элементам: а – атмосферное давление (датчик BME280); б – влажность и температура; в – воздуха

На втором этапе сравнения выполнен расчет специальных показателей качества воспроизведения данных метеостанции. В таблице представлен результат расчета. Выполнен расчет по 7 показателям качества подгонки: ME – средняя ошибка, MAE – средняя абсолютная ошибка, MSE – средний квадрат ошибки, RMSE – среднеквадратическая ошибка, PBIAS – систематическое отклонение, выраженное в % по отношению к наблюденным данным, rSD – отношение стандартных отклонений наблюденных и измеренных датчиками значений, bR2 – коэффициент детерминации, умноженный на угловой коэффициент регрессии между наблюденными и измеренными датчиками значениями. Показатель bR2 позволяет оценить качество синтезированных данных даже в случае, когда модель дает систематические отклонения и ошибочные значения, но коэффициент детерминации все равно остается неправдоподобно высоким.

Таблица

Качество воспроизведения атмосферного давления, влажности и температуры воздуха в локации метеостанции «Севастополь» по данным датчиков за период 30.01–15.08

Показатели качества	Метеорологические элементы						
	Температура воздуха			Влажность воздуха			Атмосферное давление
	BME280	AHT20	DHT22	BME280	AHT20	DHT22	BME280
ME	0,74	1,06	1,12	–5,79	–1,58	–14,7	0,1
MAE	1,22	1,39	1,27	6,28	5,16	14,7	0,27
MSE	2,75	3,92	3,11	45,2	45,1	246,3	0,18
RMSE	1,66	1,98	1,76	6,72	6,72	15,69	0,43
PBIAS %	3,50	5,00	5,30	–7,5	–2,0	–19,0	0,0
rSD	1,29	1,37	1,23	1,12	1,43	1,35	0,96
bR2	0,83	0,81	0,82	0,89	0,94	0,79	0,94

Как и на предыдущем этапе в показателях проявилась систематическая ошибка измерениях датчиков, что проявилось в наличии в выборке измерений датчиков систематического завышения, которое по критерию PBIAS составило величину более 3–5 % по температуре воздуха, 2–19 % по влажности. По выборке значений атмосферного давления PBIAS неотличим от 0, что свидетельствует об отсутствии систематических расхождений между датчиком BME280 и станционными наблюдениями.

Средняя, как и среднеквадратическая ошибки в значениях температуры воздуха находится в пределах 1,0 °С, что с учетом влияния прогрева корпуса стенда и будки с термометрами является удовлетворительным результатом. По влажности воздуха эти ошибки составили значения 5–15 %. Наибольшее значение ошибки соответствует датчику DHT22 и свидетельствует о его несостоятельности для использования в качестве датчика регулярных наблюдений за состоянием окружающей среды. По рядам данных атмосферного давления ошибки существенно меньше. Так средние и среднеквадратические ошибки составили величину 0,1 и 0,3 соответственно, что по отношению к величине изменчивости давления представляет довольно малую величину.

Величина rSD показывает, что во всех случаях всех датчиков и метеопараметров, кроме атмосферного давление, разброс измеренных величин датчиками меньше, чем величина изменчивости данных станционных наблюдений. Тем не менее, на основе данных измерений датчиков можно воспроизводить ход метеорологических элементов путем использования регрессионных зависимостей, полученных на основе параллельных измерений.

Из рис. 3 видно, что теснота связи значений датчиков с величиной на метеорологической станции удовлетворительная. Линейная регрессионная зависимость может быть использована для корректировки данных датчиков. Интересно отметить, что для атмосферного давления была получена наилучшая линейная связь, что подтверждается высоким значением коэффициента детерминации $R^2 = 0{,}945$.

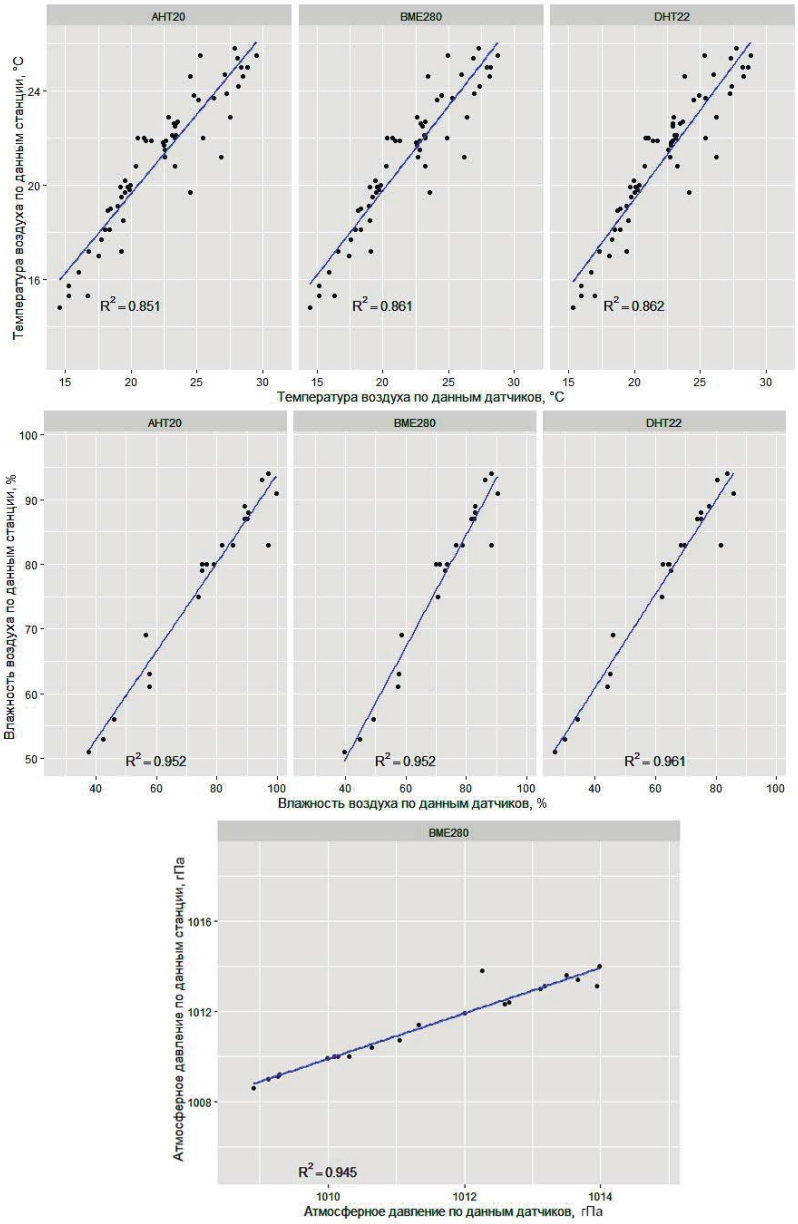


Рис. 3. Диаграммы рассеяния значений метеорологических параметров (первый ряд – температура воздуха (°C), второй ряд – влажность воздуха, третий ряд – атмосферное давление), построенная по данным метеорологической станции и стенда с датчиками

Вывод

Сбор данных о пространственном температурном распределении в городах требует создания комплекса научно-технических решений в области разработки автоматических и полуавтоматических информационно-измерительных и вычислительных систем, предназначенных для реализации технологии мезомасштабного мониторинга многопараметрических метеорологических, экологических и других параметров приземного слоя атмосферы над мезомасштабными объектами. Отличительная особенность таких систем заключается в комплексном использовании опорных стационарных и мобильных пространственно-распределенных программно-аппаратных комплексов, размещенных на борту транспортных средств, осуществляющих передачу данных в центр обработки информации. Практическая реализация, разработанной авторами концепции, требует проведения ряда предварительных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, направленных на создание территориально-распределенной системы мониторинга, состоящей из множества гетерогенных измерительных модулей, обладающих достаточной точностью измерений и, вместе с тем, имеющих низкую стоимость, энергопотребление и массогабаритные характеристики. Одним из важнейших этапов таких работ является вариантный анализ по выбору датчиков метеорологических параметров, отвечающих данным требованиям.

В результате параллельного мониторинга с использованием набора малогабаритных датчиков и стандартных измерений на метеорологической станции можно сделать следующий вывод. Примерно схожее качество воспроизведения хода метеорологических величин было выявлено по датчикам BME280 и AHT20. Датчик DHT22 демонстрирует наихудшие результаты. Датчик BME280 способен относительно точно измерять и воспроизводить ход атмосферного давления без потери качества для других метеорологических элементов, что является важным конкурентным преимуществом.

Таким образом, в дальнейшей работе построение дополнительной сети распределенного мониторинга должно осуществляться на основе датчика BME280.

Благодарности. *Работа выполнена при финансовой поддержке внутреннего гранта ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет» № 35/06-31 «Развитие гетерогенных технологий мезомасштабного метеорологического мониторинга при использовании высокопроизводительных вычислительных систем».*

Список литературы

1. Heat, human performance, and occupational health: a key issue for the assessment of global climate change impacts / T. Kjellstrom, D. Briggs, C. Freyberg, B. Lemke, M. Otto, O. Hyatt // Annu. Rev. Public Health. 2016. V. 37, № 1. P. 97–112.

2. Empirical evidence of mental health risks posed by climate change / N. Obradovich, R. Migliorini, M. P. Paulus, I. Rahwan // Proc. Natl. Acad. Sci. 2018. Vol. 115, N 43. P. 10953–10958.

3. Has the impact of heat waves on mortality changed in France since the European heat wave of summer 2003? A study of the 2006 heat wave / A. Fouillet, G. Rey, V. Wagner, K. Laaidi, P. Empereur-Bissonnet, A. Le Tertre, P. Frayssinet, P. Bessemoulin, F. Laurent, P. De Crouy-Chanel, E. Jougla, D. Hemon // Epidemiol. 2008. Vol. 37, N 2. P. 309–317.

4. Interaction of urban heat islands and heat waves under current and future climate conditions and their mitigation using green and cool roofs in New York City and Phoenix, Arizona / M. Tewari, J. Yang, H. Kusaka, F. Salamanca, C. Watson, L. Treinish // Environ. Res. Lett. 2019. Vol. 14, N 3. P. 034002.

5. Contrasting changes of urban heat island intensity during hot weather episodes / D. Fenner, A. Holtmann, F. Meier, I. Langer, D. Scherer // Environ. Res. Lett. 2019. Vol. 14, N 12. P. 124013.

УДК 528.71

Применение БПЛА для мониторинга пространственно-временных изменений наледей подземных вод

А. А. Осташов (andrey.ostashov@gmail.com)[1], Н. В. Нестерова (nnesterova1994@gmail.com)[1,2,3], О. М. Макарьева (omakarieva@gmail.com)[1,2], А. А. Землянскова (anastasiazemlanskova@gmail.com)[1]

[1] *Северо-Восточная научно-исследовательская мерзлотная станция, Институт мерзлотоведения им. П. И.Мельникова СО РАН, Магадан*
[2] *Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург*
[3] *Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург*

Аннотация. Исследована необходимость применения современных методов для мониторинга объектов, исследуемых в рамках гидрометеорологических задач. Описан метод измерения площади наледи и сопоставления со съемкой другого времени. Дан пример обработки таких измерений. Оценены проблемы использования БПЛА в мониторинге состояния наледей. Представлены результаты полевого выезда по съемкам наледей.

Ключевые слова: БПЛА, мониторинг, наледь, площадь наледи, объем наледи, ортофотоплан.

В последнее время беспилотные летательные аппараты (БПЛА) все чаще используют при исследовании различных географических объектов [5]. Они получили распространение благодаря относительной доступности, быстроте получения информации и высокому качеству получаемой информации. По результатам аэрофотосъемки есть возможность на месте получить информацию о состоянии и виде изучаемого объекта, и, на основе проведенной съемки, рассчитать ортофотоплан и цифровую модель рельефа (ЦМР). Периодичность съемки позволит обеспечить мониторинг изучаемого процесса или явления. БПЛА является отличным дополнением при комплексном исследовании объекта.

Перечисленные выше особенности позволяют использовать БПЛА в рамках гидрометеорологических задач, например, в исследовании экстремальных гидрометеорологических явлений, таких как прорывоопасные озера и селевые потоки и др. [4; 7]. Такие специфические объекты как наледи также могут стать объектом исследования с помощью БПЛА [1; 2; 6]. Наледи подвержены происходящему в данный момент изменению климата, что может быть причиной перераспределения водных ресурсов внутри сезона, а также поводом использовать наледь как маркер этого изменения в зоне их распространения. Одной из основных задач, решаемых с помощью БПЛА, является заверка данных дешифрирования снимков съемкой на местности. Также с помощью первичной разведки можно определить расположение источников и бугров пучения для формирования и корректирования программы исследований, включающей забор проб, точечные наблюдения за нарастанием и стаиванием и др. В том числе стоит подчеркнуть, что исследование наледей происходит зачастую в арктической зоне или приравненных к ней по климатическим условиям территориях, что накладывает дополнительные ограничения и создает специфические условия работы [3].

Целью работы является оценка пригодности использования БПЛА в исследованиях наледей.

Особенности применения БПЛА для исследования наледей

К задачам, решаемым с помощью БПЛА, можно отнести определение морфометрических характеристик и их динамику в пространстве и времени; данные съемки можно использовать для составления ландшафтных карт наледных полян, а также оценки русловых процессов в зоне наледеобразования. По ортофотопланам можно идентифицировать места разгрузки наледеобразующих вод, путем обозначения мест возникновения бугров пучения.

Для съемки необходимо задать условия, исходящие из поставленных задач. Высота съемки определяет пространственное разрешение получаемых в результате обработки ортофотоплана и цифровой модели рельефа. Для получения точной объемной модели необходимо производить съемку не только в надире (перпендикулярно к поверхности земли), но и под меньшими углами, а также иметь дополнительную перпендикулярную сетку для обеспечения наилучшего результата. Съемка по заранее запланированным маршрутам повышает точность получаемого результата, особенно это важно для интервальной съемки. Большую роль в качестве получаемой информации также играет перекрытие кадров, скорость движения беспилотника, модель камеры, подбор времени суток и погодных условий для съемки.

Среди положительных сторон использования БПЛА можно выделить относительную дешевизну, высокую скорость получения данных, низкая трудоемкость и высокое качество получаемой информации. Однако можно столкнуться со следующими ограничениями подобного подхода: плохими погодными условиями (дождь, туман, снег, сильный ветер), сложным, плохо урегулированным законодательством в сфере малых БПЛА, необходимостью наличия источника электроэнергии.

Если рассматривать непосредственно работу с наледями, можно выделить ряд специфических особенностей использования беспилотников. Необходимо обязательно регулировать ISO для обеспечения видимости как поверхности наледи, так и остальной поляны, иначе поляна может быть снята с затемнением, не обеспечивающим должное качество снимков. Или наледь будет засвечена и не будет находить общих точек поверхности на смежных снимках при обработке. Такая же проблема может быть при выпадении на поверхность наледи снега, который скрывает участки наледи, на которых рост ледяного тела остановился, что делает невозможным надежное дешифрирование получаемого плана. Помимо этого, даже поверхность снега может быть обработана некорректно из-за монотонности поверхности, покрытой снегом.

Методика определения морфометрических характеристик объектов

После выбора исследуемого объекта необходимо с запасом определить его границы, в рамках которых может происходить изменение морфометрических характеристик. Зачастую, если речь идет целиком об объекте, это можно сделать с помощью дешифрирования спутниковых снимков. Далее составляется в специальном программном обеспечении полетное задание, покрывающее исследуе-

мый объект маршрутами БПЛА с заданным интервалом и другими характеристиками съемки под используемую модель беспилотника. После получения разрешения на полет, производится непосредственно съемка в поле. При необходимости получения точных данных поверхности объекта можно использовать БПЛА с GNSS антенной, которая, работая одновременно с базовой станцией, при обработке дает точность в пределах первых сантиметров.

Камеральная обработка результатов съемки производится в фотограмметрическом программном обеспечении, например Agisoft Metashape. Характеристики полученных ЦМР и ортофотопланов будут зависеть от задаваемой точности расчетов, высоты съемки, качества кадров. Далее средствами ГИС происходит определение площади объекта по дешифровочному признаку по ортофотоплану. Например, для наледи используется классификация пикселей растра на кластеры по цветам. После проверки и внесения исправлений определяется площадь искомого кластера методами пространственного анализа. Для объема предусмотрен алгоритм вычитания ЦМР, полученных по результатам двух съемок, друг из друга с целью получения растра значений, отражающих разницу между объектами в разные промежутки времени.

Пример использования метода для определения площади и объема наледи

Объектом исследования являются несколько репрезентативных для региона наледей в пределах Магаданской области и Республики Саха (Якутия). Одним из объектов является Анмангындинская наледь. Она расположена в бассейне р. Анмангында в районе 152–159 км Тенькинской трассы (Магаданская обл.) в 30 км к юго-востоку от пос. Усть-Омчуг. Комплексные исследования на ней проводятся с июля 2020 г. по настоящий момент.

Результаты одной из съемок 04.07.20 приведены на рис. 1. За 2020–2021 гг. на Анмангындинской наледи ведется мониторинг с помощью БПЛА за нарастанием и стаиванием наледи посредством съемок по профилям, а также с помощью полетного задания, составленного в середине весны 2021 г. На данный момент ожидает обработки более 6 съемок для определения объема наледи на разные даты и более 10 съемок с целью получения площади. Так, по результатам двух съемок, с 4 по 15 июля произошло сокращение площади наледи в два раза с 0,65 км^2 до 0,31 км^2.

В рамках полевых работ 2020 г. получены снимки комплекса наледей на р. Кюбюме, расположенных вдоль федеральной трассы Р504 Колыма при помощи БПЛА (рис. 2). В течение двух месяцев с 28 июля по 25 сентября 2020 г. общая площадь наледей, представленных на плане выше, сократилась с 0,92 до 0,30 км^2. Наледи в р. Кюбюме могут перелетовывать, т. е. часть льда не успевает растаять за теплый сезон и переходит на следующий год. В рамках этой экспедиции была произведена съемка наледи на р. Левой Хете (рис. 3).

На протяжении зимнего периода 2020–2021 гг. проводились съемки по профилям для наблюдения за изменением конфигурации и состояния поверхности наледи на ключевых участках. Фрагмент ортофотоплана на такой профиль представлен на рис. 4. Здесь четко прослеживаются места формирования первичных бугров пучения и места разгрузки напряжений, которые впоследствии могу стать местами выхода жидкой воды на поверхность наледи.

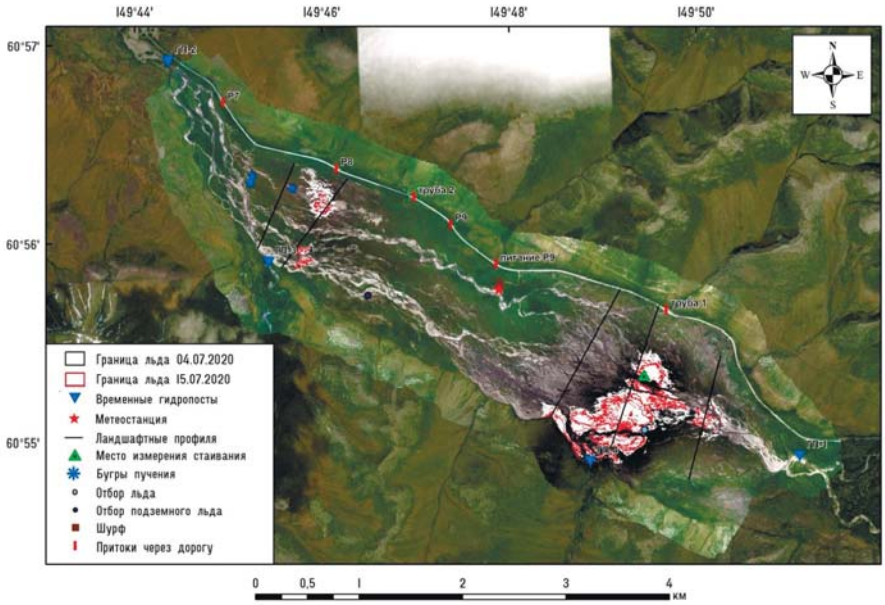


Рис. 1. Ортофотоплан наледной поляны Анмангындинской наледи

Выводы

Оценка морфометрии наледей (площадь и объем) имеет более точные результаты и требует меньших затрат на получение данных характеристик, чем методы наземной съемки. Одним из очевидных преимуществ использования данного метода является скорость получения первичных данных. Эти обстоятельства указывают на продуктивность и целесообразность использования БПЛА для мониторинга морфометрических характеристик интересующих объектов.

Благодарности

Работа проведена при поддержке РФФИ – проект №19-55-80028, РГО – проект «Атлас гигантских наледей-тарынов Северо-Востока России», Санкт-Петербургского государственного университета (проект id 75295776).

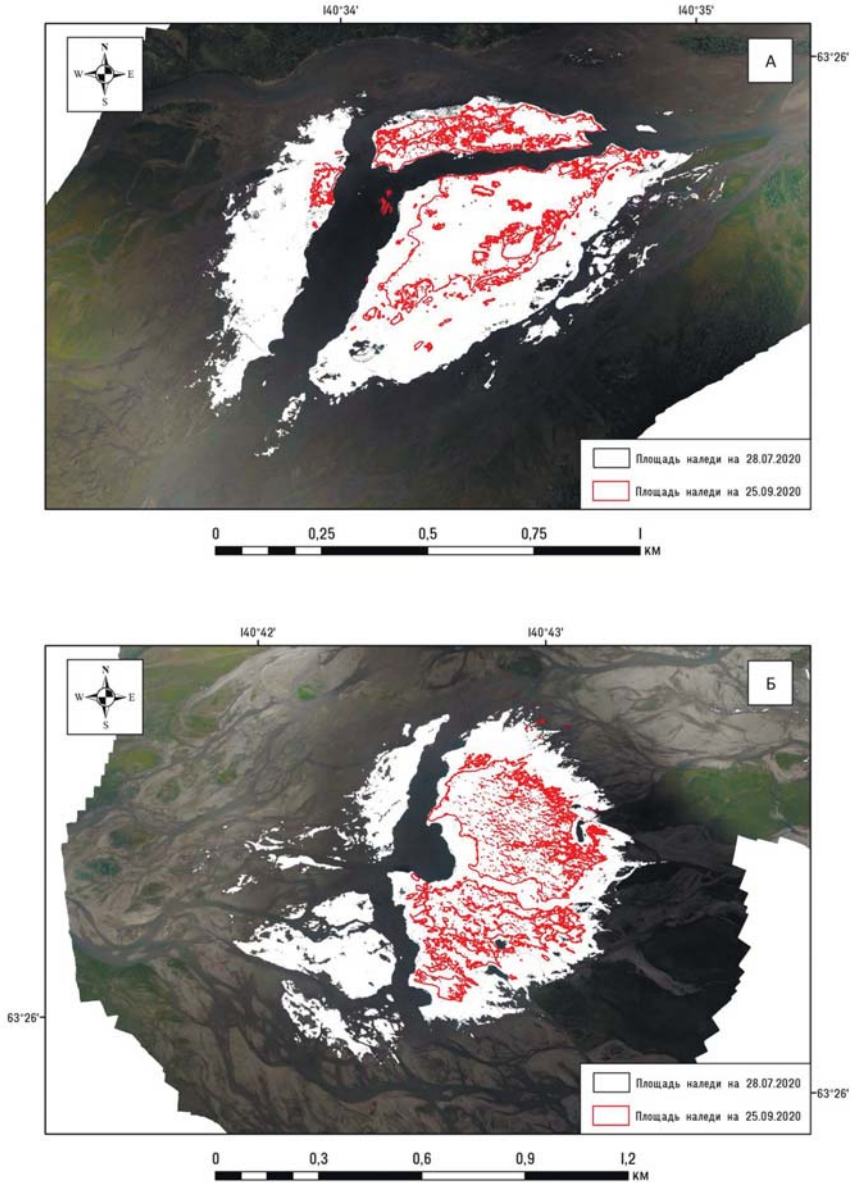


Рис. 2. Ортофотопланы наледных полян А – выше по течению и Б – ниже по течению на р. Кюбюме

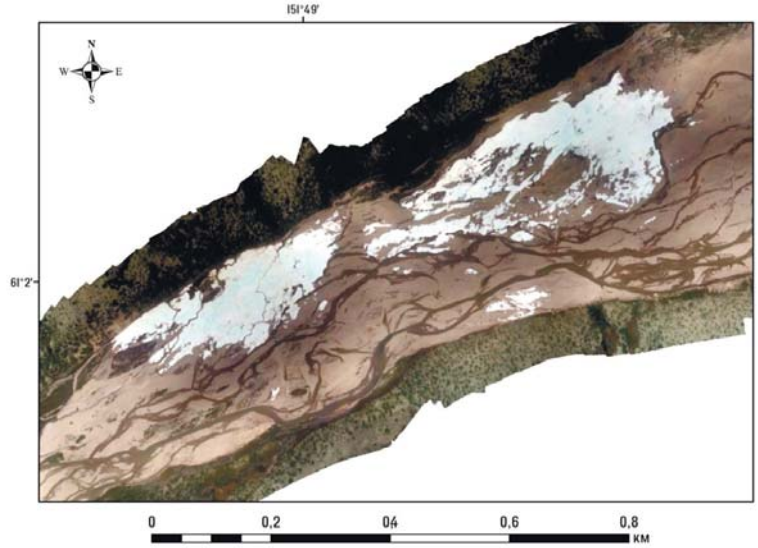


Рис. 3. Ортофотоплан наледной поляны на р. Левая Хета

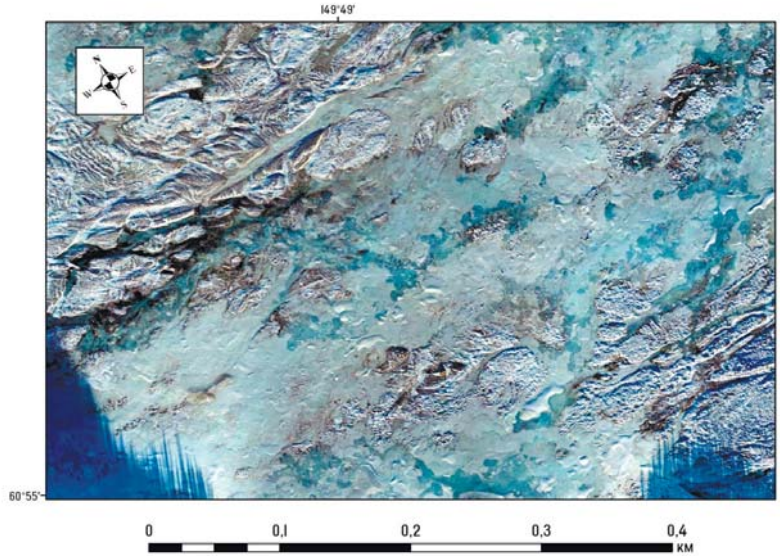


Рис. 4. Ортофотоплан участка наледеобразования на Анмангындинской наледи

Список литературы

1. *Гагарин Л. А., Волгушева Н. Э., Башарин Н. И.* Использование беспилотных летательных аппаратов в геокриологических исследованиях // Природные ресурсы и экология Дальневосточного региона. 2017. С. 13–16.

2. *Гагарин Л. А., Волгушева Н. Э.* Количественная оценка смещения оползня на участке федеральной автодороги А-360 «Лена» в Южной Якутии // Применение БПЛА в географических исследованиях : материалы Всерос. науч.-практ. конф. 2018, С. 46–51.

3. Особенности картографирования местности в экстремальных условиях Арктики посредством беспилотных летательных аппаратов / А. В. Ходак, В. А. Сивцов, И. М. Курашов, Н. А. Радченко // Моя профессиональная карьера. 2021. Т. 1, № 26. С. 115–118.

4. Прорыв озера Башкара (Центральный Кавказ, Россия) 1 сентября 2017 года / С. С. Черноморец, Д. А. Петраков, А. А. Алейников, М. Ю. Беккиев, К. С. Висхаджиева, М. Д. Докукин, Р. Х. Калов, В. М. Кидяева, В. В. Крыленко, И. В. Крыленко, И. Н. Крыленко, Е. П. Рец, Е. А. Савернюк, А. М. Смирнов // Криосфера Земли. 2018. Т. 22, № 2, С. 70–80.

5. *Colomina I., Molina P.* Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing / ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2014. Vol. 92, N 79-97. http://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013

6. Morphometric Analysis of Groundwater Icings: Intercomparison of Estimation Techniques / L. Gagarin, Q. Wu, A. Melnikov, N. Volgusheva, N. Tananaev, H. Jin, Z. Zhang, V. Zhizhin // Remote Sens. 2020. Vol. 12. 18. https://doi.org/10.3390/rs12040692

7. Using UAV large-scale aerial photography for studying hazardous geomorphological processes / E. D. Sheremetskaya, M. M. Ivanov, E. V. Voroshilov, E. V. Garankina, V. R. Belyaev // Proceedings of the International conference “InterCarto. InterGIS”. 2018. Vol. 24, N 2. P. 158–170.

УДК 556.555.5:528.85(571.5)

Анализ межгодовой изменчивости ледового режима озера Байкал по спутниковым данным

Е. Н. Сутырина (ensut78@gmail.com), В. Д. Шерстова

Иркутский государственный университет, Иркутск

Аннотация. В рамках проведенного исследования с применением спутниковых снимков AVHRR и MODIS составлены карты-схемы оз. Байкал с отображением площадей, покрытых льдом любой сплоченности в период очищения озера ото льда. Также проанализирован ход ледовитости в годы с ранним и поздним очищением озера ото льда.

Ключевые слова: данные AVHRR и MODIS, ледовитость, озеро Байкал.

Введение

Цель данной работы состоит в изучении характера ледового режима оз. Байкал в период очищения водоема ото льда по материалам дистанционного спутникового зондирования.

Озеро Байкал расположено в центральной части Евразийского материка между 51°28′ и 55°47′ с. ш. и между 103°43′ и 109°58′ в. д. и является самым глубоким и самым большим по объему пресноводным озером в мире. По современным данным, при уровне воды в озере 455,5 м над уровнем моря длина озера по тальвегу составляет 672 км, максимальная ширина – 79 км, площадь акватории – 31,7 тыс. км² [1; 5]. При изучении оз. Байкал, имеющего столь значительные

размеры акватории, данные дистанционного зондирования предоставляют возможность следить за состоянием всего водоема и получать пространственно-временную информацию о происходящих в озере процессах, которую невозможно обеспечить с применением только судовых и экспедиционных исследований [3].

Исследование ледяного покрова на оз. Байкал имеет научное и практическое значение. Ледяной покров оказывает существенное влияние на условия формирования энергетических потоков в системе «водоем – атмосфера», препятствует ветровому перемешиванию и определяет своеобразие всех элементов режима изучаемого водоема. С практической точки зрения информация о ледовой обстановке необходима для планомерного проведения навигации и перевозки грузов по льду. Прогнозирование состояния ледяного покрова необходимо для решения практических задач, связанных с определением, начала и окончания навигационного периода, с организацией и планированием транзита людей и грузов по установившемуся покрытию. Такой прогноз необходим также для работы МЧС при возникновении чрезвычайных ситуаций, особенно связанных с пребыванием людей на льду.

Характеристики ледово-термического режима чувствительны к климатическим изменениям и являются одними из важнейших индикаторов, позволяющими выявить климатические изменения, поэтому получение информации о динамике ледяного покрова и температуре поверхности воды важно для изучения изменений регионального и локального климата [2; 4].

Материалы и методы исследования

Диагностика состояния водоемов с использованием дистанционных методов основана на возможности регистрации дистанционным оборудованием широкого спектра значимых параметров водной среды. В рамках данной работы производилось исследование акватории Байкала в периоды его очищения ото льда по данным радиометра AVHRR (NOAA, MetOp) и спектрорадиометра MODIS (TERRA, AQUA) с применением ГИС-технологий.

В ходе работы отобраны были отобраны и обработаны малооблачные снимки за период с 1998 по 2021 г. Определено, что наиболее поздние сроки очищения акватории оз. Байкал наблюдались в 2010 г., наиболее ранние – в 2020 г. за указанный период. Поэтому дальнейший акцент в работе был сделан на изучение динамики разрушения льда на озере именно в эти годы.

Программа QGIS, используемая в рамках данного исследования, позволяет производить как визуальный анализ ледовой обстановки, так и применять процедуры классификации для распознавания чистой воды и акватории, покрытой льдом любой (ненулевой) сплоченности. Также пакет QGIS, дает возможность определять площади, а, следовательно, и величину ледовитости, т. е. характеристики, показывающей, какая часть акватории покрыта льдов любой сплоченности, кроме этого, QGIS дает возможность подготавливать картографические материалы по результатам дешифрирования.

Результаты

В рамках исследования на основе спутниковых данных составлены карты-схемы оз. Байкал, отображающие какие площади заняты льдом на ту или иную дату (рис. 1). Благодаря составленным картографическим изображениям можно отследить динамику сроков таяния льда на озере и сопоставить ее в различные годы.

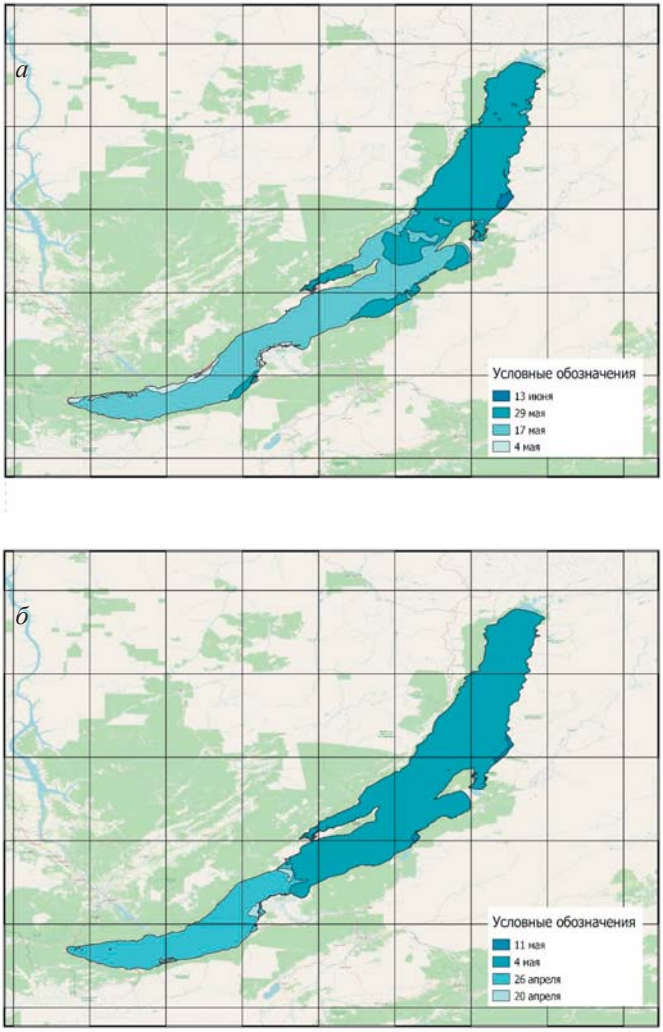


Рис. 1. Площади, занятые льдом при разрушении льда в 2010 (а) и 2020 гг. (б)

По полученной в ходе дешифрирования спутниковых снимков информации оценен ход ледовитости оз. Байкал во время очищения данного водоема ото льда в 2010 и 2020 гг. (рис. 2). На данном рисунке можно проследить межгодовую изменчивость в сроках очищения озера ото льда в указанные годы.

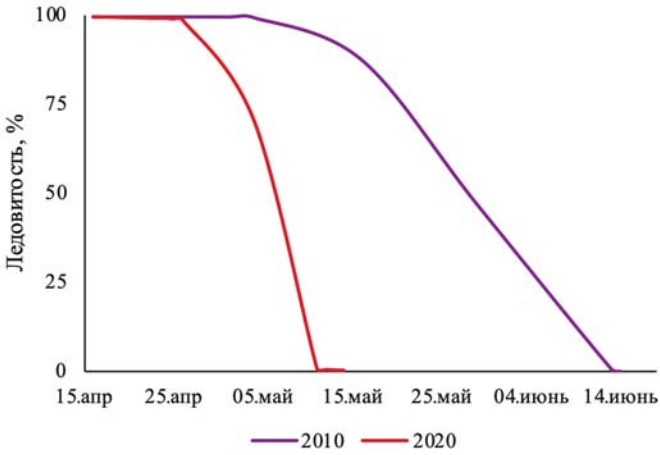


Рис. 2. Изменение ледовитости оз. Байкал в 2010 и 2020 гг.

В таблице приведены сроки наступления заданной ледовитости, определенные по графикам на рис. 2. Также в таблице указан размах наступления конкретной ледовитости.

Таблица

Сроки наступления заданной ледовитости оз. Байкал

Ледовитость, %	2010 г.	2020 г.	Размах, дни
95	11 мая	28 апр.	13
75	21 мая	03 мая	18
50	28 мая	06 мая	22
25	05 июня	09 мая	27
5	12 июня	10 мая	33

Из данных таблицы видно, что с уменьшением величины ледовитости при таянии и разрушении ледяного покрова, размах ее наступления в годы с ранним и поздним очищением озера ото льда возрастает и достигает 33 сут при величине ледовитости 5 % и только 13 сут для начала процесса очищения водоема ото льда, соответствующего величине ледовитости 95 %.

В целом можно констатировать, что для изучения ледового режима оз. Байкал и оценки межгодовой изменчивости наступления тех или иных ледовых явлений спутниковые данные позволяют получать информацию, недоступную без их использования.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Иркутской области в рамках научного проекта № 20-45-380032.

Список литературы

1. *Беркин Н. С., Макаров А. А., Русинек О. Т.* Байкаловедение : учеб. пособие. Иркутск : Изд-во ИГУ, 2009. 291 с.

2. Исследование океана из космоса / Б. А. Нелепо [и др.]. Киев : Наукова думка, 1985. 168 с.

3. *Сутырина Е. Н.* Дистанционные методы оценки температуры поверхности воды оз. Байкал // Естественные и технические науки. 2006. № 5. С. 163.

4. *Сутырина Е. Н.* Определение характеристик снежно-ледяного покрова на озере Байкал по данным дистанционного спутникового зондирования // Материалы гляциологических исследований. 2008. № 105. С. 153–157.

5. The INTAS Project 99-1669 Team, 2002. A new bathymetric map of Lake Baikal. M. De Batist, M. Canals, P. Sherstyankin, S. Alekseev. URL: http://www.lin.irk.ru/intas/index.htm (дата обращения: 18.08.2021).

Секция

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПОДГОТОВКИ КАДРОВ В СФЕРЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ

УДК 551.579:378.016(476)

О подготовке специалистов в области гидрометеорологии в Белорусском государственном университете: проблемы и перспективы

Ю. А. Гледко (gledko74@mail.ru), П. С. Лопух (lopuch49@mail.ru)
Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Рассмотрены проблемы и перспективы подготовки специалистов в области гидрометеорологии в Белорусском государственном университете.
Ключевые слова: Белгидромет, гидрометеорология, специализированное гидрометеорологическое обеспечение, Республика Беларусь.

В настоящее время основой гидрометеорологической службы Беларуси является Государственное учреждение «Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды» (Белгидромет), а также входящие в него областные центры по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (филиалы Белгидромета), межрайонные центры по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, метеорологические станции, авиационные метеорологические станции гражданские, агрометеорологические станции, гидрологические станции, болотная станция, станция фонового мониторинга, гидрологические посты [5].

Гидрометеорология становится все более высокотехнологичной отраслью, и для работы с современной техникой и новыми видами информации необходимы грамотные специалисты. Так, с 2006 г. в Белорусском государственном университете (БГУ) начата подготовка специалистов в области гидрометеорологии в рамках специальности «География» направление «Гидрометеорология». С 2013 г. на основе производственного направления открыта новая специальность 1-31 02 02 «Гидрометеорология» с пятилетним сроком обучения (с 2018 г. четырехлетним) и присвоением квалификации «Географ. Гидрометеоролог». Выпускающей кафедрой является кафедра общего землеведения и гидрометеорологии факультета географии и геоинформатики БГУ. За более чем десятилетний период подготовлены высококвалифицированные специалисты в области гидрометеорологии, которые успешно работают на таких должностях как: инженер-гидролог, инженер-метеоролог, инженер-агрометеоролог, инженер-синоптик (1-й и

2-й категории) в системе учреждений Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь, производственных и проектных организациях, а также в качестве инженера-исследователя, младшего научного сотрудника, в научных учреждениях в соответствии с должностными инструкциями и квалификационной характеристикой специалиста [1; 2].

Несмотря на то что основное количество вакансий приходится на Белгидромет, специалисты-гидрометеорологи могут быть востребованы также в проектных институтах и организациях, которые работают в сфере добычи полезных ископаемых, строительства и транспорта, занимаются проектно-изыскательской деятельностью. Также выпускники могут найти работу в экологических организациях и МЧС.

Еще один вариант для выпускников – это преподавание и наука. Сейчас на профильной кафедре идет смена поколений, хотя наука по-прежнему финансируется достаточно скромно. Университетские исследователи могут пользоваться мировыми образовательными ресурсами, электронными каталогами, передовой учебной литературой и базами данных гидрометеорологической информации, печатать работы в иностранных изданиях и участвовать в международных конференциях и форумах.

Учебный план специальности включает максимально широкий тематический спектр возможного образовательного и научного развития студентов: от фундаментальных дисциплин, таких как: «Общее землеведение», «Геофизика», «Метеорология и климатология», «Гидрология», «Геоморфология», до узкоспециализированных направлений прикладного характера: синоптическая метеорология, методы прогнозирования погоды, спутниковая метеорология, гидрометрия, моделирование метеорологических и гидрологических процессов, численный анализ атмосферных процессов и ряд других.

Во время обучения большое внимание уделяется точным наукам: фундаментом учения об атмосфере является физика, а многие задачи решаются математическими методами. Например, в рамках численных методов, которые позволяют увеличить точность недельных прогнозов, атмосферные процессы (движение воздуха, теплообмен, испарение, конденсация и т. д.) описываются уравнениями гидро- и термодинамики.

Для подготовки специалистов используется современная научно-правовая база, методики мониторинга атмосферы и гидросферы, стандартные программные продукты, численные модели прогнозирования погоды, соответствующие международным стандартам СНГ и Всемирной метеорологической организации.

Теоретические знания студенты закрепляют в ходе прохождения практик с использованием автоматизированной системы сбора гидрометеорологической информации Vaisala, автоматизированного гидрологического комплекса, а также современного программного обеспечения. Студенты-гидрометеорологи под руководством преподавателей кафедры проходят метеорологическую, гидрологическую, геоморфологическую, лимнологическую, агрометеорологическую и микроклиматическую практики, а также производственную, преддипломную и

научно-исследовательскую практику на базе ГУ «Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды» (Белгидромет) и его филиалов, ННИЦ мониторинга озоносферы БГУ, Центрального НИИ комплексного использования водных ресурсов (ЦНИИКИВР), Института природопользования НАН Беларуси, НПЦ по геологии и других профильных организаций.

В ГУ «Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды» много лет успешно работает филиал кафедры общего землеведения и гидрометеорологии. Преподаватели филиала проводят теоретические и практические занятия с использованием специализированного оборудования и программных средств, используемых в практике Белгидромета [2].

При кафедре функционирует магистратура и аспирантура.

Особое место в ходе подготовки специалистов-гидрометеорологов занимает вопрос о специализированном гидрометеорологическом обеспечении (СГМО) различных видов экономической деятельности, которое ориентировано на конкретного потребителя, носит индивидуальный, избирательный и адресный характер. Степень зависимости потребителей от условий погоды и климата (чувствительность потребителя к гидрометеорологической информации) определяет их спрос (потребность) на определенный вид информации. Проведенные исследования показывают, что особенно уязвима экономическая сфера и такие отрасли экономики, как сельское хозяйство, транспорт, энергетика, жилищно-коммунальное хозяйство.

В условиях ужесточения влияния природной среды на общество производственно-хозяйственные объекты (как потребители гидрометеорологической информации, особенно прогностической) вынуждены полностью принять доктрину оптимальной адаптации к ожидаемым условиям погоды. Именно оптимальная адаптация, а значит оптимальное (экономически эффективное) использование гидрометеорологической информации, позволяет максимально снизить возможные воздействия гидрометеорологических условий, а значит, и экономические потери. Основные научные направления исследований кафедры связаны с исследованиями в области климата и адаптации отраслей экономики к климатическим изменениям, проблем озоносферы, гидрологического режима водотоков и водоемов и рационального использования водных ресурсов [3; 7].

Таким образом, еще одним значимым аспектом при подготовке специалистов является оценка экономического эффекта от использования гидрометеорологической информации. В настоящее время в Белгидромете применяются методики расчета экономического эффекта от использования гидрометеорологической информации, разработанные российскими авторами, адаптированные для территории Беларуси. В ходе практических занятий студентами производится расчет экономического эффекта от использования гидрометеорологической информации в дорожном хозяйстве, сельском хозяйстве, строительстве [6]. На современном этапе важность решаемых задач обусловлена тем, что перспективное

развитие специализированного метеорологического обеспечения предусматривает переход от концепции информирования потребителей к рекомендательной концепции. Кроме того, изучение данной проблемы находит отражение в научной работе студентов, с дальнейшим внедрением результатов исследований в учебный и производственный процесс [2].

Как отмечалось выше научная работа – одно из перспективных направлений в подготовке специалиста-гидрометеоролога. Студенты имеют возможность использовать фактический материал Белгидромета, а также данные автоматизированной системы сбора гидрометеорологической информации Vaisala, установленной на территории БГУ, для написания научных работ. При кафедре функционирует студенческий научный кружок, однако в дальнейшем планируется создание студенческой научно-исследовательской лаборатории, что позволит привлечь к конкретной научной работе наиболее способных студентов, содействовать более эффективному решению проблем их научной подготовки, способствовать углубленному изучению и закреплению учебного материала у студентов и магистрантов, а также создание научного задела для успешного обучения их в аспирантуре, освоению приемов и методов самостоятельного научного исследования, приобретение навыков организационной работы.

Одним из современных направлений в образовании является интеграция средних специальных учреждений и вузов. В перспективе возможна подготовка выпускников 9 и 11 классов по техническим специальностям, которые позволят работать им в системе Белгидромета и при желании дальнейшей возможностью продолжить образование в области гидрометеорологии на дневном отделении факультета географии и геоинфоматики БГУ.

Большинство поступающих на специальность «Гидрометеорология» выбирает профессию осознанно. Часто школьников приводит в метеорологию интерес к географии, и здесь многое зависит от учителя, который организует, например, экскурсию на метеостанцию или в гидрометцентр. В некоторых школах даже существуют небольшие метеостанции, где ребята учатся наблюдать за явлениями природы, работать с приборами и анализировать информацию о погоде. В перспективе возможно оснащение современной погодной станцией каждой школы страны. Немаловажным аспектом в привлечении будущих специалистов является популяризация гидрометеорологической деятельности, знаний о применении современных технологий в гидрометеорологии и смежных областях с привлечением средств массовой информации, что способствует повышению осведомленности общества о значимости метеорологии, формирует погодоориентированное мышление.

Подводя итог, следует обратить внимание на важность подготовки специалистов в области гидрометеорологии в Беларуси, а также повышение престижа данной специальности. Рассматривая задачи подготовки профессиональных кадров в аспекте повышения эффективности специализированного гидрометеорологического обеспечения, следует отметить, что в настоящее время остро ощущается нехватка специалистов в области экономики специализированного гидроме-

теорологического обеспечения: экономистов, маркетологов, менеджеров, способных эффективно решать организационные, научно-методические, оперативно-производственные, маркетинговые и финансовые задачи СГМО и обладающих знаниями в области экономики предприятия, делопроизводства, эффективной коммуникации и т. д. [4]. Приоритетным направлением научных исследований в области влияния гидрометеорологических условий на экономическую деятельность является управление природными рисками в целях обеспечения гидрометеорологической безопасности. Особый интерес представляет управление рисками, в том числе и гидрометеорологическими, с использованием специализированных геоинформационных систем (ГИС). Разработка и создание подобных ГИС представляет практический интерес и может рассматриваться как новый продукт СГМО. Исходя из этого, необходима разработка новых образовательных программ, соответствующих текущим потребностям рынка труда, с использованием современных информационных технологий в образовательном процессе, а также более тесное взаимодействие между образовательным учреждением и гидрометеорологической службой по вопросам повышения квалификации педагогического состава с учетом современных требований практики.

Список литературы

1. *Гледко Ю. А., Лопух П. С.* Опыт подготовки специалистов по гидрометеорологии в Белорусском государственном университете // М. А. Петросянц и отечественная метеорология : тез. конф. к 100-летию со дня рождения М. А. Петросянца, 21–22 нояб. 2019 г. М. : МГУ, 2019. С. 4.

2. *Гледко Ю. А* Теория и практика преподавания дисциплины «Обеспечение потребителей гидрометеорологической информацией» на географическом факультете БГУ // Проблемы гидрометеорологического обеспечения хозяйственной деятельности в условиях изменяющегося климата : материалы Междунар. науч. конф. Минск, 5–8 мая 2015 г. / редкол.: П. С. Лопух (отв. ред.) [и др.] ; Белорус. гос. ун-т. Минск : Издат. центр БГУ, 2015. С. 307–310.

3. *Лопух П. С., Гледко Ю. А., Хао Ван.* Проблемы адаптации субъектов хозяйствования Беларуси к изменяющимся климатическим условиям // Danish Scientific Journal. 2021. Vol. 46, N 2. P. 10–27.

4. Подготовка кадров для национальной гидрометеорологической службы в современных условиях / А. А. Фокичева, Е. П. Истомин, А. Г. Тимофеева, Э. В. Подгайский, Л. С. Слесарева // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право : труды Междунар. науч.-практ. конф. «Инфогео-2015». СПб. : Андреевский издательский дом, 2015. Вып. 2 (16). С. 41–45.

5. Государственное учреждение «Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды». URL: http://belgidromet.by (дата обращения: 18.10.2021).

6. *Hledko Y. A.* Estimation of economic effect of the use of hydrometeorological information during exploitation of highways of / 3rd Baltic Earth Conference. Earth system changes and Baltic Sea coasts. To be held in Jastarnia, Hel Peninsula, Poland, 1–5 June 2020. Held online 2–3 June 2020. International Baltic Earth Secretariat Publication, 2020. № 18, 209. P. 65-67.

7. *Lopuch P., Hledko Y., Hao W.* Problems of water utilization in different climatic conditions (on the example of Belarus) // IV Vinogradov Conference “Hydrology: from Learning to Worldview” in Memory of Outstanding Russian Hydrologist YuryVinogradov. E3S Web of Conferences, 2020. 163, 05007.

УДК 378.14.015.62:

Исследование факторов, оказывающих влияние на успешность освоения образовательных программ направлений, реализуемых на географическом факультете ФГБОУ ВО «ИГУ»

Т. Ю. Новгородцева (nfyz-31@mail.ru), А. Ю. Бурдуковская (buran_baikal@mail.ru), О. А. Бархатова (barhat2006@mail.ru), И. Н. Сагалуева (sgh@mail.ru)

Иркутский государственный университет, Иркутск

Аннотация. Статья посвящена изучению связи между переменными, характеризующими абитуриента и показателем успешности освоения образовательной программы бакалавра. Исследовались следующие данные: сумма баллов по ЕГЭ, направление подготовки, категория набора, форма обучения, пол, возраст на момент зачисления, место постоянного проживания, вид образовательного учреждения до поступления в вуз. Проведен анализ изменения значения этих факторов, построена многофакторная регрессионная модель, описывающая зависимость успешности обучения в вузе от входных характеристик абитуриента и результатов его учебы (средний балл за период обучения) в вузе. Объектом исследования выбраны студенты географического факультета Иркутского государственного университета.

Ключевые слова: коэффициент квадратической сопряженности, коэффициент Крамера, метод категорезированных переменных, c^2-распределение, корреляционно-регрессионный анализ, многофакторная регрессионная модель, коэффициент детерминации, характеристики абитуриента.

Создание единой системы оценки знаний школьников в России как идея зародилась приблизительно с конца 1980-х гг. Связано это было с тем, что проводимые реформы образования, требования подготовки абитуриентов для вузов и возможности школьной программы часто расходились. В результате школьники из периферии не всегда имели возможность попасть в престижные вузы, просматривалась и коррупционная составляющая при поступлении в вуз.

Во всем мире накоплен большой опыт использования результатов использования стандартизированных тестов для поступления в высшие учебные заведения. Самые известные из них – SAT Reasoning Test (а также Scholastic Aptitude Test и Scholastic Assessment Test, дословно «Академический оценочный тест») и ACT (American College Testing «Американское тестирование») в США и Matura в ряде европейских стран.

В США каждый вуз устанавливает, какой из этих тестов, SAT или ACT, принимается в качестве вступительного экзамена. Сейчас все чаще вузы принимают результаты обоих тестов, устанавливая шкалы соответствия баллов по одному и другому [7]. Результаты этих тестов используются, в том числе, для прогнозирования успеваемости студентов во время обучения в вузе.

С 2009 г. в России введен Единый государственный экзамен (ЕГЭ). Разработка и введение в практику ЕГЭ стали ключевыми элементами реформы российской образовательной системы. Основная черта ЕГЭ как новой оценочной процедуры – его стандартизированный и всеобщий подход к оцениванию [5].

Во-первых, ЕГЭ должен был стать основой для системы оценки качества школьного образования и всеобщей итоговой аттестации выпускников школ; во-вторых, он должен был способствовать обеспечению равного доступа к высшему образованию для всех выпускников школ, вне зависимости от их социальных и экономических характеристик [3].

На каждое направление высшего образования определяются вступительные испытания в соответствии с приказом Министерства образования и науки Российской Федерации [6].

Учитывая зарубежный опыт, логично было бы использовать результаты ЕГЭ для прогнозирования успеваемости в российских вузах. В данном исследовании предпринята попытка применить этот подход на примере географического факультета Иркутского государственного университета. Оценке подверглась успеваемость студентов, поступивших с 2011 по 2015 учебные годы.

Географический факультет ведет подготовку по следующим направлениям бакалавриата: География, Гидрометеорология, Экология и природопользование.

Особо можно выделить направление Гидрометеорология, которое являются редким, всего семь вузов РФ ограниченным контингентом обучающихся осуществляют набор по этому направлению, поэтому выпускники гидрологи и метеорологи особо востребованы у работодателей [2].

На данный момент существует большая проблема в том, что количество выпускников гидрологов и метеорологов, по сравнению с их количеством при поступлении на первый курс, уменьшается в два и более раз [3]. Возможно, это связано с тем, что, при поступлении на данное направление профильным предметом определена «География», но учебный план подготовки включает достаточно большой блок физико-математических дисциплин. Таким образом, обучающиеся оказываются не готовыми к освоению этих дисциплин, что приводит либо к невысоким оценкам, либо к образованию академической задолженности и последующим их отчислением [2].

Схожая картина, но в меньшем объеме прослеживается и на других направлениях географического факультета. На современном этапе развития География и Экология это уже далеко науки не описательные даже не просто объяснительные, раскрывающие механизмы природы, населения и хозяйства какой-то территории, а науки объяснительно-прогностические и конструктивные, направленные на решение конкретных практических проблем. Сейчас дело географов и экологов не только исследовать, но оценивать и прогнозировать, т. е. предсказывать, какая она будет, наша планета в ближайшее и далекое будущее. При этом широко используются ГИС технологии, методы математической статистики и моделирования и т. п., где обходимы, как и у гидрометеорологов, физико-математические знания.

Поэтому необходимо было проанализировать наличие или отсутствие связи между результатами ЕГЭ (школьная подготовка) и результатом обучения (окончил обучения/отчислен).

В исследовании использовались данные по характеристикам 383 студентов географического факультета с 2011 по 2015 г.

Задачи исследования заключались в рассмотрении следующих моментов:

- есть ли связь между тем, доучиться ли студент или будет отчислен и характеристиками обучающегося;
- если связь существует, то насколько сильна степень тесноты этой связи.

Для получения корректных сведений об обучающихся были применены методы анализа: документов и категоризованных переменных.

Из имеющихся документальных сведений был сформирован набор характеристик обучающихся (табл. 1).

Таблица 1

Характеристики обучающихся

Измеряемая характеристика	Условное обозначение (x_i)	Число градаций (m_i)	Комментарий
Пол	x_1	$m_1 = 2$	1 – женский; 0 – мужской
Возраст на момент зачисления	x_2	$m_2 = 3$	1 – до 20 лет; 2 – от 20 до 30 лет; 3 – старше 30 лет
Место постоянного проживания	x_3	$m_3 = 3$	1– Иркутск; 2 – Иркутская область; 3 – другие регионы
Вид образовательного учреждения до поступления в вуз	x_4	$m_4 = 6$	1 – школа; 2 – лицей; 3 – гимназия; 4 – училище; 5 – техникум; 6 – вуз
Сумма баллов по ЕГЭ	x_5	$m_5 = 3$	1 – до 100 баллов; 2 – от 100 до 200 баллов; 3 – выше 200 баллов
Средний балл за период обучения	x_6	$m_6 = 4$	1 – меньше 3 баллов; 2 – от 3 до 4 баллов; 3 – от 4 до 5 баллов; 4 – 5 баллов
Результат обучения	x_7	$m_7 = 2$	0 – не закончил (отчислен по различным причинам); 1 – закончил обучение и получил диплом бакалавра по выбранному направлению при поступлении

Характеристики абитуриентов, влияющие на успешность обучения в вузе выделены с помощью метода анализа категоризованных переменных. Их статистическая значимость доказана на основе коэффициентов квадратической сопряженности и Крамера.

Для анализа данных были построены и проанализированы 6 таблиц сопряженности, представленных на рис. 1, в каждой из которых одной из категорированной переменной является переменная «Результат обучения» (переменная x_7).

Таблица сопряженности для переменных x_7 и x_1

	1	*2*	*сумма*
0	124	62	186
1	82	115	197
сумма	206	177	383

Таблица сопряженности для переменных x_7 и x_2

	1	*2*	*3*	*сумма*
0	150	49	7	206
1	145	24	8	177
сумма	295	73	15	383

Таблица сопряженности для переменных x_7 и x_3

	1	*2*	*3*	*сумма*
0	60	99	47	206
1	45	100	32	177
сумма	105	199	79	383

Таблица сопряженности для переменных x_7 и x_4

	1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*сумма*
0	147	11	15	5	2	26	206
1	131	9	13	4	2	18	177
сумма	278	20	28	9	4	44	383

Таблица сопряженности для переменных x7 и x5

	1	*2*	*3*	*сумма*
0	5	178	23	206
1	1	144	32	177
сумма	6	322	55	383

Таблица сопряженности для переменных x_7 и x_6

	1	*2*	*3*	*4*	*сумма*
0	95	113	13	0	221
1	0	60	100	2	162
сумма	95	173	113	2	383

Оценка тесноты связи между категоризованными переменными

Коэффициенты	*Результаты анализа таблиц сопряженности*					
	1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*
Коэффициент квадратической сопряженности	24,14	6,55	2,82	0,64	5,56	175,29
Хи - квадрат (табличное)	3,84	5,99	5,99	11,07	5,99	7,81
Коэффициент Крамера	0,25	0,13	0,09	0,04	0,12	0,68

Рис. 1. Результаты проведения анализа категоризованных переменных

Анализ коэффициентов квадратической сопряженности и расчетных значений коэффициентов Крамера позволил сделать выводы:

- Характеристики: «Пол», «Возраст на момент зачисления», «Средний балл за период обучения» считаются статистически значимыми (при уровне значимости $\alpha = 0{,}05$).
- Между перечисленными выше характеристиками и «Результатом обучения» существует связь с достаточно высокой степенью тесноты.

На рис. 2 представлены результаты расчета коэффициента Крамера. Из шести анализируемых переменных наличие достаточно тесной связи с переменной «Результат обучения» выявлено у переменных «Пол», «Возраст на момент зачисления» и «Средний балл за период обучения».

Ранее проводимое исследование позволило выдвинуть гипотезу о влиянии показателя «Пол» и «Средний балл за период обучения» на показатель «Результат обучения» [4]

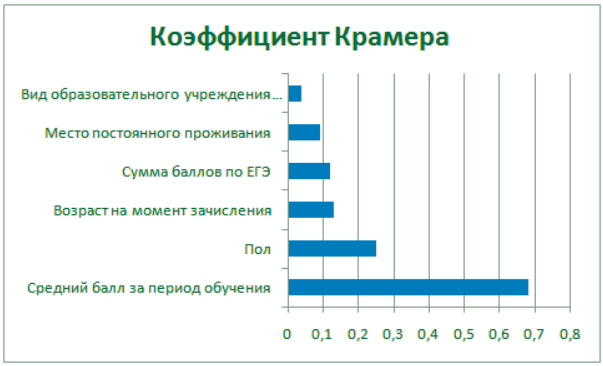


Рис. 2. Анализ характеристик абитуриента

В попытке предложить подход к выявлению факторов – характеристик абитуриента, влияющих на успешность получения высшего образования, построена многофакторная регрессионная модель, описывающая зависимость успешности обучения в вузе от входных характеристик абитуриента и результатов его учебы (средний балл за период обучения) в высшей школе. С помощью метода исключения факторов последовательно по одной были исключены переменные, коэффициенты при которых статистически не значимы и имеют наименьшее значение статистики. В рамках корреляционно-регрессионного анализа построена многофакторная модель, оценки которой рассчитаны с помощью пакета Statistica (рис. 3).

Рис. 3. Расчеты оценок неизвестных параметров модели

В конечном итоге модель получила следующий вид: $x_0 = -0{,}28 + 0{,}1x_1 + 0{,}22\,x_2$, где x_0 – эндогенная переменная «Успешность обучения в вузе», x_1 – экзогенная переменная «Пол», x_2 – экзогенная переменная «Средний балл за период обучения» [5].

Проведенное исследование показало, что:

- Степень влияния на переменную «Результат обучения» наибольшая для переменных: «Средний балл за период обучения», «Пол». Можно отметить, что девушки на 10% успешнее юношей, а повышение среднего балла за период обучения на единицу повышает успешность обучения на 22 %.

• Множественный коэффициент корреляции R = 0,64, что свидетельствует о тесной связи между факторами. Модель статистически значима (расчетное значение критерия Фишера составило 131,23), коэффициент детерминации равен 0,41.

• Построенная модель подтвердила гипотезу о том, что фактор «Сумма баллов по ЕГЭ» не является статистически значимым, определяющее влияние на успешность обучения в вузе.

Таким образом, можно сделать вывод, что то, с какой успешностью сдано ЕГЭ практически не оказывает влияние на то, закончит ли студент обучение или нет и делает выдвигаемую гипотезу о связи набора дисциплин при поступлении на географический факультет и усвоением программы обучения не состоятельной. Рассмотренный подход может быть применен и в других учебных заведениях.

Список литературы

1. *Айвазян С. А., Мхитарян В. С.* Прикладная статистика. Основы эконометрики : учеб. для вузов : в 2 т. 2-е изд., испр. М. : ЮНИТИ-ДАНА, 2001. Т. 1: Теория вероятностей и прикладная статистика. 656 с.

2. *Бархатова О. А.* Некоторые аспекты в подготовке // Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России : материалы III Всерос. науч.-практ. конф. Иркутск, 25–27 нояб. 2020 г. Иркутск : Изд-во ИГУ, 2020. С. 446–454.

3. *Болотов В. А., Вальдман И. А.* Как обеспечить эффективное использование результатов оценки образовательных достижений школьников // Образовательная политика. 2012. № 1 (57). С. 36–42.

4. Выявление зависимости между переменными, характеризующими студента и показателем успешности обучения в вузе / А. В. Бурдуковская [и др.] // Современное педагогическое образование. 2021. № 4. С. 66–70.

5. Использование категоризованных переменных при выявлении зависимости между характеристиками абитуриента и успешностью освоения образовательной программы бакалавра / А. В. Бурдуковская [и др.] // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Гуманитарные науки. 2021. № 4, ч. 2

6. Об утверждении перечня вступительных испытаний при приеме на обучение по образовательным программам высшего образования – программам бакалавриата и программам специалитета : приказ Минобрнауки России от 30 авг. 2019 № 666 (Зарег. в Минюсте России 02.11.2021 № 65680).

7. *Хавенсон Т. Е., Соловьева А. А* Связь результатов единого государственного экзамена и успеваемости в вузе // Вопросы образования. 2014. № 1. С. 176–199.

УДК 556.5.02

Актуальные проблемы подготовки кадров в сфере гидрологии для АЗРФ

Р. А. Терехова (gwk_rt@aari.ru)

Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург

Аннотация. Проведен анализ кадровой политики в сфере гидрологии в Арктической зоне Российской Федерации. Подготовлены предложения по совершенствованию структуры гидрологической сети и подготовке кадров с учетом специфики гидрологических наблюдений в Российской Арктике.

Ключевые слова: Арктика, гидрология, кадры.

Состояние кадрового обеспечения гидрологической сети

Фактическое состояние кадрового обеспечения гидрологической сети в Российской Арктике можно оценить по результатам инспекций ААНИИ и на основе ежегодных сведений УГМС для подготовки обзора работы сети за 2011–2020 гг. Анализ полученной информации выявил дефицит квалифицированных инженерно-технических кадров на гидрологической сети в разных районах в пределах 40–70 %.

Причин дефицита кадров накопилось много. Основной причиной является существующая кадровая политика в УГМС, которая не способствует закреплению специалистов.

Проблемы подготовки инженерно-технических кадров связаны также с тем, что «содержание бывших пятилетних инженерных программ не удалось эффективно включить в четырехлетние программы бакалавриата. В результате, не всегда гарантировано достижение практических результатов обучения» [1]. Отмечено наличие дисбаланса в программе обучения и фактическими потребностями производства в знаниях и навыках. Кроме того, необходимо повысить знания основ федерального законодательства в области гидрометеорологии.

В условиях сокращения финансирования негативную роль сыграла кадровая политика УГМС по «оптимизации» численности сотрудников в методических подразделениях и на сети. Причем сокращение коснулось в том числе и специалистов с профильным образованием, которые получили знания для обеспечения наблюдений и работ на сети в Росгидромете. А в настоящее время при отсутствии распределения выпускников и тотальном дефиците гидрологов вакантные места вынужденно заполняются экологами, географами, гидротехниками, математиками, программистами.

На престижность профессии гидролога влияет и крайне низкая заработная плата при несоразмерной трудоемкости гидрологических работ в суровых климатических условиях Арктики.

Структура гидрологической сети Арктической зоны РФ

Территория Арктической зоны Российской Федерации установлена Указом Президента РФ от 2 мая 2014 г. № 296 «О сухопутных территориях Арктической зоны Российской Федерации» [2].

Современный состав сухопутной территории Арктической зоны РФ в соответствии с Указом Президента РФ и УГМС Росгидромета, обеспечивающие работу сетевых подразделений на соответствующей территории, приведен в таблице.

Таблица

Современный состав сухопутной территории Арктической зоны РФ

Субъект Российской Федерации	Территории, входящие в состав АЗРФ	УГМС Росгидромета
Мурманская область	Вся территория	Мурманское УГМС
Республика Карелия	Территории муниципальных образований «Беломорский муниципальный район», «Лоухский муниципальный район» и «Кемский муниципальный район»	Северо-Западное УГМС
Архангельская область	Территории муниципальных образований «Город Архангельск», «Мезенский муниципальный район», «Новая Земля», «Город Новодвинск», «Онежский муниципальный район», 2Приморский муниципальный район», 2Северодвинск»	Северное УГМС
Республика Коми	Территория муниципального образования городского округа «Воркута»	Северное УГМС
Ненецкий автономный округ	Вся территория	Северное УГМС
Ямало-Ненецкий автономный округ	Вся территория	Обь-Иртышское УГМС
Красноярский край	Территории городского округа города Норильска, Таймырского Долгано-Ненецкого муниципального района, Туруханского района	Среднесибирское УГМС
Республика Саха (Якутия)	Территории Абыйского улуса (района), Аллаиховского улуса (района), Анабарского национального (долгано-эвенкийского) улуса (района), Булунского улуса (района), Верхнеколымского улуса (района), Верхоянского района, Жиганского национального эвенкийского района, Момского района, Нижнеколымского района, Оленекского эвенкийского национального района, Среднеколымского улуса (района), Усть-Янского улуса (района) и Эвено-Бытантайского национального улуса (района)	Якутское УГМС
Чукотский автономный округ	Вся территория	Чукотское УГМС

В соответствии с РД 52.04.107-86 (приложение 17) типовой штат гидрологической станции I и II разряда зависит от числа прикрепленных постов I и II разряда [3]. Основным наблюдательным подразделением является гидрологический пост с одной штатной единицей наблюдателя. Их количество может варьировать от 20 до 40 единиц. Наблюдатели постов не имеют профильного образования и не могут выполнять типовую программу без постоянной методической помощи инженерно-технического персонала гидрологической станции. Такая структура гидрологической сети неприемлема для Арктической зоны.

На средних и больших реках выполнение работ по программе ГП-I с измерением расходов воды и взвешенных наносов одним наблюдателем является нереальным. Это касается как периода открытого русла с использованием плавсредств, так и периода ледостава с учетом трудоемкости работ и необходимости соблюдения техники безопасности при работе со льда. В весенний и осенний периоды работы по измерению расходов воды по поплавкам-льдинам с помощью теодолита выполнить может только техник-гидролог. На устьевых постах в зоне переменного подпора наблюдения за уровнем воды предусмотрены в 4 срока [4], что нереально выполнить одной штатной единицей наблюдателя. Геодезические работы по обеспечению устойчивости высотной основы на постах ГП-I и ГП-II должны выполняться инженерно-техническим персоналом регулярно в течение года.

Из-за дефицита или отсутствия специалистов-гидрологов на гидрологических станциях в Арктической зоне гидрологические посты закреплены за метеорологическими, аэрологическими станциями или АМСГ без надлежащей методической помощи. В идеальном случае гидрологические посты замыкаются на отделы при УГМС, но при их труднодоступности фактически оказываются бесконтрольными.

Такие результаты не гарантируют надежности и однородности наблюдений за уровнем воды. Обеспечить надлежащее методическое руководство наблюдателями этих постов и выполнение надежных наблюдений в течение года не представляется возможным.

В качестве примера рассмотрим строение гидрологической сети и ситуацию с кадровым составом в Арктической зоне деятельности Якутского УГМС.

В северных районах Якутии (13 улусов АЗРФ) отмечается крайне низкая плотность гидрологической сети. На гидрологических станциях Г-II в низовьях рек Оленек, Лена, Яна и Колыма острый дефицит инженерно-технического состава (фактически отсутствует). Функции начальников гидрологических станций и гидрологические наблюдения в сокращенном варианте (без измерений расходов воды и взвешенных наносов) выполняют метеорологи. Гидрологические станции в низовьях рек Хатанга, Анабар, Индигирка и Алазея вовсе отсутствуют. Поэтому гидрологические посты ГП-I и ГП-II почти на всей северной части Якутии замыкаются на ОГМС при Якутском УГМС в г. Якутске. Сотрудники ОГМС Якутск выполняют эпизодические измерения расходов воды при посещении постов только на реках Анабар и Яна один раз в летний период. Такие результаты не дают возможности для вычисления стока воды ни за сезон, ни тем более в целом за год. На остальных постах ГП-I измерения расходов воды не проводятся.

При существующей структуре гидрологической сети наблюдателями без профильного образования не выполняется типовая программа наблюдений и работ. На всех постах ГП-I и ГП-II геодезические работы по обеспечению устойчивости высотной основы выполняются эпизодически 1 раз в несколько лет. Не проводится регулярный контроль водомерных устройств пунктов наблюдений, что ставит под сомнение достоверность наблюдений за уровнем воды, стоком воды и наносов.

Все перечисленные выше проблемы отражаются на качестве наблюдений и выявлены при проведении инспекций ААНИИ и экспертизы материалов ежегодных и многолетних данных на стадии подготовки их к публикации в изданиях Водного кадастра РФ. В такой ситуации предстоящая модернизация и автоматизация не имеет перспективы осуществления.

Кадровая политика модернизации гидрологической сети

Утвержденная Росгидрометом в марте 2021 г. Программа реализации мероприятия 4.8 «Модернизация и развитие гидрометеорологической сети наблюдений за состоянием окружающей среды в Арктической зоне Российской Федерации» (далее Программа) подпрограммы 4 «Организация и обеспечение работ и научных исследований в Арктике и Антарктике» государственной программы Российской Федерации «Охрана окружающей среды» предусматривает обеспечение необходимыми приборами и оборудованием гидрологической сети станций и постов для выполнения стандартной программы наблюдений и работ, современными средствами связи и строительство жилых и служебных помещений.

Гидрологическая сеть на водных объектах Арктической зоны модернизируется по остаточному принципу или вовсе не включена в Программу. Мероприятия по восстановлению измерений стока воды и наносов на замыкающих створах сибирских рек не предусмотрены. Необходимость восстановления наблюдений в устьевых областях рек на реперных гидрологических постах по программам ГП-1 является очевидным, так как речной сток является основным фактором, определяющим ледово-гидрологические условия в устьевых областях рек.

Установка АГК и совершенствование геодезической сети на замыкающих створах крупных рек Хатанга, Анабар, Оленек, Лена, Яна, Алазея, Индигирка, Колыма и Анадырь не запланированы.

Программа не предусматривает модернизацию структуры гидрологической сети и обеспечение квалифицированным кадровым составом для ее реализации. Без решения кадровых проблем и структурной реорганизации сроки модернизации гидрологической сети в Российской Арктике могут быть отодвинуты на неопределенные сроки.

Предложения по подготовке инженерно-технического состава для АЗРФ

С целью решения кадровых проблем на гидрологической и устьевой сети АЗРФ:

1) повысить престижность специальности «гидрология» путем популяризации;

2) увеличить набор студентов в среднеспециальных и высших учебных заведениях по специальности «гидрология»;

3) увеличить оплату труда специалистам среднего и высшего звена с учетом трудоемкости работ в арктических условиях;

4) провести реорганизацию структуры гидрологической и устьевой сети в АЗРФ;

5) уточнить и дополнить Программу модернизации по разделу «гидрологические наблюдения».

Изменение структуры гидрологической и устьевой сети необходимо провести в целях повышения статуса специалистов и наблюдательных пунктов наблюдений. Гидрологические и устьевые станции должны иметь статус гидрометобсерваторий (ГМО). В связи с ограниченной транспортной доступностью на значительной территории Арктической зоны РФ все посты должны быть заменены станциями (Г-I, Г-II и Г-III) с соответствующим штатом специалистов в зависимости от объема выполняемых работ и замыкаться на ГМО.

При осуществлении перечисленных выше предложений повысится интерес молодых специалистов к работе на гидрологической и устьевой сети Росгидромета.

Список литературы

1. *Тимофеева Л. А.* Реализация компетентностного подхода при подготовке гидрологов-бакалавров // Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития : тр. III Всерос. конф. СПб. : ХИМИЗДАТ, 2019. С. 833–836.

2. О сухопутных территориях Арктической зоны Российской Федерации : указ Президента РФ от 2 мая 2014 г. № 296 (в ред. Указов Президента РФ от 27.06.2017 № 287, от 13.05.2019 № 220, от 05.03.2020 № 164). 3 с.

3. РД 52.04.107-86. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Л., 1987. Вып. 1. 184 с.

4. РД 52.10.324-92. МУ Гидрологические наблюдения и работы на гидрометеорологической сети в устьевых областях рек. ГОИН, 1993. 188 с.

Научное издание

Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России

Материалы
IV Всероссийской научно-практической конференции
Иркутск, 24–26 ноября 2021 г.

Материалы публикуются в авторской редакции

Темплан 2021. Поз. 259
Уч.-изд. л. 30,2. Заказ 307

ИЗДАТЕЛЬСТВО ИГУ
664082, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 124