СОДЕРЖАНИЕ

Секция «ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ»

Балагуров А. М. Состояние и направления обеспечения единства аэрологических измерений 9

Бузмаков С. В., Юхно А. В., Осташов А. А. Анализ работоспособности автоматизированных гидрологических комплексов на реках Российской Федерации 19

Вязилов Е. Д., Мельников Д. А., Казаков Д. В., Хритошин Н. В., Попушой А. Г., Медведева Ю. В. Прорывные информационные технологии в гидрометеорологии 29

Мельников Ю. И. Птицы лесных экосистем Байкальского региона: потепление климата и динамика населения 39

Шевченко А. И., Готовченкова И. Л., Белоус С. В. Современные автоматизированные средства сбора и обработки гидрологической информацией по рекам и каналам наблюдательной сети Росгидромета и перспективы их развития с применением машинного обучения 49

Секция «ПОГОДА И КЛИМАТ. МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ»

Абасов Н. В., Гасан В. С. Анализ точности прогнозирования температурного режима в бассейне озера Байкал по ансамблям данных глобальной климатической модели CFSv2 61

Вязилова Н. А., Вязилов А. Е. Особенность Эль Ниньо 2023–2024 гг. и его влияния на атмосферную циркуляцию в Евро-Атлантическом регионе 77

Гекова А. В., Латышева И. В., Лощенко К. А. Многолетняя динамика волн тепла и холода в Иркутске 73

Котляров Д. А. Оценка индекса континентальности климата Магадана за период с 1936 по 2024 г. 83

Латышева И. В., Лощенко К. А., Разницына Е. В. Современный климатический режим оз. Байкал 89

Рябова С. А. Особенности временных вариаций среднегодовых значений температуры по данным метеостанции Цугшпитце 94

Секция «МОНИТОРИНГ, МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ»

Амосова И. Ю., Гагаринова О. В. Ландшафтные и структурно-гидрографические предпосылки формирования экстремального стока 99

Байгубеков К. Р., Семкин П. Ю. Изменчивость водного и ледового режима р. Пенжина в нижнем течении в современных условиях 103

Величко Д. Н., Сутырина Е. Н. Гидрологическое обоснование гидроэнергетических параметров Тельмамской ГЭС 110

Вершинин Д. А., Карташова Д. А. Горизонтальные деформации берегов меандрирующих рек и их связь с характеристиками водности половодья (на примерах рек Кеть и Чулым в нижнем течении) 115

Вихренко С. В., Лисина И. А., Костык В. А. Картографирование и расчеты гидрографических характеристик с использованием аэрофотосъемки и ГИС 120

Габриелян С. Х., Ильичёва Е. А., Павлов М. В., Шкимелис Ю. И., Ушкалов А. А. Оценка руслового и грунтового стока в устьевых системах Селенгинского и Приморского побережий Байкала 124

Гайдукова Е. В., Филатов Д. М. Учет временных аналогов при построении регрессионной модели для характеристик речного стока 128

Гуляев И. М., Гребенщикова В. И., Бархатова О. А. Оценка распределения фтора в воде байкальской экосистемы 133

Ерошкин В. М., Чепинога Л. Д., Потапова Е. В. Экологические индикаторы состояния водных объектов 142

Канашин С. А. Прогноз сроков появления льда и установления ледостава на реке Умбе с использованием нейронных сетей 147

Кручина Е. Б., Потапова Е. В. Экосистемные услуги водных объектов 152

Мазилкин М. С. , Бабичева В. А. Оценка загрязнения донных отложений Иркутского водохранилища тяжёлыми и редкоземельными металлами 156

Максимовская Т. М. Мониторинг Полярной фронтальной зоны по данным экспедиционных исследований на вековом разрезе «Кольский меридиан» 165

Михалёва А. И., Потапова Е. В. Реки как коридоры природно-экологического каркаса города Иркутска 172

Непрокина К. С., Зиновьева Т. И., Воронков А. В. Содержание частиц микропластика в реке Вороне выше и ниже по течению от города Кирсанова 176

Паскочина А. А., Болдырев В. С., Данилин Д. Д., Мишин Д. В. Экологическое состояние водных объектов, подверженных антропогенному воздействию в бассейнах рек Озерной и Уки (Камчатский край) по результатам экспедиционных исследований 2023–2024 гг. 180

Воронцов А. А., Булыгин А. М., Вишнев О. Г. Мониторинг состояния Черного моря 185

Пляскина А. А. Оценка индекса мутности NDTI рек Большой Ирети и Большой Белой 191

Салко С. С., Бархатова О. А. Современный опыт урегулирования вопросов влияния складирования промышленных отходов на поверхностные и подземные воды для территории Иркутской области 202

Сахновский А. В., Бархатова О. А. Гидрохимический анализ воды, используемой в технологическом цикле на ТЭЦ-1 города Читы 208

Тропина Н. М., Потапова Е. В. Экологическая составляющая обеспечения гидрологической безопасности 215

Шварёва Н. А., Микова К. Д. Особенности нарастания толщины льда на Камском водохранилище 220

Шкимелис Ю. И., Ильичёва Е. А., Павлов М. В., Габриелян С. Х., Ушкалов А. А. Распределение стока по основным рукавам дельты р. Селенги по эмпирическим данным за 2023–2024 годы наблюдений 226

Секция «РЕГИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ АТМОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ»

Котова А. А. Особенности формирования особых явлений погоды конвективного происхождения опасных для авиации над территорией Западной Сибири 232

Секция «ОПАСНЫЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ И ПРОЦЕССЫ»

Вашестюк Ю. В. Обеспечение гидрометеорологической безопасности на морских объектах добычи нефти и газа 240

Груздев И. П. Оценка влияния рек Санги Южной и Ингоды на мостовой переход в с. Хадакта 246

Калмыкова О. В., Спрыгин А. А., Козлов С. В., Вязилов А. Е., Ингель Л. Х., Кулижникова Л. К. Оценка риска формирования интенсивных конвективных процессов и сопутствующих им опасных явлений на европейской территории России: концепция построения автоматизированной технологии 255

Ковригин Д. Д., Потапова И. А. Физическая природа и экологические последствия загрязнения атмосферы Арктики 263

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

Коновалова Т. И. Воздействие климатических изменений на трансформацию таежных геосистем 272

Красноштанова Н. Е. Влияние климатических изменений на социально-экологические системы Севера 277

Ромашова В. Н., Микова К. Д. Оценка многолетнего изменения квартального притока воды в Камское водохранилище 281

Секция «СОВРЕМЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ»

Андреев Ф. М. Моделирование и разработка программного обеспечения для автоматизированного анализа спутниковых снимков: оценка и мониторинг площади о. Ярки 288

Галушин Д. А., Громов С. А., Авдеев С. М. Статистический анализ данных об атмосферных осадках на метеорологических станциях и станциях мониторинга химического состава осадков в Иркутском УГМС 292

Доценко А. А. Миграция БД из СУБД Oracle в СУБД PostgreSQL в рамках импортозамещения 300
Иванов П. О. Современные методы обработки и публикации океанографических данных 308
Михтеева Е. Ю., Потапова В. Р., Потапова И. А., Скобликова А. Л., Яковлева Т. Ю. Моделирование параметров рассеяния излучения крупнодисперсными аэрозольными частицами в атмосфере 311
Петриченко С. А., Калмыкова О. В., Козлов С. В., Кулижникова Л. К. Опыт применения автоматизированной технологии прогноза зарождения и перемещения полярных мезоциклонов для Арктического региона РФ 316
Тастайбекова М. А., Пастухова Д. А., Шайдулина А. А. Процессы снеготаяния на южных реках Пермского края в 2019 г. 325

Секция «СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ»

Хабитуев Д. С., Латышев А. С. Современные методы поиска экзопланет 331

Секция «АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПОДГОТОВКИ КАДРОВ В СФЕРЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ»

Вашестюк Ю. В., Вологжина С. Ж., Салатин С. А. Роль природоохранного законодательства в формировании профессиональных компетенций гидрометеорологов 339
Иванова О. А., Тихонова Л. А., Салатин С. А. Организация работы кураторов студенческих групп на кафедре гидрологии и природопользования географического факультета ИГУ 343

Секция

ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ

УДК 551.501.7

Состояние и направления обеспечения единства аэрологических измерений

А. М. Балагуров (a.balagurov@mail.ru)
ФГБУ «Центральная аэрологическая обсерватория» Росгидромета, г. Долгопрудный Московской обл.

Аннотация. Обеспечение единства аэрологических измерений направлено на поддержание точности, достоверности и сопоставимости аэрологических данных. Оно включает в себя использование сертифицированных средств измерений, аттестованных методик и систему контроля качества измерений, фильтрации ошибок и исключения некорректных значений. Важным фактором является то, что система радиозондирования входит в глобальную систему наблюдений, проводятся международные сравнения для проверки соответствия международным нормам ВМО. Разрабатываются новые методы получения аэрологических данных (спутники, дистанционное зондирование, беспилотные аппараты). В работе обсуждается состояние обеспечения единства аэрологических измерений, перспективы дальнейшего совершенствования в условиях растущих требований пользователей за счет технологической модернизации, снижения зависимости от импортных технологий, повышения точности измерений. На основе результатов анализа сформулированы предложения по направлениям обеспечения единства аэрологических измерений, оптимизации работы аэрологической сети Росгидромета.

Ключевые слова: аэрологические измерения, качество данных, точность, эффективность, потребности пользователей.

Состояние обеспечения единства измерений системы радиозондирования

Аэрологические измерения являются одним из важнейших составляющих Глобальной системы наблюдений (ГСН) Всемирной метеорологической организации (ВМО) и одним из самых дорогостоящих видов синоптических наблюдений. Аэрологические данные требуются для анализа и прогноза погоды, особенно для прогноза опасных гидрометеорологических явлений, метеорологического обеспечения авиации и вооруженных сил, других форм оперативного обслуживания народного хозяйства [2].

Обеспечение единства аэрологических измерений параметров атмосферы является важной и актуальной задачей, решение которой определяет эффективность работы метеорологической службы и направления её дальнейшего развития. Разрабатываются новые методы получения аэрологических данных (спутники, дистанционное зондирование, беспилотные аппараты и т. д.). В настоящее время информация, получаемая с космических аппаратов, является принципиально необходимой для решения большого числа задач мониторинга природной среды. Спутниковая информация глобального покрытия стала наиболее важным видом информации для численных прогнозов погоды (ЧПП). Важным фактором качества спутниковых данных является их валидация с использованием данных радиозондирования. Таким образом, радиозондовые и спутниковые системы зондирования являются взаимодополняющими и при совместном использовании обеспечивают наиболее надёжную глобальную систему наблюдения.

Современный радиозонд – это прибор, оснащенный датчиками для измерения метеорологических величин (в первую очередь, температуры и влажности) и радиопередатчиком для передачи на землю результатов измерений. Вторым важным элементом является наземная станция приема (радиолокатор, или навигационная станция) для определения координат радиозонда в полете, которые позволяют рассчитать высоту радиозонда, а также скорость и направление ветра. При проведении радиозондирования необходимо обеспечивать надежную и качественную работу технических средств, выполнение методики измерений, контроль качества данных, квалифицированную работу персонала аэрологических станций (АЭ), прием, обработку и передачу данных [2].

Сеть радиозондирования Росгидромета (114 станций) является основным средством получения данных аэрологических измерений. Результаты радиозондирования поступают в государственный фонд данных и в международный обмен данными о состоянии природной среды. Система радиозондирования Росгидромета не в полной мере отвечает требованиям по качеству измерений, пространственно-временному разрешению, особенно на севере и северо-востоке России. Радиозонд является средством измерения (СИ) разового действия и в лабораторных условиях невозможно воспроизвести весь комплекс величин, влияющих на результаты измерений, измерения являются косвенными, динамическими и однократными, отсутствуют эталонные средства измерения, имеющие необходимые диапазоны измерений, динамику и возможность учета влияющих факторов [2]. В соответствии с ФЗ от 26 июня 2008 г. № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений» косвенные измерения, относящиеся к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, должны выполняться по первичным референтным методикам (методам) измерений, референтным методикам (методам) измерений и другим аттестованным методикам (методам) измерений, сведения о которых должны быть внесены в Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений. Однако сертифицированные Росстандартом организации выдают сертификаты на радиозонды без учета этого требования федерального законодательства.

Российские оперативные радиозонды не полностью соответствуют требованиям по диапазону и точности измерений по причине значительных дополнительных погрешностей (радиационных, динамических, погрешностей за счет влияния осадков на измерения температуры и влажности, влияния температуры на измерения влажности и т. д.). Эти дополнительные погрешности имеют значительную изменчивость в зависимости от условий измерения, что существенно увеличивает их влияние на погрешности результатов радиозондирования [2]. В соответствии с постановлением Правительства РФ от 16 ноября 2020 г. № 1847 «Об утверждении перечня измерений, относящихся к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений» установлены предельно допустимые метрологические требования к измерениям температуры и влажности при радиозондировании. Соответствие этим требованиям является основой для участия РФ в международном обмене аэрологическими данными. Погрешности, записанные в свидетельствах на тип СИ, выдаваемых Росстандартом, в 2–3 раза

меньше, чем предельно допустимые по Постановлению № 1847, однако фактические погрешности существенно превышают предельные.

В руководящих документах ВМО – Техническом регламенте ВМО [3] в части пользования интегрированной глобальной системы наблюдений (ИГСНВ), а также в Руководстве по климатологической практике ВМО [4] в части проведения наблюдений для мониторинга долгосрочных изменений в верхних слоях атмосферы сформулированы основные требования к проведению аэрологических измерений: Их выполнение является ключевым фактором обеспечения единства аэрологических измерений.

Качество аэрологических данных проверяется путем сравнения данных наблюдений с данными краткосрочного прогноза на срок наблюдений, получаемого с помощью современной численной модели, основанной на непрерывном усвоении данных [1]. Результаты анализа отклонений «наблюдение-прогноз» для геопотенциала в слое 1000–100 гПа (критический уровень – 48 гпм – геопотенциальных метров) – «OB-FG» используются, как основной параметр для обзора сопоставимости аэрологических данных, и представляет собой интегральный показатель качества работы радиозонда и наземной станции для измерений температуры, давления и высоты. Например, в январе 2025 г. количество АЭ Росгидромета по взвешенному среднеквадратичному значению «наблюдение-прогноз» для геопотенциала в слое 1000–100 гПа, которое превышает критический уровень, составило 24 станции (рис.).

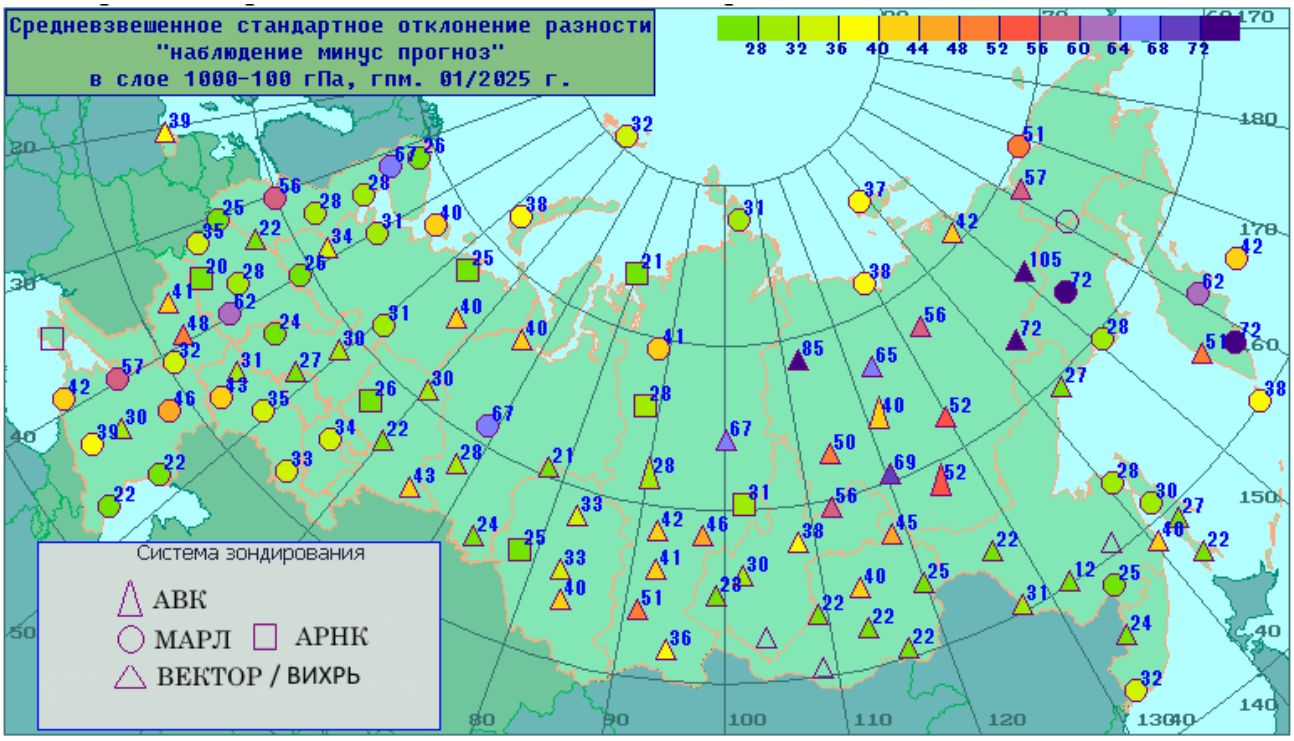


Рис. Взвешенное среднеквадратичное значение 'наблюдение-прогноз' для геопотенциала в слое 1000–100 гПа в январе 2025 г.

В Руководстве ВМО [4] отмечен ряд проблем, касающихся качества радиозондовых измерений для целей мониторинга климата и обнаружения изменений климата. Погрешности, обусловленные солнечной радиацией, порождают неопределенности в измерении температуры. Оперативные радиозонды не способны измерять влажность с достаточной точностью при низких температурах. Многолетний ряд данных радиозондовых наблюдений имеет многочисленные недостатки, связанные с недостаточным количеством взаимосравнений различных типов радиозондов и установленных на них датчиков, и различием в размещении датчиков в конструкции радиозондов.

Международные сравнения радиозондов ВМО имеют долгую историю. По ряду причин российские системы радиозондирования не смогли принять участие в 4 последних международных сравнениях ВМО. Последние сравнения были проведены в Китае в 2010 г. и в Германии в 2022 г. Анализ результатов международных сравнений радиозондов показал, что российские радиозонды существенно уступают по техническому уровню (инерционность, точность, влияние окружающей среды и т. п.) лучшим зарубежным радиозондам.

Комиссия по приборам и методам ВМО (КПМН-17 от 12–16 октября 2018 г.) приняла рекомендации по взаимным сравнениям аэрологических приборов. Отмечено, что регулярное проведение взаимных сравнений радиозондов ВМО имеет большое значение, поскольку обеспечивает независимую оценку эффективности участвующих радиозондов и служит основой при оптимальном выборе оперативных систем радиозондирования. Взаимные сравнения способствуют повышению качества данных систем аэрологических наблюдений путем формулирования рекомендаций, касающихся результативности этих систем, совершенствования приборов и методов наблюдения, а также выбора рабочих эталонов для членов ВМО и производителей приборов.

Основные результаты сравнений в Германии (Линденберг) были опубликованы в отчете о сравнениях IOM-143 UAII 2022 [7]. В лабораторных условиях результаты измерений влажности при комнатной температуре находились в пределах 5–10 % от эталонных значений для большинства моделей радиозондов. При низких температурах для некоторых датчиков постоянная времени в конкретных условиях лабораторных испытаний составляла до 450 с при температуре –40 °С, что подчеркивает необходимость минимизации временной задержки показаний датчиков, и разработки и внедрения метода коррекции динамической погрешности измерений, что особенно важно для измерений в верхней тропосфере, где температура может опускаться до минус 85 °С.

При лабораторных испытаниях влияния солнечного излучения на датчики температуры было определено, что это является наиболее важным источником ошибок при измерении дневной температуры с помощью радиозондов. Чувствительность датчиков температуры к солнечному излучению в лабораторных условиях сильно различается в зависимости от исследованных моделей. Нескорректированные погрешности от солнечного излучения достигают до 3,8 °С на уровне 10 гПа. Аналогичные результаты были отмечены и при полетных испытаниях, что подтвердило необходимость использования датчиков температуры с

минимально возможной чувствительностью к солнечной радиации, а также введения в документацию значений коррекции от влияния солнечной радиации на результаты измерений. В ходе сравнительных натурных испытаний были отмечены достаточно надежные измерения давления атмосферы, а также скорости и направления ветра.

Проведение сравнений российских систем радиозондирования с радиозондами повышенной точности (РПТ), участвовавшими в международных сравнениях ВМО в Китае и Германии является весьма актуальным в настоящее время. Чтобы результаты сравнений были признаны КПМН ВМО, в них должно участвовать не менее двух систем РПТ, участвовавших в международных сравнениях ВМО, и они должны проводиться в соответствии с процедурами и правилами, предусмотренными Руководством по приборам и методам ВМО № 8.

В ходе сравнений 2022 г. была проведена интеграция данных, получаемых с помощью дистанционного зондирования с данными систем радиозондирования. Эта интеграция была признана успешной, было рекомендовано рассмотреть возможность включения дистанционного зондирования при проведении следующих международных сравнений.

Применение новых методов аэрологических измерений

Система гидрометеорологических наблюдений строится и развивается в соответствии с требованиями прогностических служб к пространственному и временному разрешению получаемых данных, потребностями различных отраслей народного хозяйства и науки, а также с учетом рекомендаций ВМО. В целом объем и структура данных системы радиозондирования удовлетворяет потребностям климатологии, среднесрочного и долгосрочного прогнозов. В то же время, в ее современном состоянии она недостаточна для краткосрочного прогноза погоды, для решения задач по переносу загрязняющих примесей, обеспечения функционирования атомных станций и проведения различных атмосферных исследований, в первую очередь – по причине недостаточного пространственно-временного разрешения.

Главными потребителями аэрологической информации являются Гидрометцентр и Авиаметтелеком. Для авиационных прогнозов синоптикам надо получать больший объем данных, чем получают сейчас в результате 2-разового зондирования. Европейские страны проводят радиозондирование 4 раза в сутки, как было и во времена СССР. Одним из вариантов повышения пространственно-временного разрешения является разработка и применение новых методов проведения аэрологических измерений – спутниковые, дистанционные, измерения с использованием беспилотных аппаратов.

Спутниковые аэрологические измерения играют ключевую роль в современном мониторинге атмосферы, метеорологии и климатологии. Они позволяют получать информацию о параметрах атмосферы на глобальном уровне, включая труднодоступные регионы (Арктика и Антарктика). Развитие спутниковых аэрологических измерений предусматривает создание более точных средств измерений, интеграцию с наземными и беспилотными системами, разработку малых спутников – удешевление и расширение возможностей мониторинга атмосферы.

Таким образом, спутниковые аэрологические измерения обеспечивают уникальную возможность глобального мониторинга атмосферы, дополняя наземные дистанционные измерения и радиозондовые наблюдения.

Для прогнозирования опасных явлений погоды, экологического мониторинга и обеспечения безопасности полетов авиации необходимо проведение более частых, а фактически – непрерывных измерений, что является основным преимуществом дистанционных методов перед стандартным радиозондированием. Особенно это относится к пограничному слою атмосферы (ПСА) [3]. К основным технологиям дистанционных методов относятся содары, лидары и профилемеры, которые позволяют определять скорость и направление ветра, температуру, состав воздуха и другие параметры на различных высотах, обнаружение сдвигов ветра, турбулентности и других факторов, влияющих на безопасность полетов. Принцип работы содаров основан на использовании акустических волн для измерения скорости и направления ветра в атмосфере. Они работают по принципу доплеровского эффекта: звуковые волны отражаются от неоднородностей в атмосфере (турбулентность, температурные градиенты), а затем анализируется их частотное изменение. Основные преимущества содаров – оперативность (непрерывные автоматизированные измерения), низкая стоимость эксплуатации.

Лидары используют лазерное излучение, которое отражается от аэрозолей, частиц пыли и молекул газа в атмосфере. По времени прохождения сигнала и его рассеянию можно определить скорость и направление ветра, концентрацию загрязняющих веществ, наличие облаков и аэрозолей. Преимущества лидаров заключаются в высокой точности измерений и возможности анализа атмосферы на больших высотах. Однако лидары имеют ограничения в части снижения эффективности работы в условиях плотной облачности или сильного дождя, требуют калибровки и регулярного обслуживания.

В части профилемеров, в основном в научных исследованиях, применяются многоканальные профилемеры, особенностью которых является чувствительность их характеристик к большому числу физико-химических параметров атмосферы (температуре, влажности, водности облаков, давлению, газовому составу, параметрам турбулентности), однако, наибольшее применение наблюдается по одноканальным микроволновым температурным профилемерам (ТПМ). На ГНС Росгидромета ТПМ применяются, как часть основных средств аэрологических наблюдений, что утверждено нормативными документами. До 2024 г. 22 пункта наблюдений были оснащены микроволновыми температурными профилемерами типа МТР-5 и МТП-5 (свидетельство на тип СИ № 68218). Однако такого небольшого количества профилемеров для большой территории РФ явно недостаточно.

В каждом типе дистанционных средств аэрологических измерений имеются СИ, получившие соответствующий сертификат на тип СИ, выданный Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии, и зарегистрированные в Государственном реестре средств измерений, что является основанием их применения с точки зрения обеспечения единства аэрологических измерений. По результатам сравнительного анализа можно сделать следующие выводы:

- содары удобны для изучения ветровых характеристик в нижних слоях атмосферы;
- лидары обеспечивают высокоточную информацию о ветре, аэрозолях и влажности, но чувствительны к погодным условиям;
- профилемеры универсальны, могут использовать различные методы измерений.

Использование содаров, лидаров и профилемеров расширяется, их производство освоено российскими предприятиями, а дальнейшее развитие технологий делает их более доступными и эффективными. Перспективами развития дистанционного аэрологического зондирования являются комбинирование технологий – развитие гибридных систем, объединяющих лидары, содары и профилемеры для более точных измерений, автоматизация и внедрение искусственного интеллекта – нейросетей для анализа данных и прогнозирования изменений в атмосфере, миниатюризация оборудования – разработка компактных и мобильных систем для установки в городских условиях, на беспилотниках и спутниках, развитие беспилотных платформ – использование дронов с лидарами и содарами для мобильного мониторинга атмосферы.

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) в последние годы активно внедряются в аэрологические исследования, предоставляя новый уровень точности, мобильности и оперативности в сборе аэрологических данных. БПЛА могут нести различное оборудование для измерения параметров атмосферы – датчики температуры, влажности, давления, скорости и направления ветра, газоанализаторы, спектрометры и т. п. С точки зрения метеообеспечения авиации БПЛА могут обеспечивать мониторинг турбулентности и ветровых сдвигов, контроль за обледенением и условиями видимости.

Установка высокоточных метеорологических датчиков на БПЛА не всегда гарантирует получение точных данных, вследствие термодинамических и динамических эффектов, образуемых конструкцией БПЛА. Преимуществами использования БПЛА для аэрологических измерений являются: высокая точность и детальность данных; возможность проводить измерения на низких и средних высотах; высокое пространственное и временное разрешение измерений; возможность неоднократного измерения одной и той же области для анализа изменений в атмосфере; гибкость и оперативность, быстрое развертывание в любой точке, включая труднодоступные районы (горные районы, Арктика, океанические зоны); экономичность, возможность многократного использования.

В рамках демонстрационной кампании беспилотных летательных аппаратов (UAS-DC), проведенной под эгидой ВМО в течение 2 месяцев в 2024 г. в Метеорологическом научно-исследовательском институте в городе Цукуба (Япония), дважды в сутки проводились измерения профилей метеорологических параметров. Эта кампания была организована для оценки возможности проведения непрерывных ежедневных измерений, распространения данных в формате, предназначенном для численного прогнозирования погоды, и для оценки качества данных по сравнению с традиционными метеорологическими данными. Были использованы три типа БПЛА: метеорологический гексакоптер среднего размера

и коммерческие дроны среднего и малого размера с прикреплёнными метеорологическими датчиками [6].

Точность метеорологических данных, полученных с БПЛА, в целом была сопоставима с точностью данных, полученных от станции радиозондирования: температура – 0,11–0,26 град, относительная влажность – 0,85–1,49 %, скорость ветра – 0,27–0,57 м/с. По результатам этих испытаний было отмечено, что необходимо адаптировать методы и приборы, чтобы свести к минимуму погрешности измерений, которые сильно зависят от типа БПЛА (например, вертолёт или самолёт с неподвижным крылом) и размера (малый или большой) БПЛА, а также от его грузоподъёмности.

При выполнении инструментальных измерений для получения легитимных результатов требуется соответствующее методическое и метрологическое обеспечение измерительных комплексов на базе БПЛА. В России пока единственным СИ БПЛА, имеющим сертификат на тип СИ, является «Система измерительная для мониторинговых исследований на базе беспилотных летательных аппаратов «РДР-2015» (свидетельство № 75187). В структуру данного БПЛА включены СИ, внесенные в государственный реестр средств измерений. Однако все они относятся к многокомпонентным газоанализаторам и анализаторам пыли. Метеорологические параметры не включены в описание типа СИ. Тем не менее БПЛА представляют собой перспективный инструмент для аэрологических измерений, позволяя значительно повысить точность, оперативность и детализацию данных о состоянии атмосферы. Они уже активно применяются в метеорологии, климатологии и экологическом мониторинге, а их дальнейшее развитие направлено на увеличение высоты полета, продолжительности работы и интеграцию с глобальными системами наблюдений.

Направления обеспечения единства аэрологических измерений

Результаты анализа метрологических характеристик и репрезентативности аэрологических измерений показали, что основной недостаток нормирования метрологических характеристик радиозондов заключается в раздельном нормировании предельно допускаемой основной погрешности измерения при функционировании их в нормальных условиях, и нормировании предельно допускаемой дополнительной погрешности, возникающей при варьировании всех влияющих факторов. При этом, как указано в нормативном документе Росстандарта ИТС 22.1-2016, суммарная погрешность измерений не нормируется. В связи с этим требуется совершенствование нормативно-технической документации, регламентирующей требования к метрологическим характеристикам СИ в этой области, и к методам и средствам их испытаний и поверки.

При проектировании и модернизации аэрологических измерений необходимо учитывать требования по обеспечению соответствия аэрологических СИ согласованным потребностям российских пользователей (Гидрометцентр, Авиаметтелеком, ГГО, Минобороны и др.). Постоянное развитие глобальной наблюдательной системы за состоянием природной среды, технологий дистанционного зондирования, с помощью которых добывается информация, ставит задачу

оценки влияния конкретного вида и источника информации на качество численных прогнозов погоды. Эта задача решается путем исключения из рассмотрения информации определенного вида и последующего сравнения полученного таким образом прогноза с контрольным экспериментом, в котором учитывается весь объем получаемых метеорологических данных.

Анализ данных радиозондирования имеет свою специфику по отношению ко многим другим метеорологическим наблюдениям, так как на многих высотах в атмосфере имеется множество пропущенных наблюдений [1]. Основные причины этого – недостаточная высота подъема радиозондов, пространственные и временные неоднородности данных, недостатки технологии радиозондовых наблюдений, производства оболочек, зондов и датчиков, получения и расчета реальных значений высоты, температуры, влажности и ветра.

Влияние этих факторов на успешность ЧПП можно оценить путем генерации псевдослучайного шума на архивы данных радиозондирования с характеристиками, соответствующими реальным факторам недостатков работы системы радиозондирования (смещение, среднеквадратическое отклонение и вертикальные корреляции). Использование полученных измененных архивов данных при расчете среднеквадратичной ошибки прогноза и сравнение с предыдущим прогнозом, полученным по исходным архивам данных, позволит оценить влияние на ЧПП вышеуказанных факторов. Целью этих расчетов могут быть следующие выводы и результаты:

– получение количественного обоснования соответствия/несоответствия требованиям текущего количества и расположения АЭ Росгидромета для определения необходимых (допустимых) изменений в конфигурации сети;

– обоснование/подтверждение оптимальных погрешностей измерений по высоте, температуре, влажности, скорости и направления ветра;

– заключение, является ли объем получаемых данных на всей сети в виде 2-разового зондирования минимально необходимым, или он может быть сокращен (в какой степени), или должен быть увеличен (при каких условиях);

– обоснование требований к минимально необходимой высоте аэрологического зондирования, а также в каких условиях она может быть изменена;

– обоснование требований к непрерывности данных аэрологического зондирования для оперативных прогнозов погоды и для климатических наблюдений, определение максимально допустимого времени простоя каждой станции и отсутствия данных с нее.

Полученные обоснования и выводы дадут возможность сформулировать обоснованные предложения по оптимизации работы аэрологической сети Росгидромета. При реализации этих предложений планирование работы сети, закупка и обеспечение работы аэрологического оборудования, закупка расходных аэрологических материалов могут быть существенно оптимизированы.

На основании сформулированных и согласованных потребностей российских пользователей, кроме повышения качества данных, в дальнейшем могут быть сформулированы предложения по оптимизации работы аэрологической сети. Сформулированные предложения по конфигурации сети, количеству выпусков, необходимым погрешностям и высоте зондирования могут привести к

достижению эффективной работы средств аэрологических измерений. При этом наиболее оптимальным вариантом является передача головной организации – ЦАО организации всех основных работ по обеспечению функционирования аэрологической сети Росгидромета, включая планирование работы сети, участие в организации закупки аэрологического оборудования и расходных аэрологических материалов. Фактическое отсутствие влияния головной организации на процедуру закупок приводит к неоптимальному и нецелесообразному расходованию бюджетных средств. Такой подход необходим еще и для того, чтобы у Росгидромета была возможность влияния на возможные отклонения от законодательства в области метрологии. Например, в свидетельства на тип СИ радиозондов органы Росстандарта включают данные, которые им представляют изготовители. Эти показатели не соответствуют реальным погрешностям. В частности, в соответствии с российским законодательством в области метрологии все радиозонды, предназначенные для применения на сети Гидрометслужбы, должны пройти испытания на утверждение типа СИ в рамках утвержденной в России Государственной поверочной схемы для СИ влажности газов (ГПС). Однако в ГПС отсутствуют эталоны для определения метрологических характеристик измерений влажности радиозондов в реальных условиях радиозондирования.

Обеспечение единства аэрологических измерений внесет существенный вклад в достижение основных целей Стратегии деятельности в области гидрометеорологии и смежных с ней областях на период до 2030 года (с учетом аспектов изменения климата) – формирование высокоэффективной гидрометеорологической службы, обеспечивающей выполнение функций по предоставлению потребителям своевременной и достоверной гидрометеорологической и гелиогеофизической информации, информации о состоянии окружающей среды, ее загрязнении, а также по эффективному и безопасному проведению работ, связанных с активным воздействием на метеорологические и другие геофизические процессы, на базе современной техники и технологий.

Выполнение предложенных вариантов обеспечения соответствия качества аэрологических данных согласованным потребностям российских пользователей обеспечит повышение качества прогнозов погоды, снижение рисков ущерба экономике, здоровью граждан, обороне и безопасности государства.

Список литературы

1. *Алдухов О. А., Черных И. В*. Методы анализа и интерпретации данных радиозондирования атмосферы. Т. 1. Контроль качества и обработка данных. Обнинск, 2013. 306 с. (Тр. ВНИИГМИ-МЦД).

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

3. Наземные микроволновые температурные профилемеры: потенциал и реальность / Е. Н. Кадыгров, Е. В. Ганьшин, Е. А. Миллер [и др.] // Оптика атмосферы и океана. Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН. Т. 28, № 6. 2015. С. 521–528.

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

5. Руководство по климатологической практике. Изд. 2014 г. ВМО № 100.

6. Operational Capability of Drone-Based Meteorological Profiling in an Urban Area. Report // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2024. 28 December. P. 2–19.

7. Report of WMO's 2022 Upper-Air Instrument Intercomparison Campaign. Instruments and Observing Methods Report N 143. World Meteorological Organization, 2024. 400 p.

УДК 556.5.08

Анализ работоспособности автоматизированных гидрологических комплексов на реках Российской Федерации

С. В. Бузмаков (s.buzmakov@hydrology.ru), А. В. Юхно (artem-ardene@mail.ru), А. А. Осташов (andrey.ostashov@gmail.com)

Государственный гидрологический институт, г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Обсуждается работоспособность автоматизированных гидрологических комплексов на реках Российской Федерации, которая играет ключевую роль в надежном и оперативном обеспечении гидрологической информацией потребителей. Она зависит от целого ряда факторов: качества монтажа, режима и стабильности его энергообеспечения; устойчивости компонентов контроллера и датчика к воздействию негативных факторов внешней среды; развития русловых процессов и вандализма, которые могут приводить к нарушению или полной утрате оборудования. Представлена оценка корректности измерения уровня воды автоматизированными комплексами и полнота поступающей с них информации. Выявлена многолетняя динамика характеристик работоспособности комплексов и полноты передаваемой ими информации. Рассмотрены причины, влияющие на работоспособность комплексов и даны рекомендации по поддержанию достигнутого уровня автоматизации сети.

Ключевые слова: автоматизированный гидрологический комплекс, работоспособность, уровень воды, государственная наблюдательная сеть, гидрологический пункт наблюдений.

Введение

Необходимость автоматизации гидрологического мониторинга, включая измерение уровней воды, определяется возрастающей потребностью экономики и общества в оперативной и надёжной информации [8; 3].

На сети гидрологических наблюдений Росгидромета по состоянию на 2024 г. автоматизация достигает менее 40 % [2]. Основным средством измерения уровня воды до настоящего времени остаётся водомерная рейка. Большое количество неавтоматизированных пунктов наблюдений, возрастающие затраты на ручные измерения, а также потребность в высоко дискретной передаче информации определяют значительный потенциал автоматизации сети.

Под автоматизированным гидрологическим комплексом (далее – АГК) в данной статье понимается совокупность приборов и оборудования, предназначенных для выполнения автоматизированных измерений уровней воды и оснащённых средствами передачи информации в центры сбора данных. В состав АГК обязательно входит средство измерений уровня воды (чувствительный элемент), выполняющий измерения в точке его установки, контроллер, выполняющий функции накопления измеренных данных об уровне воды, их хранения и передачу данных измерений по каналам связи в центр сбора данных, а также линия связи датчика с контроллером. На постах могут использоваться АГК с различной

комплектацией, которая может включать средства измерений уровня и температуры воды, атмосферных осадков, а также средства наблюдения за состоянием водного объекта.

Практика внедрения АГК

Первым АГК в мире в некоторой степени можно считать поплавковый самописец уровня воды, оснащённый коротковолновым радиопередатчиком в 1930–1932 гг. и функционировавший на посту р. Луга – с. Толмачево. Серийно АГК начали устанавливаться на сеть при реализации перовой волны модернизации («Росгидромет-1»), которая стартовала в 2006 г. и коснулась переоснащения сети в паводкоопасных бассейнах рек Уссури, Оки и Кубани. На гидрологических постах было установлено 153 АГК [1]. В этот же период для прохождения опытной эксплуатации и проведения сравнительных наблюдений был организован и оснащен различными АГК гидрометрический полигон р. Полометь – с. Яжелбицы в Валдайском филиале ГГИ.

Вторая волна модернизации началась в 2012 г. и закончилась в 2020 г. За это время было реализовано два проекта: Модернизация гидрологических наблюдений в бассейне р. Волга («Росгидромет-2») и федеральная целевая программа «Развитие водохозяйственного комплекса Российской Федерации в 2012–2020 годах»[1]. В рамках данных проектов на сети было установлено 258 и 654 АГК соответственно. По окончанию второй волны интенсивность закупки и установки АГК значительно снизилась (рис. 1).

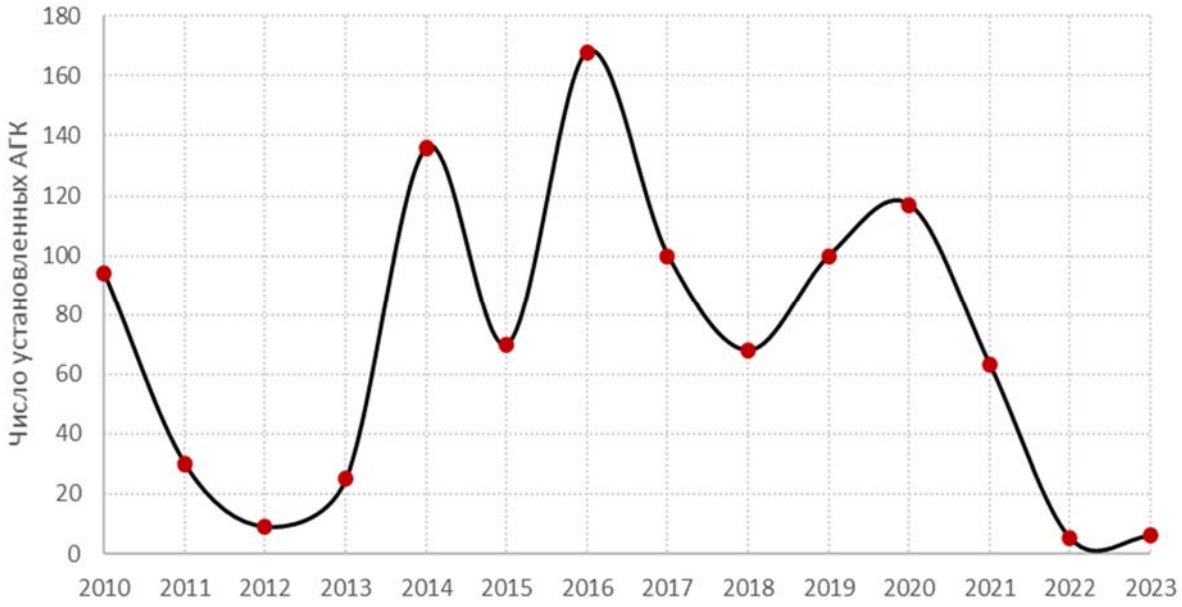


Рис. 1. Распределение по годам количества введённых в эксплуатацию АГК

[1] Федеральная целевая программа "Развитие водохозяйственного комплекса Российской Федерации в 2012-2020 годах" (Постановление Правительства РФ № 350 от 19.04.2012).

Измерения уровня воды с помощью АГК регламентированы в РД 52.08.869-2022[2]. По состоянию на конец 2024 г. на гидрологической сети насчитывается 1100 АГК (табл. 1), ими оборудовано 37 % от общего количества гидрологических постов сети. Большинство АГК находится на европейской территории Российской Федерации (рис. 2).

Таблица 1

Распределение АГК по территориальным управлениям Росгидромета

УГМС	Барботажный	Гидростатический	Поплавковый	Радарный	Всего
Северо-Западное	11	104	6	1	122
Северо-Кавказское	70	22	0	26	118
Центральное	48	49	0	0	97
Западносибирское	70	12	0	14	96
Верхне-Волжское	0	76	0	0	76
Приморское	58	1	0	0	59
Башкирское	46	9	0	1	56
Уральское	0	56	0	0	56
Якутское	0	56	0	0	56
Среднесибирское	3	49	0	0	52
Дальневосточное	37	3	0	2	42
Приволжское	3	33	0	1	37
Северное	1	35	0	0	36
Республика Татарстан	1	32	1	1	35
Забайкальское	0	22	0	0	22
Мурманское	9	13	0	0	22
Колымское	5	15	0	0	20
Камчатское	1	18	0	0	19
Центрально-Черноземное	5	14	0	0	19
ЧАМ	0	0	0	18	18
Обь-Иртышское	1	7	0	9	17
Иркутское	0	15	0	0	15
Крымское	0	10	0	0	10
Всего	370	650	7	73	1100

Чаще используется комплексы с датчиком уровня воды гидростатического типа, датчик радарного типа преобладает в южных широтах, что обусловлено спецификой ледового режима рек. АГК барботажного типа имеет локальные зоны распространения.

Больше АГК установлено на территории Северо-Западного и Северо-Кавказского УГМС, плотность автоматизированной сети в Европейской части РФ значительно превышает этот показатель в Азиатской.

[2] РД 52.08.869-2022. Руководство по организации и проведению измерений уровня воды в водоёмах и на водотоках автоматизированными гидрологическими комплексами

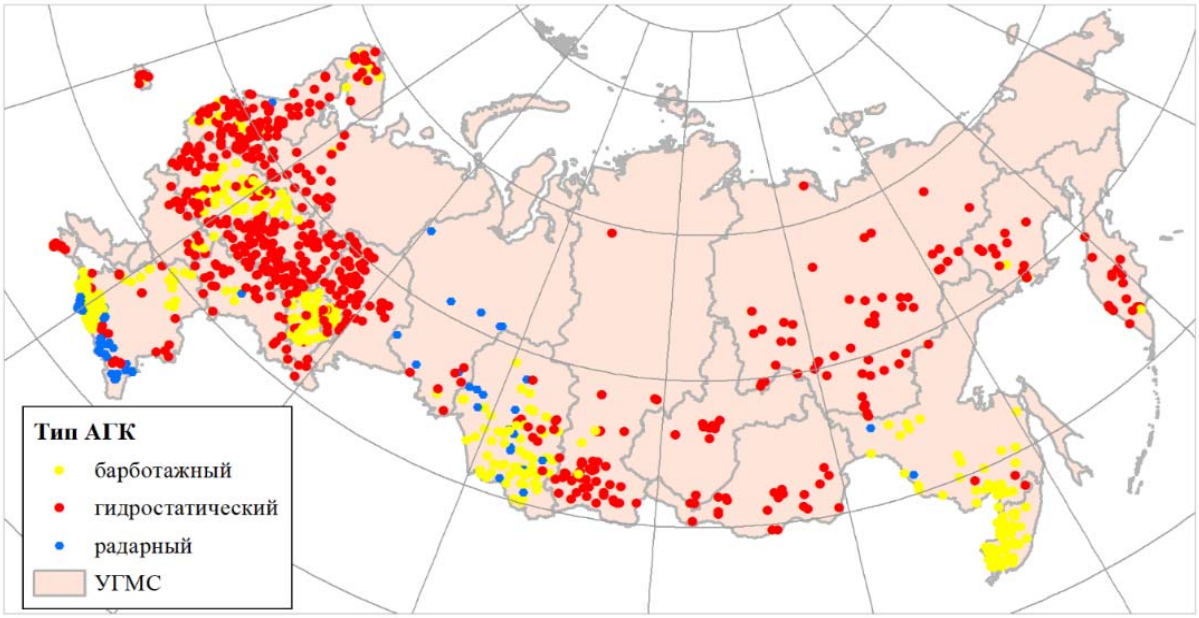


Рис. 2. Распределение АГК с учётом типа датчика по территории Российской Федерации

Материалы и методы исследований

Анализ работы АГК на государственной наблюдательной сети был произведён на основе ежемесячных отчётов, направляемых в ГГИ территориальными управлениями Росгидромета (далее УГМС) за 2021–2024 гг., в которых специалисты на местах заполняют формы по качеству работы АГК в установленном порядке.

Информация о типе датчика АГК, организации поставщике, производителе контроллера и датчика была получена по специализированному запросу. Несмотря на то, что в комплект АГК могут входить датчики разного применения, в работе анализируются только данные по уровню воды.

Рассматриваются все АГК, перечисленные в отчётностях за исследуемый период, вне зависимости от того находятся ли они на складах или установлены на местах эксплуатации. В основе анализа лежат две характеристики – работоспособность комплекса и качество поступивших данных. Под работоспособностью комплекса в исследовании понимается процент поступивших в центры сбора данных сообщений об уровне воды от общего количества наблюдаемых основных сроков (как правило, основным сроком считается ежечасное измерение).

По качеству поступающие с АГК данные разбиты на три категории: высокое качество (расхождение с данными от наблюдателя не превышает 3 см, в соответствии с требованиями РД 52.08.903-2020[3]; хорошее качество (расхождение с данными от наблюдателя не превышает 7 см, в соответствии с требованиями постановления Правительства РФ № 1847 от 16 ноября 2020 г.[4] и низкое каче-

[3] РД 52.08.903–2020. Руководство по проведению сравнительных наблюдений за уровнем и температурой воды стандартными и автоматизированными средствами измерений
[4] Постановления Правительства РФ от 16.11.2020 № 1847 "Об утверждении перечня измерений, относящихся к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений"

ство (расхождение с данными от наблюдателя превышает 7 см). Как и с работоспособностью процент качественных данных также рассчитывался исходя из общего количества наблюдаемых основных сроков, а не от поступивших сообщений.

Анализ работы проведён по шести направлениям:

– пространственный анализ (характеризующий успешность внедрения АГК различными УГМС)

– в зависимости от проекта модернизации (выделяются три проекта – «Росгидромет-1», ФЦП «Развитие водохозяйственного комплекса Российской Федерации в 2012–2020 годах» и «Росгидромет-2»);

– в зависимости от типа датчика АГК (выделяются четыре типа: гидростатический, барботажный, поплавковый и радарный). Необходимо отметить, что часть специалистов не относит к АГК поплавковые датчики уровня воды и поэтому не учитывает их в отчётности;

– в зависимости от производителя контроллера АГК (к анализу представлены АГК 16 производители из 3 регионов);

– в зависимости от организации, производившей монтаж оборудования.

Помимо средних за 4 года значений характеристик приводится оценка снижения объёма получаемых данных, выраженная в уменьшении значения характеристики в процентах за год.

Обсуждение и результаты

Начиная с 2021 г. происходит снижением объёма приходящих в УГМС данных с интенсивностью 2,70 % в год (рис. 3), объём данных высокого качества снижается с интенсивностью 1,21 % в год, в меньшей степени происходит падение объёма данных хорошего качества – 0,84 % в год. Такое соотношение связано с тем, что в большинстве случаев из работы полностью выходят АГК, которые присылали данные плохого качества. Также заметна внутригодовая динамика, объясняемая сезонностью работы некоторых гидрологических постов. В феврале работоспособность в среднем за 4 года меньше на 4,6 % работоспособности в июле.

В рамках первой волны модернизации «Росгидромет-1» на сеть были установлены АГК только немецкой фирмы Seba Hydrometrie, а по проекту «Росгидромет-2» только АГК с контроллером финской фирмы VAISALA Oyj и датчиком немецкой фирмы OTT Hydromet. Процедура закупки проводилась централизовано, а само оборудование поставлялось вместе с установкой и пусконаладкой на месте эксплуатации. Модернизация по федеральной целевой программе «Развитие водохозяйственного комплекса Российской Федерации в 2012–2020 годах» (далее ФЦП) проходила совершенно в другом ключе – закупка осуществлялась самими УГМС, а монтаж комплексов либо силами специалистов на местах, либо поставщиком оборудования. По итогам реализации такого варианта на сети появилось 16 комбинаций датчик-контроллер, большинство из которых попросту не были адаптированы под эксплуатацию в полевых условиях.

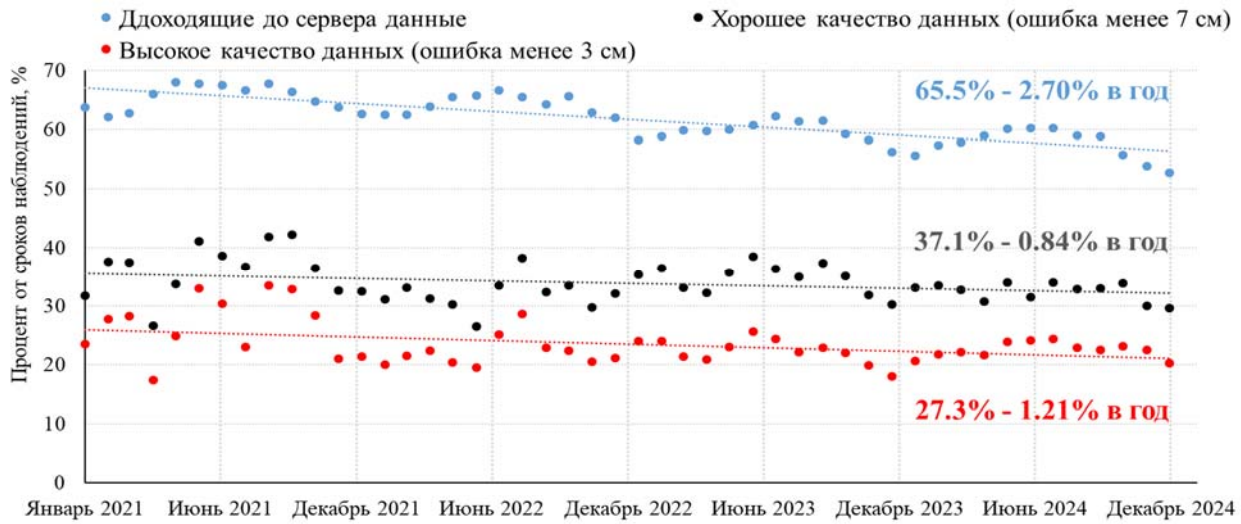


Рис. 3. Динамика работы АГК за 2021–2024 гг.

Можно однозначно утверждать о том, что централизованная поставка приборов с наличием нескольких этапов контроля является более эффективным методом автоматизации сети, поскольку процент работоспособности комплексов, установленных по ФЦП ниже 50 %, а объём данных высокого качества меньше 17 % (табл. 3). Тем более единичные поставки приводят к излишнему разнообразию парка приборов и невозможности передачи опыта по работе с приборами между специалистами на местах. Оборудование, поставленное по проекту «Росгидромет-1», несмотря на почти двойную отработку гарантийного срока службы (6 лет) до сих пор показывают хорошую динамику: 74 % работоспособности при почти нулевой интенсивности её снижения и самым большим объёмом данных высокого качества 36,7 %. Однако интенсивность снижения качественных данных более 4 % в год указывает на значительный дрейф показаний сенсоров и необходимость их замены. АГК, поставленные по проекту «Росгидромет-2», имеют обратную тенденцию – интенсивность снижения объёма данных высокого качества практически нулевая, а интенсивность падения работоспособности более 4 % в год, что скорее всего связано с первичной адаптацией приборов на местах установки.

К причинам неработоспособности АГК относятся:

32 % случаев – ненадёжная связь;

36 % – отказ контроллера, датчика или модема;

6 % – вандализм;

11 % – разряд аккумуляторов;

15 % – повреждение датчика и линии связи с модемом ледоходом или иными плывущими предметами

По показателям работы АГК, установленных по ФЦП, заметно, что монтаж комплексов, проведённый силами сотрудников УГМС произведён качественнее, чем сторонними частыми организациями. При практически одинаковом уровне работоспособности (58–59 %) объём качественных данных сильно выше (28,3 % против 17,9 %), что может быть связано с углублённым знанием сотрудников

УГМС локальных особенностей на местах установки и личной заинтересованности в получении корректных данных.

Согласно табл. 3 самым качественным типом датчика уровня воды можно считать поплавковое устройство, но такой тип датчика не может относиться к процессу полной автоматизации измерений, поскольку за положением поплавка приходится всегда следить. Корректнее относить поплавковый тип к самописцам уровня воды, что не отменяет их хорошей работоспособности и эффективности. Наиболее распространённые гидростатический и барботажный типы датчиков имеют схожие параметры (табл. 3), стоит лишь выделить большую интенсивность снижения объёма качественных данных у барботажных устройств, что лишь отчасти можно связать с большим сроком службы приборов. Радарные датчики, в отличие от опыта их применения на зарубежных сетях, имеют значительное меньшее распространение и показывают худшие результаты.

Таблица 3

Параметры работы комплексов в зависимости от производителя датчика

Программа/тип	Число АГК	Объём приходящих на сервер данных, %	Уменьшение объёма приходящих на сервер данных, % в год	Качество данных, % от всех сроков		Уменьшение объёма данных с погрешностью 3 см, % в год	Средний срок службы, лет
				до 3 см	до 7 см		
Программа модернизации							
Росгидромет-1	134	74,6	0,05	36,7	42,8	4,07	13,0
ФЦП	654	47,8	2,73	16,9	25,5	0,93	8,8
Росгидромет-2	258	84,6	4,04	30,5	47,2	0,35	5,2
Монтажная организация							
Силами УГМС	164	59,1	0,15	28,3	40,1	0,93	8,6
Частная фирма	443	57,8	3,47	17,9	24,3	1,39	8,8
Тип датчика уровня воды							
Барботажный	370	70,7	4,26	22,0	33,4	3,34	9,9
Гидростат	650	58,0	1,68	24,7	34,9	-0,22	8,1
Поплавковый	7	92,7	1,48	54,6	69,8	-0,85	13,0
Радарный	73	50,1	3,60	15,4	21,2	2,01	9,0
Производители контроллера							
Азиатские	199	49,53	4,34	8,23	14,12	1,00	8,3
Европейские	638	76,39	2,77	32,30	45,25	1,44	9,2
Российские	263	35,23	1,00	13,11	20,54	0,45	8,4
Производители датчика уровня воды							
Азиатские	4	7,05	5,61	0,00	2,08	0,00	6,0
Европейские	704	74,27	2,71	31,27	43,81	1,49	9,0
Российские	394	39,64	2,55	9,38	15,88	0,46	8,6

Российские и азиатские производители оборудования значительно уступают европейским аналогам в качестве произведённых приборов, как контроллеров, так и датчиков уровня воды (см. табл. 3).

Большая часть АГК сосредоточена на европейской территории Российской Федерации: 63 % устройств находится западнее 60° в. д., где работоспособность комплексов составляет 73 %. Восточнее 60° в. д. этот показатель равен 43 %

(рис. 4). Объём данных высокого качества на территории страны западнее 60° в. д. составляет 41 %, восточнее – 20 % (рис. 5). Единственным исключением является функционирование АГК в Приморском УГМС, где работоспособность составляет 89 %, а объём данных высокого качества достигает 72 %.

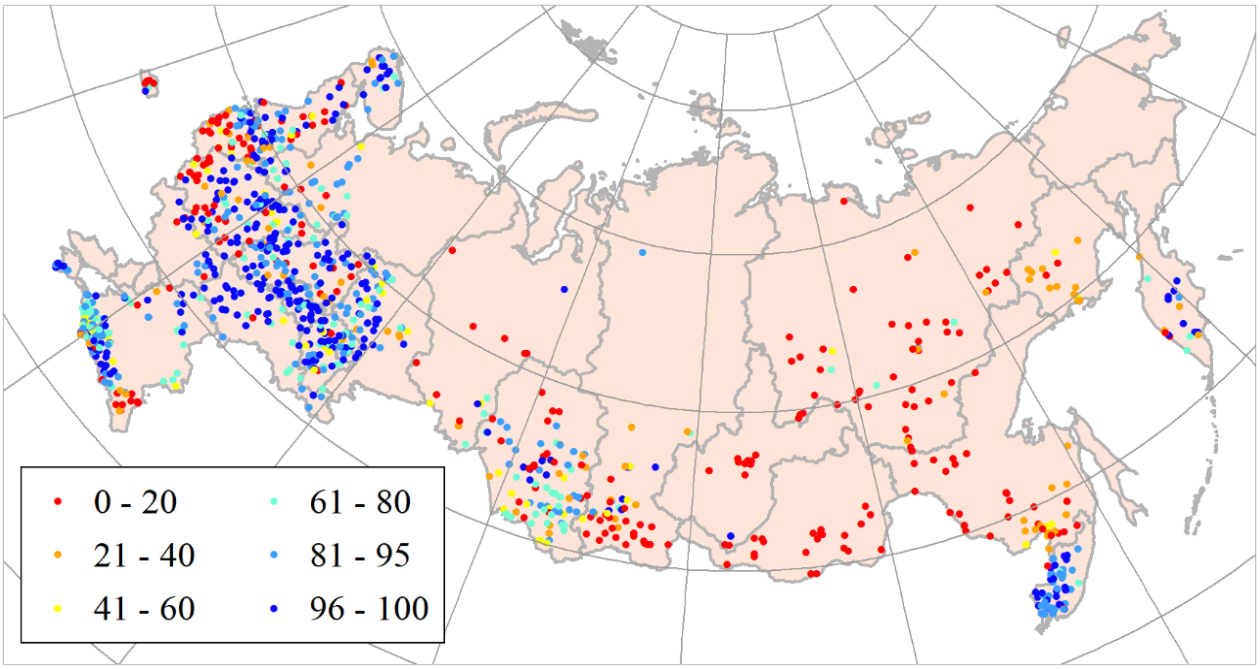


Рис. 4. Карта распределения АГК по времени работоспособности, %

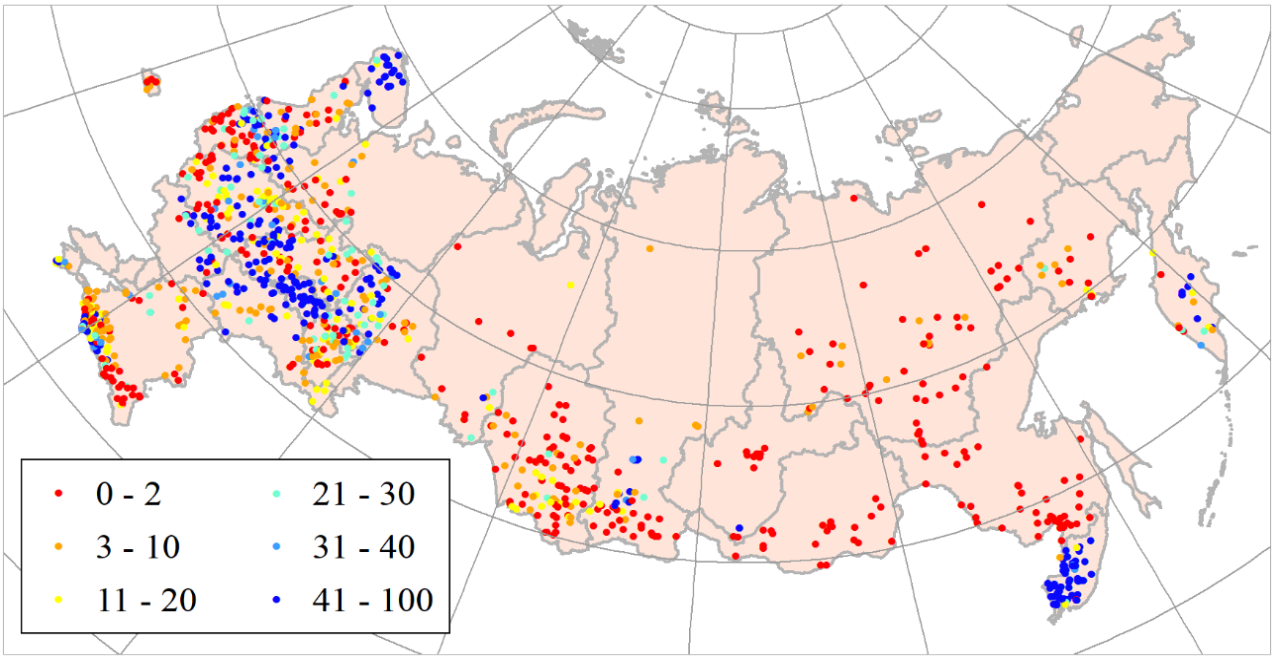


Рис. 5. Карта распределения АГК по объему данных хорошего качества, %

Выводы и обсуждения

Отказ оборудования (контроллера, датчика или модема) является основной причиной нарушения работоспособности АГК на сети Росгидромета (36 %), 32 % сбоев обусловлены проблемами с обеспечением связи, 15 % – повреждениями датчика или линий связи, 11 % – разрядом аккумуляторной батареи, 6 % – вандализмом.

Интенсивность падения работоспособности АГК оценивается в 2,7 % в год. Большинство комплексов приближается или уже превысило свой гарантированный производителями срок службы, поэтому в ближайшее время прогнозируется увеличение данного показателя. С учётом такой динамики для поддержания достигнутого уровня автоматизации необходимо ежегодно вводить (заменять) 40 АГК. Для того чтобы достигнуть 100 % автоматизации необходимо вводить по 130 АГК ежегодно на протяжении двадцати лет. Наилучшим вариантом здесь выступает проведение многолетних научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по составлению технической документации с созданием опытных образцов и выпуском серийных партий АГК отечественного производства и распространение их централизовано по территориальным управлениям Росгидромета.

В отличие от большинства иностранных гидрометеорологических служб в Российской Федерации действует более строгая система метрологического контроля, поэтому возможно оценить не только объём поступающих данных, но и их качество. Контроль ведётся как по линии лабораторной точности приборов – система первичной и периодической поверки средств измерений, так и по линии влияния местных факторов за счёт параллельных измерений уровня воды наблюдателем.

Помимо соблюдений сложившихся метрологических традиций также необходимо вводить международную практику, заключающуюся в:

– применении резервных автоматизированных средств измерения уровня воды в том числе с автоматизированным переключением между источниками данных в момент сбоев

– использовании в качестве резервного источника данных об уровне воды непередающих записывающих данные во внутреннюю память автономных уровнемеров (АУ), стоимость которых существенно ниже, а простота монтажа и хорошая защищённость от вандализма позволяет характеризовать такие СИ как надежные [5];

– расширение штата сотрудников инженерных подразделений, которые бы обслуживали АГК в рамках работы МГЛ[5].

– заполнении пропусков данных и фильтрации выбросов в режиме реального времени с помощью искусственного интеллекта [7], машинного обучения [4], IoT-технологий [6] в автоматизированном режиме;

– создание резервных фондов, в которые закладывается возможная утеря оборудования для быстрого восстановления автоматизированных пунктов сети;

[5] РД 52.08.897–2020. Производство наблюдений приборным комплексом мобильной гидрологической лаборатории

– высоком уровне передачи данных в режиме реального времени на общедоступные платформы на базе ГИС-технологий;

– оперативного учёта стока по данным АГК;

– большем применении АГК радарного и ультразвукового типов.

Список литературы

1. *Вуглинский В. С, Высоцкий Д. В., Яковлева Т. И.* Мониторинг поверхностных водных объектов в России // Метеорология и гидрология. 2021. Вып. 6. С. 77–88. https://doi.org/10.52002/0130-2906-2021–6-77–88

2. Обзор состояния системы гидрологических наблюдений, обработки данных и подготовки информационной продукции в 2023 году. СПб. : ФГБУ «ГГИ», 2024.

3. Multi-scale hydrological system-of-systems realized through WHOS: the brokering framework / E. Boldrini, S. Nativi, S. Pecora [et al.]. // International Journal of Digital Earth. 2012. Vol. 15 (1). P. 1259–1289. https://doi.org/10.1080/17538947.2022.2099591

4. Estimation of miss-ing streamflow data using various artificial intelligence methods in peninsular Malaysia / Lin Ng Jing, Y. F. Huang, A. H. Chong [et al.]. // Water Practice and Technology. 2024. Vol. 19 (11). P. 4338–3354. https://doi.org/10.2166/wpt.2024.265

5. Experimental instrumentation of water stage monitoring stations in mountain streams bedrock using pressure transducers / V. M. Quezada, J. H. H. Anguiano, R. Miranda [et al.]. // Flow Measurement and Instrumentation. 2023. Vol. 93. P. 20 https://doi.org/10.1016/j. flowmeasinst. 2023. 102436

6. Extending global river gauge records using satellite observations / R. M. Riggs, G. H. Allen, Wang Jida [et al.]. // Environmental Research Letters. 2023. Vol. 18. P. 12 https://doi.org/10.1088/1748–9326/acd407

7. *Sanhueza P. A., Karelovic B., Link O.* Automatic Gap-Filling of Daily Streamflow Time Series in Data-Scarce Regions using a Machine Learning Algorithm // Journal of Hydrology. 2021. Vol. 528 (8). 16 p. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126454

8. *Steward B.* Measuring what we manage – the importance of hydrological data to water resources management // Hydrological Sciences and Water Security: Past, Present and Future, Proceedings of the 11th Kovacs Colloquium. 2015. IAHS Publ. 366. P. 80–85. https://doi.org/10.5194/piahs366-80-2015

УДК 551.583.1

Прорывные информационные технологии в гидрометеорологии

Е. Д. Вязилов (vjaz@meteo.ru)[1,2], Д. А. Мельников (melnikov@meteo.ru)[2], Д. В. Казаков (kazakovdv@oiate.ru)[1], Н. В. Хритошин (khritoshinNV20@oiate.ru)[1], А. Г. Попушой (aleksandra.popushoy@mail.ru)[1], Ю. В. Медведева (jule4ka03@mail.ru)[1]

[1]*OIATE – Branch of the National Research Nuclear University MEPhI, г. Obninsk*
[2]*ВНИИГМИ-МЦД, г. Обнинск*

Аннотация. Рассматриваются основные направления развития прорывных информационных технологии в гидрометеорологии. В исследовании использовались методы ИИ в виде генеративных моделей, баз знаний, интеграции данных. Основным направлением развития гидрометеорологического обеспечения являются расширение состава распределенных и неоднородных информационных ресурсов и переход к архитектуре «Сетка данных». Впервые для модернизации программного обеспечения Единой государственной системы информации об обстановке в Мировом океане (ЕСИМО) предлагается использовать методы и средства ИИ в виде чат-ботов для поиска данных, графов знаний для связывания различных типов и видов данных, баз знаний для автоматизации массовой обработки данных. промтов для генерации страниц сайтов, текстовых прогнозов и воздействий стихийных явлений на деятельность предприятий и населения. Научная значимость результатов исследований заключается в развития интеграции распределенных и неоднородных данных в виде архитектуры «Сетка данных» с использование цифровых двойников. Результаты исследований будут использованы при модернизации ЕСИМО.

Ключевые слова: информационные технологии, ЕСИМО, промты, генерация текстов, страницы сайтов, обзоры, текстовые прогнозы, воздействия.

Введение

В настоящее время имеется много прорывных технологий. Это информационно-коммуникационные технологии, облачные хранилища, позволяющие осуществлять удаленный доступ к базам данных (БД) практически из любого места Земли, с любого интернет-устройства, в любое время. В последние годы в области наук о Земле стали разрабатываться цифровые двойники (ЦД) и графы знаний, которые позволяют связать существующие БД и наборы данных, хранящиеся в различных доменах, использовать данные для моделирования воздействий среды на деятельность предприятий и обогащения выдаваемых данных. С помощью мобильных интернет-средств значительно упростился доступ к БД и появилась возможность удаленно пополнять БД. В 2022–2023 гг. искусственный интеллект (ИИ) бурно ворвался в нашу жизнь. Методы, средства и технологии ИИ в той или иной степени можно применить при развитии гидрометеорологического обеспечения (ГМО) пользователей. В статье [1] показаны основные направления развития ИТ для устойчивого развития.

Целью статьи является представление тенденций развития ИТ для ГМО. В статье рассмотрено продвижение в области интеграции данных – переход к архитектуре «Сетка данных» для дальнейшего использования данных в различных приложениях, в том числе для обучения нейронных сетей.

Перспективы развития гидрометеорологического обеспечения

ГМО должно развиваться на следующих принципах:

- развитие интеграции данных из разных доменов;
- доставка данных во внутренние и внешние приложения;
- переход ГМО от самообслуживания на веб-сайтах и порталах к персонализированному обслуживанию пользователей;
- совместная обработка различных видов наблюдений;
- создание сквозной технологии работы всех компонентов от сбора до принятия решений с использованием методов и средств ИИ;
- доведение до пользователей только той информации и только тогда, когда значение показателей опасного явления (ОЯ) выходит за пороговые значения;
- оценка воздействия изменений климата на население и экономику;
- выдача рекомендаций для принятия решений;
- оптимизация решений с учетом складывающихся гидрометеорологических условий и экономической оценки ущерба и стоимости превентивных мероприятий.

Основываясь на этих принципах и на имеющихся разработках при модернизации Единой государственной системы информации об обстановке в Мировом океане (ЕСИМО) можно выделить следующие направления развития для повышения эффективности ГМО.

Расширение интеграции распределенных, неоднородных данных производится с использованием метаданных об общих кодах и классификаторах, обеспечивает обновление данных. Например, ЕСИМО интегрирует структурированные файлы, БД, объектные файлы (готовые карты, текстовые файлы, изображения, др.), картографические сервисы и другие приложения. Система обеспечивает единое окно доступа для пользователей, и доставку данных в том числе для использования в средствах ИИ и различных моделях. Фактически ЕСИМО может взять на себя предоставление услуг по подключению новых типов и видов данных, что значительно облегчит переход к единому источнику данных. Так как разработчикам моделей ИИ не нужно будет готовить данные, используя несколько технологий, изучать способы доступа к ним, достаточно будет только подключить новую модель.

Автоматическая доставка данных во внутренние и внешние приложения в виде ЦД состояния окружающей среды, социальной, финансовой, технологической и другой информации в соответствии с подпиской с помощью REST или SOAP сервисов становится важнейшей функцией интегрированных систем. Главное, здесь обеспечить безопасность как на уровне хранения интегрированных данных, так и на уровне их передачи.

Переход ГМО от самообслуживания на веб-сайтах и порталах к персонализированному обслуживанию пользователей это эволюция существующего обслуживания современными веб-технологиями с учетом конкретных потребностей предприятий, имеющихся у них информационных систем, бизнес-процессов, зависящих от ОЯ. То есть доставляется та и только та информация, которая необходима для решения конкретных бизнес-процессов.

За счет интеграции данных впервые появилась новые возможности по:

- совместной обработке наблюденных, прогностических и климатических данных;
- объединению различных различных видов и типов данных, т. е. совместно с данными по окружающей среде, можно рассматривать, например, временные ряды по демографии и количеству отдельных ОЯ или пространственное распределение повторяемости ОЯ и рождаемость по субъектам Российской Федерации;
- совместной обработке данных из различных информационных ресурсов;
- обогащению данных при обслуживании пользователей.

Создание сквозной технологии работы всех компонентов от сбора до принятия решений с использованием методов и средств ИИ позволяет практически без вмешательства администраторов выполнить не только цикл работ по интеграции данных, но и организовать автоматическое получение и доведение необходимой пользователю информации.

Доведение до пользователей информации только тогда, когда значение показателей ОЯ выходит за пороги уровня опасности для конкретных предприятий, бизнес-процессов. Информационные потребности предприятий указываются при подписке с указанием локальных пороговых значений показателей ОЯ [2].

Основной проблемой оценки воздействий изменений климата на население и экономику, выдачи рекомендаций для принятия решений является разрозненность усилий различных ведомств [2], связанных с:

- производством наблюдений и выдачей прогнозов (Росгидромет);
- доведением сведений об ОЯ до руководителей предприятий, органов государственной власти и населения (МЧС России);
- использованием ГМИ для принятия решений и выполнением превентивных мероприятий (руководители предприятий, органов государственной власти и население).

В настоящее время убытки от воздействий ОЯ считаются после его прохождения. Росгидромет считает экономическую эффективность обслуживания прогнозами. Развитие информационно-коммуникационных технологий позволяет оценить ущерб, стоимость превентивных мероприятий и провести оптимизацию решений на основе модели «Стоимость превентивных мероприятий, не должна превышать 30 % от оценок ущерба».

От интеграции данных к архитектуре «Сетка данных»

Архитектура «Сетка данных» является перспективным методом распространения данных, в основе которой лежит персонализированное обслуживание

данными и продукцией. Эта архитектура предназначена для поиска и доступности к данным [6]; использует базы знаний для выявления инцидентов в системе безопасности и идентификации превышений пороговых значений тех или иных показателей ОЯ. Архитектура “Сетка данных” на основе ЕСИМО представлена на рис. 1.

Рис. 1. Архитектура «Сетка данных» на основе ЕСИМО

Преимущества архитектуры «Сетка данных» связаны с развитием сквозной схемы обработки и ГМО «от измерения до принятия решений». Для стандартизации структур данных и дальнейшего их применения в моделях и приложениях используются ЦД. Для организации эффективного поиска связанных ресурсов и обогащения данных при выполнении запросов применяются графы знаний, хранящиеся в векторной БД. Основным способом получения данных становятся API, REST и SOAP сервисы.

Применение методов и средств ИИ в исследованиях

Трансформация прогностических цифровых данных в текст прогноза

Прогнозы Росгидромета, подготовленные с помощью численных моделей, представляются в виде цифровых значений параметров атмосферы и гидросферы в узлах регулярной сетки. Синоптик на этой основе составляет прогноз в виде текста для крупных поселений. Эта работа достаточно трудоемкая. требуется автоматизация составления таких прогнозов [2]. Для трансформация цифровой прогностической информации в текст, понятный любому человеку, можно ис-

пользовать нейронную сеть. В США компания Tomorrow [3] уже разработала такую технологию. Например, если прогнозные значения параметров следующие: температура = 18 °С, ветер = 12 м/с, вероятность дождя = 50 %, то система определит погодные условия и сгенерирует текст: «Ожидается умеренный ветер до 12 м/с. Возможны кратковременные дожди. Температура составит 18 °С».

Генеративные модели, основанные на трансформерной архитектуре [4; 6], способны создавать связные текстовые описания. Генеративная модель GPT-3 и её русскоязычная версия RuGPT (https://rugpt.io) принимает числовые данные как входные параметры. Если на вход модели подать данные: температура = 20 °С, влажность = 80 %, вероятность дождя = 70 %, то модель сгенерирует текст: «Сегодня в вашем регионе ожидается облачная погода с температурой около 20 °С. Возможны дожди с вероятностью 70 %. Влажность воздуха составит 80 %, что создаст ощущение повышенной сырости».

Для генерации текста прогноза взят набор данных с портала ЕСИМО (http://esimo.ru) в виде CSV файла, который содержит основные прогностические метеорологические параметры. Структура данных включает временные и пространственные параметры – дата, время, широта, долгота, а также основные параметры прогноза, табл. 1.

Таблица 1

Структура данных исходного файла

Дата и время: начало	Дата и время	Широта	Долгота	Давление на поверхности	Давление на уровне моря	Температура возд.	Температура поверхности	Точка росы	Осадки: количество	Ветер: U	Ветер: v	Ветер: порывы
2024–12–19 12:00:00	2024–12–20 15:00:00	36.4085	54.8587	1023.0	828.00	0.20	–1.3	–7.9	1.3	–0.9	5.0	?

Процесс обучения включает подготовку данных, выбор модели, настройку гиперпараметров и обучение модели. Исходный набор данных был разделен на две выборки: обучающую и тестовую. Среди основных гиперпараметров, которые были настроены в процессе обучения, выделены – количество слоев нейронной сети; размер скрытого слоя; скорость обучения; число полных циклов обучения; количество примеров, которые модель обрабатывает за один раз при каждом обновлении весов.

Текстовой прогноз, сгенерированный при помощи RUGPT, представлен в таблица 2. Для оценки нейронной сети использовались такие метрики как BLEU (Bilingual Evaluation Understudy), ROUGE (Recall-Oriented Understudy for Gisting Evaluation) и Perplexity (перплексия). Показатели BLEU и ROUGE показывают, что сгенерированный текст прогноз не полностью соответствует реальным текстам прогнозам. Низкие оценки BLEU и ROUGE указывают на то, что модель не

учитывает сложные зависимости и контексты, которые важны для генерации текстовых прогнозов погоды. Генерируемый текст иногда избыточен – модель может добавлять неуместные подробности. Модель требует улучшений в области генерации текстов. Для улучшения результатов необходимо дообучить модель с более разнообразными и сложными данными, которые включают не только базовые предсказания, но и более детализированные описания погоды.

Таблица 2

Результат текстового прогноза

Дата	Сгенерированный прогноз
2024–12–19 12:00:00	Прогноз погоды на основе данных: Температура воздуха: –0,04 °C, Атмосферное давление: 0,18 гПа, Зональная составляющая скорости ветра: –1,1 м/с, Осадки: 1,9 мм. Что можно ожидать в Калужская область в ближайшие часы? На дорогах области провести работы по расчистке проезжей части от снега и наледи

Промты для подготовки обзорных статей

При выполнении пилотного проекта было подготовлено пять промтов:

1. «Напиши обзор по теме «Гидрометеорология», выделяя ключевые факты и основные аспекты этой области науки».
2. «Подготовь статью, в которой подробно освещены ключевые направления гидрометеорологии с акцентом на новейшие исследования и достижения в этой области».
3. «Подготовь комплексную обзорную статью по теме «Гидрометеорология», охватывающий её историческое развитие, текущие исследования, перспективы на будущее, включая инновации, такие как ИИ и машинное обучение, а также их влияние на прогнозирование и управление природными катастрофами».
4. Проведи подробный анализ для обзорной статьи по теме «Гидрометеорология», включая историческое развитие, текущие исследования, проблемы и вызовы, а также рекомендации по решению основных задач с учётом современных технологий и трендов».
5. «Подготовь структурированный обзор по теме «Гидрометеорология», включив описание актуальных проблем этой науки, вызовов и возможных путей их решения, с примерами практического применения».

Результаты промта № 3 представлены ниже:

Гидрометеорология – это междисциплинарная наука, исследующая взаимодействие атмосферных процессов и водных ресурсов Земли. Она играет ключевую роль в решении проблем, связанных с изменением климата, рациональным использованием воды и предупреждением природных катастроф. Рассмотрим актуальные проблемы, вызовы и примеры их решения.

Актуальные проблемы гидрометеорологии:

а) *Изменение климата*

- *Проблема: Глобальное потепление приводит к изменениям в круговороте воды, увеличению частоты экстремальных погодных явлений, таких как засухи и наводнения.*
- *Последствия: Нарушение экосистем, нехватка питьевой воды, разрушение инфраструктуры.*

b) *Недостаточность данных*

- *Проблема: В некоторых регионах мира отсутствуют современные метеорологические и гидрологические наблюдательные системы.*
- *Последствия: Невозможность точного прогнозирования погоды и управления водными ресурсами. Примеры практического применения.*

a) *Сельское хозяйство*

- *Прогнозы осадков и температуры позволяют планировать посевные работы и оптимизировать использование воды.*
- *Пример: Внедрение прогнозов погоды в фермерских хозяйствах Индии помогло увеличить урожайность на 20 %.*

b) *Предупреждение природных катастроф*

- *Системы раннего оповещения о наводнениях и ураганах спасают жизни и уменьшают ущерб.*
- *Пример: Использование спутниковых данных в Юго-Восточной Азии позволило уменьшить смертность от наводнений на 30 %.*

Сравнительный анализ промтов представлен в табл. 3. Промт № 2 показывает лучшие результаты по точности и релевантности, но связывается с небольшими недостатками в плавности и связности. Промт № 5 является самым сбалансированным, демонстрируя высокие оценки по всем критериям с превосходной плавностью и связностью.

Таблица 3

Сравнительный анализ промтов

Промты	Точность	Связность	Плавность	Релевантность	Оригинальность
1 «Напиши обзор по теме «Гидрометеорология»	0,84	4,1	31,17	0,61	0,7
2 «Напиши статью про ключевые направления гидрометеорологии»	1,0	3,9	28,23	1,0	0,73
3 «Подготовь структурированный обзор по гидрометеорологии»	0,4	4,4	48,38	0,65	0,67
4 «Подготовь анализ для обзорной статьи по гидрометеорологии»	0,16	4,2	36,20	0,77	0,84
5 «Подготовь комплексную обзорную статью по гидрометеорологии»	0,87	4,5	14,1	0,84	0,87

Разработка промптов для создания веб-сайтов

Разработка начинается с анализа требований к основным типам страниц сайта. Можно выделить несколько типовых страниц, например, главная, контакты, публикации. Главная страница является визитной карточкой сайта и

должна быть понятной, привлекательной и функциональной. Рекомендации по написанию промптов показаны ниже.

Избегайте двусмысленных фраз и неточных описаний; указывайте конкретные требования, например, «Создай форму регистрации с полями для имени, e-mail, пароля и кнопки «Зарегистрироваться».

Укажите все параметры, такие как размеры шрифтов, цвета, поведение кнопок, адаптивность. Пример: «Задай фон страницы белым, текст – серым, шрифт – Arial, заголовок уровня H1 сделай 28px»; используйте числовые или измеримые критерии, например, «Отводи 70 % экрана под основной контент».

Разбивайте сложные запросы на несколько отдельных промптов, чтобы избежать перегрузки чат-бота, например, сначала запросите создание структуры HTML-страницы, затем её стилизацию с помощью CSS, а затем добавление динамики (JavaScript).

Формулируйте запросы так, чтобы они были понятны даже без глубоких технических знаний, например, «Добавь на страницу кнопку с надписью: «Нажми меня»;

Если задаёте уточняющий запрос, обращайтесь к предыдущему ответу бота: «Добавь стили для шапки, которую ты создал ранее»;

Если результат не соответствует ожиданиям, то уточните детали: «Сделай фон кнопок зелёным вместо синего»; переформулируйте запрос, исключая двусмысленность. Используйте последовательные итерации: «Сначала создай HTML-структуру, затем добавь стили для заголовков и кнопок». Запрашивайте исправления: «Добавь отступы между элементами в секции «О нас».

Для проведения оценки сгенерированных страниц сайтов используются критерии, представленные в табл. 2. При проверке функциональности оценивалась работоспособность ключевых элементов: меню, кнопок, форм; исправность слайдеров, адаптивных элементов и интеграций с картографическими сервисами; корректная обработка форм обратной связи. Необходимо смотреть насколько сайт соответствует требованиям промта по структуре и содержанию страниц, наличию элементов – футеров, заголовков, ссылок.

В анализе первого уровня (базовый сайт) проверяется наличие минимальных функциональных элементов (текст, контакты), анализируется, насколько структура соответствует промпту. В анализе 2–4 уровня (средний, высокий, продвинутый) добавляется анализ дизайна, интерактивных элементов, адаптивность, проверяется работоспособность слайдеров, карточек и других элементов. В анализ пятого уровня проводится комплексная проверка, включая интеграции и динамические обновления, сравнение с реальными корпоративными сайтами.

Сравнение результатов показало значительное улучшение качества сайта с каждым следующим промптом. Промпт 1 представляет базовый уровень, где сайт минимален по дизайну и функционалу, но подходит для самых простых задач. Промпт 2–4 добавляют новые функционал. Промпт 5 достигает максимального уровня качества, предлагая профессиональный дизайн, SEO-оптимизацию, интерактивность и полную адаптивность (рис. 2).

Таблица 4

Результаты анализа полученных сайтов по каждому промту

Критерий	Промпт 1	Промпт 2	Промпт 3	Промпт 4	Промпт 5
Качество дизайна	Минимально: простой текст и базовая структура	Среднее: добавлены логотип и стили	Хорошее: слайдер, карточки, стилизованные элементы	Очень хорошее: разнообразные блоки, визуально привлекательный сайт	Отличное: профессиональный дизайн, карточки, слайдер, секция для отзывов
Функциональность	Минимально: отображение текста и контактов	Базовое: добавлены дополнительные страницы	Среднее: карта, форма обратной связи, интерактивность	Хорошее: кнопки с действиями, навигация	Полное: интерактивные формы, динамическое обновление контента
Адаптивность	Отсутствует	Частичное: элементы масштабируются	Среднее: адаптация меню, масштабирование изображений	Хорошее: полноценный гамбургер, карточки адаптируются	Полное: меню, карточки, масштабирование всех элементов
Соответствие требованиям	Частично: основные текстовые блоки	Удовлетворительное: соблюдение базовых требований	Хорошее: добавлены все ключевые элементы	Полное: все страницы выполнены в соответствии с требованиями	Максимальное: учтены все требования, реализован расширенный функционал
SEO-оптимизация	Отсутствует	Базовое: метатеги добавлены	Среднее: описания для каждой страницы	Хорошее: добавлены ключевые слова и описания	Полное: метатеги, ключевые слова, SEO-разметка
Скорость загрузки	Очень высокая: минимальный контент	Высокая: базовые элементы	Хорошая: больше изображений, интерактивных элементов	Средняя: много картинок и стилей	Умеренная: сложная структура, много интерактивности
Пользовательский опыт	Удовлетворительный	Средний: навигация по страницам	Хороший: удобная структура и интерактивность	Очень хороший: продуманная структура, удобство использования	Превосходный: современный, интуитивно понятный интерфейс

Заключение

Представлены краткий анализ основных направлений развития ИТ для ГМО и подходы по развитию архитектуры «Сетка данных» на основе ЕСИМО. При этом единая система берет на себя предоставление услуг по подключению новых типов и видов данных, что значительно облегчает переход к такой архитектуре.

Проведены эксперименты с генеративными моделями ИИ для трансформации прогностических данных в текст прогноза, понятный населению, подготовки страниц сайтов, обзоров, резюме. При этом проведена оценка качества полученных текстов, которая включает и экспертную оценку полученных текстов.

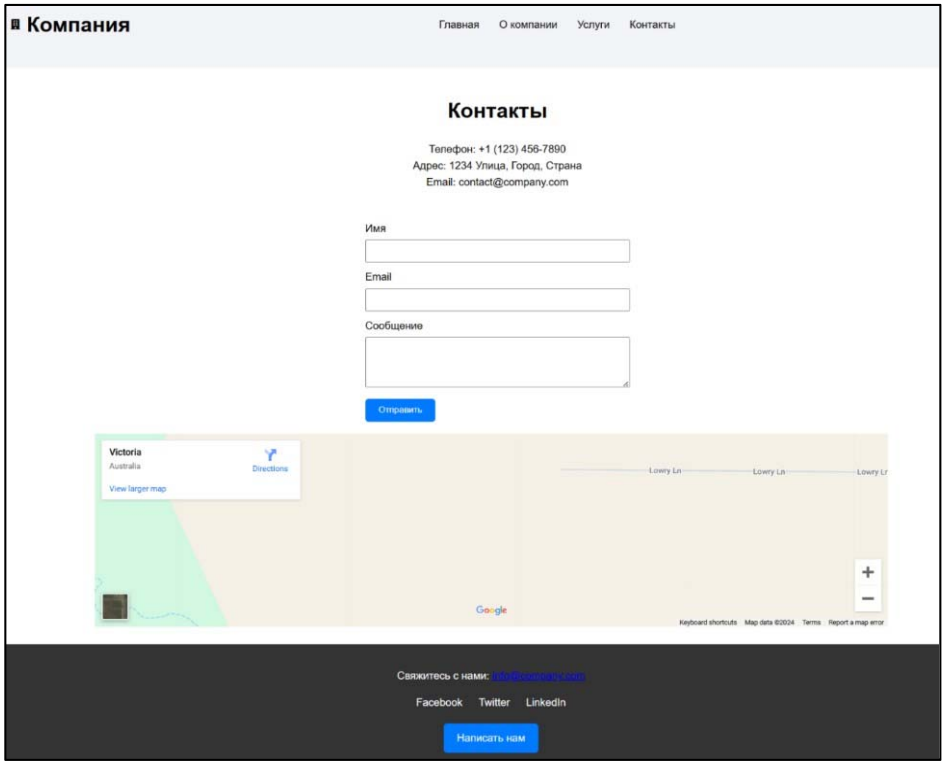


Рис. 2. Страница сайта для промпта № 5

Результаты работы показали, что использование структурированных промтов позволяет достичь хорошего качества генерируемых текстов. Перспективы для дальнейшей работы являются проведение углублённого сравнения сгенерированных текстов с опубликованными документами, использование расширенного состава метрик для дополнительной оценки полученных текстов. Проведённые эксперименты показали перспективы использования нейросети RUGPT-3 для трансформации числовых прогнозных данных в текст прогноза. Однако есть ограничения, связанные с необходимостью дообучения и проверки качества результатов на других моделях.

Список литературы

1. *Вязилов Е. Д., Мельников Д. А.* Новые информационные технологии для устойчивого освоения океанов и морей // Океанологические исследования. 2005.

2. *Вязилов Е. Д.* Цифровая трансформация гидрометеорологического обеспечения. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД. 2021. Т. 1. 356 с. ; 2022. Т. 2. 355с.

3. A Family of Pretrained Transformer Language Models for Russian. URL: https://clck.ru/3FLBy9 (дата обращения: 11.11.2024).

4. Tomorrow Company. URL: https://www.tomorrow.io/blog/tomorrow-io-unveils-first-weather-climate-generative-ai/ (access date: 12.08.2024).

5. Transformers. URL: https://clck.ru/3FLCAp (дата обращения: 13.11.2024).

6. *Zhamak Dehghani.* How to Move Beyond a Monolithic Data Lake to a Distributed Data Mesh. 2019. URL: http://martinfowler.com/articles/data-monolith-to-mesh.html (access date: 14.10.2024).

УДК 551.510.42:598.2(571.5)

Птицы лесных экосистем Байкальского региона: потепление климата и динамика населения

Ю. И. Мельников (yumel48@mail.ru)
Байкальский музей СО РАН, Иркутская обл., р. п. Листвянка

Аннотация. На основе длительных полевых исследований (2010–2024 гг.) на Южном Байкале впервые показаны особенности динамики населения и видового состава птиц лесных экосистем в условиях резкого потепления климата. Доказано, что уровень связи плотности населения и общей тенденции к потеплению климата зимой носит линейный характер среднего уровня – $R^2 = 0,72$, а летом удовлетворительно аппроксимируется полиномиальной регрессией шестой степени – $R^2 = 0,29$. Связь плотности населения и видового богатства птиц в зимний период хорошо описывается линейной регрессией среднего уровня – $R^2 = 0,59$, а в летний период полиномиальной регрессией шестой степени – $R^2 = 0,5$. На протяжении всего периода исследований зимой все изученные показатели последовательно снижались. В летний период в начале наблюдалось их повышение (до пика потепления в 2015 г.), а затем резкое снижение. В целом динамика населения птиц определялась процессами иммиграции и эмиграции, а также перемещением местных видов оседлых птиц в более северные регионы, где в настоящее время находятся оптимумы их ареалов.

Ключевые слова: Байкальский регион, лесные экосистемы, климат, птицы, плотность населения, видовая структура.

Введение

Несмотря на длительное изучение птиц Байкальского региона, влияние климата на плотность и структуру их населения до сих остается слабо изученным вопросом. Обширность региона, разные участки которого изучены неравномерно, не позволяет детально рассматривать этот вопрос. В то же время на южных и северных участках котловины оз. Байкал (ФГБНУ «Байкальский музей СО РАН» и ФГБУ «Заповедное Подлеморье») проводились длительные стационарные исследования. Они позволяют более детально рассмотреть многие вопросы экологии лесных птиц, в том числе и влияние климата на их население.

На Южном Байкале условия обитания птиц были заметно благоприятнее, что, несомненно, связано с физико-географическими его особенностями. Температурные условия данного района определяются как его южным положением, так и низкогорным рельефом. Широкая долина р. Селенги, расположенная напротив истока р. Ангары, создавала условия для проникновения теплых масс воздуха, идущих из Монголии в периоды сильных засух, в южные районы Предбайкалья. В связи с этим в нижних участках крупных рек, впадающих в р. Ангару, сформировались большие участки лесостепи [9]. Вместе с тем широкая долина р. Ангары, связанная с южными потоками воздуха, проникающими сюда из Монголии и существование системы рано формирующихся больших полыней в истоке этой реки, обеспечивают более раннее наступление весенней миграции околоводных и водоплавающих птиц. Медленное остывание оз. Байкал в осенний период, связанное с огромной массой прогретой летом воды, способствует

длительным задержкам птиц на местах массовых остановок на отдых и позднему окончанию осеннего пролета. Все вышеперечисленные факторы создают дополнительные благоприятные условия для расселения птиц на запад, северо-запад, и север, а также на юг и юго-восток [7].

Высокогорные районы Северного Байкала находятся под большим влиянием отрицательных температур воздуха. Специальные исследования климата в бассейне р. Баргузин указывают, что здесь повышение температуры приземного слоя воздуха было явно ниже, чем в южных районах котловины оз. Байкал [11]. Детальное изучение динамики фауны птиц, связанное с изменениями климата, выполнено в Баргузинском заповеднике [1]. Более суровый климат и отсутствие массовых миграций птиц привели к формированию здесь значительно менее выраженных процессов изменения их населения. В целом это общая закономерность – изменения климата сильнее выражены и лучше прослеживаются на равнинных территориях и в поймах крупных рек, а в высокогорных районах потепление климата и его последствия проявляются значительно медленнее и позже. Следовательно, при анализе населения птиц котловины оз. Байкал эти регионы необходимо рассматривать отдельно. В данной работе рассматриваются особенности динамики населения лесных птиц, связанные с изменениями климата на Южном Байкале (правобережье истока р. Ангары).

Материал и методика

Работа выполнялась с 2009 по 2024 г. на ключевом участке площадью более 50,0 км^2 на правобережье истока р. Ангары в междуречье рек Никольская Банная и Крестовка. Изучалось население лесных птиц и его динамика в современных климатических условиях. Ключевой участок представлен среднегорьями Предбайкальского краевого прогиба, склоны которого примыкают к отрогам Приморского хребта. Для него характерны невысокие горные гряды с относительно широкими и заболоченными межгорными понижениями. Территория достаточно типична для юго-западного побережья оз. Байкал. Учеты птиц проводились по стандартным методикам, широко применяемым при изучении их многовидовых сообществ [6; 10].

На основе предварительных специальных исследований (2009 г.) на ключевом участке, хорошо отражающем соотношение разных местообитаний данной местности, выделено восемь типов основных местообитаний птиц: 1. Селитебная территория диффузного типа (участки застройки перемежаются с участками естественных местообитаний), включающая отдельные группы домов и улицы вдоль горных распадков, дома отдыха, санатории, дачные участки и садоводства. 2. Сосново-березовые леса с примесью молодого подроста сосны сибирской (кедра) *Pinus sibirica*, сильно затененные и захламленные ветровальными деревьями. 3. Еловые пойменные леса с основной породой ель сибирская *Picea obovata*, и примесью крупных деревьев лиственницы сибирской *Larix sibirica,* сосны сибирской (кедра), пихты сибирской *Abies sibirica*, березы повислой *Betula pendula* и осины *Populus tremula*. 4. Темнохвойные склоновые леса, с большим включением всех пород хвойных деревьев, а также березы повислой и осины.

5. Осиново-березовые леса, производные обширных гарей и больших по площади вырубок, с отдельными небольшими участками сохранившихся темнохвойных лесов. 6. Сосновые леса с резким преобладанием сосны обыкновенной (лесной) *Pinus sylvestris* (не менее 80,0 % состава лесонасаждения. 7. Сосново-березовые леса, сформировавшиеся в результате выборочных рубок на старых зарастающих гарях и выположенных участках местности. 8. Открытые поймы рек, зарастающие мелким березником с большим количеством кустарников, произрастающих на переувлажненных участках пойм рек и ключей.

В связи с необходимостью более полного выявления видового состава птиц (данный период отличался массовыми их выселениями к границам ареалов), протяженность учетных маршрутов превышала рекомендуемую методикой по разным местообитаниям в 2–3, а иногда и более раз. Последнее было характерно для местообитаний с очень большой площадью. Данный подход обеспечил получение материалов, позволяющих привести полную характеристику населения птиц. Необходимость его использования объясняется тем, что выселяющиеся птицы лесных экосистем часто были представлены одиночными особями, парами и мелкими группами. В целом по изучаемой территории их было достаточно много, но в пределах ограниченного по площади ключевого участка их находки являлись достаточно редким событием. Необходимо было очень плотное обследование территории, обеспечивающее выявление полного видового состава птиц изучаемой территории.

Общая протяженность учетных маршрутов, пройденных за 15 лет исследований, составляла 7523 км (зимой – 3706 км, а летом 3817 км). Это вполне достаточно для получения точных данных по видовому составу птиц, характеру их распределения по местообитаниям и общей плотности населения.

Результаты

Плотность населения является наиболее важным интегральным показателем состояния популяции, отражающим всю сумму факторов, воздействующих на изучаемую группировку птиц. В связи с этим, анализ населения птиц начинается с рассмотрения особенностей динамики данного параметра. Динамика населения птиц существенно различается в разные сезоны года (рис. 1). В зимний период эта связь линейная и плотность населения птиц на протяжении всего период работ постепенно снижается – множественный коэффициент детерминации – R^2=0,72. Потепление климата на Южном Байкале сильно и четко выражено в конце зимнего и начале весеннего периода. Следовательно, полученная линейная регрессия в наибольшей степени отражает влияние потепления климата на общую тенденцию изменения плотности населения птиц, именно, в зимний период.

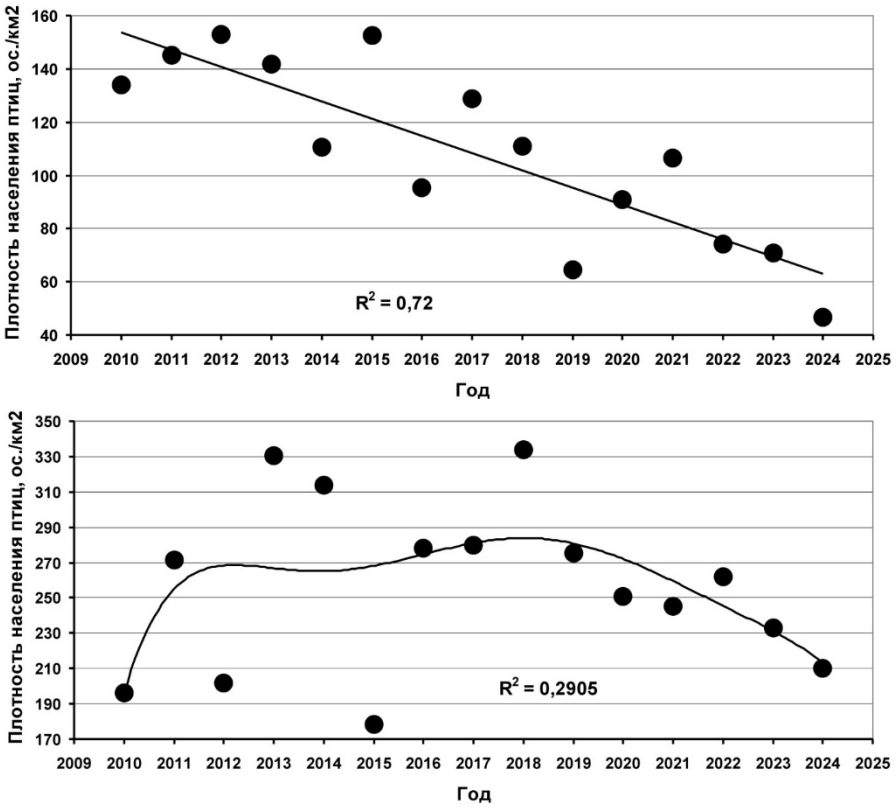


Рис. 1. Динамика плотности населения птиц лесных экосистем Байкальского региона в период пика потепления климата (Южный Байкал), ос. /км^2
Верхний рисунок – зима, нижний рисунок – лето

В летний период изменения плотности населения оказались значительно более сложными и коэффициент детерминации полиномиальной регрессии шестой степени оказался низким – на уровне 0,3, а линейная регрессия фактически не была выражена (см. рис. 1). Поскольку уровень потепления был наиболее высоким в позднезимнее и ранневесеннее время (до начала весенних миграций), это, вероятно, и определяло динамику населения птиц в разные сезоны года. Надо иметь в виду, что население птиц в летний период очень сильно зависело от районов выселения птиц. Они располагались в Центральной Азии и определялись областью формирования очень сильных, продолжительных и часто повторяющихся засух, нередко имеющих катастрофический характер. Поскольку засухи постоянно перемещались по территории, последовательно охватывая разные районы Монголии и Китая, выселения птиц также наблюдались с разных направлений [5; 7]. Однако основное генеральное направление смещения их ареалов к северу сохранялось весь период исследований [8].

В то же время численность выселяющихся птиц, за исключением отдельных видов, чаще всего стенобионтных, была очень низкой. Они встречались отдельными особями, парами и мелкими группами из 3–5 птиц [7; 8]. Следовательно, общее обилие птиц на местах гнездовий формировалось не только за счет выселяющихся птиц, но и мест предыдущих, более обычных, южных районов зимнего их обитания. В данном случае необходимо обратить внимание на то, что

пик потепления климата в Байкальском регионе наблюдался в 2015 г. [4] и сопровождался очень сильными лесными пожарами, которые также могли оказать влияние на распространение многих видов птиц. Данный сезон отличался наиболее низкой плотностью населения птиц Байкальского региона в летний период. В то же время плотность зимнего населения птиц в 2015 г. была практически максимальной (рис. 1). Это указывает на существование фактически противоположной тенденции в изменении плотности населения птиц в разные сезоны года, во всяком случае, в период подъема плотности населения птиц к максимальному уровню. В то же время видовое разнообразие птиц в период гнездования в большей степени было связано с районами выселений, а не местами зимовок птиц.

Поскольку речь идет о динамике плотности населения птиц и видовом их разнообразии в период массовых выселений (пик потепления), необходимо проверить связь этих двух показателей. Данная связь оказалась достаточно высокой в зимний период – множественный коэффициент детерминации равен 0,6. В летний период она отличается достаточно высокой сложностью, но удовлетворительно описывается полиномиальной регрессией шестой степени – коэффициент детерминации находится на уровне – 0,5 (рис. 2).

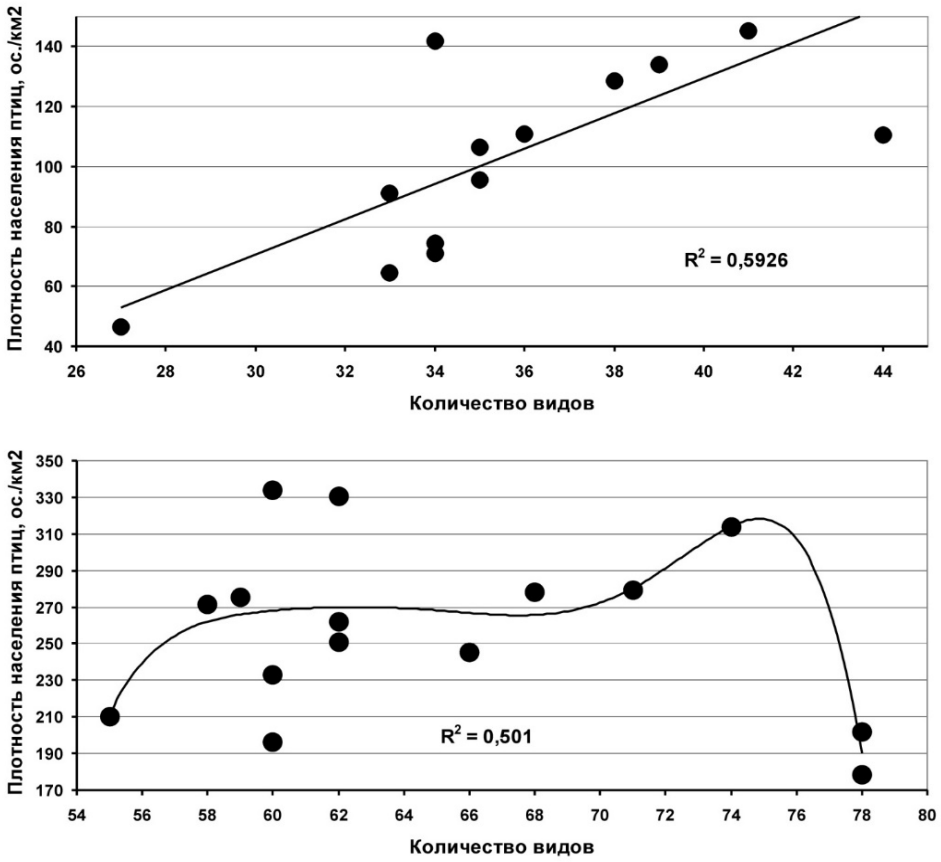


Рис. 2. Анализ связи между количеством видов и плотностью населения птиц лесных экосистем Байкальского региона в период пика потепления климата (Южный Байкал), ос. /км^2
Верхний рисунок – зима, нижний рисунок – лето

Как и в предыдущем случае, в зимний сезон эта связь является линейной, но ее уровень существенно ниже. Достаточно хорошо выделяются три выскакивающие варианты. Первая из них не вызывает особого удивления – низкой плотности населения соответствует и минимальное количество видов (27 видов при плотности населения 46,6 ос/км^2). Это ситуация последнего года наблюдений, когда плотность населения птиц и их видовое разнообразие находились на минимальном уровне (рис. 1 и 2). Данный период очевидно соответствует минимальной плотности населения, наблюдающейся при переходе тепло-сухой фазы очередного 11-летнего цикла климата к влажно-холодной фазе. Следующей выскакивающей вариантой является высокая плотность населения при среднем уровне видового разнообразия (34 вида при плотности населения 141,9 ос/км^2). Данная ситуация возникла перед пиком потепления климата, когда три года подряд наблюдалась максимальная плотность населения доминантных видов птиц, связанная с массовыми налетами на зимовку обыкновенной чечетки *Acanthis flammea*. И третья выскакивающая варианта, соответствует ситуации, когда высокому видовому разнообразию соответствовал средний уровень плотности населения птиц (44 вида при плотности населения 111,0 ос/км^2), обусловленный невысоким обилием птиц, подлетевших на зимовку. Явно, данные параметры в зимний период определяются обилием и количеством видов, подлетающих в этот район на зимовку из более северных регионов Восточной Сибири и прилегающих территорий.

В летний период связь между данными параметрами не является линейной и явно определяется количеством выселяющихся с юга видов птиц. Далеко не всегда минимальное количество видов коррелирует с наиболее низким обилием птиц, хотя отдельные сезоны с такой ситуацией присутствуют и в нашем наборе данных (рис. 2). Нередки ситуации, когда максимальному видовому разнообразию соответствует минимальная плотность населения. Обычно такие варианты населения наблюдаются в периоды сильной перестройки населения птиц в переломные периоды (переход от более теплого периода к более влажному или наоборот). Наиболее обычные ситуации соответствуют среднему уровню плотности населения и видового разнообразия птиц, которые наблюдаются в периоды задолго до пика потепления и спустя некоторое время после него (2–3 года). Максимальная плотность населения птиц наблюдалась перед пиком потепления и после него.

Минимальная плотность населения птиц летом пришлась на пик потепления (2015 г.), но видовое их разнообразие в это время было максимальным. В то же время четкой связи между этими параметрами, также, как и линейной регрессии, в летнее время быть просто не может. Такая связь могла бы сформироваться в области развития сильной засухи, которая всегда является начальным районом выселений у птиц. Мы же работали в районах, куда выселяются птицы, осваивая очень обширные территории. Следовательно, встреча любого нового вида здесь определяется случайными и трудно предсказуемыми процессами. Численность новых видов обычно невелика и поэтому при высоком видовом разнообразии часто наблюдается средний или низкий уровень плотности их населения.

Следующим важным вопросом, требующим специального рассмотрения, является динамика видовой структуры населения птиц. В зимний период до пика потепления основу населения птиц (доминантные виды) составляли: буроголовая гаичка *Parus montanus*, ополовник *Aegithalos caudatus*, чечетка, полевой воробей *Passer montanus*, большая синица *Parus major*, большой пестрый дятел *Dendrocopos major*. Наиболее массовыми и обычными видами среди них являлись буроголовая гаичка, ополовник и чечетка. После пика потепления видовой соотношение доминантных видов птиц зимой несколько изменилось. Основу их стали составлять другие виды: большая синица, буроголовая гаичка, чечетка, большой пестрый дятел и полевой воробей. В целом за зимний период из 11 видов, входящих в состав доминантных и субдоминантных птиц хотя бы один раз за период исследований, немного, но достоверно повысил плотность населения один вид – московка *Parus ater*. Существенно понизили плотность населения и положение в структуре населения птиц 7 видов: буроголовая гаичка, чечетка, ополовник, полевой воробей, свиристель *Bombycilla garrulus*, серый снегирь *Pyrrhula cineracea*, черноголовая гаичка *Parus palustris*. Тенденция к отсутствию изменений в плотности населения отмечена у 3 видов: большая синица, большой пестрый дятел, щур *Pinicola enucleator*. Общее количество зимующих видов птиц на ключевом участке менялось от 27 до 44 видов. Из них новыми для территории являлись 12 видов.

В летний период до пика потепления основу населения птиц, т. е. доминантные виды, составляли пятнистый конек *Anthus hodgsony* и буроголовая гаичка. После пика потепления видовой состав доминантных птиц несколько изменился. Его стали формировать пятнистый конек, буроголовая гаичка, белая трясогузка *Motacilla alba* и большая синица. В то же время существенно понизили плотность населения и положение в структуре населения птиц 3 вида: буроголовая гаичка, ополовник, рыжая овсянка *Emberiza rutila*. В конце периода наблюдений буроголовая гаичка вышла из состава доминантных видов и перешла в группу фоновых птиц. В целом за летний период из 9 видов, входящих в состав доминантных и субдоминантных птиц хотя бы один раз за период исследований, повысили плотность населения 5 видов: пятнистый конек, большая синица, зяблик *Fringilla coelebs*, московка, большой пестрый дятел. Тенденция к отсутствию изменений в плотности населения отмечена только у белой трясогузки. Общее количество видов птиц, зарегистрированных на ключевом участке, менялось от 55 до 78 видов, из них новыми для региона являлись 28 видов.

Общей тенденцией как для зимнего, так и летнего периодов являлась очень низкая численность и плотность населения новых для региона видов птиц. В общей структуре населения они входили в состав второстепенных и очень редко и только в отдельные сезоны фоновых птиц. Исключением являлся зяблик, который в последний год наблюдений вошел в состав субдоминантной группы птиц. Обычно он входил в группу фоновых видов, но иногда его обилие снижалось (перестройка населения в переходный период от более влажных к засушливым годам) до уровня второстепенных видов. Выявленные тенденции в изменении видового состава и плотности населения птиц могут быть обусловлены и сменой

периода наиболее выраженного потепления климата. Ранее он приходился на позднезимнее и ранневесеннее время (февраль-март), а сейчас смещается на летний период (июль-август) [2].

Обсуждение

Проведенные исследования охватывали период завершения 2000-летнего многовекового цикла климата (2010–2024 гг.), оканчивающегося тепло-сухой фазой максимального развития. Работы начаты в период, когда уже закончился резкий рост температуры воздуха (после 2005 г.) 1,9 °С/100 лет, но общий уровень потепления еще не достиг своего пика. Максимальная средняя температура приземного слоя воздуха наблюдалась в 2015 г. [4]. На период максимальной температуры воздуха (2015 г.) и смежные годы приходится развитие сильных пожаров на территории Прибайкалья.

В зимний период до наиболее высокого уровня потепления (2015 г.) буроголовая гаичка и обыкновенная чечетка, сменяя друг друга в годы массовых налетов чечетки, доминировали по численности. Затем буроголовая гаичка резко снизила обилие и на первое место часто стала выходить большая синица, а пухляк постепенно перешел в группу субдоминантных видов. Обыкновенная чечетка прекратила массовые налеты и к концу наблюдений перешла в группу фоновых видов птиц.

В летний период снижение плотности населения птиц не имело четкой тенденции, хотя существовала слабая полиномиальная связь и множественный коэффициент детерминации регрессии шестой степени составлял R^2=0,29. После пика плотности населения птиц в 2018 г. (334,1 ос. /км2), дальнейшие ее изменения можно было бы точно описать линейной регрессией с общей четкой тенденцией к ее снижению. До 2015 г. в летний период состав доминантной группы птиц формировался массовыми оседлыми видами и массовыми перелетными видами птиц с переменным доминированием пятнистого конька и пухляка. Начиная с 2016 г. доминирование пятнистого конька резко увеличилось, а пухляк перешел в группу субдоминантных, а затем фоновых видов. Большая синица часто стала входить в состав доминантной группы птиц и кроме нее в данную группу иногда попадали белая трясогузка *Motacilla alba* и большой пестрый дятел *Dendrocopos major*. Основная перестройка структуры летнего населения птиц лесных экосистем наблюдалась в 2018–2019 гг., после сезона с максимальной температурой воздуха (2015 г.). В это время множественный коэффициент детерминации резко снизился с 0. 9998 до 0,53, а затем 0,45. Стабилизация структуры произошла в 2020–2021 гг., но коэффициент детерминации уменьшился до 0,37–0,32, что, несомненно, связано с предыдущей перестройкой экосистем.

В целом на основе постоянных наблюдений установлено, что у оседлых птиц лесных экосистем Байкальского региона в зимний период по мере повышения температуры приземного слоя воздуха, а впоследствии его стабилизации, наблюдается общее упрощение структуры населения с сокращением их видового состава и резким доминированием одного-трех видов. Основной причиной

смены доминирования являлось сильное снижение их общей численности. Оптимумы их ареалов сдвинулись далеко к северу, и они начали покидать прежние места обитания, уходя именно на север. Данное явление детально прослежено нами на двух массовых видах птиц – ополовнике и пухляке.

Ополовник в годы, предшествующие максимальному потеплению климата, являлся одним из наиболее массовых видов местных птиц. В 2010–2014 гг. в раннеосенний период он формировал огромные стаи. На высоковольтных просеках по линии ЛЭП, где пропуск птиц практически исключен, в это время встречались стаи от 300–500 до 1000 и более птиц. Однако в зимнее время они отсутствовали, хотя он относится к оседлым видам птиц. После пика потепления данный вид стал встречаться в очень ограниченном количестве. В то же время ранневесенние наблюдения показали, что птицы данного вида подлетают на места гнездования с севера. Прилет идет рыхлыми, но большими стаями на протяжении двух недель и птицы сразу занимают гнездовые биотопы. В зимний период плотность населения этого вида была низкой, но к началу гнездования он становился обычным видом. Такая же ситуация характерна и для пухляка, но его обилие в осенний период значительно ниже, чем у ополовника. В то же время в гнездовой период плотность населения пухляка увеличивается и не уступает, а в ряде случаев выше, чем у ополовника. Однако впоследствии такие налеты ранней весной у этих видов прекратились, что указывает на общий сдвиг их ареалов далеко на север.

В данном случае надо вспомнить, что на основе предыдущих исследований косвенное влияние температурных условий проявляется через размножение и границы ареалов определяются условиями, обеспечивающими прохождение цикла размножения [3]. На основе наших исследований в период пика потепления климата можно сделать вывод, что такой сдвиг ареалов указывает и на прямое влияние зимней температуры на физиологию птиц и определяет возможности их зимнего выживания в определенных условиях. Данные виды сформировались в очень жестких условиях плейстоценовых похолоданий, и их физиологические процессы в такие периоды должны были обеспечить их выживание, а не размножение, для которого они могли перемещаться в более южные участки ареалов. Очевидно, эти виды имеют норму реакции, которая соответствует более жестким условиям обитания. Именно этим и определяется перемещение оседлых видов птиц в более северные широты при потеплении климата. Крайним выражением таких приспособлений являются тканевые адаптации, наиболее характерные для автохтонных видов [12].

Заключение

Собранные материалы указывают на существенную перестройку структуры населения птиц лесных экосистем Байкальского региона в результате сильного потепления климата. Это подтверждается как изменениями плотности их населения и сменой циклических изменений на достаточно четкий общий тренд к ее снижению, так и динамикой видового состава изучаемых птиц. Основная перестройка видовой структуры населения птиц лесных экосистем наблюдалась

в 2018–2019 гг., спустя два года после сезона с максимальной температурой приземного слоя воздуха (2015 г.). Восстановление прежних циклических изменений плотности населения наблюдалось уже в 2020–2021 гг., но общая, хотя и очень слабая тенденция к сохранению установившейся приземной температуры воздуха определила развитие общего тренда к уменьшению плотности населения птиц. При этом множественный коэффициент детерминации резко снизился, что, несомненно, отражает предыдущие перестройки экосистем и связанных с ними параметров структуры населения птиц.

Общая структура летнего населения птиц определяется соотношением местных оседлых видов и видов, появляющихся здесь только в летний период (перелетных видов). Изменения в структуре населения птиц в это время в значительной степени определяются существенным сокращением плотности населения наиболее массовых и типичных видов оседлых птиц. Это приводит к резкому доминированию одного вида (пятнистого конька) и нескольких видов оседлых птиц, обилие которых сильно снижается. Данный вывод полностью подтверждается сильным снижением плотности населения оседлых птиц в зимний период. Существование оптимумов ареалов у оседлых видов птиц, способных активно искать наиболее благоприятные для жизни условия, указывает на их глубокие адаптации к обитанию в умеренных широтах, к неустойчивым, часто меняющимся, параметрам окружающей среды. Судя по всему, эти адаптации имеют тканевую природу и отражают уровень генетической дифференциации разных видов, осваивающих территории с очень суровыми условиями обитания.

В целом динамика видовой структуры и плотности населения птиц в периоды сильной перестройки экосистем, полностью определяется процессами иммиграции и эмиграции, которые наиболее полно выражены в период пика потепления климата. Сам процесс выселений определяется расположением более южных участков, охваченных жестокими и продолжительными засухами, иди длительными маловодными периодами. Это и определяет основные направления выселения птиц, которые могут появляться в новых районах с разных направлений, пользуясь уже существующими пролетными путями. По мере общего потепления климата наблюдается поступательное изменение северных границ ареалов птиц и четкое продвижение их к северу.

Список литературы

1. *Ананин А. А.* Птицы Северного Прибайкалья: динамика и особенности формирования населения. Улан-Удэ : Изд-во Бурят. ГУ, 2010. 296 с.

2. Мезомасштабные особенности климатических изменений на побережье оз. Байкал / С. Ж. Вологжина, И. В. Латышева, С. В. Латышев, К. А. Лощенко, С. В. Олемской // Вестник Забайкальского государственного университета. 2019. Т. 25, № 8. С. 6–13.

3. *Данилов Н. Н.* Пути приспособления наземных позвоночных животных к условиям существования в субарктике. Т. 2. Птицы. Тр. Института биологии, 1966. Вып. 56. 148 с.

4. *Ковадло П. Г., Шиховцев А. Ю., Язев С. А.* О влиянии современного потепления на увлажнение Байкальского региона // Развитие жизни в процессе абиотических изменений на Земле : материалы Всерос. науч.-практ. конф., посвящ. 30-летнему юбилею Байкальского музея СО РАН, 25–29 сент. 2023 г., пос. Листвянка, Иркутская обл., Россия. Иркутск : Изд-во ИГУ, 2023. Вып. 4. С. 164–167.

5. *Кошеленко И. В.* Засухи и борьба с ними. Обзор. Обнинск : Изд-во ВНИИГМИ-МЦД, 1983. Вып. 4. 56 с.

6. *Мельников Ю. И.* Репрезентативность учетного материала и необходимый объем выборки (на примере учета птиц в многовидовых сообществах) // Актуальные проблемы экологии : материалы III Междунар. науч.-практ. конф. Караганды : Изд-во КарГУ, 2004. Ч. 1. С. 165–168.

7. *Мельников Ю. И.* Фауна птиц Восточной Сибири: потепление климата и его последствия // Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России : материалы V Всерос. науч.-практ. конф., 23–25 нояб. 2022 г., Иркутск, Россия. Иркутск : Изд-во ИГУ, 2023. С. 292–301.

8. *Мельников Ю. И.* Современное потепление климата и его влияние на плотность и структуру населения лесных птиц Байкальского региона // 80 лет экологической науке на Урале : материалы Всерос. научн. конф. с междун. участием, посвящ. 80-летию Ин-та экологии растений и животных УрО РАН, 11–15 нояб. 2024 г., Екатеринбург, Россия. Екатеринбург : Reaction, 2024. С. 151–153.

9. Предбайкалье и Забайкалье. Природные условия и естественные ресурсы СССР. М. : Наука, 1965. 492 с.

10. *Равкин Е. С., Челинцев Н. Г.* Методические рекомендации по комплексному маршрутному учету птиц. Репринт. М. : Изд-во Госкомприроды СССР. 1990. 33 с.

11. *Убугунов В. Л.* Тренды изменения климата юга Баргузинской котловины // Экосистемы Центральной Азии в современных условиях социально-экономического развития: материалы Междунар. конф., 8–10 сент. 2015 г., Улан-Батор, Монголия. Улан-Батор, 2015. Т. 2. С. 393–396.

12. *Шварц С. С.* Экологические закономерности эволюции. М. : Наука, 1980. 278 с.

УДК 556.043:681.3.016

Современные автоматизированные средства сбора и обработки гидрологической информацией по рекам и каналам наблюдательной сети Росгидромета и перспективы их развития с применением машинного обучения

А. И. Шевченко (ashevchenko@meteo.ru), И. Л. Готовченкова (gil@meteo.ru), С. В. Белоус (stepanvbelous@gmail.com)

Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической Информации – Мировой центр данных, г. Обнинск

Аннотация. Рассматриваются вопросы перехода от существующей системы обработки гидрологических данных по рекам и каналам к современной онлайн системе нового поколения. Содержатся краткие сведения о системе гидрологических наблюдений в Росгидромете. Описываются преимущества и недостатки современных автоматизированных программных средств применяемых для обработки гидрологических данных. Описываются задачи, которые необходимо решить, чтобы обеспечить регулярное пополнение Госфонда режимной гидрологической информацией хорошего качества, получение материалов Водного кадастра, обслуживание потребителей. Отдельно уделено внимание перспективам развития методов автоматизированного расчета расходов воды с применением машинного обучения. Главная цель работ, описанных в статье, заключается в развитии систем сбора и обработки гидрологических данных системы государственного мониторинга поверхностных водных объектов с применением современных информационных технологий.

Ключевые слова: гидрология суши, обработка гидрологических наблюдений, гидрологическая наблюдательная сеть, реки и каналы, машинное обучение, расчет расхода воды.

Введение

Речная гидрологическая наблюдательная сеть входит в состав наземной наблюдательной сети Росгидромета.

Общегосударственная гидрологическая сеть является основой системы государственного мониторинга поверхностных водных объектов. Для её функционирования в Росгидромете существует общегосударственный технологических комплекс под общим названием «Система гидрологических наблюдений» [1]. Неотъемлемой частью системы гидрологических наблюдений являются технологии автоматизированной обработки гидрологических данных наблюдений для подготовки материалов водного кадастра Российской Федерации и обеспечения потребителей справочно-информационной продукцией [2].

Потребителями гидрологической информации являются в основном проектные организации, занимающиеся гидрометеорологическими изысканиями в области строительства гидротехнических сооружений, нефте– и газопроводов, дорог и т. п., а также специалисты, занимающиеся климатическими исследованиями. У этих потребителей востребованы не данные измерений и наблюдений, а результаты месячных и годовых обобщений этих данных за весь период работы гидрологического поста. Именно эта информация помещается в ежегодные и многолетние справочники Водного кадастра и служит основой для расчетов при обслуживании потребителей.

Обработка режимной гидрологической информации по ракам и каналам системой РЕКИ-РЕЖИМ»

С 2010 г. по настоящее время в Российской Федерации и Белоруссии сбор, режимная обработка и накопление гидрологической информации по рекам и каналам осуществляется системой РЕКИ-РЕЖИМ [3]. Система оказалась достаточно успешной, и в последующие годы была внедрена в ряде стран СНГ и Монголии.

За период эксплуатации система РЕКИ-РЕЖИМ совершенствовалась, модернизировалась в соответствии с новыми методическими требованиями и новыми средствами измерений [4]. Система обеспечивает все этапы автоматизированной обработки данных гидрологических постов по рекам и каналам от первичных данных наблюдений до формирования справочников Водного кадастра, гидрологических ежегодников (ЕДС) и многолетних данных (МДС) Включая этап автоматизированного расчета ежедневных расходов воды по результатам измеренных расходов, этот этап наиболее трудоемкий в процессе подготовки таблиц ежегодника [5]. Так же имеются все необходимые средства графического представления данных для ее анализа. Обеспечивает формирование файлов долговременного хранения для Госфонда в отраслевом стандарте хранения гидрометеорологических данных ЯОД (язык описания гидрометеорологических данных) [6].

Система РЕКИ-РЕЖИМ реализована как автономное десктопное приложение, имеет файловую систему хранения данных на базе отраслевого стандарта хранения гидрометеорологических данных ЯОД. Структура хранения данных

имеет жесткий формат, что не позволяла расширять перечень видов гидрологической информации, а также малыми трудозатратами адаптировать действующие программы для обработки данных учащенных наблюдений. Графический интерфейс и часть расчетных модулей реализованы с использованием среды разработки Delphi. Модули месячной, годовой обработки, и часть сервисных программ разработаны на языке Visual Fortran. Для формирования гидрологической продукции в табличном виде применяется библиотека Microsoft Excel. Технология функционирует только под операционной системой Windows, что делает невозможным переход на российские операционные системы и офисные пакеты.

В территориальных управлениях Росгидромета, включая все структурные подразделения, где производят обработку гидрологических данных, на компьютерах пользователей установлено около 350 экземпляров системы.

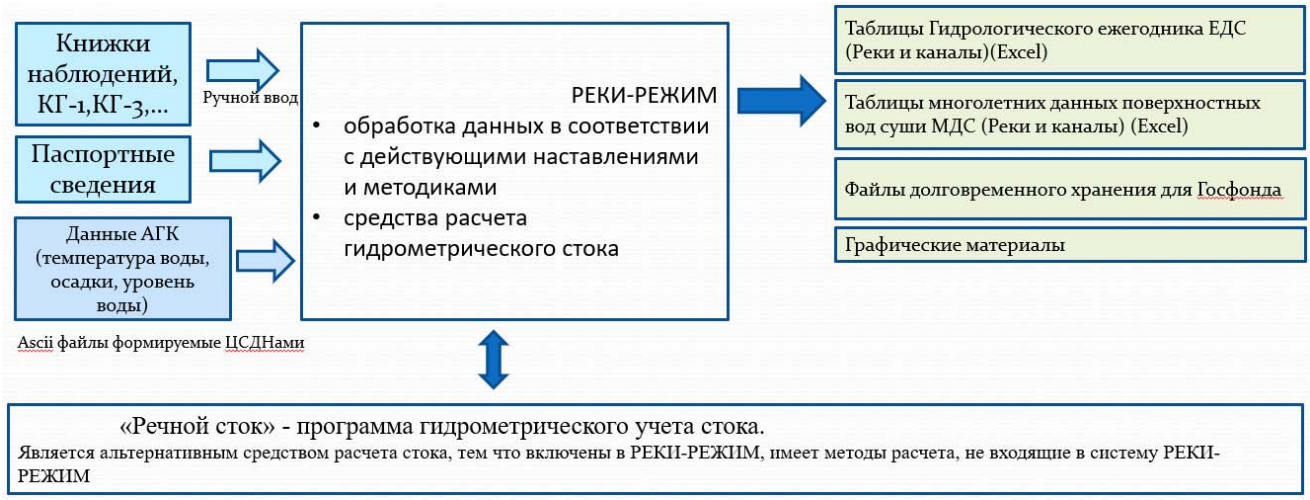


Рис. 1. Схема обработки гидрологических данных и формирование продукции системой РЕКИ-РЕЖИМ

Программный комплекс сбора и обработки гидрологической информации нового поколения

В настоящее время завершена разработка первой версии программного комплекса нового поколения «Иволга», предназначенного для сбора, анализа и обработки гидрологических данных [7; 8].

Новый программный комплекс соответствует современному уровню развития компьютерных технологий, имеет клиент-серверную архитектуру, реализован по технологии «тонкого» клиента, имеет централизованное хранение данных, взаимодействие с пользователем осуществляется исключительно через браузер, сохраняя преемственность с системой РЕКИ-РЕЖИМ в части алгоритмов обработки, действующих методических требований к автоматизированной обработке гидрологической информации [9]. Основная часть системы реализована на языке Java, но часть расчетных модулей разработана на языке Python.

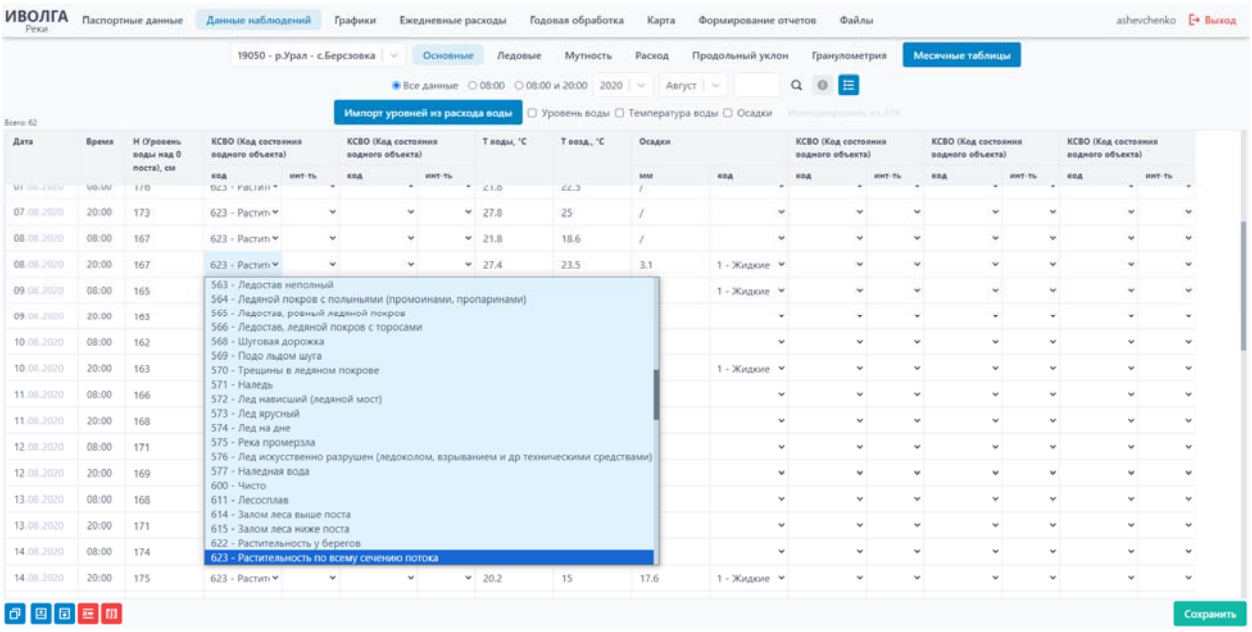


Рис. 2. Экранные формы занесения информации в системе Иволга

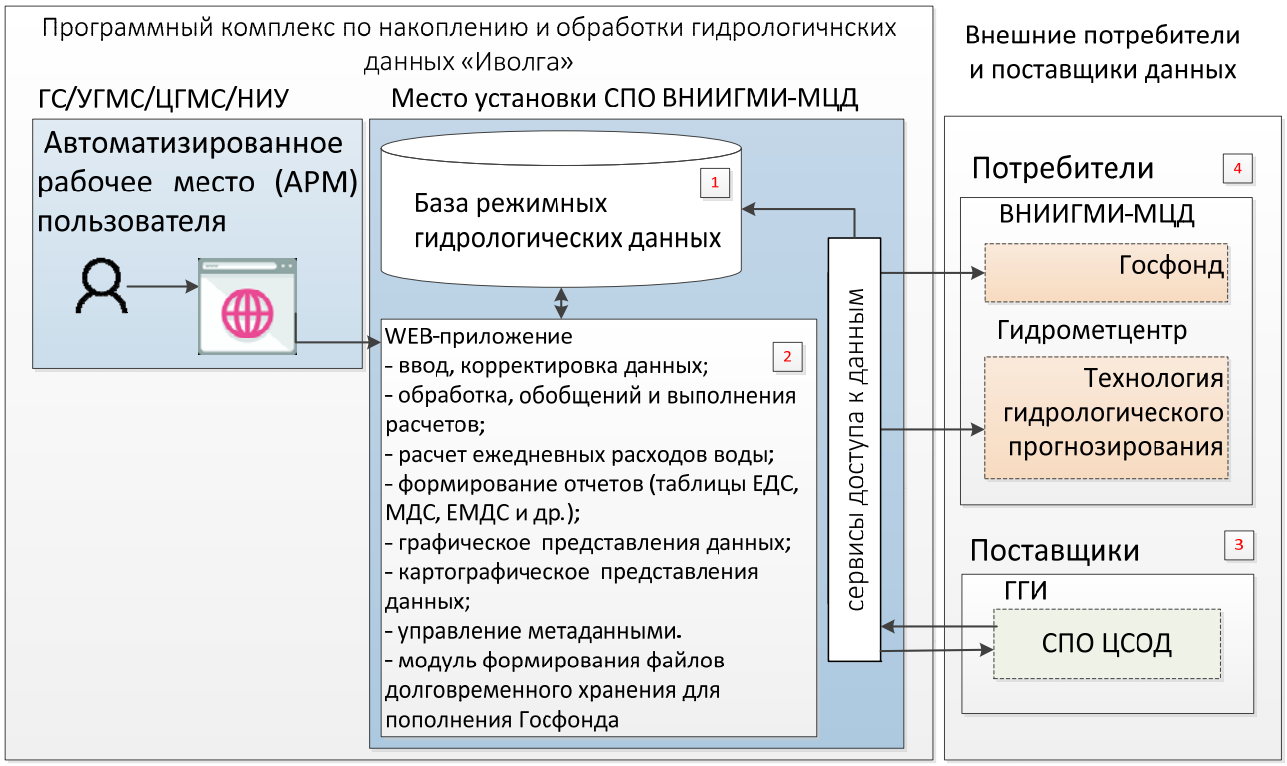


Рис. 3. Архитектура и компоненты новой системы обработки гидрологических данных: *1* – центральное хранилище гидрологических данных и продукции; *2* – сервер приложений, содержит весь необходимый функционал для работы с гидрологическими данными и средства подготовки продукции; *3* – системы сбора данных, которые являются поставщиками данных, поступающих по автоматизированным каналам связи; *4* – внешние системы, которые являются потребителями гидрологических данных, доступ к центральной БД осуществляется посредством web-сервисов

Программный комплекс может функционировать на любой операционной системы семейства Windows или Linux, которая поддерживает OpenJava 1.8, в том числе на отечественной ОС Astra Linux. В настоящее время она установлена на операционной системе Linux CentOS 8. В качестве веб-сервера используется Tomcat 9 в интеграции с веб-сервером Nginx и uWSGI для работы модулей, разработанных на языке Python. В качестве системы управления базой данных используется PostgreeSQL. Для управления идентификацией пользователей используется программный продукт с открытым исходным кодом Keycloak.

Ключевые преимущества ПК «Иволга» по отношению к действующей системе РЕКИ-РЕЖИМ:

– отсутствие необходимости установки и сопровождения в УГМС локального ПО.

– существенно переработаны формы ввода данных наблюдений, в том числе минимизировано количество закодированной информации;

– возможность развивать систему, так как использован современный архитектурный подход и языки программирования;

– единая централизованная базы данных режимных гидрологических данным;

– возможность взаимодействия с другими системами при помощи сервисов межмашинного обмена;

– работает на базе свободно распространяемого ПО, обеспечение перехода на российское ПО;

– при подготовке режимных данных имеется возможности в большей мере использовать данных наблюдений, поступающих по автоматизированным каналам связи, в том числе и данные АГК;

– реализована система управления доступом пользователей.

– контроль режимной гидрологической информации в режиме онлайн;

– формирование архивных файлов в ЯОД-формате, совместимым с РЕКИ-РЕЖИМ;

– заложен базовый функционал для сбора и обработки данных по озерным постам.

Новый программный комплекса сбора, обработки и накопления данных гидрологических наблюдений по рекам и каналам для режимных целей, обеспечит сквозную автоматизированную технологию по выпуску ежегодных и многолетних справочников Водного кадастра, от получения данных с автоматических гидрологических комплексов до выпуска таблиц гидрологических справочников, включая все фазы контроля, анализа, расчетов, выборок.

В новой системе сохраняется возможность формировать массивы режимных данных для пополнения госфонда традиционным способом, т. е. сохранять на компьютере пользователя архивные файлы в формате ЯОД. При этом со временем, когда система будет полноценно эксплуатироваться на сети, необходи-

мость в передачи данных в фонд традиционным способом может быть исключена, а надо будет только прислать уведомление, что данные в системе готовы для включения в госфонд.

Одним и поставщиков данных для системы Иволга должно стать специальное программное обеспечение СПО ЦСОД, которое аккумулирует оперативную информацию с гидрологических постов включая данные АГК. Архитектура программных комплексов предусматривает межмашинный обмен.

В Иволге заложены функции бесшовной интеграции с СПО ЦСОД, а именно реализованы инструменты импорта данных из СПО СЦОД для их дальнейшей обработки и включения в гидрологические ежегодники и для пополнения ЕГФД (единого государственный фонд данных).

Несмотря на то, что Иволга может функционировать как самостоятельная система, без импорта данных из с СПО ЦСОД возможности Иволги будет использованы не в полной мере. Так как именно таким образом предусматривается автоматизированное пополнение данными наблюдений, поступающих с автоматизированных гидрологических комплексов (АГК). Кроме того, возможность импорта оперативных данных наблюдений поступающих в СПО ЦСОД по традиционной системе связи в виде телеграмм КН-15, так же частично автоматизирует задачу сбора данных для системы Иволга.

Внедрение программного комплекса «Иволга» в территориальных управлениях Росгидромета планируется в 2025 г.

К настоящему времени:

– создан каталог всех действующих гидрологических постов по рекам и каналам;

– загружены режимные гидрологические данные по рекам и каналам за 2019–2022 гг.;

– созданы учетные записи пользователей.

Для успешного внедрения системы «Иволга» необходимо решить ряд задач [10]. Оптимальным решением на этапе внедрения является сохранение возможности использования «РЕКИ-РЕЖИМ» как резервной. Необходимость в этом может возникнуть, прежде всего по причине, что архитектура системы «Иволга» требует наличия стабильного интернет-соединения клиентских машин пользователей с сервером, что является её узким местом, поскольку доступ к интернет-сети в некоторых организациях Росгидромета не всегда достаточен для обеспечения устойчивой связи, также не исключен и сбой самой системы «Иволга».

Автоматизированный расчет расхода воды и оперативный учет стока

Одна из важных задач по автоматизации обработки данных является расчет ежедневных расходов воды (ЕРВ) по результатам гидрометрических измерений и наблюдений: дискретных измеренных расходов воды, непрерывных наблюдений за уровнем воды, наблюдениями за факторами влияющих на пропускную способность русла (ледовые явления, зарастание русла, переменный подпор от

впадающих ниже притоков или размещенных в русле гидротехнических характеристик и т. д). Методы расчета ежедневных расходов воды описаны в действующем руководящем документе по обработке наблюдений за стоком воды [11] и статье о развитии методов гидрометрического учета и увязки стока.

Этап расчета ежедневных расходов воды наиболее трудоемкий в процессе обработки гидрологических данных. При вычислении срочных и ежедневных расходов воды в качестве первого приближения при фиксированном уровне воды принимается значение расхода воды, полученное по кривой расходов или уравнению связи расходов и уровней воды Q(H), которое можно существенно уточнить, если учесть изменения пропускной способности русла, нарушающие однозначность связи Q(H) [12]

Инструменты, которые позволяют автоматизировать расчет ЕРВ входят в программный комплекс «РЕКИ-РЕЖИМ», разработанный в ВНИИГМИ-МЦД и «РЕЧНОЙ СТОК», разработанный в Государственном гидрологическом институте. Система «Иволга» так же содержит инструменты позволяющие автоматизировать вычисление расхода воды по аппроксимирующим кривым зависимости Q(H) и другими методами, в том числе и интерполяционными.

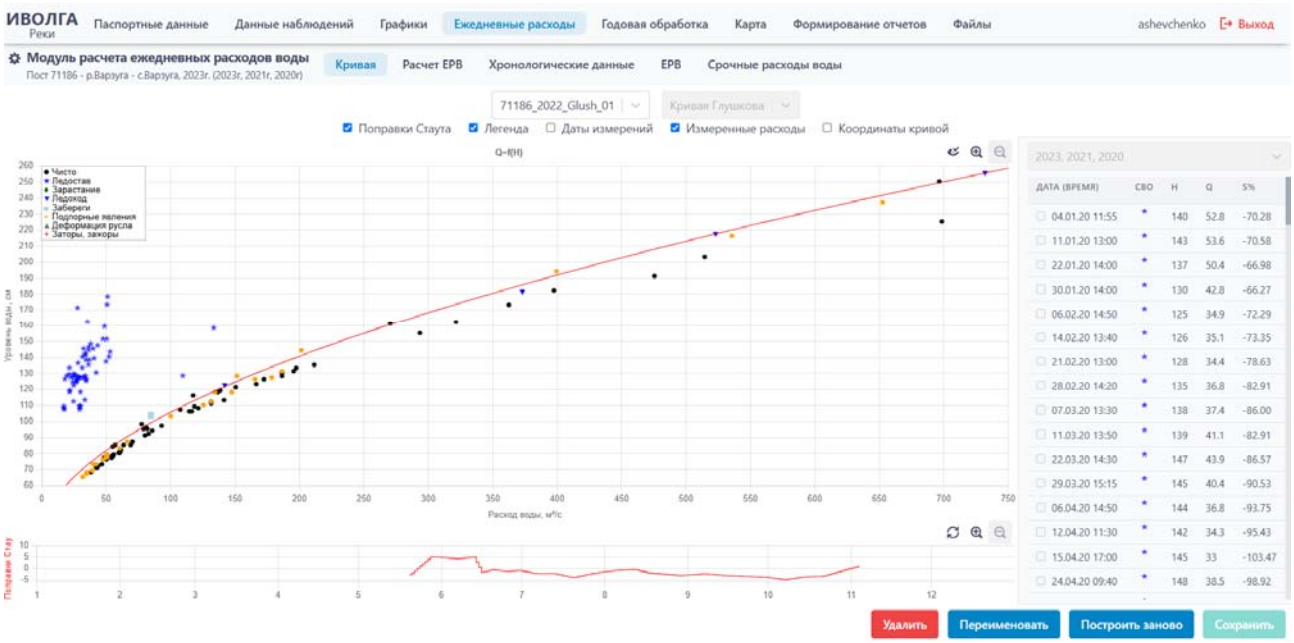


Рис. 4. Модуль расчета ежедневных расходов воды в системе «Иволга». Автоматический подбор кривой зависимости Q(H)

Оперативный вариант учета речного стока подразумевает вычисление значений расходов воды практически в режиме реального времени для обеспечения задач прогнозирования и предупреждения опасных гидрологических явлений, ежедневного контроля водности рек и информационного обеспечения функционирования объектов водного хозяйства в речных бассейнах. Задача оперативного учета стока заключается в получении срочных и ежедневных значений расходов воды по

данным актуальных наблюдений за уровнем воды и совокупности измеренных расходов, выполненных в период, предшествующий моменту расчета [13]. В настоящее время актуальна задача автоматизации оперативного учета стока.

Для получения оперативных данных о стоке приходится опираться на данные прошлых лет, поэтому за основу оперативного учета стока принимается многолетняя зависимость Q(H) в случаях, когда в течение последних лет не происходило существенных изменений пропускной способности русла и режима рек. В системе Иволга реализована первая версия сервиса межмашинного обмена “discharge-real-time”, который для заданного дня рассчитывает расход воды для конкретного гидрологического поста на основе зависимости Q(H) и коэффициентов стеснения русла. Сервис реализован в виде API (Application Programming Interface), основным пользователем сервиса должно стать программное обеспечение СПО ЦСОД.

Расчет расходов воды по однозначной кривой зависимости Q(H) для периода открытого русла, когда отсутствуют факторы уменьшения его пропускной способности, в основном такие, как ледовые явления и зарастание, не вызывает особых трудностей. При режимном расчете стока подбор коэффициентов стеснения русла (коэффициент зарастания, коэффициент зимний (при ледовых явлениях)) выполняется по отклонению от кривой Q(H) расходов воды, измеренных за рассчитываемый период, при факторах, влияющих на пропускную способность. При расчете оперативного стока с подбором таких коэффициентов возникают трудности, так как имеются данные только предшествующего периода и интерполяция коэффициентов стеснения русла между датами измеренных расходов воды невозможна.

На величину коэффициента стеснения русла в зимний период прежде всего влияют такие факторы как наличие льда и его толщина, в летний – зарастание русла. Очевидно, что у рек с устойчивым руслом должна быть хорошая связь уровня воды, количества льда и зарастания с расходом воды. Для определения этой связи хорошо подходят методы машинного обучения, а именно нейронные сети [14].

Для решения задачи прогнозирования (расчета) оперативного расхода воды были применены нейронной сети прямого распространения (FNN) и рекуррентные нейронные сети (RNN). Для обучения модели нейронной сети были использованы данные суточного разрешения за период с 1985 по 2015 г. Данные с 2016 по 2022 г. использовались для верификации обученных моделей. Так как толщина льда имеет прямую корреляцию с температурой воздуха, а данные наблюдений за толщиной льда производятся нерегулярно, то для обучения моделей были использованы массивы данных с среднесуточными значениями уровня воды, температуры воздуха и расходов воды.

В качестве эксперимента, обучение моделей было выполнено для нескольких гидрологических постов зоны ответственности территории ФГБУ «Мурманского УГМС». Результаты показали довольно хорошую сходимость прогнозируемых (расчетных) значений обученных моделей нейронной сети с реальными данными ежедневных расходов воды, рассчитанными традиционным способом.

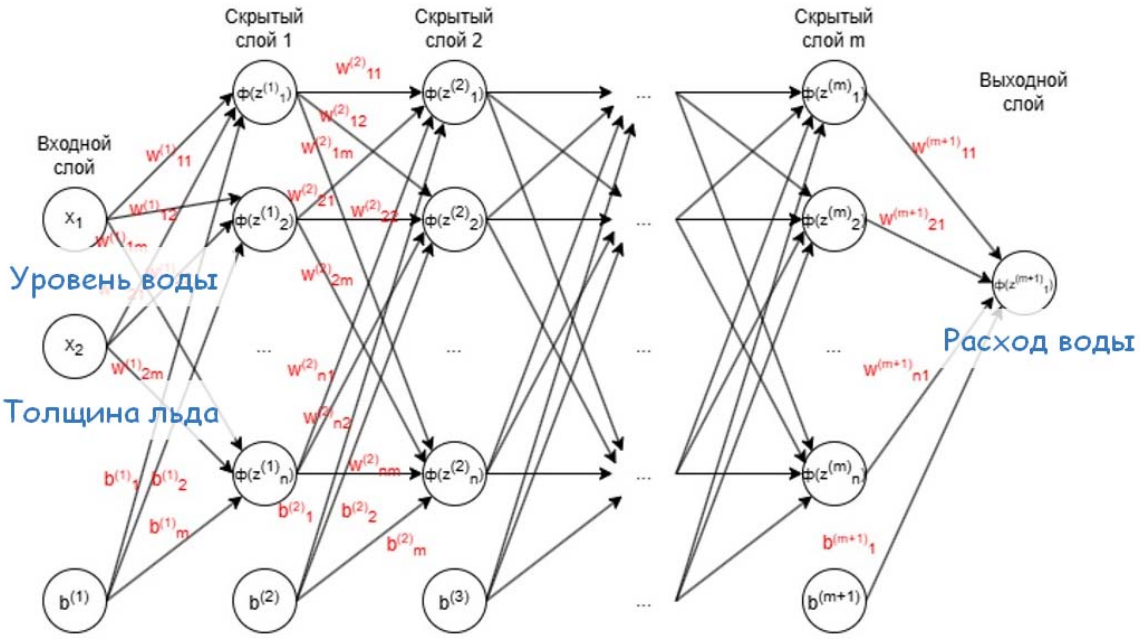


Рис. 5 . Схематическое изображение модели нейронной сети прямого распространения для связи уровня воды и толщины льда с расходом воды.

На рис. 6 представлен гидрограф расхода воды для поста р. Варзуга – с. Варзуга расчитанный традиционным способом и гидрографы рассчитанные обученной нейронной сетью. В данном примере были отобраны 8 обученных моделей нейронной сети, которые показали наилучший результат (имели наименьшую дисперсию) для всего года либо для одного из периодов гидрологического режима: зимний период, высокой, низкой, средней водности летне-осеннего периода. Для ставнения представлен результат расчета с применением нейронной сети прямого распространения (FNN) и для рекурентной модели сети (RNN). Как показал результат эксперимента рекуррентные модели дают более хороший результат.

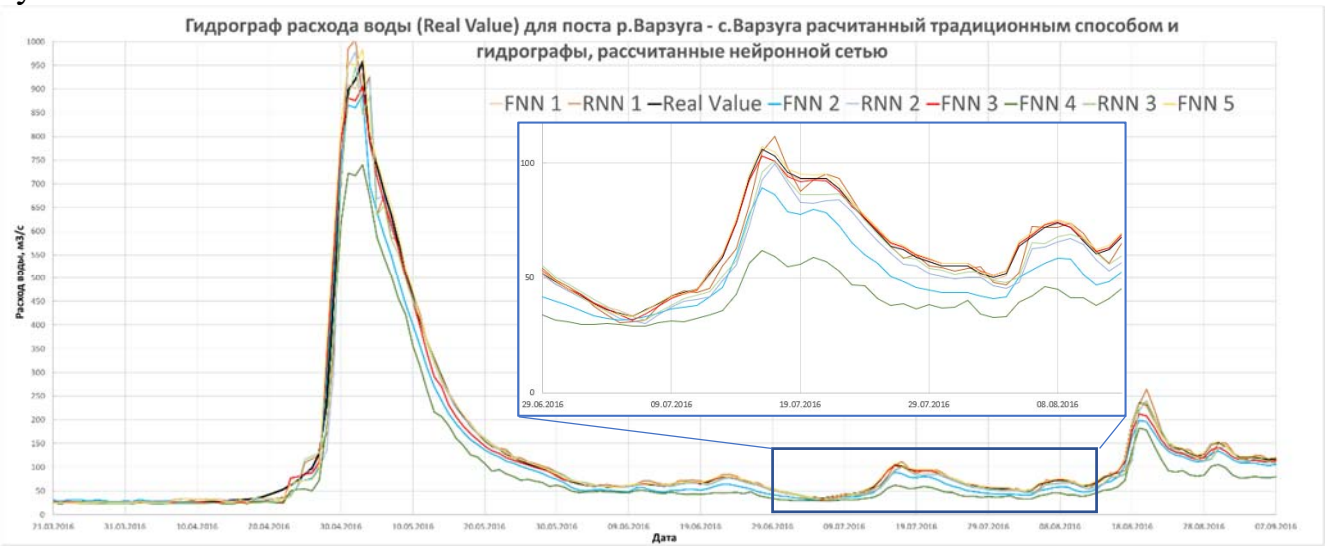


Рис. 6. Гидрограф расхода воды для поста р. Варзуга – с. Варзуга расчитанный традиционным способом и гидрографы, рассчитанные нейронной сетью.

В продолжении работ по улучшению математического аппарата расчета оперативного расхода воды в системе «Иволга», веб-сервис “discharge-real-time” будет дополнен методами расчета с использованием обученных нейронный сетей. В дальнейшем для каждого гидрологического поста потребуется обучение собственной модели нейронной сети.

Заключение

Благодаря накопленной базе данных гидрометрических наблюдений и результатов расчетов на их основе за многолетний период и развития средств машинного обучения, возможно существенно упростить и повысить качество обработки гидрологических данных в части оперативного учета стока. При этом оперативный учета стока с применением нейронных сетей может применяться наряду с традиционными методами расчета как дополнительный инструмент.

Внедрение новой системы обработки гидрологических данных Иволга важный этап развития систем сбора и обработки гидрометеорологических данных в системе Росгидромета с применением современных информационных технологий. Программный комплекс Иволга совместно с СПО ЦСОД должны стать неотъемлемой частью современной системы государственного мониторинга поверхностных водных объектов в части автоматизации технологии сбора, обработки и подготовки продукции.

Список литературы

1. *Вуглинский В. С., Высоцкий Д. В., Яковлева Т. И.* Мониторинг поверхностных водных объектов в России // Метеорология и гидрология. 2021. № 6. С. 77–88.

2. *Яковенко Л. И., Готовченкова И. Л., Шевченко А. И.* Подготовка справочных изданий водного кадастра при автоматизированной обработке данных гидрологических наблюдений // Труды ВНИИГМИ-МЦД. 2021. Вып. 188. С. 177–188.

3. *Готовченкова И. Л., Шевченко А. И.* Сбор, обработка и получение информационной продукции в системе обработки режимной гидрологической информации по рекам и каналам «РЕКИ – РЕЖИМ» // Труды Государственного океанографического института. 2013. № 214. С. 291–298.

4. *Шевченко А. И., Готовченкова И. Л., Сомова С. М.* Развитие технологий сбора и обработки режимной гидрологической информации по рекам и каналам в условиях модернизации наблюдательной гидрологической сети и новой концепции водного кадастра // Труды Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных. 2014. № 177. С. 87–94.

5. *Готовченкова И. Л., Шевченко А. И.* Об одном подходе к автоматизированному определению ежедневных расходов воды // Труды ВНИИГМИ-МЦД. 2010. Вып. 174. С. 288–294

6. Методические указания по организации гидрометеорологических данных на магнитных лентах ЕС ЭВМ. Язык описания гидрометеорологических данных / Веселов В. М. при участии Рейтенбаха Р. Г., Копрова В. М., Селунского В. М. Обнинск : ВНИИГМИ-МЦД. 1977. 119 с. (Утв. ЦКПМ в 1978 г.)

7. *Шевченко А. И., Готовченкова И. Л., Степанова Е. М.* Разработка нового программного комплекса сбора, обработки и накопления данных гидрологических наблюдений по рекам и каналам для режимных целей // Труды ВНИИГМИ-МЦД. 2021. № 188. С 211–219.

8. *Шевченко А. И., Готовченкова И. Л.* Современные автоматизированные средства сбора, обработки и обслуживания потребителей гидрологической информацией по рекам и каналам наблюдательной сети Росгидромета // Гидрометеорология и физика атмосферы: современные достижения и тенденции развития : материалы II Междунар. науч.-практ. конф. СПб., 2024. С. 248–252.

9. РД 52.19.924-2012. «Определение гидрологических характеристик по рекам и каналам в условиях автоматизированной обработки информации для получения материалов водного кадастра». Обнинск : ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2023

10. *Шевченко А. И., Готовченкова И. Л., Степанова Е. М.* Обеспечение преемственности при переходе на обработку и накопление данных гидрологических наблюдений по рекам и каналам новым программным комплексом «ИВОЛГА» // Труды ВНИИГМИ-МЦД. 2023. № 190. С 29–37.

11. РД 52.08.915-2021. Обработка и обобщение данных наблюдений за стоком воды на реках и каналах при подготовке справочных изданий водного кадастра. Введ.01.02. 2022. ФГБУ ГГИ, 2022. 225 с.

12. *Изъюрова Ю. В., Яковлева Т. И.* Развитие методов гидрометрического учета и увязки стока. // Метеорология и гидрология. 2024. № 1. С. 48–57.

13. Р 52.08.872.2018. Оперативный учет стока на водотоках. Методы обработки наблюдений за уровнями и расходами воды. Введ. 22.02.2018. ФГБУ ГГИ, 2018. 107 с.

14. *Gurney K.* An introduction to neural networks // University of Sheffield. 1997. P. 13–19.

Секция

ПОГОДА И КЛИМАТ. МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ

УДК 551.582:004.9

Анализ точности прогнозирования температурного режима в бассейне озера Байкал по ансамблям данных глобальной климатической модели CFSv2

Н. В. Абасов (nva@isem.irk.ru), В. С. Гасан (viktor-gasan@yandex.ru)
Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск

Аннотация. Приведены результаты исследований эффективности использования прогностических ансамблей глобальной климатической системы CFSv2 для формирования оценок температурного режима различной заблаговременности у поверхности Земли на примере бассейна оз. Байкал. На основе разработанного авторами мониторинга и преобразования прогностических ансамблей исходных данных произведена их классификация по времени создания. Сформированы вероятностные распределения по заданной области исследования в центральной зоне озера с вычислением статистических характеристик: математическое ожидание, медиана, границы квантилей вероятностной кривой. Результаты исследований показали неплохие результаты по точности прогнозируемых оценок температурного режима (менее 1 °С) для теплого июля 2024 г. с заблаговременностью до 6–8 ми месяцев. В работе также приводятся прогностические оценки на июль 2025 г.

Ключевые слова: глобальные климатические модели, долгосрочное прогнозирование, вероятностные распределения, точность прогнозов, верификация.

Введение

Долгосрочное прогнозирование температурного режима, осадков и притоков воды в водохранилища ГЭС является важной задачей для эффективного управления функционированием водохозяйственных и энергетических систем. Надежность долгосрочного прогнозирования (более 1 мес.) температурного режима, осадков и других метеорологических показателей за выбранный интервал времени для различных регионов Земли до сих пор остается недостаточно высокой, несмотря на интенсивное развитие глобальных климатических и нейросетевых моделей.

Глобальная система CFSv2 [1–3] ежедневно формирует для открытого использования прогностические ансамбли сеточного разрешения по всему земному шару на период до 9 месяцев с временным интервалом 6 часов. Применяемый в системе ансамблевый подход позволяет формировать различные сценарии изменения климатических показателей в зависимости от задаваемых начальных возмущений, что позволяет формировать вероятностные оценки с большой заблаговременностью. Разработанная в ИСЭМ СО РАН система долгосрочного прогнозирования ГеоГИПСАР [4; 5] позволяет обрабатывать и накапливать в специальном хранилище агрегированные до суток прогностические ансамбли для их дальнейшего исследования.

Прогнозирование температурного режима оз. Байкал

На рис. 1 представлена карта распределений отклонений прогнозируемых средних по 5 ансамблям данных температурного режима (для июля 2025 г.) относительно средних фактических данных (по данным реанализа [6]) за аналогичный месяц. С помощью специально разработанных компонентов системы ГеоГИПСАР сеточные данные приводятся в соответствие по ячейкам, используя двухмерную линейную интерполяцию. На карте отмечен бассейн водосбора озера с выделением областей: Северная часть, Центральная часть, Южная часть, и бассейна р. Селенги (Российская, Монгольская части). Шкала отклонений приведена в градусах Цельсия в диапазоне от –8 °С до +8 °С. Практически по всему бассейну озера температура ожидается ниже по сравнению с июлем 2024 г., кроме Монгольской части бассейна р. Селенга. Остается вопросом, насколько можно доверять приведенным прогнозным показателям. Последующие прогностические ансамбли данных могут существенно изменить приведенную климатическую карту температурного режима.

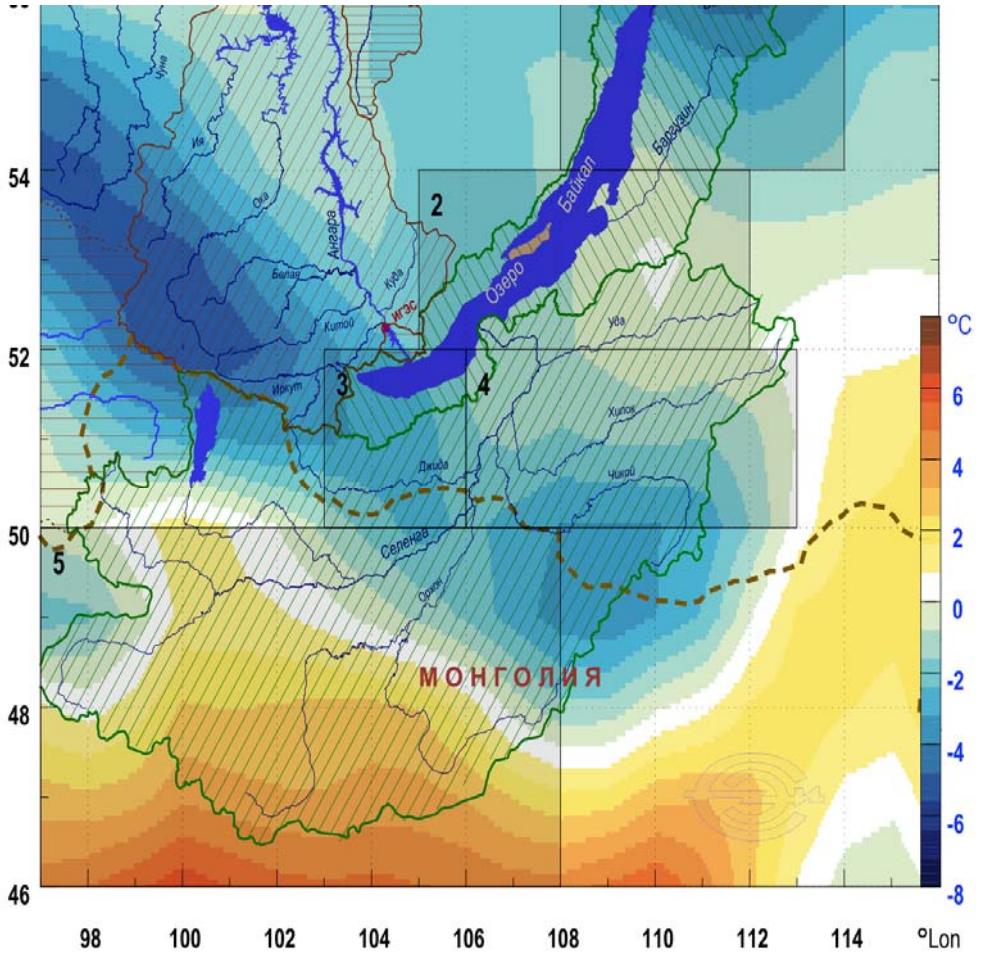


Рис. 1. Прогностические распределения на июль 2025 г. отклонений температурного режима относительно июля 2024 г. в бассейне оз. Байкал (по прогностическим ансамблям на конец февраля 2025 г.) с выделением областей:
1 – Северная часть, *2* – Центральная часть, *3* – Южная часть, *4* – бассейн Селенги (Российская часть), *5* – бассейн Селенги (Монгольская часть)

Верификация прогностических ансамблей

Для оценки надежности прогностических данных за 2023–2024 гг. было накоплено более 500 ансамблей (примерно 30 на каждый месяц), по которым был произведен анализ точности прогнозирования на основе обработки их различных групп. На рис. 2 приведена гистограмма распределения количества ансамблей с разной точностью прогнозирования, относительно фактического показателя июля 2024 г. Точность была определена как отклонение математического ожидания (МО) ансамблей каждого месяца от фактического показателя за прогнозируемый период.

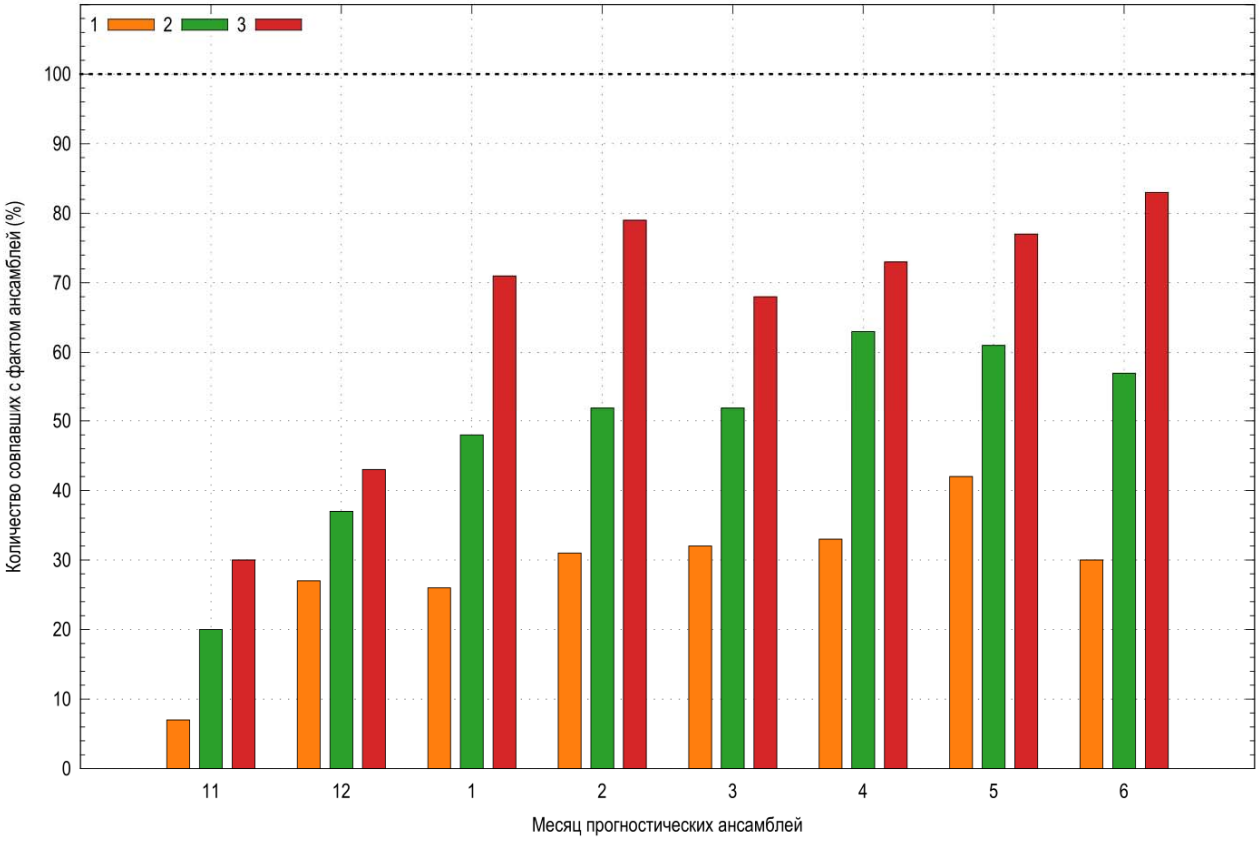


Рис. 2. Количество ансамблей с точностью прогнозирования относительного фактического показателя: 1 – 0,5°С, 2 – 1°С, 3 – 1,5°С

На рис. 2 видно, что с точностью менее 0,5 °С, лучше себя показали ансамбли за май месяц, с точностью менее 1°С – за апрель, с точностью менее 1,5 °С – за июнь. Максимальное расхождение соответствует ансамблям за ноябрь 2023 г.

Для каждого набора ансамблей месяца, начиная с ноября 2023 г. по июнь 2024 г., были сформированы вероятностные распределения в виде функции плотности распределения вероятностей, формируемой по эмпирическим данным в системе ГеоГИПСАР с расчетом основных статистических характеристик: МО, медиана, границы квантилей (рис. 3).

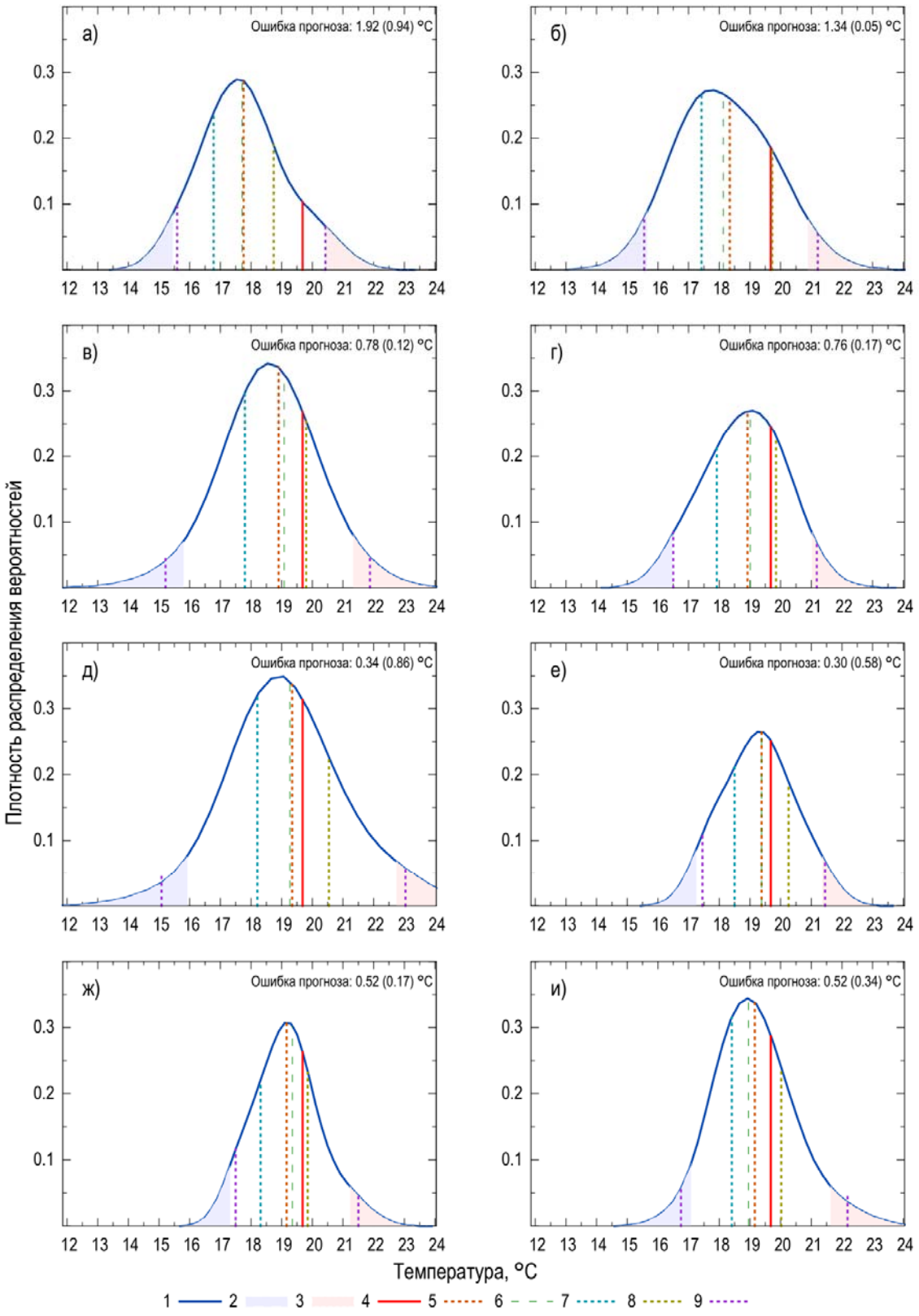


Рис. 3. Прогностические распределения температурного режима центральной части бассейна оз. Байкал для июля 2024 г. по различным ансамблям системы CFSv2 за: а) ноябрь и б) декабрь 2023 г.; в) январь, г) февраль, д) март, е) апрель, ж) май, и) июнь 2024 г.; 1 – прогностическое распределение, 2,3 – квантили (5 %), 4 – факт, 5 – математическое ожидание, 6 – медиана; 7,8 – границы вероятного и 9 – максимального диапазона

По прогностическим ансамблям каждого месяца приведены ошибки в виде отклонений фактического показателя от МО, а также вероятного ближайшего прогностического показателя (по данным выше или ниже математического ожидания). Наименьшая ошибка отклонения от МО отмечена на рис. 3, *д, е* (0,3 °С) для марта и апреля соответственно. Для ансамблей за ноябрь и декабрь 2023 г. ошибки достигают немного менее 2 °С с пониженной прогностической температурой. По ансамблям за январь-февраль ошибка составляет около 0,8 °С, а для ансамблей за май-июнь – 0,5 °С. Ошибки с точностью 1 °С считаются допустимыми для использования оценок температурного режима при формировании прогностических сценариев полезного притока в озеро.

Прогностическое распределение на июль 2025 г.

На рис. 4 приведены вероятностные распределения температурного режима центральной зоны озера на июль 2025 г.

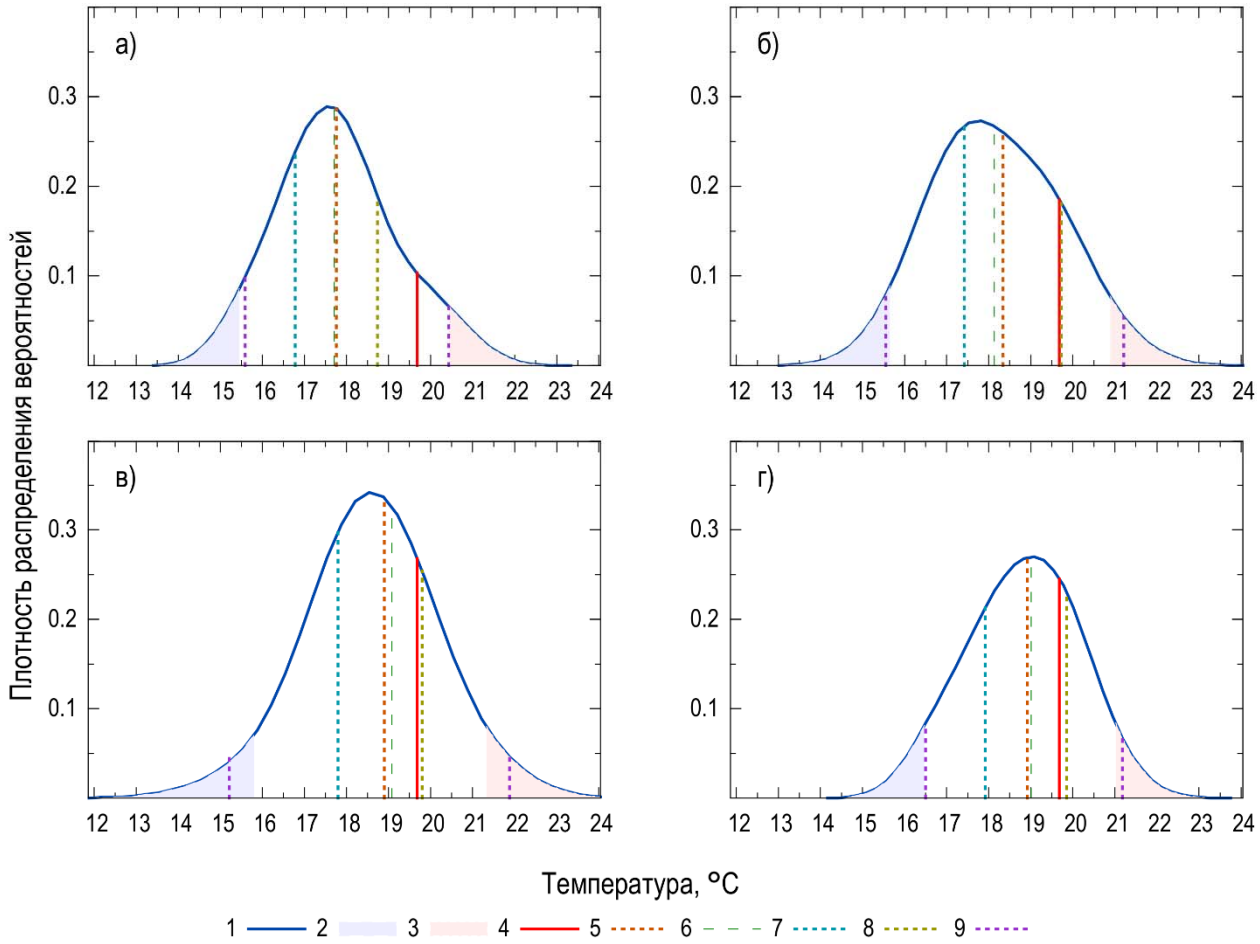


Рис. 4. Прогностические распределения температурного режима центральной части бассейна оз. Байкал для июля 2025 г. по различным ансамблям системы CFSv2 за: а) ноябрь и б) декабрь 2024 г. ; в) январь, г) февраль 2025 г. ; 1 – прогностическое распределение, 2,3 – квантили (5 %), 4 – факт июля 2024 г., 5 – математическое ожидание, 6 – медиана; 7,8 – границы вероятного и 9 – максимального диапазона

На рис. 4, *а, б* приведены прогностические характеристики по ансамблям данных за ноябрь-декабрь месяцы. Для сравнения с характеристиками по 2024 г. рис. 4 отмечен фактический показатель средней температуры за июль 2024 г.

Заключение

По предварительным прогностическим показателям (по ансамблям данных до марта 2025 г.) средняя температура июля 2025 г. ожидается на 1 или более градусов ниже, чем в июле 2024 г. По другим областям бассейна показатели точности прогностических показателей аналогичны центральной области, кроме Монгольской части бассейна р. Селенга, ошибки прогнозирования для которой были более 2 °С. Разрабатываемый в системе ГеоГИПСАР блок кластеризации позволит более глубоко исследовать отдельные области бассейна с выявлением закономерностей на больших выборках. Также разрабатываются компоненты анализа точности по интенсивностям осадков, приземному давлению и показателям циркуляции атмосферы в бассейне озера.

Работа выполнена в рамках проекта государственного задания ИСЭМ СО РАН (№ FWEU-2021-0003, рег. номер: АААА-А21-121012090014-5) программы фундаментальных исследований РФ на 2021–2025 гг.

Список литературы

1. The NCEP climate forecast system version 2 / S. Saha, S. Moorthi, X. Wu [et al.] // J. Climate. 2014. No. 6(27). P. 2185–2208.

2. First look at climate forecast system version 2 (CFSv2) for hydrological seasonal prediction / X. Yuan, E. Wood, L. Luo [et al.] // Geophys. Res. Lett. 2011. 38 p.

3. *Rai A., Saha S. K.* Evaluation of energy fluxes in the NCEP climate forecast system version 2. 0 (CFSv2) // Clim. Dyn. 2017. Vol. 50. P. 101–114.

4. *Абасов Н. В.* Система долгосрочного прогнозирования и анализа природообусловленных факторов энергетики ГеоГИПСАР // Экстремальные проявления глобального изменения климата на территории Северной Азии : материалы Междунар. совещания APN (MAIRS/NEESP/SIRS). Enviromis-2012. С. 63–66.

5. *Гасан В. С., Абасов Н. В., Осипчук Е. Н.* Мониторинг и накопление данных в информационно-прогностической системе ГеоГИПСАР // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2023. № 4 (32). С. 160–169.

6. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project / E. Kalnay, M. Kanamitsu, R. Kistler [et al.] // Bulletin of the American Meteorological Society. 1996. Vol. 77, N 3. P. 437–471.

УДК 551.465.7

Особенность Эль Ниньо 2023–2024 гг. и его влияния на атмосферную циркуляцию в Евро-Атлантическом регионе

Н. А. Вязилова (nav@meteo.ru)[1], А. Е. Вязилов (vyazilov@typhoon.obninsk.ru)[2]
[1] ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных», г. Обнинск Калужской обл.
[2] ФГБУ «НПО-Тайфун», г. Обнинск

Аннотация. Сценарий и интенсивность аномалий климатической системы, наблюдаемых в экваториальном районе Индийского и Тихого океанов, позволяют отнести Эль Ниньо 2023–2024г. к группе наиболее интенсивных теплых событий ЭНЮК, отмеченных за период с 1979 по 2024 г. Сравнение с экстремальным Эль Ниньо 1997–1998 гг. показало, что в обоих случаях влияние Эль Ниньо на атмосферную циркуляцию в Евро-Атлантическом регионе проявилось в виде развития интенсивной положительной фазы восточноатлантического колебания в осенние и зимние месяцы. Однако в 2023 г., в отличие от 1997 г., положительная фаза восточноатлантического колебания сопровождалась развитием положительной фазы северо-атлантического колебания, что проявилось в интенсификации циклонической активности, как на акватории Северной Атлантики, так и в Европейском регионе, в том числе на европейской территории России. Важную роль в механизме отклика ЭНЮК в Евро-Атлантический регион может играть активизация южноазиатского субтропического струйного течения, чему может способствовать экстремальное нагревание в верхних слоях тропосферы в экваториальном регионе Индийского и Тихого океанов в предшествующие летний и осенний сезоны.

Ключевые слова: Эль Ниньо, атмосферная циркуляция, циклоническая активность

Введение

Наиболее значимой модой изменчивости климатической системы океан-атмосфера в тропическом регионе является Эль Ниньо – Южное колебание (ЭНЮК). Исследования показывают, что влияние ЭНЮК, как теплых явлений, Эль Ниньо, так и холодных, Ла Нинья, на погоду и климат проявляется в различных районах Земного шара. Наиболее значимое влияние, в том числе на экономику стран, общество и экосистемы, оказывают экстремально сильные события ЭНЮК. Следует отметить, что несмотря на регулярное развитие событий ЭНЮК, наблюдаемых каждые 2–7 лет, в последние несколько десятилетий отмечаются значительные изменения в частоте, интенсивности и характере как теплых событий, Эль Ниньо, так и холодных, – Ла Нинья. Вследствие этих изменений в настоящее время в научной литературе было предложено разделять события ЭНЮК на разные типы, в зависимости от пространственного распределения температуры поверхности океана (ТПО) в тропическом регионе Тихого океана [5; 11]. Классический или канонический тип ЭНЮК определяется основной модой изменчивости ТПО и в литературе часто обозначается как канонический или восточно-тихоокеанский. Центрально-тихоокеанский тип ЭНЮК, или тип Модоки, обусловлен второй модой изменчивости ТПО в экваториальном регионе Тихого океана. Для идентификации явления Эль-Ниньо (Ла Нинья) во многих

исследованиях используется океанический индекс ЭНЮК (Oceanic Nino Index – ONI), который рассчитывается, как скользящее среднее за три месяца отклонение температуры поверхности океана от нормы в экваториальной части Тихого океана, в районе Nino 3–4, с координатами (120º з. д. –170º з. д., 5º с. ш. – 5º ю. ш.), и публикуется на сайте Американского Метеорологического Центра. Согласно данному индексу, явление Эль-Ниньо (Ла Нинья) представляет собой явление в экваториальной части Тихого океана, характеризующееся положительным (отрицательным) отклонением температуры поверхности океана от нормы по абсолютной величине на 0,5 ºС и более в течение пяти последовательных месяцев. На основании этого индекса хорошо идентифицируются классические явления ЭНЮК. Именно на основе данного индекса уже в мае 2023 г. было идентифицировано развитие теплого события ЭНЮК, которое продолжалось до апреля 2024 г. Для идентификации явлений ЭНЮК типа Модоки, и отделения их от классических событий ЭНЮК, часто дополнительно, в том числе, в работ [3]. используются индексы, рассчитываемые на основании аномалий ТПО в районах Nino3 и Nino4. Согласно методу, примененному в работе [3], идентифицированное явление Эль Ниньо относится к каноническому типу при условии, если значения аномалий ТПО в течение трех месяцев в районе Nino3 больше по сравнению с аномалиями в районе Nino4 . В случае если аномалии ТПО в районе Nino4 выше, чем в районе Nino3, то данное событие Эль Ниньо относится к типу Модоки.

Целью настоящей работы является изучение, во-первых, особенностей развития аномалий климатической системы в экваториальном районе Индийского и Тихого океанов в период развития Эль Ниньо 2023–2024 гг. в различные сезоны годового цикла, и во-вторых, интерес представляет отклик атмосферной циркуляции в Евро-Атлантическом (ЕАР) регионе на Эль Ниньо.

Аномалии температуры поверхности океан и атмосферных осадков в тропическом регионе Индийского и Тихого океанов

Анализ временного изменения значений океанического индекса ЭНЮК (рис. 1) показывает, что максимального значения, равного +2,0, океанический индекс ЭНЮК достиг в декабре 2023 г., а в предшествующие осенние месяцы и первые два зимних месяца 2024 г. существенно превышал +1,0. Это позволяет отнести Эль Ниньо 2023–2024 гг. к группе наиболее интенсивных теплых событий ЭНЮК, отмеченных за период с 1979 по 2024 г., наряду с событиями 1982–1983, 1997–1998 и 2015–2016 гг. Следует отметить, что перечисленные Эль Ниньо, согласно индексам и многочисленным исследованиям относятся к классическому, или каноническому типу.

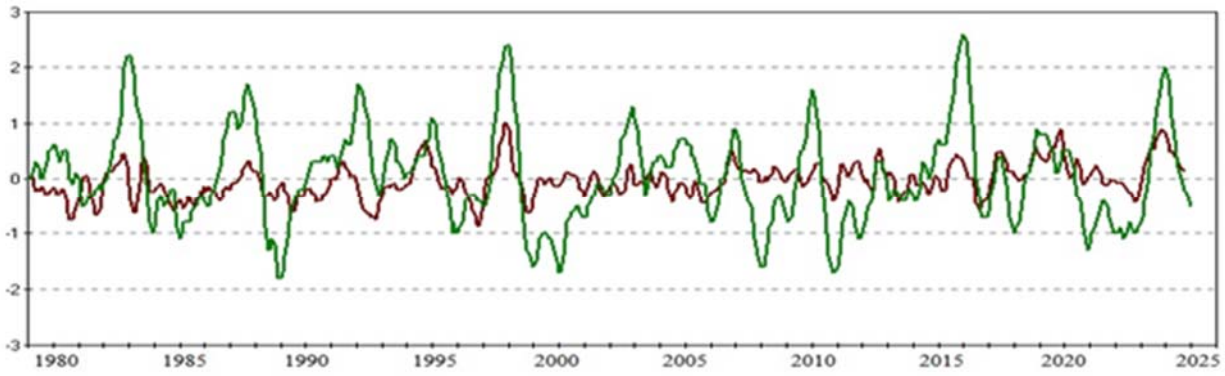


Рис. 1. Изменение значений океанического индекса ЭНЮК (линия зеленого цвета), а также скользящих средних значений за каждые три месяца индекса Индийского Диполя – DMI (линия коричневого цвета) [12].

Эль Ниньо 2023–2024 гг. по характеру развития также, как и вышеперечисленные интенсивные Эль Ниньо, относится к каноническому типу. Канонический тип Эль Ниньо 2023–2024 гг. подтверждают анализ других индексов ЭНЮК, в том числе, в районах Nino3 и Nino4, а также пространственного распределения аномалий ТПО и осадков в экваториальном районе Тихого океана в летний и осенний сезоны 2023 г. и последующий зимний сезон 2023–2024 гг. (рис. 2).

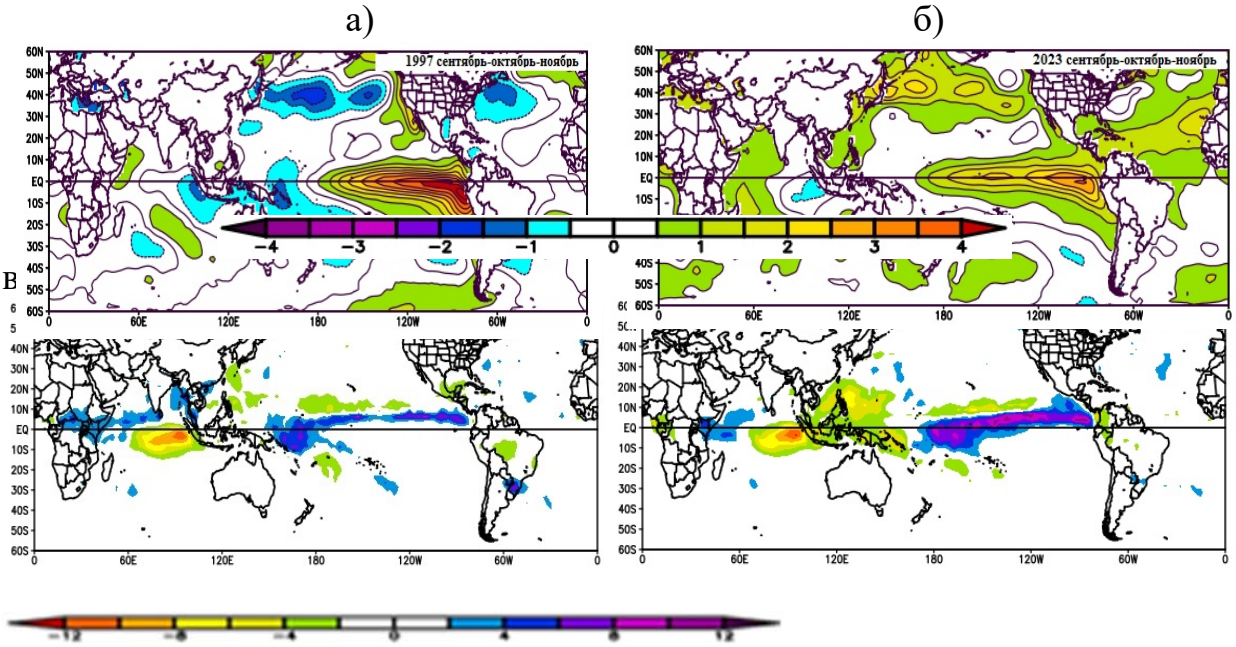


Рис. 2. Пространственное распределение средних значений аномалий температуры поверхности океана в °С (а, б) и атмосферных осадков в мм/сутки (в, г) в осенний сезон (сентябрь-октябрь – ноябрь) 1997 г. (*а, в*) и 2023 г. (*б, г*), рассчитанных, соответственно, по данным архивов ERSST. v5 SST [9] и Arkin-Xie Precipitation STD (CMAP) [14]

Для сравнения на этом же рисунке представлено пространственное распределение ТПО и атмосферных осадков в осенний сезон 1997 г., год развития интенсивного Эль Ниньо канонического типа. Максимальных значений аномалии ТПО в экваториальном районе Тихого океана достигли в осенние месяцы 2023 и наблюдались восточнее линии смены дат. Важной особенностью пространственного распределения аномалий ТПО в летний и осенний сезоны как в 2023г., так и в 1997 г., является развитие отрицательных аномалий ТПО в восточной части и положительных аномалий в западной части экваториального района Индийского океана. Развитие аномалий ТПО в экваториальном регионе Тихого и Индийского океанов сопровождалось формированием интенсивных аномалий в поле атмосферных осадков. И в 2023 и в 1997 гг., в Тихом океане наблюдалось смещение области осадков и конвекции из района Индонезии в центральную часть океана, в район линии смены дат, в Индийском океане – существенное ослабление осадков в районе океанической ВЗК в восточной части экваториального района океана и формирование интенсивных осадков в западной части океана.

Характер аномалий ТПО и осадков в экваториальном районе Индийского океана свидетельствует о развитии и в 1997 г., и в 2023 г. положительной фазы Индийского диполя. Индийский Диполь (Indian Ocean Dipole) является важной составляющей климатической системы тропиков Индийского и Тихого океанов океана, представляет моду климатической изменчивости в системе океан-атмосфера в экваториальном районе Индийского океана, имеет положительную и отрицательную фазы развития. В настоящее время для идентификации Индийского Диполя используется индекс, впервые предложенный авторами работы [12], Dipole Mode Index – DMI, и который рассчитывается на основе аномалий температуры поверхности в экваториальном регионе Индийского океана как разность аномалий ТПО в западной (50 – 70 E, 10 S – 10 N) и юго-восточной части экваториального района Индийского океана (90 – 110 E, 10 S – Equator). На рис. 1 представлен график временного изменения значений Dipole Mode Index (DMI) за период с 1979 по 2024 г., рассчитанных как скользящие средние за каждые три месяца. Из рисунка можно увидеть, что в годы наиболее интенсивных Эль Ниньо,– 1982, 1997, 2015 и 2023 гг., согласно положительным значениям индекса DMI, действительно наблюдалась положительная фаза Индийского диполя, однако наиболее высокие значения индекса отмечаются только в 1997 и 2023 гг.

Аномалии удельной влажности, потенциальной температуры и зонального переноса в экваториальном регионе Индийского и Тихого океанов

Анализ вертикальных сечений распределения аномалий удельной влажности в течение 2023 г. показывает (рис. 3), что начиная с летнего и вплоть до зимнего сезона в экваториальной атмосфере Индийского и Тихого океанов наблюдалось значительное увлажнение нижних и средних слоев атмосферы с максимальными значениями аномалий удельной влажности в районах аномальных осадков.

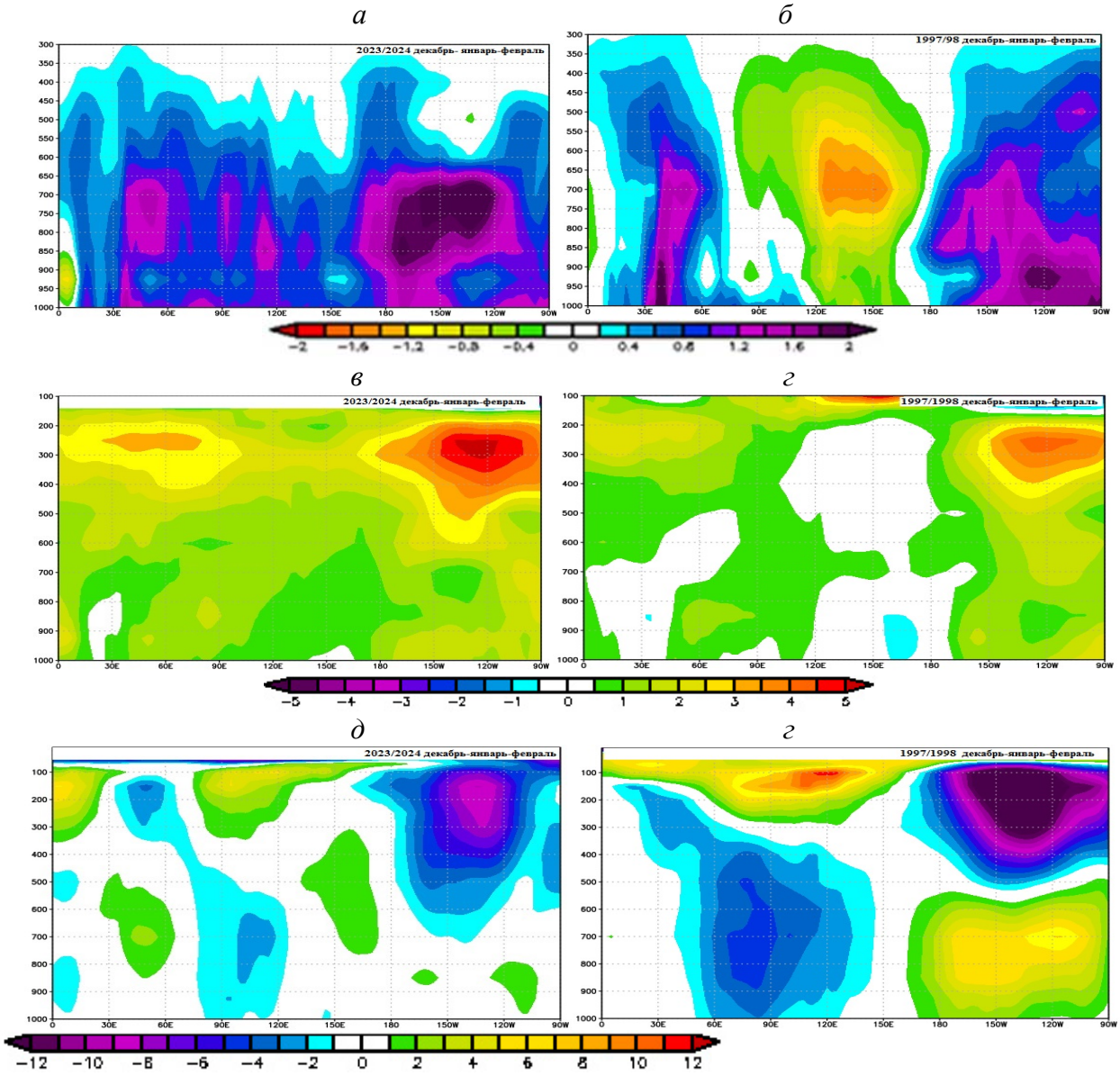


Рис. 3. Вертикальное распределение аномалий удельной влажности, г/кг (*а, б*); потенциальной температуры атмосферы, °К (*в, г*); и зональной скорости ветра в м $с^{-1}$ (*д, е*), осредненных в полосе широт (10° ю. ш. – 10° с. ш.) экваториального региона Индийского и Тихого океанов в зимний сезон (декабрь – январь – февраль) 1997–1998 гг. (*а, в, д*) и 2023–2024 гг. (*б, г*), рассчитанных по данным архива NCEP-DOE [10]

В течение 1997 г., в отличие от 2023 г., в экваториальной атмосфере Индотихоокеанского региона кроме зон аномального увлажнения в районах аномальных осадков формируется обширная зона отрицательных аномалий удельной влажности в районе Индонезии. Максимальных значений аномалии удельной влажности, как положительные, так и отрицательные, наблюдались в зимний сезон 1997–1998 г. В районах максимальных осадков, как в 2023 г., так и в 1997 г. в верхней тропосфере наблюдалось аномальное нагревание, с максимальными значениями аномалий потенциальной температуры в зимние сезоны (рис. 3, *в, г*). Увлажнение нижних и средних слоев тропосферы с аномальным нагреванием

верхних слоев атмосферы в районах аномальных осадков в экваториальном районе Индо-Тихоокеанском региона сопровождалось формированием аномалий в поле зонального переноса в нижней и верхней тропосферы (рис. 3, *д, е*). Картина аномалий зонального переноса, наблюдаемая в течение развития Эль Ниньо в 2023 г., в общем аналогична картине зонального переноса в 1997 г. В экваториальном районе Индийского океана уже в летние месяцы наблюдалось ослабление западного переноса в нижних слоях тропосферы и восточного переноса в верхних слоях, как в 1997, так и в 2023 г. В западной и центральной части экваториального района Тихого океана, наоборот наблюдалось усиление западного переноса в нижней тропосфере и восточного – в верхней. Максимальных значений аномалии зонального переноса достигают в последующий зимний сезон. Однако следует отметить, что интенсивность аномалий зонального переноса в нижних слоях тропосферы в 2023 г., более слабая по сравнению с аномалиями зонального переноса, наблюдаемыми в 1997 г.

Экстремальные Эль Ниньо выделяются не только характеристиками развития в тропическом регионе, но также глобальным влиянием на погоду и климат в других районах Земного шара.

Особенности циклонической активности в Евро-Атлантическом регионе в 1997 и 2023 гг.

Оценка циклонической активности выполнена на основе анализа повторяемости и интенсивности циклонов, рассчитываемых, соответственно, как количество центров циклонов и сумма аномалий давления в центрах циклонов относительно климатических значений в узлах сетки в календарный месяц по данным реанализа NCEP-DOE [10]. Центры циклонов и траектории их смещения рассчитаны на основе метода автоматической идентификации по 6-часовым данным атмосферного давления на уровне моря (MSLP) [1]. Для анализа отбирались циклоны с длиной жизни от 3 сроков наблюдения и более. Согласно индексам NAO и EA (табл.), в осенние месяцы и 2023 г., наблюдалась отрицательная фаза североатлантического колебания (САК) и интенсивная положительная фаза восточноатлантического колебания (ВАК), в последующие зимние месяцы – интенсивная положительная фаза и САК, и ВАК. В осенний сезон 1997 г. преобладала отрицательная фаза и САК, и ВАК, и только в последующие зимние месяцы сформировалась достаточно интенсивная положительная фаза ВАК.

Анализ пространственного распределения характеристик циклонической активности в ЕАР показывает интенсификацию циклонов на восточной акватории океана и на европейском континенте в осенние месяцы 2023 г. (рис. 4), что, действительно, характерно для интенсивной положительной фазы восточноатлантического колебания. В последующие зимние месяцы 2023 г. наблюдалась значительная интенсификация циклонической активности в основной зоне шторм-трека, как на акватории океана, так и в северных районах Европы, что, обычно происходит, при интенсивной положительной фазе североатлантического колебания (САК), и в случае совпадения положительных фаз САК и восточноатлантического колебания (ВАК) [2]. В качестве общих особенностей в

развитии циклонической активности в ЕАР в 2023 и 1997 гг. можно отметить интенсивную положительную фазу восточноатлантического колебания, в осенние и последующие зимние месяцы, в период кульминации Эль Ниньо.

Таблица

Ежемесячные значения индексов NAO и EA в период с июня по апрель развития Эль Ниньо 2023–2024 гг. и 1997–1998 гг. Красным цветом выделена положительная фаза колебаний, синим – отрицательная фаза

Год и месяц	NAO	EA	Год и месяц	NAO	EA
2023/09	**–0.44**	**2.72**	1997/09	0. 61	**–0.81**
2023/10	**–2.03**	**1.20**	1997/10	**–1.7**	**–1.50**
2023/11	–0.32	**1.19**	1997/11	–0.9	**0.92**
2023/12	**1.94**	**1.51**	1997/12	–0.96	**1.74**
2024/01	0.21	**2.58**	1998/01	0.39	**0.14**
2024/02	**1.09**	**1.7**	1998/02	–0.11	**1.33**

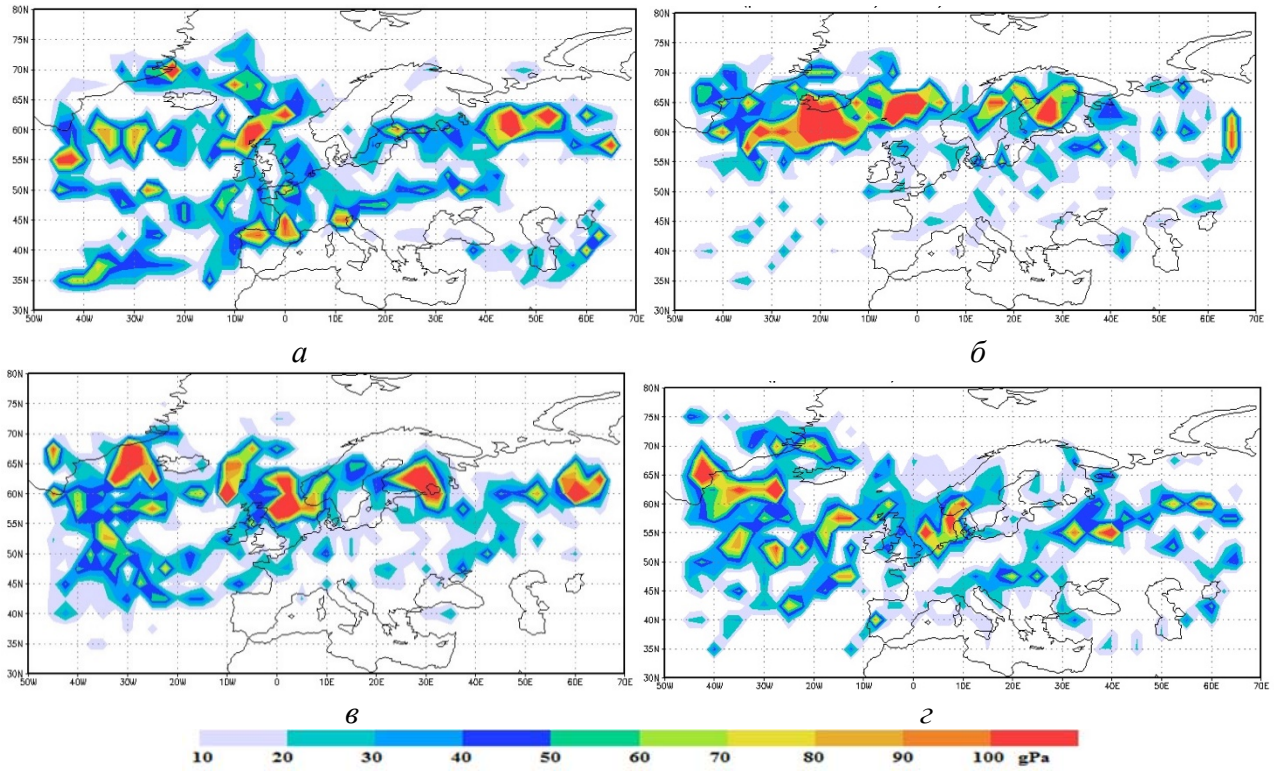


Рис. 4. Пространственное распределение индекса циклонической активности (гПа) в ЕАР в осенние сезоны 2023 г. (*а*) и 1997 г. (*в*), а также в последующий зимние сезоны 2023–2024 гг. (*б*) и 1997–1998 г (*г*)

Ранние исследования не отмечали значимого эффекта ЭНЮК на погоду и климат в ЕАР, однако в более поздних работах, в том числе в [6; 8], была предложена гипотеза и механизм взаимосвязи между климатическими аномалиями в экваториальном регионе Тихого океана и атмосферной циркуляцией в ЕАР через стратосферную циркуляцию. В последующих исследованиях, например в [4; 13], было выдвинуто предположение, что «стратосферный мост» не является единственным механизмом, связывающим аномалии ТПО в экваториальной части

Тихого океана с североатлантическим колебанием, и представлен «тропосферный» механизм, который связывает аномалии ТПО в экваториальной части Тихого океана и атмосферную циркуляцию над Европой и Северной Атлантикой, который включает наличие субтропического струйного течения, которое активизируется при развитии Эль Ниньо.

Анализ карт пространственного распределения аномалий зонального переноса в верхней тропосфере в исследуемые годы с Эль Ниньо показывает значительное усиление зонального переноса на уровне струйного течения в субтропическом регионе Южной Азии и Тихого океана в зимние сезоны и 2023–2024, и 1997–1998 гг. Следует отметить, что максимальных значений положительные аномалии зонального переноса, означающие усиление западного переноса по сравнению с климатическими значениями, в оба зимних сезона наблюдались в центральном районе Тихого океана, при этом в зимний сезон 1997–1998 гг. интенсивность аномалий значительно сильнее по сравнению с зимним сезоном 2023–2024 гг. Однако в зимний сезон 2023–2024 гг., в отличие от зимнего сезона 1997–1998 гг., зона усиления западного переноса о в ЕАР распространилась на обширный район Северной Атлантики и северные районы Европы.

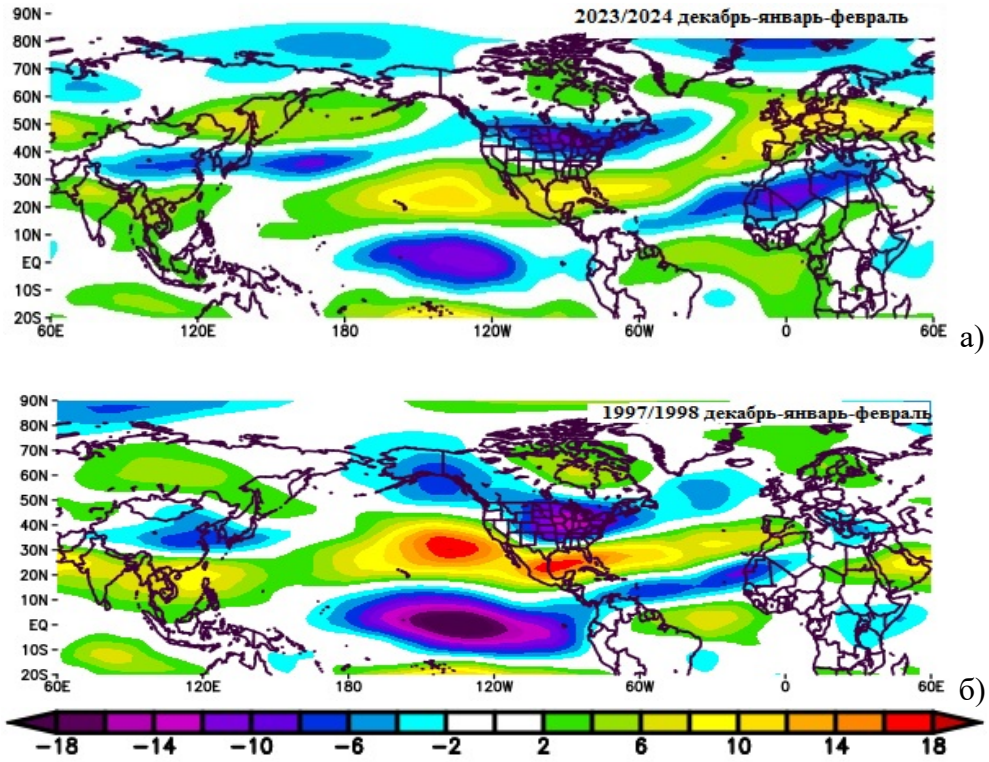


Рис. 5. Среднемесячные аномалии зонального переноса (в м/с) в верхней тропосфере (250гПа) в зимние сезоны 2023–2024 гг. (*а*) и 1997–1998 гг. (*б*), рассчитанные по данным реанализа NCEP-DOE [10]

Можно предположить, что согласно гипотезе «тропосферного моста», интенсивные климатические аномалии в системе океан – атмосфера обусловили формирование источника аномального тепла в верхней тропосфере в экваториальном районе Индийского и Тихого океанов в летний и осенний сезон и последующую модификацию субтропического южноазиатского струйного течения. Активизация струйного течения над акваторией Северной Атлантики, в свою очередь, играет важную роль в интенсификации циклонической активности в указанном районе. Примеры анализа отдельных глубоких циклонов и штормов показывают [7], что развитие экстремально глубоких внетропических циклонов в восточной Атлантике происходит над акваторией океана в условиях преобладающего динамического форсирования с верхних слоев тропосферы, интенсивность которого в значительной степени обусловлено положением и интенсивностью струйного течения в верхних слоях тропосферы.

Заключение

Сценарий развития климатических аномалий в тропическом регионе Индийского и Тихого океанов в течение 2023 г. фактически соответствует сценарию развития климатических аномалий в указанном регионе, наблюдавшемуся в 1997г. И сценарий, и интенсивность аномалий климатической системы в экваториальном районе Индийского и Тихого океанов , отмеченные в процессе развития Эль Ниньо в 2023–2024 гг., позволяет отнести данное Эль Ниньо к экстремальным теплым событиям ЭНЮК.

Важнейшей особенностью и 2023 г., и 1997 г. является не только развитие интенсивной положительной фазы ЭНЮК, Эль Ниньо, в Тихом океане в осенние и последующие зимние месяцы, но и интенсивной положительной фазы дипольного явления в регионе Индийского океана в летние и осенние месяцы, что подтверждается климатическими индексами, публикуемыми на сайте Национального метеорологического Центра США.

Влияние Эль Ниньо на атмосферную циркуляцию в ЕАР может проявляться как в виде развития положительной фазы североатлантического колебания, но и развития интенсивной положительной фазы восточноатлантического колебания. В 2023 г., в отличие от 1997 г., положительная фаза восточноатлантического колебания сформировалась уже в летние месяцы и сохранялась вплоть до конца зимнего сезона. И положительная фаза североатлантического колебания, и положительная фаза восточноатлантического колебания проявились в интенсификации циклонической активности как на акватории Северной Атлантики, так и в Европейском регионе, в том числе на европейской территории России.

Важную роль в механизме отклика ЭНЮК в Евро-Атлантический регион может играть усиление зонального переноса в субтропическом регионе в верхней тропосфере на уровне струйного течения, причиной которого является экстремальное нагревание в верхних слоях тропосферы в экваториальном регионе Индийского и Тихого океанов в летний и осенний сезон.

Список литературы

1. *Вязилова Н. А.* Об экстремальной циклонической активности в Северной Атлантике // Метеорология и гидрология. 2012. № 11. С. 5–17.

2. *Вязилова Н. А.* Циклоническая активность и колебания циркуляции в Северной Атлантике // Метеорология и гидрология. 2012. № 7. С. 5–14

3. *Железнова И. В., Д. Ю. Гущина*. Отклик глобальной циркуляции атмосферы на два типа Эль-Ниньо // Метеорология и гидрология. 2015. № 3. С. 36–50.

4. Separating the Indian and Pacific Ocean Impacts on the Euro-Atlantic Response to ENSO and Its Transition from Early to Late Winter / M. A. Abid [et al.] // Journal of Climate. 2021. Vol. 34 (4). P. 1531–1548.

5. El Nino Modoki and its possible teleconnection / K. Ashok, S. K. Behera, S. A. Rao, H. Weng, T. Yamagata // J. Geophys. Res. 2007. Vol. 112. C11007.

6. Broennimann, S. Impact of El Nico-Southern Oscillation on European climate // Rev. Geophys., 2007, Vol. 45, RG3003. https://doi.org/10.1029/2006RG000199.

7. *Deveson A. C. L., K. A. Browning, T. D. Hewson*. A classification of FASTEX cyclones using a height-attributable quasi-geostrophic vertical-motion diagnostic // Quart. J. Roy. Meteor. Soc. 2002. Vol. 128. Is. 579. P. 93–117.

8. *Ineson S., Scaife A. A.* The role of the stratosphere in the European climate response to El Nino // Nat. Geosci. 2009. Vol. 2. P. 32–36. https://doi.org/10.1038/ngeo381

9. Extended Reconstructed Sea Surface Temperature, Version 5 (ERSSTv5): Upgrades, Validations, and Intercomparisons / B. Huang, P. W. Trorne, V. F. Banzon [et al.] // J. Climate. Vol. 30. P. 8179–8205.

10. NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2) / M. Kanamitsu, W. Ebisuzaki, J. Woollen, S.-K. Yang, J. J. Hnilo, M. Fiorino, and G. L. Potter // Bull. Amer. Meteor. Soc. 2002. Vol. 83. P. 1631–1643.

11. *Kao H.-Y., Yu J.-Y.* Contrasting eastern-Pacific and central-Pacific types of ENSO // J. Climate, 2009. Vol. 22. P. 615–6322

12. A Dipol Mode in the Tropical Indian Ocean / N. H. Saji, B. N. Goswami, P. N. Vinayachandran, T. Yamagata // Nature. 1999. Vol. 401. P. 360–363.

13. *Yu B., Lin H*. Tropical atmospheric forcing of the wintertime North Atlantic Oscillation // J. Climate. 2016. Vol. 29. P. 1755–1772.

14. *Xie P., Arkin P. A.* Global precipitation: a 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates, and numerical model outputs // Bull. Amer. Meteor. Soc. 78. P. 2539–2558.

УДК 551.583

Многолетняя динамика волн тепла и холода в Иркутске

А. В. Гекова (gekova00@bk.ru), И. В. Латышева (ababab1967@mail.ru),
К. А. Лощенко (loshchenko@bk.ru)
Иркутский государственный университет, г. Иркутск

Аннотация. Для исследования климатических факторов изменения атмосферного давления на примере метеостанции Иркутск в период 1882–2024 гг. была рассмотрена многолетняя динамика волн тепла и волн холода. Под волнами тепла и волнами холода понимали периоды соответственно с положительными и отрицательными температурными аномалиями. Для исследования был выбран январь – месяц с наиболее низкими средними месячными температурами воздуха, когда в наибольшей степени проявляется охлаждающее влияние материка и хорошо выражена динамика зимнего континентального центра действия атмосферы (Азиатский антициклон) и океанических депрессий (Исландская и Алеутская). Всего за исследуемые 143 года в Иркутске было выделено 361 волн тепла и 375 волн холода, т. е. количество волн тепла и холода оказалось практически одинаковым. Рассмотрена многолетняя динамика волн тепла, которая характеризуется увеличением их количества, и волн холода, количество которых уменьшается на фоне сокращения числа дней с различными градациями отрицательных температур воздуха. Выполнена типизация синоптических процессов у поверхности Земли и на высоте изобарической поверхности АТ-5500 гПа (5 км) для периодов наиболее высоких и наиболее низких среднемесячных температур в январе 2000–2024 гг., сравнительный анализ с аномально холодным январем 1968 г., а также синоптический анализ продолжительных волн тепла в последние десятилетия в Иркутске.

Ключевые слова: климат, Иркутск, волны тепла, волны холода, климатическая норма, типизация, высотный циклон, атмосферный фронт.

Введение

Атмосферное давление в каждой точке земной поверхности не остается постоянным. При этом иногда давление атмосферы изменяется во времени очень быстро, иногда же довольно долго остается неизменным. Изменения атмосферного давления в основном имеют непериодический характер и обусловлены как термическими, так и динамическими причинами. Неравномерное нагревание или охлаждение земной поверхности приводит к изменению давления над различными ее участками. Вторжение теплых или холодных воздушных масс на данную территорию (адвекция) также вызывают изменения давления. В результате колебания давления могут быть сравнительно большими и резкими: за сутки давление может измениться на 20–30 гПа [1; 2]. Наибольшие колебания давления наблюдаются там, где интенсивнее циклоническая деятельность, т. е. в умеренных и высоких широтах. Путем осреднения данных многолетних наблюдений можно на фоне непериодических колебаний давления выявить его периодические его колебания – суточные и годовые изменения [3].

Таким образом, области повышенного и пониженного атмосферного давления играют важную роль в формировании погодных условий. Поэтому изуче-

ние характеристик, отражающих как долговременное, так и кратковременное изменение атмосферного давления, важны для понимания тенденций и причин среднесрочных и долгосрочных изменений климата.

Методика исследования

Иркутская область расположена в южной части Восточной Сибири, почти в центре Евроазиатского материка. Резкие изменения погодных условий на территории Иркутской области в большинстве случаев вызваны прохождением глубоких циклонов и связанных с ними динамически значимых атмосферных фронтов [4]. Атмосферные фронты на территории Иркутской области претерпевают значительную деформацию, взаимодействуя при своем перемещении с горной системой Восточных Саян, Прибайкальских хребтов и испытывая термическое влияние оз. Байкал. Наибольшая повторяемость атмосферных фронтов, с которыми связаны резкие изменения температуры воздуха и опасные явления погоды, отмечается в переходные сезоны года, когда усиливаются горизонтальные градиенты температур и, как следствие, увеличивается повторяемость выходов циклонов [22]. В зимний период уменьшение числа выходов циклонов и связанных с ними атмосферных фронтов можно объяснить господствующим влиянием блокирующих процессов, в том числе Азиатского антициклона, тогда как уменьшение числа атмосферных фронтов летом связано с ослаблением температурных контрастов и значительным смещением осей высотных фронтальных зон к югу.

Для исследования вклада адвективных и динамических факторов изменения атмосферного давления в формирование температурного режима Иркутской области на примере г. Иркутск были выделены волны тепла и холода, как периоды с положительными и отрицательными температурными аномалиями в январе за период 1882–2024 гг. Январь – месяц с наиболее низкими среднемесячными температурами воздуха, когда в наибольшей степени проявляется охлаждающее влияние материка и хорошо выражена динамика зимнего континентального центра действия атмосферы (Азиатский антициклон). Под волнами тепла и волнами холода понимали периоды соответственно с положительными и отрицательными температурными аномалиями.

Результаты исследования

В многолетнем изменении волн тепла и холода в Иркутске в 1882–2024 гг. выявлена динамика увеличения количества случаев с волнами тепла и уменьшение количества случаев с волнами холода, наиболее выраженные с начала 1990-х гг. Если в конце XIX в. количество волн тепла в Иркутске в январе чаще всего составляло 1–2, а волн холода 3–4, то в последние годы количество волн тепла в течение месяца может достигать 6, а волны холода в отдельные годы отсутствуют.

В климатическом плане представляет интерес проанализировать многолетнюю динамику числа дней с различными градациями отрицательных температур воздуха в Иркутске. Рассмотрены градации температур минус 25 °С – минус

С, минус 30 °С – минус 34 °С, минус 35 °С – минус 39 °С, минус 40 °С – минус

С. В исследуемый период 1882–2024 гг. уменьшается количество дней с указанными градациями отрицательных температур воздуха с коэффициентами линейного тренда, значимость которого возрастет с понижением температур. Наибольшее число дней с градациями температуры воздуха минус 25 °С – минус 29 °С зафиксировано в январе 2018 г., который был на 2,7 °С холоднее нормы, а отсутствовали указанные градации в январе 1885, 1983, 2007 и 2020 гг., например, январь 2020 г. был на 3,7 °С теплее нормы. Градации температур минус 25 °С – минус 29 °С чаще всего отмечались в 1934–1945 гг., а в распределении градаций температур минус 30 °С – минус 34 °С прослеживается уменьшение числа дней от 15 в январе 1887 г., который был со средними температурами на 6,1 °С ниже нормы до повторяемости ~40 % в период 2000–2024 гг. Градации температур минус 35 °С – минус 39 °С также характеризуются уменьшением их количества с максимальным числом (10) в январе 1969 г., который имел средние температуры на 9 °С ниже нормы, до отсутствия данных градаций с вероятностью порядка отмечались до января 1967 г. с наибольшей повторяемостью в период 1914– отмечались, а в январе 2002 г., который был на 7,3 °С ниже нормы, такие градации отмечались 7 и 8 января.

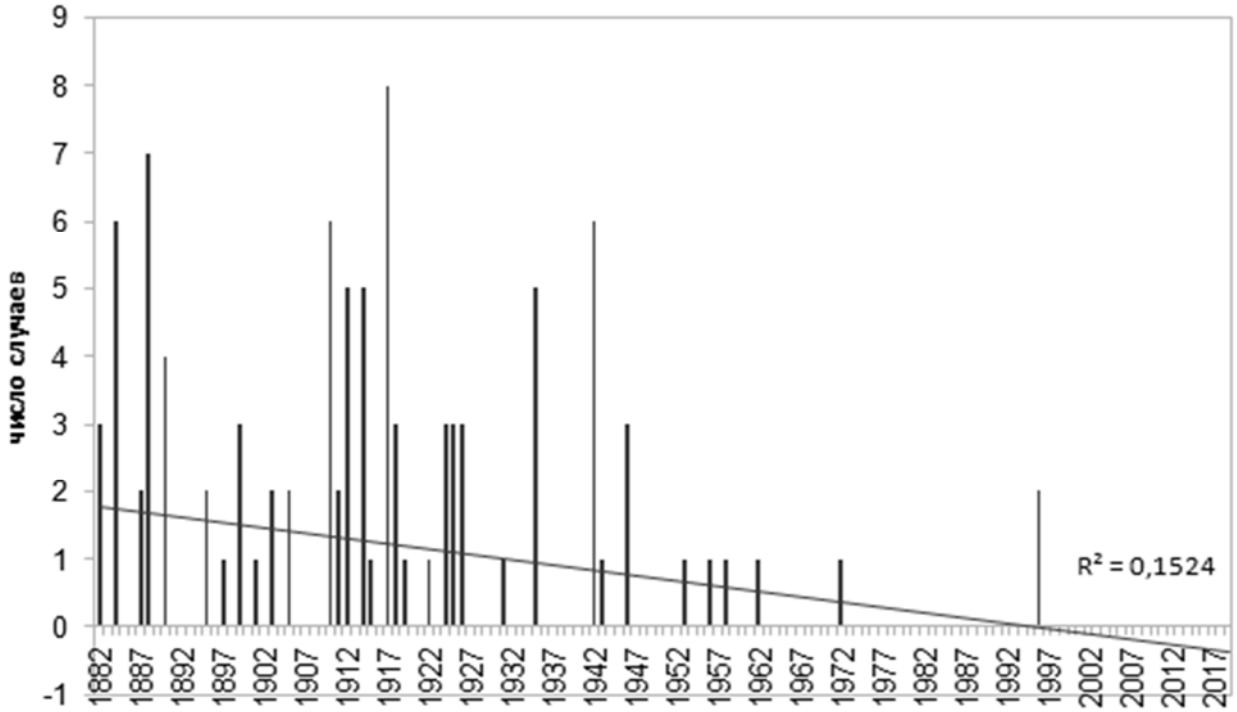


Рис. 1. Многолетняя динамика градаций температур минус 40 °С – минус 45 °С в Иркутске в январе 1882–2024 гг.

Далее были выделены самые теплые и холодные зимние месяцы в Иркутске в 2000–2024 гг. и за каждый день определены типы синоптических процессов, на основе которых построена типизация синоптических полей у поверхности Земли и в средней тропосфере на уровне изобарической поверхности АТ-500 гПа км). Рекордно теплым в Иркутске был январь 2002 г. (на 7,5 °С выше нормы), при климатической норме среднемесячной температуры воздуха –18,3 °С она составила –10,8 °С. Январь 2002 г. оказался не только теплым, но, и снежным, так как выпало 168 % месячной нормы осадков. Анализ приземного поля давления показал, что положительные аномалии температур и увеличение атмосферных осадков были обусловлены увеличением вклада числа дней с теплым сектором циклона, теплых атмосферных фронтов и ложбин ныряющего циклона (40 %) при преобладающем синоптическом типе барический гребень (25 %). В средней тропосфере в аномально теплый январь 2002 г. преобладающим типом процессов (53 %) была динамически значимая в температурных и барических контрастах высотная фронтальная зона, ее передняя часть с адвекцией более теплых воздушных масс с южной составляющей.

Самым холодным за период 2000–2024 гг. оказался декабрь 2020 г., на С ниже нормы. При климатической норме –15,3 °С фактическая температура месяца составила –17,0 °С. Атмосферных осадков выпало 59 % от месячной нормы. В период с 25 по 28 декабря 2020 г. происходило понижение температур на С. По сравнению с аномально теплым январем 2002 г. преобладающим типом атмосферных процессов (45 %) был барический гребень Азиатского антициклона и зона взаимодействия циклона и антициклона, где характерно усиление ветра, оказывающее дополнительное охлаждающее воздействие. Кроме того, по сравнению с теплым январем 2002 г. в 4 раза реже отмечались теплые атмосферные фронты. На высоте изобарической поверхности АТ-500 гПа (5 км) понижение декабрьских температур 2020 г. было вызвано увеличением вклада (42 %) тыловой части высотной ложбины, где с нисходящими потоками средней и верхней тропосферы осуществляется адвекция наиболее холодных арктических воздушных масс.

Учитывая, что в последние годы существенно возросла повторяемость волн тепла была проведена синоптическая типизация для наиболее продолжительных теплых зимних периодов. Исследование выполнено на примере января 2020 г., когда только 3 дня были со среднесуточной температурой воздуха ниже климатической нормы, и рекордно теплого января 2002 г., когда только один день месяца был со среднесуточной температурой ниже нормы. Согласно выполненной типизации в январе 2020 г. преобладающими типами атмосферных процессов у поверхности Земли (54 %) были теплый атмосферный фронт и теплый сектор циклона, а на высоте изобарической поверхности АТ-500 гПа (5 км) в большинстве случаев (41 %) в проходила ось динамически значимой высотной фронтальной зоны и ось среднетропосферного струйного течения. В аномально теплый январь г. аналогично теплому январю 2020 г. у поверхности Земли также преобладающим типом синоптических процессов (58 %) было влияние теплого сектора циклона и теплого атмосферного фронта, а на высоте изобарической поверхности

АТ-500 гПа аналогично январю 2020 г. прохождение оси высотной фронтальной зоны (29 %).

В заключение для сравнения были рассмотрены синоптические процессы для холодного декабря 1968 г., который был на 3,3 °С холоднее нормы. 31 декабря 1968 г. в ночные часы температура воздуха в Иркутске понижалась до –С. Как показал синоптический анализ, основная волна холода в третьей декаде месяца была вызвана усилением Азиатского антициклона с центром на территории Иркутской области, который был господствующим типом (19 %) синоптических процессов у поверхности Земли в этом месяце (рис. 2).

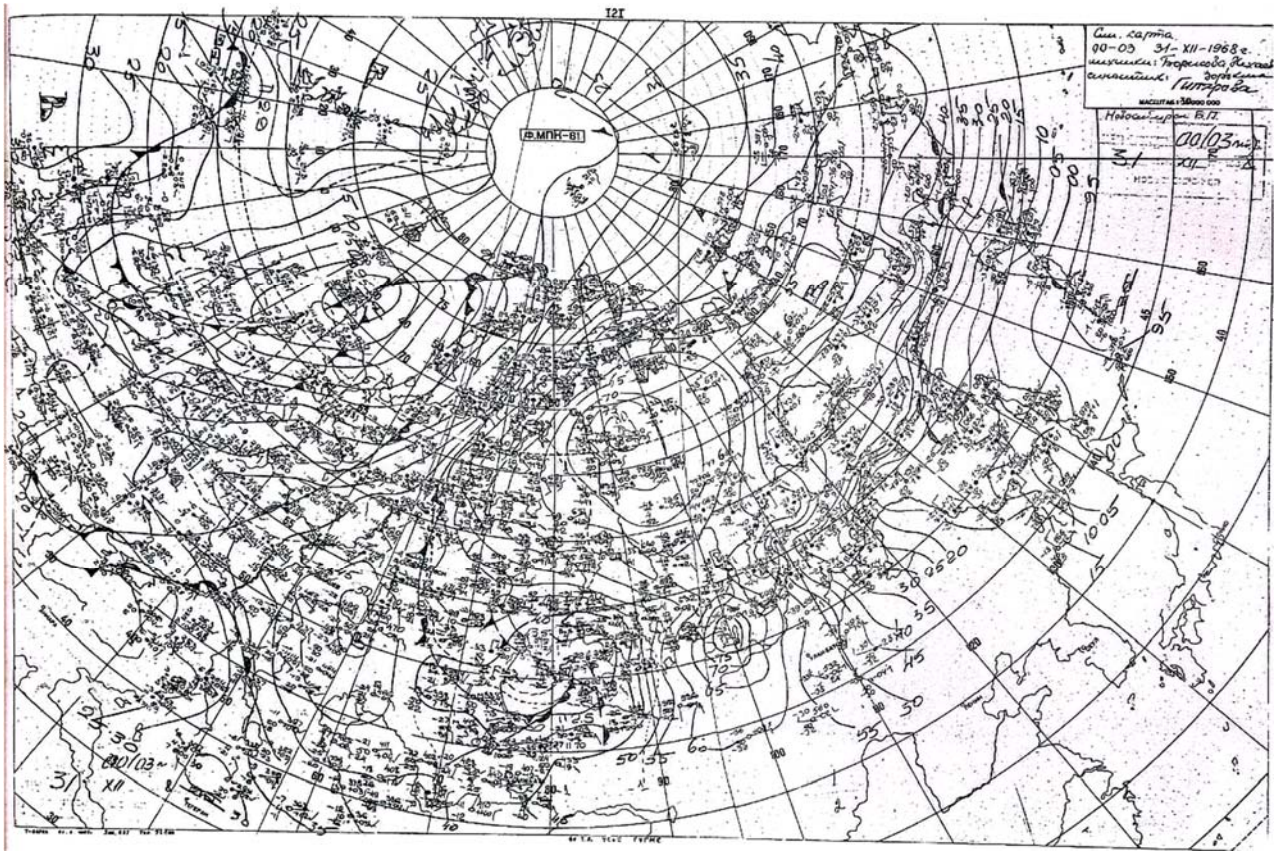


Рис. 2. Приземное барическое поле в январе 1968 г.

За последние десятилетия наиболее низкие температуры в январе (-42,8 °С) отмечались 8 января 2001 г. Они были вызваны у поверхности Земли влиянием холодной устойчивой воздушной массы при объединении гребней Арктического и Монгольского антициклонов, а в средней тропосфере над Иркутском отмечался центр холодного высотного циклона глубиной 508 дкм (рис. 3). 22 января 2018 г. в Иркутске температура воздуха понижалась до –38,4 °С в холодной неустойчиво стратифицированной воздушной массе в тыловой части высотного циклона.

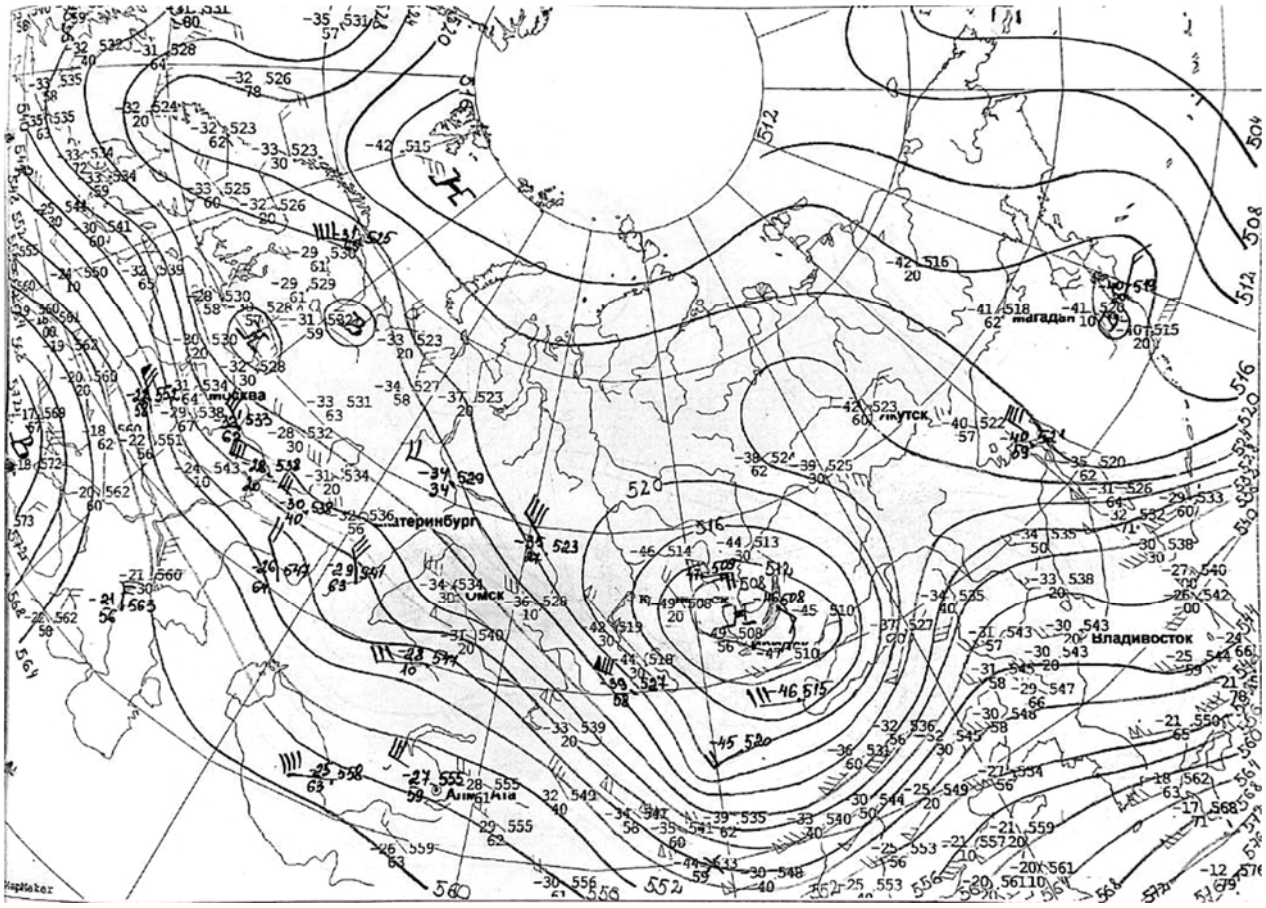


Рис. 3. Высотное барическое поле 8 января 2001 г.

Заключение

За период инструментальных метеорологических наблюдений в Иркутске (1882–2024 гг.) отмечалось 361 волн тепла и 375 волн холода, т. е. количество волн тепла и холода оказалось практически одинаковым. Однако в многолетней динамике можно проследить увеличение волн тепла и уменьшение количества волн холода, выраженное с начала 1990-ых годов. По сравнению с концом XIX века количество волн тепла в Иркутске в январе возросло в 3–6 раз, а волны холода в отдельные годы отсутствуют.

Потепление климата сопровождается уменьшением количества дней с различными градациями отрицательных температур воздуха в январе в Иркутске. Положительные аномалии январских температур были обусловлены увеличением вклада числа дней с теплым сектором циклона, теплыми атмосферными фронтами и ложбинами ныряющих циклонов. Понижение зимних температур было вызвано увеличением вклада числа дней с тыловой частью высотной ложбины, где с нисходящими потоками средней и верхней тропосферы осуществляется адвекция наиболее холодных арктических воздушных масс.

Наибольших значений положительные аномалии среднесуточной температуры воздуха (15,7 °С) достигали в Иркутске 2 января 1927 г., когда воздух в дневные часы прогрелся до 2,3 °С. Температура воздуха также повышалась до

значениям отрицательные температурные аномалии в Иркутске наблюдались –42,7 °С, а ночные до –47,6 °С. 12 января 1915 г. отрицательные температурные аномалии составили –24,9 °С, дневные температуры понижались до –43,7 °С, а ночные до –49,7 °С. Одна из последних крупных отрицательных температурных аномалий отмечалась 8 января 2001 г. и составила –20,7 °С, когда дневные температуры понижались до –35,7 °С, а ночные – до –42,8 °С.

Список литературы

1. *Аухадеев Т. Р.* Пространственно-временные изменения приземного давления воздуха в северном полушарии в 1948–2013 гг. // Ученые записки Казанского государственного университета. Естественные науки. 2015. Т. 157. Кн. 3. С. 20–34.

2. Анализ сезонной и многолетней изменчивости поля атмосферного давления в Арктике методами анализа случайных процессов / К. П. Беляев, Н. П. Тучкова, Г. М. Михайлов, А. Н. Сальников // Научный сервис в сети Интернет : тр. XXII Всерос. науч. конф. 21–25 сент. 2020 г. М. : ИПМ им. М. В. Келдыша, 2020. С. 129–139.

3. *Полянская Е. А.* Синоптические процессы Восточной Сибири и Дальнего Востока : учеб. пособие. Саратов : СГУ, 2011. Ч. 1. 48 с.

4. *Латышева И. В., Лощенко К. А.* Синоптическая метеорология : учеб. пособие. Иркутск : Изд-во ИГУ, 2014. 109 с.

УДК 551.582

Оценка индекса континентальности климата Магадана за период с 1936 по 2024 г.

Д. А. Котляров (svms@sapo.pt)
Северо-Восточный государственный университет, г. Магадан

Аннотация. Индекс континентальности является важным интегральным показателем оценки климата и значимым инструментом его прогнозирования. Данный индекс оценивает не только динамику основных климатических переменных, характерных для определенного временного интервала и территории, но и отражает их взаимосвязь между собой посредством влияния одной переменной на другую. Таким образом, оценка индекса континентальности позволяет проследить особенности климата в прошлом, охарактеризовать его изменения в настоящем и спрогнозировать тенденции изменения в будущем с учетом наметившейся динамики по отдельным климатическим переменным. Для оценки континентальности климата Магадана производился предварительный расчет усредненных климатических переменных по девяти временным интервалам, которые впоследствии использовались для расчета индексов континентальности. Расчет индексов осуществлялся по двух различным методикам, учитывающим не только годовую амплитуду температур и широту местности, но и средние температуры января и июля, а также сезонное распределение осадков. Оценка итоговых индексов показала незначительное ослабление континентальности климата в Магадане за исследуемый период, посредством роста средних зимних и летних температур, а также значительного увеличения количества осадков.

Ключевые слова: континентальность климата, индекс континентальности, коэффициент континентальности, климатические переменные, Магадан, северо-восток России.

Введение

Глобальные климатические изменения, охватившие территорию планеты, для одних регионов Земли носят существенный и зачастую необратимый характер, а для других регионов эти изменения практически незначительны, хотя и имеют место быть. Такие изменения проявляются по-разному, но вызваны, как правило, ростом средней температуры воздуха на планете. Результатом таких изменений являются отклонения многолетних значений параметров погоды от нормы, характерной для определенных территорий.

Территория Северо-Востока России, где расположен город Магадан, относится к одним их самым холодных районов не только России, но и планеты в целом. Всю территорию можно условно разделить на две области: внутриконтинентальные и прибрежные, в которых климат будет значительно отличаться друг от друга. Во внутриконтинентальных областях средние январские температуры достигают крайне низких значений –40–45 °С (Верхоянск, Оймякон). Повсеместно развито такое метеорологическое явление, как зимняя инверсия температур, результатом которой является выхолаживание межгорных котловин до экстремально низких температур посредством застаивания в них холодного и сухого воздуха. Одной из причин такого явления является формирование в зимний период области высокого атмосферного давления с морозной и солнечной погодой. Низкий снежный покров и экстремальные температуры способствуют развитию многолетней мерзлоты, мощность которой достигает несколько сотен метров. Для прибрежных областей Северо-Восточной Сибири, где расположен Магадан, характерен менее суровый климат с более высокими зимними температурами и бóльшим количеством осадков. Тем не менее здесь наблюдаются более суровые климатические условия, чем в западных районах страны, расположенных на тех же широтах. Анализ изменения климата на этой территории, посредством оценки индекса континентальности, позволит оценить «глобальность» климатических изменений на нашей планете в самых отдаленных уголках Земли.

Континентальность климата – это сочетание различных свойств климата, определяемых влиянием значительных площадей суши на приземные слои атмосферы и климатообразующие процессы [3]. Оценка индекса континентальности, как интегрального показателя, позволяет комплексно оценить те климатические изменения, которые произошли в Магадане за исследуемый период времени. Данный индекс учитывает не только отдельные значения климатических переменных (температура, количество осадков), но и их взаимосвязь, а также изменение этих значений в течение исследуемого периода времени.

Основной целью данного исследования является оценка изменения континентальности климата Магадана на основе данных метеорологических наблюдений с 1936 по 2024 г. Следует отметить, что метеорологические наблюдения средних годовых и месячных температур в городе велись с 1930 г. Однако по отдельным годам или месяцам в начале 1930-х гг. эти метеоданные отсутствуют, поэтому все необходимые расчеты будут вестись на основании только тех лет,

по которым имеется полная статистика не только по температуре, но и по количеству осадков, необходимых для расчета индекса континентальности климата. Весь временной интервал будет разбит на несколько временных периодов, для которых будет произведен расчет индекса континентальности климата по двум методикам и их последующее сравнение в динамике.

Материалы и методы

Для расчета индексов континентальности климата Магадана будут использованы две различные методики, учитывающие не только годовую амплитуду температур и широту местности, но и средние январские и июльские температуры, а также количество осадков, выпавших в теплый и холодный период времени. Так, в первом случае для расчета индексов континентальности климата будет использована методика С. П. Хромова, имеющая следующее уравнение:

$$К_{хр} = \frac{A - 5{,}4\ \mathrm{Sin}\varphi}{A}\ 100\ \%,$$

где, $К_{хр}$ – индекс континентальности С. П. Хромова; А – годовая амплитуда температуры воздуха, °С; φ – географическая широта места (десятичные градусы).

Итоговое значение индекса континентальности, выраженное в процентах, показывает долю годовой амплитуды температуры воздуха, которая создается за счет влияния на нее материков. Выражение 5,4sinφ, по мнению С. П. Хромова, есть не что иное, как океаническая амплитуда. При этом максимальные значения индекса характерны для внутриконтинентальных районов, где они равны или превышают 90 %. Над океанами эти значения варьируют от 10 % (Южное полушарие) до 25 % (Северная Атлантика) [3; 9].

Во втором случае для расчета индексов будет использована формула общей годовой континентальности, и сам индекс будет выражен как коэффициент. Данная формула имеет следующий вид:

$$К_t = К_w + К_s,$$

где $К_t$ – коэффициент общей годовой континентальности; $К_w$ – коэффициент зимней континентальности; $К_s$ – коэффициент летней континентальности.

При расчетах коэффициентов зимней и летней континентальности учитываются средние январские и июльские температуры воздуха, а также количество осадков, выпавших в теплый и холодный период года. Так, формула для расчета индекса зимней континентальности будет имеет следующий вид:

$$К_w = \frac{\left(1 - \frac{T_w}{t_0}\right)\cos\varphi + \frac{P_0}{P_w} - 2}{2},$$

где T_w – средняя январская температура, °С; P_w – сумма осадков с октября по март (включительно), мм; P_0 – сумма осадков за год в открытом океане на широтах умеренного климатического пояса (≈1000 мм); t_0 – средняя годовая температура на уровне океана на широте умеренного климатического пояса (≈+8 °С).

По аналогии с зимней континентальностью рассчитывается значение коэффициента летней континентальности:

$$K_s = \frac{\left(\frac{T_s}{t_0} - 1\right)\sin\varphi + \frac{P_0}{P_s} - 2}{2},$$

где T_s – средняя июльская температура °С; P_s – сумма осадков с апреля по сентябрь (включительно), мм [3; 8].

Материалами для исследования послужили метеорологические данные за период с 1936 по 2024 г., размещенные в открытом доступе на официальном сайте справочно-информационного портала «Погода и климат» (http://www.pogodaiklimat.ru). В общей сложности было обработано свыше 2,2 тыс. метеорологических показателей, которые были сведены в итоговую таблицу усредненных значений годовой амплитуды температур, средней январской и июльской температуры, а также средней суммы осадков с октября по март и с апреля по сентябрь (табл. 1). Данные значения были использованы для расчета индексов континентальности климата Магадана по девяти временным интервалам.

В качестве дополнительных литературных источников и материалов послужили научные труды по анализу и оценке индексов континентальности Западной Сибири [1], отдельных регионов Восточной Сибири [2] и Европейской части России (территории Среднего и Нижнего Поволжья, а также Южного Предуралья) [5–7]. Для оценки континентальности климата Магадана широко использовались следующие методы исследования: метод сравнительного анализа, статистический и математический.

Результаты и их обсуждение

Анализ усредненных климатических переменных по девяти временным интервалам показывает, что за последние 25–30 лет в Магадане произошел рост как средней январской, так и средней июльской температуры (табл. 1). При этом январские температуры выросли на 2–3 °С, а июльские температуры показали рост в среднем на 1–1,5 °С, достигнув в последнем временном интервале максимального значения в +12,6 °С. Одновременно с ростом средней температуры увеличилось среднее количество осадков в теплое и холодное время года. Так, за последние 20 лет количество осадков с октября по март превысило отметку в 230 мм, а с апреля по сентябрь отметку в 420 мм, что является самым максимальным значением за все время метеорологических наблюдений в городе.

На основании усредненных климатических переменных были произведены итоговые расчеты индексов континентальности климата Магадана по двум указанным выше методикам за период с 1936 по 2024 г. (в разрезе девяти временных интервалов). Результаты данных расчетов представлены в табл. 2.

Таблица 1

Усредненные расчетные значения климатических переменных в г. Магадане за период с 1936 по 2024 г.

Временные интервалы	Средняя годовая амплитуда температур (A), °C	Средняя январская температура (T_w), °C	Средняя июльская температура, (T_s), °C	Средняя сумма осадков с октября по март (P_w), мм	Средняя сумма осадков с апреля по сентябрь (P_s), мм
1936–1945 гг.	30,4	-15,9	11,3	169,6	342,2
1946–1955 гг.	30,8	-18,0	11,4	215,7	308,4
1956–1965 гг.	30,1	-16,7	11,4	170,3	343,4
1966–1975 гг.	31,5	-18,0	10,9	200,4	359,1
1976–1985 гг.	30,3	-15,9	11,0	172,5	346,7
1986–1995 гг.	30,7	-17,7	11,4	197,0	347,3
1996–2005 гг.	30,2	-15,4	12,2	200,8	322,5
2006–2015 гг.	30,6	-15,0	12,4	234,8	434,9
2016–2024 гг.	30,1	-16,0	12,6	235,2	421,7

Таблица 2

Итоговые индексы континентальности в г. Магадан за период с 1936 по 2024 г.

Временные интервалы	Индекс континентальности по С. П. Хромову (K_{xp}), %	Коэффициент общей континентальности K_t ($K_s + K_w$)	В том числе коэффициенты сезонной континентальности	
			летней (K_s)	зимней (K_w)
1936–1945 гг.	84,68	3,35	0,64	2,71
1946–1955 гг.	84,88	3,00	0,80	2,20
1956–1965 гг.	84,53	3,79	1,07	2,72
1966–1975 гг.	85,22	2,87	0,55	2,32
1976–1985 гг.	84,63	3,26	0,60	2,66
1986–1995 гг.	84,83	2,97	0,62	2,35
1996–2005 гг.	84,58	3,01	0,78	2,23
2006–2015 гг.	84,78	2,25	0,39	1,86
2016–2024 гг.	84,53	2,32	0,43	1,89

Анализ итоговых индексов континентальности климата Магадана, рассчитанных по двум методикам, показал, что существенных отклонений как в индексах С. П. Хромова, так и в индексах общей континентальности не отмечается. В целом данные индексы имеют общую тенденцию с усредненными расчетными значениями климатических переменных, представленных в табл. 1. Так, отклонение в индексах С. П. Хромова по всем временным интервалам не превышает 1 % и составляет 0,69 %, что является несущественным отклонением. При этом снижение значения индекса наблюдается за последние 25–30 лет относительно предыдущих временных интервалов и достигает минимального значения за последние девять лет (2016–2024 гг.) – 84,53 %. Однако подобное снижение было зафиксировано и в предыдущий временной интервал (1956–1965 гг.), что говорит о цикличном изменении индекса без значительных отклонений. Таким образом, влияние континента на климатообразующие процессы в городе по-прежнему остается достаточно существенным, о чем говорит доля годовой амплитуды температуры воздуха, которая создается за счет влияния на нее материков (более 84 %).

Итоговые значения индексов общей континентальности по девяти временным интервалам имеют бóльшие отклонения, чем индексы С. П. Хромова, и варьируют в пределах 1–1,5 ед. Однако, как и в первом случае, следует отметить наметившуюся тенденцию снижения значений индексов за последние 20 лет, т. е. наблюдается незначительное ослабление континентальности в городе. При этом снижение значения характерно как для индексов зимней континентальности, так и для индексов летней континентальности. Данное снижение определяется ростом средних температур января и июля, а также значительным увеличением количества выпавших осадков как в теплый, так и в холодный периоды года. Осадки связаны с более частым приходом влажных воздушных масс из акватории Тихого океана, что снижает влияние воздушных масс из континентальных районов северо-востока России [4]. Также следует отметить, что незначительное увеличение количества осадков происходило и ранее (1966–1975 гг.), что нашло свое отражение в итоговом индексе общей континентальности за этот период, который составил 2,87.

Заключение и выводы

В целом проведенное исследование показало, что существенных отклонений в значениях индексов континентальности климата в г. Магадане не наблюдается. Имеющиеся отклонения вписываются в общую тенденцию изменения климатических переменных за исследуемый период времени и связаны с ростом средних январских и июльских температур, а также с увеличением количества осадков в разные сезоны года. Особенно эта тенденция проявляется за последние два десятилетия, что подтверждают результаты проведенных расчетов. Это позволяет говорить о незначительном ослаблении континентальности климата в Магадане. Следует отметить, что подобные локальные изменения климатических переменных фиксировались и в предыдущие временные интервалы, хотя и с меньшими значениями отклонений. Таким образом, на климат и климатообразующие процессы в Магадане по-прежнему оказывают значительное влияние обширные континентальные пространства Северо-Восточной Сибири.

Список литературы

1. *Аблова И. М.* Оценка индекса континентальности Западной Сибири на фоне регионального изменения климата // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Науки о Земле. 2023. Т. 23, вып. 2. С. 76–79.

2. *Андрейчик М. Ф., Монгуш Л. Д.-Н.* Исследование индекса континентальности на фоне потепления климата в Хемчикской котловине Республики Тыва // Вестник КрасГАУ. 2013. № 7. С. 146–151.

3. *Котляров Д. А.* Анализ индекса континентальности климата на территории Северо-Востока России // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Естественные и медицинские науки. 2024. № 1. С. 92–103.

4. *Котляров Д. А.* Оценка особенностей муссонного климата города Магадан // Тихоокеанская география. 2024. № 3. С. 70–83.

5. *Морозова С. В., Полянская Е. А., Кононова Н. К.* Об изменение степени континентальности климата в степной зоне России // Степи Северной Евразии : материалы IX Междунар. степ. форума Рус. геогр. о-ва. Оренбург : Оренбург. гос. ун-т. 2021. С. 575–579.

6. *Ормели Е. И.* Оценка степени континентальности климата Саратовской области в начале XXI века // Вестник Удмуртского университета. Серия: Биология. Науки о Земле. 2022. Т. 32, вып. 4. С. 476–484.

7. *Пряхина С. И., Ормели Е. И.* Расчет индексов континентальности климата для Среднего и Нижнего Поволжья // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Науки о Земле. 2017. Т. 17. Вып. 1. С. 17–19.

8. *Соколов С. Н., Кузнецова Э. А.* Континентальность климата Сибирского региона // Вестник ВГУ. Серия: География. Геоэкология. 2020. № 4. С. 44–52.

9. *Хромов С. П.* Метеорология и климатология, развитие науки, географические факторы климата. Тепловой режим атмосферы. Индексы континентальности. Л. : Гидрометеоиздат, 1978. 345 с.

УДК 520.8

Современный климатический режим оз. Байкал

И. В. Латышева (ababab1967@mail.ru), К. А. Лощенко (loshchenko@bk.ru), Е. В. Разницына (kraznitsyna@mail.ru)

Иркутский государственный университет, г. Иркутск

Аннотация. В статье выполнен климатический анализ температурно-влажностного режима побережья оз. Байкал за период 1980–2023 гг. по данным метеорологических станций Патроны, Еланцы, Большое Голоустное, Баргузинский заповедник, Большой Ушканий, Сарма, Култук, Хужир, Хамар-Дабан и Байкальск. Проанализированы пространственные и временные особенности распределения среднегодовых и среднемесячных температур воздуха и сумм атмосферных осадков. Разнообразие орографических факторов и мезоциркуляционных условий определяют большие перепады средних температур воздуха, которые в рассматриваемый период на прибайкальских станциях превышают 40 °С. Количественно оценены темпы потепления климата, которые сопровождаются увеличением засушливости на фоне уменьшения сумм атмосферных осадков, что следует учитывать при исследовании возможных негативных последствий изменений климата на экосистемы оз. Байкал. В годовом ходе наиболее высокие темпы потепления климата на байкальских станциях выявлены в холодный период (с января по март), когда погодные условия в значительной степени подвержены влиянию Азиатского антициклона и в меньшей степени сказывается влияние водной масс оз. Байкал.

Ключевые слова: климат, потепление, оз. Байкал, температура воздуха, атмосферные осадки, годовая амплитуда, абсолютный максимум, абсолютный минимум.

Введение

Последствия изменений климата становятся постоянно действующим фактором, влияющим на развитие экономики регионов России. В настоящее время размер экономического ущерба, связанного с погодными и климатическими факторами, может достигать и превышать 1 % валового внутреннего продукта (ВВП) России [1]. С происходящими глобальными изменениями ожидается сдвиг к северу районов благоприятного земледелия, увеличение частоты и интенсивности наводнений и засух.

На территории России, где темпы климатических изменений почти вдвое выше, чем суши в целом и составляют ~0,49 °С за десятилетие, необходимо учитывать весь комплекс угроз, рисков и возможностей, обусловленных наблюдаемыми и ожидаемыми климатическими изменениями. Следует отметить, что наиболее быстрое потепление происходит в азиатской части России (~ 0,71 °С за десятилетие) [4].

Ожидаемо повышенной уязвимостью к изменениям климата являются высокие широты, а также горные и озерные экосистемы, которые характеризуются большим видовым разнообразием и в них присутствуют эндемики, обладающие высокой чувствительностью даже к небольшим изменениям климата. Оценка адаптации лесов к изменениям климата показала, что наиболее негативная динамика, связанная с уменьшением продуктивности лесов, характерна для лесов Сибири, что может быть обусловлено засушливыми периодами и последствиями лесных пожаров [3]. Одним из ключевых экономических последствий изменения климата является снижение урожайности сельскохозяйственных культур в ряде регионов, что приводит к увеличению цен на продовольствие и снижению продовольственной безопасности [2].

Высокая степень уязвимости территории России к климатическим рискам обусловлена рядом географических факторов, например наличием территорий в разных климатических поясах, в том числе обширной арктической зоны, наиболее подверженной изменению климата. Объект исследования – территория Иркутской области, где в сочетании с резко расчлененным рельефом тесное взаимодействие разнородных воздушных масс определяют разнообразное проявление последствий изменений климата и связанных с ними климатических рисков.

Методика исследования

2024 год признан по данным ВМО самым теплым на планете, что указывает на наблюдающиеся высокие темпы изменения глобального климата Земли. Однако климатические изменения по-разному проявляются в регионах мира, где существенный вклад вносят влияние орографии и циркуляционных условий. На территории Иркутской области научный и практический интерес представляет изучение региональных особенностей климата, в том числе на побережье оз. Байкал, который благодаря огромной водной массе оказывает в холодный период года отепляющее, а в теплый период года – охлаждающее влияние на прибрежные территории. Кроме того, климатический режим озера существенно различается в его северной и южной оконечности, зависит от сезонов года, траекторий смещения циклонов, господствующего влияния в холодный период года Азиатского антициклона и других факторов.

Целью работы явилось изучение современных особенностей климата оз. Байкал на основе статистической обработки среднемесячных и абсолютных значений температуры воздуха, годовых и месячных сумм атмосферных осадков по данным байкальских метеорологических станций за период 1980–2023 гг. В качестве объекта исследования выбраны метеостанции Патроны, Еланцы, Большое Голоустное, Баргузинский заповедник, Большой Ушканий, Сарма, Култук, Хужир, Хамар-Дабан и Байкальск, расположенные в пределах 50–54ºс. ш. и 103–109ºв. д. на высотах от 458 до 886 м над у. м., высокогорная станция Хамар-Дабан на высоте 1442 м. Полученные данные представляют практический и научный интерес, так как содержат новые результаты по изучению климатического режима озера в условиях возросших темпов изменения глобального климата.

Результаты исследования

В исследуемый период 1980–2023 гг. средняя годовая температура воздуха на большинстве рассматриваемых в работе метеорологических станций положительная. Максимальных значений (0,9 ºС) она достигает на южной оконечности озера (Байкальск), на станциях Большое Голоустное, Култук, Сарма и Хужир она равна 0,5 ºС. Отрицательные среднегодовые температуры воздуха отмечаются в северной оконечности озера – Баргузинский Заповедник (-2,7 ºС), Большой Ушканий (–1,9 ºС) и на высокогорной станции Хамар-Дабан (–1,9 ºС). Таким образом, различия среднегодовой температуры воздуха между северной и южной оконечностью оз. Байкал составляют в среднем 3,6 ºС.

Самым теплым месяцем года на всех рассматриваемых станциях, кроме северных станций Баргузинский Заповедник и Большой Ушканий, является июль, на северной оконечности озера – август. Самым холодным месяцем года является январь, за исключением Байкальска и Большой Ушканий, где минимум смещен на февраль. Абсолютный максимум температуры воздуха варьирует в рассматриваемый период от 23,3 °С (Большой Ушканий) до 30,5 °С (Еланцы). Абсолютный минимум температуры воздуха изменяется от –27,4 °С (Большой Ушканий) до –38,3 °С (Баргузинский Заповедник). Годовая амплитуда температуры воздуха варьирует от 29,5 °С на высокогорной станции Хамар-Дабан до 37,3 °С на станции Еланцы. В целом перепады средних температур воздуха в рассматриваемый период на рассматриваемых станциях составили 40,6 °С.

Максимальные среднемесячные температуры воздуха отмечаются в январе – Байкальск (–4,7 °С), в феврале – Хамар-Дабан (–14,3 °С), в марте – Большое Голоустное (–6,9 °С), в апреле и мае – Патроны (1,7 и 8,8 °С соответственно), в летние месяцы – Еланцы (15,3; 18,4 и 16,0 °С соответственно), в сентябре – Хужир (10,1 °С), в период с октября по декабрь – Большой Ушканий (3,0; –3,3 и –7,5 °С соответственно). Минимальные среднемесячные температуры воздуха наблюдаются в январе, феврале и марте – Баргузинский Заповедник (–22,2; –21,1 и –12,6 °С соответственно), в период с апреля по июля – Большой Ушканий (–2,3; 3,6; 8,2 и 12,5 °С соответственно), в период с августа по ноябрь – Хамар-Дабан (11,5; 5,2; –1,8 и –9,9 °С соответственно), в декабре – Патроны (–16,3 °С).

В исследуемый период 1980–2023 гг. максимальное среднее годовое количество атмосферных осадков составило 1381 мм и отмечалось на высокогорной ст. Хамар-Дабан (рис. 1) и в Байкальске (798 мм), а наименьшее на станциях – Сарма (189 мм) и Хужир (205 мм). Таким образом, на наветренных склонах Хамар-Дабана в среднем за год выпадает атмосферных осадков в 7 раз больше, чем в средней части оз. Байкал.

В годовом распределении максимальное количество атмосферных осадков выпадает в июле, за исключение Сармы, где он приходится на август. Наибольшее количество атмосферных осадков в июле отмечается на станциях Хамар-Дабан (266 мм) и Байкальск (167 мм). Минимальные месячные суммы осадков приходятся на февраль – период устойчивого ледостава, и варьируют от 22 мм (Сарма, Большое Голоустное, Большой Ушканий, Еланцы) до 32 мм (Хамар-Дабан).

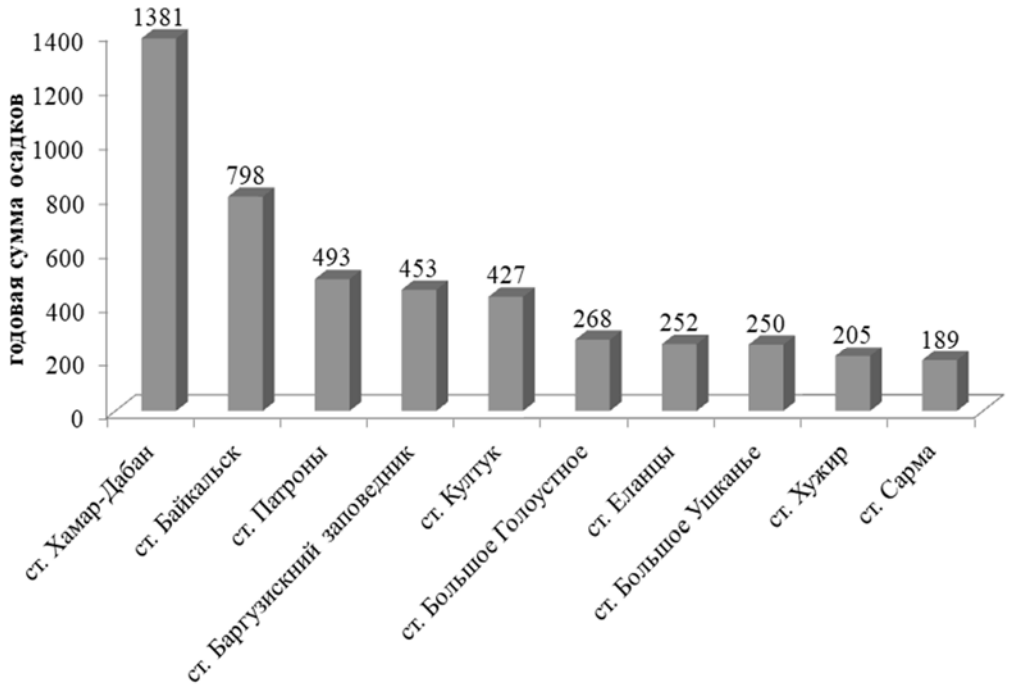


Рис. 1. Среднегодовые суммы атмосферных осадков
на прибайкальских станциях Иркутской области в 1980–2023 гг.

На рис. 2 показана амплитуда годового хода атмосферных осадков. Годовая амплитуда тесно коррелирует с годовыми суммами атмосферных осадков и наибольших значений (234 мм) достигает на высокогорной ст. Хамар-Дабан, далее следуют станции Байкальск (153 мм), Култук (106 мм), Патроны (101 мм). Соответственно наименьших значений годовая амплитуда атмосферных осадков отмечается на байкальских станциях Сарма (47 мм), Хужир (53 мм) и Большое Голоустное (54 мм).

Процентный вклад атмосферных осадков различных календарных сезонов года в годовую сумму осадков на прибайкальских станциях варьирует в зимние месяцы от 4 % на большинстве байкальских станций до 14 % (Баргузинский Заповедник), весной от 9 % (Большой Ушканий) до 21 % (Хамар Дабан). Наибольший процентный вклад в годовые суммы осадков приходится на летние месяцы и изменяется от 38 % (Баргузинский заповедник) до 67 % (Еланцы), осенью варьирует от 16 % (Большое Голоустное) до 34 % (Баргузинский заповедник).

В исследуемый период 1980–2023 гг. происходит потепление климата на всех рассматриваемых в работе байкальских станциях в среднем со скоростью 0,27–0,35 ºС/10 лет, причем со сменой отрицательных среднегодовых значений температуры воздуха на положительные. Наименьшие темпы повышения средних температур отмечались на южной станции Байкальск (0,15 ºС/10 лет), а наиболее быстро среднегодовая температура воздуха увеличилась на ст. Патроны (0,48 ºС/10 лет). Обращают внимание высокие темпы роста среднегодовых температур воздуха в последние годы (2020–2023 гг.). По сравнению с десятилетием 1980–1989 гг. в настоящее время среднегодовые суммы атмосферных осадков имеет тенденцию к уменьшению.

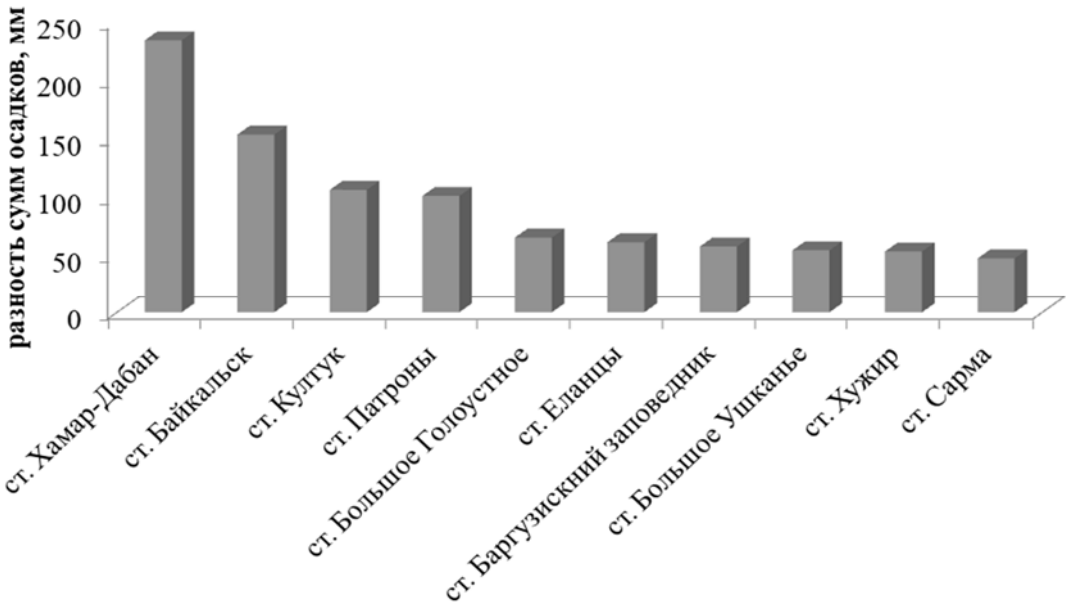


Рис. 2. Годовая амплитуда атмосферных осадков
на прибайкальских станциях Иркутской области за период 1980–2023 гг.

Заключение

В рассматриваемый период (1980–2023 гг.) среднегодовые температуры воздуха на побережье оз. Байкал изменялись от 0,9 ºС на южной оконечности озера (Байкальск) до –1,9 ºС на высокогорной станции Хамар-Дабан, а среднемесячные температуры от максимальных значений в июле на ст. Еланцы (18,4 °С) до минимальных в январе на ст. Баргузинский заповедник (–22,2 °С).

Наиболее благоприятные температурные условия в летние месяцы отмечаются в Еланцах, в зимние месяцы в Байкальске, а наиболее суровые климатические условия на северных станциях: летом – Большой Ушканий, зимой – Баргузинский Заповедник.

Среднегодовые суммы атмосферных осадков изменяются от 189 мм в средней части оз. Байкал (Сарма) до 1381 мм на высокогорной станции Хамар-Дабан, а среднемесячные от максимальных значений в июле в Хамар-Дабане (266 мм) до минимальных значений в феврале на станциях Сарма, Большое Голоустное, Большой Ушканий, Еланцы (22 мм).

На побережье оз. Байкал в 1980–2023 гг. происходит потепление климата с наиболее высокими темпами в период с января по март, достигающие максимальных значений в марте и составляющие 1,25 ºС/10 лет на северной станции Баргузинский Заповедник и 1 ºС/10 лет на ст. Патроны. Потепление климата сопровождается уменьшением годовых и месячных сумм атмосферных осадков, т. е. увеличением засушливости климата.

Список литературы

1. Доклад о климатических рисках на территории Российской РФ. СПб. : Климатический центр Росгидромета, 2017. 106 с.

2. *Климов Н. А.* Климатические изменения и продовольственная безопасность // Сельское хозяйство и экономика. 2022. № 5. С. 22–40.

3. *Семёнова Е. И., Сорока А. О., Недбаев И. С.* Пространственная дифференциация лесов субъектов Российской Федерации на основе авторской методики оценки уровня адаптации к изменениям климата // Лесотехнический журнал. 2024. Т. 14. № 1 (53). С. 16–34.
4. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. СПб. : Наукоем. технологии, 2022. 124 с.

УДК 551.524

Особенности временных вариаций среднегодовых значений температуры по данным метеостанции Цугшпитце

С. А. Рябова (riabovasa@mail.ru)
Институт динамики геосфер им. академика М. А. Садовского РАН, г. Москва
Институт физики Земли О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва

Аннотация. Отмечено, что изменения приземной температуры в приповерхностном слое атмосферы происходят неравномерно, в рамках исследования проблемы изменения климата актуально выполнение анализа вариаций температуры воздуха в разных точках нашей планеты, в частности, важно проведение такого рода исследований для регионов, где наблюдается деградация ледников. Выполнен анализ временной динамики среднегодовых значений температуры воздуха по данным инструментальных наблюдений за вариациями температуры на высокогорной метеостанции Цугшпитце с 1901 по 2024 г. С применением метода линейной регрессии показан рост температуры. Выделение трендовой составляющей методом сингулярного спектрального анализа демонстрирует увеличение темпа роста температуры с 1969 г.

Ключевые слова: температура воздуха, рост, метод сингулярного спектрального анализа, линейная регрессия.

Изменением климата называют перемену погодных условий и долгосрочные температурные изменения. Причины такой трансформации могут быть естественными, такими как циклические колебания солнечной активности, смена сезонов и деятельность вулканов [2]. Существенным фактором современного потепления климата принимается также антропогенная деятельность, которая по данным многочисленных публикаций [например, 1, 3, 8] определяет не только повсеместный рост температуры в разных регионах земного шара, но и изменения интенсивности и повторяемости экстремальных климатических явлений (засух, наводнений, ураганов и т. д.). Следует отметить, что изменения приземной температуры в приповерхностном слое атмосферы происходят неравномерно [8].

В рамках исследования проблемы изменения климата актуально выполнение анализа вариаций температуры воздуха в разных точках нашей планеты, в том числе, важно проведение такого рода исследований для регионов, где наблюдается деградация ледников, каким и является Цугшпитце.

Гора Цугшпитце – самая высокая точка Германии, ее высота составляет 2962 м, располагается в Альпах, на юге страны (Бавария), в 11 км от городка Гармиш-Партенкирхен [5].

На флангах Цугшпитце расположены три ледника, два из которых (Северный Шнефернер и Холленталфернер), расположенные на Цугшпицплатт (плато к югу от вершины Цугшпице), являются крупнейшими в Германии, и относительно небольшой Южный Шнефернер. До 1900 г. Северный Шнефернер и Южный Шнефернер были одним крупным ледником. По наблюдениям за ледниками с 1980 г. отмечается значительное сокращение их площадей. В среднем ежегодно тает около 80 см льда. На 2018 г. общая площадь сократилась до 18 га, из которых около 10 % приходилось на Южный Шнефернер.

Ледник Холлентальфернер находится на восточном склоне горы Цугшпитце. Сравнение изображений Google Earth 2000 и 2009 г. показывает отступление главного конечного языка ледника на 40 м. Язык также сократился на аналогичную величину в ширину.

Все три ледника на склонах горы Цугшпитце сильно пострадали от экстремальных температур, зафиксированных летом 2022 г. Снимки в районе ледника Южный Шнефернер, полученные спутниками Copernicus Sentinel-2 в 2016 и 2022 гг. показали, что на леднике наблюдается значительное сокращение площади льда. Площадь ледника сократилась на 50 % с 2018 по 2022 г. Из-за ограниченной остаточной массы его ледяного покрова относительно профиля склона Южный Шнефернер перестал течь вниз по склону, что является важным критерием для классификации ледяной массы как «ледника». На сегодняшний день ледники Северный Шнефернер и Холлентальфернер, каждый площадью примерно 16 га, еще классифицируются как ледники, но они продолжают активно таять.

В ходе настоящей работы выполняется анализ временной динамики среднегодовых значений температуры воздуха по данным инструментальных наблюдений за вариациями температуры на высокогорной метеостанции Цугшпитце.

Рассматривались вариации среднегодовых значений температуры воздуха за период с 1901 по 2024 г. Метеостанция Цугшпитце расположена на высоте 2574 м. Ее географические координаты: 47 °25'00" с. ш., 10 °58'59" в. д.

Для определения роста температуры со временем в работе использовалась линейная регрессия – это метод анализа данных, который математически моделирует неизвестную или зависимую переменную и известную или независимую переменную в виде линейного уравнения. Оценка подгонки линейной регрессии выполнялась на основе анализа коэффициента детерминации.

В настоящей работе с целью выделения трендовой составляющей использовался метод сингулярного спектрального анализа, который заключается в декомпозиции временного ряда на его составляющие, называемые эмпирическими компонентами [6].

Алгоритм сингулярного спектрального анализа состоит в следующем [6; 7].

На первом этапе исходный временной ряд разбивается на оконные последовательности, затем каждая последовательность преобразуется в траекторную матрицу, в которой время представлено в виде строк, а взаимодействие между элементами временной последовательности в виде столбцов.

На следующем этапе с целью выделения эмпирических компонент ряда используется сингулярное разложение (аппроксимация матрицы через линейную

комбинацию базисных векторов), при этом базисные векторы получаются из диагональных элементов матрицы сингулярных значений, а эмпирические компоненты – из произведения матрицы левых сингулярных векторов на транспонированную матрицу правых сингулярных векторов.

Каждая эмпирическая компонента содержит информацию о ряде определенной частоты и длины внутри оконной последовательности. Для выделения тренда необходимо сгруппировать собственные тройки с медленно меняющимися сингулярными векторами [7].

На рисунке приведены вариации среднегодовых значений температуры воздуха за период 1901 по 2024 г. по данным метеостанции Цугшпитце. Максимальная среднегодовая температура наблюдалась в 2024 г. и составила 0,55 °С. Минимальная среднегодовая температура наблюдалась в 1919 г. и составила –3,70 °С. Средняя среднегодовая температура в период с 1901 по 1968 г. составляет –2,49 °С. Средняя среднегодовая температура в период с 1969 по 2024 г. составляет –0,98 °С, т. е. на 1,51 °С больше по сравнению с периодом 1901–1968 гг.

Кроме того, на рисунке приведены вариации трендовой составляющей, рассчитанной с помощью метода сингулярного спектрального анализа. Визуальный анализ данных рисунка показал, что темп роста температуры значительно увеличился с 1969 г. Это хорошо отображает динамика трендовой составляющей, рассчитанной с помощью метода сингулярного спектрального анализа.

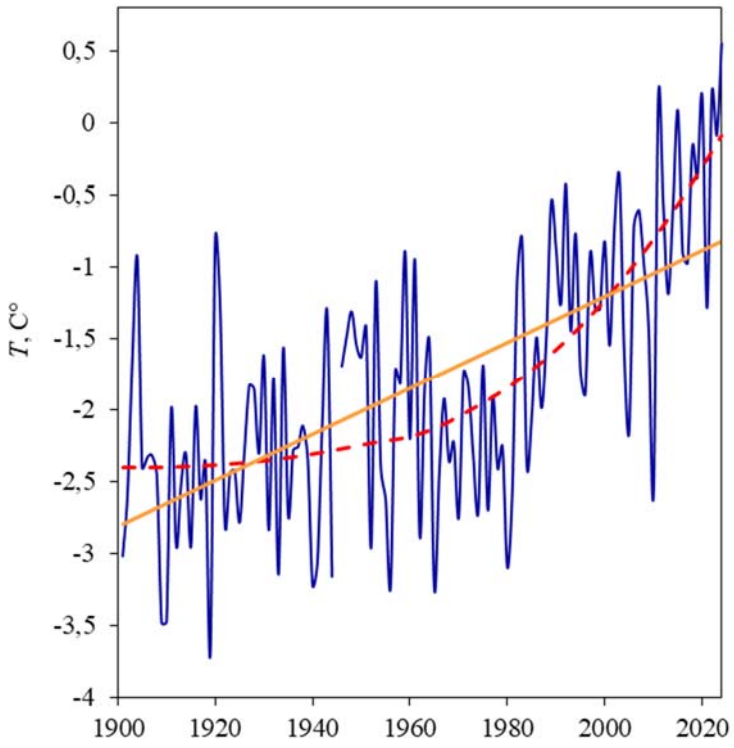


Рис. Вариации среднегодовых значений температуры воздуха по данным метеостанции Цугшпитце за период с 1901 г. по 2024 г. ; красные линии – вариации трендовой составляющей, рассчитанной с помощью метода сингулярного спектрального анализа; оранжевые линии – результаты линейной регрессии

Результаты регрессионного анализа для временного интервала с 1901 по 2024 г. демонстрируют рост температуры со временем, коэффициент детерминации линейной регрессии составляет 0,40. Лучше линейной зависимостью аппроксимируются вариации температуры с 1969 г., коэффициент детерминации линейной регрессии составляет 0,53.

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИДГ РАН «Преобразование геофизических полей как основной фактор межгеосферных взаимодействий» (№ 125012700798–8) и в рамках государственного задания ИФЗ РАН.

Список литературы

1. *Будыко М. И*. Климат в прошлом и будущем. Л. : Гидрометеоиздат, 1980. 351 с.

2. *Кислов А. В*. Климат в прошлом, настоящем и будущем. М. : Интерпериодика, 2001. 352 с.

3. *Логинов В. Ф., Микуцкий В. С.* Изменения климата: тренды, циклы, паузы. Минск : Беларуская навука, 2017. 179 с.

4. *Максимова Т. Г., Попова И. Н*. Эконометрика : учеб.-метод. пособие. СПб. : Университет ИТМО, 2018. 70 с.

5. *Рябова С. А*. Исследование мультифрактальности температуры по данным метеостанции Цугшпитце // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2024. Т. 60, № 1. С. 26–32. https://doi.org/10.31857/S0002351524010038

6. *Elsner J. B., Tsonis A. A*. Singular Spectrum Analysis. A new tool in time series analysis. New York: Springer Science & Business Media, 1996. 164 p.

7. *Golyandina N., Zhigljavsky A*. Singular Spectrum Analysis for time series. Springer Briefs in Statistics. Heidelberg, New York, Dordrecht, London : Springer, 2013. 119 p.

Секция

МОНИТОРИНГ, МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

УДК 556.16+571.5

Ландшафтные и структурно-гидрографические предпосылки формирования экстремального стока

И. Ю. Амосова (irinaamosova_83@mail.ru)[1,2], О. В Гагаринова (whydro@irigs.irk.ru)[1]

[1]*Институт географии им. В. Б. Сочавы, г. Иркутск*
[2]*Иркутский государственный университет, г. Иркутск*

Аннотация. Проведен анализ ландшафтных, морфометрических, гидрологических и структурно-гидрографических характеристик бассейна р. Голоустной. На основе закономерностей строения речных систем выделены области формирования, транзита и аккумуляции стока. Пространственный анализ структурно-гидрографических особенностей речных систем в различных ландшафтно-гидрологических комплексах позволяет сформулировать общие закономерности условий формирования стока территории и уточнить границы областей стокофрмирования. Совместный анализ ландшафтно-гидрологических и структурно-гидрографических характеристик позволил определить величину без пространственного дополнения наблюдательной сети. Представлена картосхема областей стокоформирования в бассейне р. Голоустной в соответствии с ландшафтно-гидрологическими комплексами.

Ключевые слова: ландшафтно-гидрологическое исследование, структурно-гидрографическая индикация, максимальная водоносность, экстремальный сток

Введение

Формирование стока на водосборе в значительной степени зависит от ландшафтной структуры территории, которая определяет условия трансформации атмосферного увлажнения в поверхностный сток и инфильтрацию в подземные горизонты, расходы на испарение и транспирацию растительностью, аккумуляцию в микропонижениях рельефа и болотных комплексах и т. д. Отсутствие наблюдательной гидрометеорологической сети в верховьях бассейнов для оценки стока речных систем создает необходимость привлечения структурно-гидрографического анализа на основе ландшафтных признаков. Исследование ландшафтно-гидрологических и структурно-гидрографических особенностей речных систем выполнен на примере бассейна р. Голоустной.

Объекты и методы

Бассейн р. Голоустной расположен в пределах Хамар-Дабанского гидрологического района [8]. Исток реки находится на Онотской возвышенности, а ее долина прорезает Приморский хребет и впадает на западном берегу южной котловины оз. Байкал. В бассейне р. Голоустной широко распространены карстующиеся породы, некоторые притоки поглощаются карстовыми полостями. Речная сеть бассейна формируется и дренирует первичный подветренный юго-восточный склон Приморского хребта, в устьевой области отмечается наименьший слой осадков, менее 250–300 мм в год. Весь поверхностный сток формируется и концентрируется в верховьях рассматриваемого бассейна [4].

При недостаточности и отсутствии режимных наблюдений эффективным способом оценки величин стока с водосборов является ландшафтно-гидрологический [3; 5] и структурно-гидрографический анализ территории. Структурно-гидрографический подход позволяет на основе закономерностей строения речных систем определить их водоносность, области формирования, транзита и аккумуляции стока, дать оценку экстремальной водности рек при отсутствии наблюдательной сети [1; 2; 6; 7]. Использование ландшафтно-гидрологического подхода дает возможность выявить общие пространственно-временные закономерности формирования стока на территории в различные фазы увлажнения, а также позволяет оценить изменения режима водоотдачи и уточнить границы областей формирования, транзита и аккумуляции стока.

Результаты

Формирование поверхностного стока происходит в элементарной сети области формирования стока, представленной временными и эпизодическими водотоками. Время добегания по элементарной сети невелико, а по длине реки происходит интенсивное наращивание порядка, в результате чего при достижении речной системой наивысшего его значения, основной сток достигает транзитных водотоков ближайших младших порядков. Количество водно-эрозионных элементов первого порядка при этом сокращается. В замыкающем створе области аккумуляции стока наблюдается концентрация стока и практически полное его отсутствие в элементарной сети.

Ландшафтно-гидрологическое районирование бассейна р. Голоустная не противоречит структурно-гидрографическим параметрам водосбора, но имеет определенные отклонения, по мнению авторов, обусловленные историей геолого-морфологического формирования данной территории и требующего отдельного исследования.

Ландшафты бассейна реки представлены 12 видами, которые обобщены в несколько групп по видовому составу растительности, морфоструктурным параметрам и характеризуются однотипными гидрологическими функциями в различные фазы водного режима.

В области формирования стока комплексную стокоформирующую и стокорегулирующую роль выполняют горно-таежные темнохвойные вершинные и светлохвойные сосново-лиственничные сообщества на слабо- и среднерасчлененных склонах (рис.).

Осадки, поступающие в горно-таежные кедрово-пихтовые ландшафты, расположенные на вершинных выположенных поверхностях обеспечивают невысокую, но достаточно постоянную водоотдачу. Основная доля поверхностного стока формируется в сосново-лиственничных ландшафтах возвышенных склонов (до 1200 м), что обусловливает формирование небольших водотоков, верховий малых рек. В многоводные дождливые периоды в данных темнохвойных и светлохвойных ландшафтах формируется высокий и очень высокий поверхностный сток. В свою очередь, хорошо развитая водно-эрозионная сеть (367 элементов первого порядка), общей протяженностью более 800 км определяет благоприятные предпосылки формирования экстремального стока (табл.).

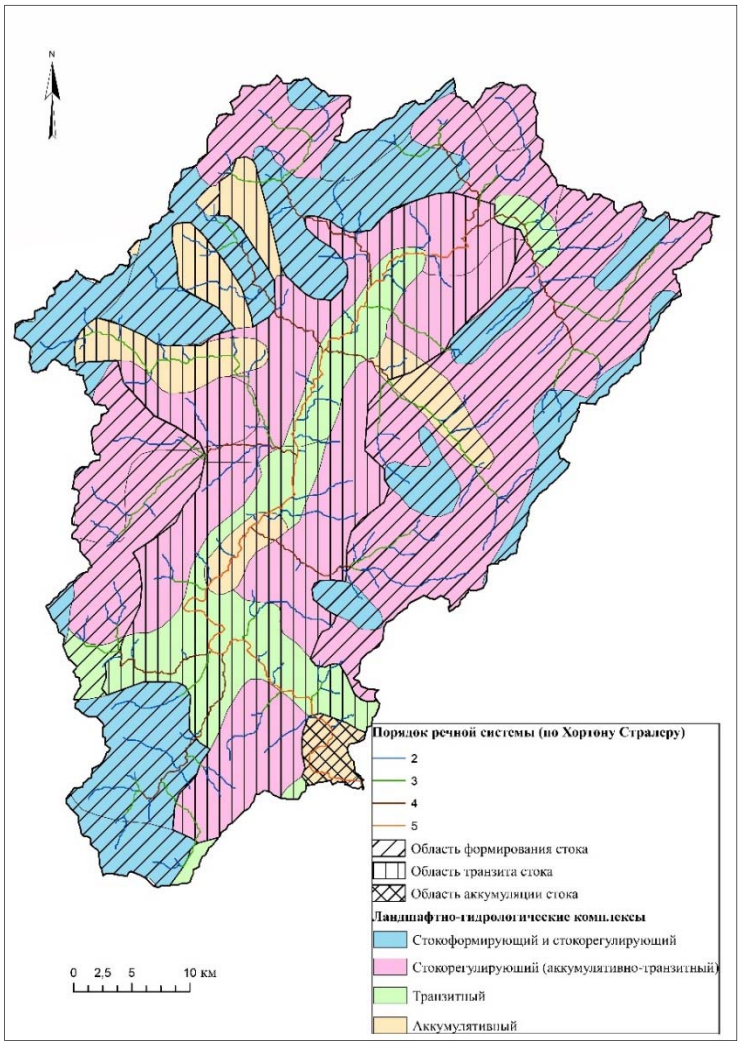


Рис. Области стокоформирования в бассейне р. Голоустной

Таблица

Дифференциации структурно-гидрографических характеристик речной системы Голоустной по областям стока

Структурно-гидрографические характеристики	Область формирования стока	Область транзита стока	Область аккумуляции стока
Площадь, км^2	1327	925	25,4
Средняя / максимальная высота водосбора, м	848 / 1158	739 / 1120	624 / 978
Средняя / максимальная высота тальвега, м	780 / 1027	662 / 960	505 / 807
Средний / максимальный уклон водосбора, °	4 / 23	5/ 25	7 / 22
Средний / максимальный уклон водной поверхности, °	3 / 19	3 / 20	3 / 17
Суммарная длина водно-эрозионной сети, км	858	734	30,6
Порядок водно-эрозионной сети по классификации Хортона – Стралера	1,2,3,4	1,2,3,4,5	1,2,5
Магнитуда, шт	367	258	6
Суммарная длина элементов I порядка, км	473	331	13,1

В области транзита стока в бассейне р. Голоустной стокорегулирующую и аккумулятивно-транзитную функцию выполняют темнохвойные пихтово-кедровые склоновые и подгорные светлохвойные сосновые ландшафты. В условиях средней водности водоотдача с данных комплексов равномерная и относительно низкая, что обусловлено факторами инфильтрации в подземные горизонты и аккумуляции влаги в ландшафтах. Также наличие водотоков со слепыми устьями,представляющие локальное понижение рельефа,являются участками аккумуляции стока в меженный период, ав условиях переувлажнения территории, служат источниками дополнительного поступления воды в речную сеть и на прилегающую территорию. При высоких осадках, в паводочный период эти ландшафтные комплексы выполняют стокоформирующую роль с высокой интенсивностью стока. Достаточное количество эпизодических и временных тальвегов (258 шт.) области транзита стока позволяет принять транзитный сток с вышележащей части бассейна и формировать значительный местный его объем.

Злаковые луга и светлохвойные остепненные ландшафтные комплексы, прилегающие и частично занимающие долину реки, характеризуются низкими аккумулирующими свойствами и выполняют транзитную функцию. Исключение составляют заболоченные долины притоков с редким темнохвойным древостоем и отдельные лугово-болотные комплексы в долине главной реки и области аккумуляции стока, которые обладают высокими аккумулирующими свойствами в период любой водности. Область аккумуляции стока обладает неблагоприятными условиями стокоформирования для периодов средней и пониженной водности. Тем не менее в периоды повышенной водности наличие эпизодических и временных водотоков, характеризующиеся достаточно большими уклонами как самих тальвегов, так водосбора этой области, допускает хоть и незначительное, но местное формирование стока (до 10 $м^3/с$).

Совместный анализ ландшафтно-гидрологических и структурно-гидрографических характеристик позволил определить величину экстремальной водоносной способности при условии заполнения всей совокупности тальвегов речной системы Голоустной. В области формирования стока водоносность составит 604 $м^3/с$, в замыкающем створе – 970 $м^3/с$.

Выявленные закономерности и особенности формирования экстремального стока предполагают граничное положение, показывают максимально возможный объем, который может транспортировать конкретная речная система.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИГ им. В. Б. Сочавы СО РАН (№ государственной регистрации АААА-А21-121012190059-5

Список литературы

1. *Амосова И. Ю., Ильичева Е. А.* Структурно-гидрографический подход к определению экстремально высокого стока // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2018. Т. 23. С. 17–27.

2. *Амосова И. Ю., Ильичева Е. А.* Структурно-гидрографический подход к определению областей формирования стока рек бассейна оз. Байкал в период максимальной и экстремальной водности // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2024. Т. 48. С. 3–24.

3. *Антипов А. Н., Федоров В. Н.* Ландшафтно-гидрологическая организация территории. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. 255 с.
4. *Афанасьев А. Н.* Водные ресурсы и водный баланс бассейна озера Байкал. Новосибирск : Наука, 1976. 238 с.
5. *Гагаринова О. В.* Ландшафтно-гидрологические закономерности формирования стока в бассейне оз. Байкал // География и природные ресурсы. 2012. № 3. С. 55–60.
6. *Ильичева Е. А.* Структурно-гидрографические закономерности речных систем юга Восточной Сибири // Географические закономерности гидрологических процессов юга Восточной Сибири. Иркутск : Ин-т географии СО РАН, 2003. С. 29–57.
7. *Корытный Л. М.* Бассейновая концепция в природопользовании. Иркутск : Ин-т географии СО РАН, 2001. 163 с.
8. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 16. Вып. 3. Л. : Гидрометеоиздат, 1973. 400 с.

УДК 556.535:551.583

Изменчивость водного и ледового режима р. Пенжина в нижнем течении в современных условиях

К. Р. Байгубеков (baukir@gmail.com), П. Ю. Семкин (pahno@list.ru)
Тихоокеанский океанологический институт ДВО РАН им. В. И. Ильичева, г. Владивосток

Аннотация. Исследуется временная изменчивость водного и ледового режима р. Пенжина на основе данных гидрологических наблюдений за период 2008–2022 гг. Цель работы – анализ изменений в водном и ледовом режимах реки в современных климатических условиях. Использованы данные гидрологического поста у с. Каменское, включая ежедневные уровни воды, расходы и ледовые явления. Установлено, что продолжительность ледостава сократилась по сравнению с архивными данными 1968–1970 гг., а процесс установления полного ледостава стал более длительным. Выявлены особенности сезонного хода толщины льда и восстановлены ежедневные расходы воды на основе кривых связи уровней и расходов. Данное исследование станет основой для комплексного изучения изменчивости водного и ледового режима р. Пенжина.

Ключевые слова: Пенжина, водный режим, ледовый режим, толщина льда, кривые расходов.

Введение

Река Пенжина расположена на северо-востоке Камчатского края и протекает по территории Корякского округа. Она берет свое начало на Срединном хребте Камчатки и впадает в Пенжинскую губу Охотского, образуя эстуарий, вместе с р. Таловкой. Её длина около 713 км, площадь водосборного бассейна составляет 71 600 км^2 в створе с. Каменское в 69 км от устья. В верховьях Пенжина – горная река с порогами и перекатами, в среднем и нижнем течении выходит на равнину, замедляется и протекает по заболоченной низменности, разбиваясь на протоки [2].

Питание реки преимущественно снеговое с ярко-выраженным весенне-летним половодьем и дождевыми паводками. Она является второй по величине стока, после р. Камчатки. Замерзает в октябре-ноябре, вскрывается в мае, при этом ледоход сопровождается заторами и подтоплениями [9].

Бассейн реки малонаселенный, в основном преобладает горная тайга и тундра. Климат резко-континентальный, внутригодовая амплитуда температур составляет более 40 °С, отличается суровой зимой и коротким и прохладным летом. Осадки умеренные, но зима многоснежная. В нижнем течении имеет важное значение для местных экосистем и ограниченного хозяйственного использования. Судоходство ограничено из-за мелководья и порогов [8].

Цель работы – проанализировать изменения водного и ледового режимах реки Пенжина в нижнем течении в современных климатических условиях и восстановить ежедневные расходы воды по ежедневным измерениям уровня воды, используя регрессионные уравнения кривых зависимостей Q(H) при свободном русле.

Изучение ледового режима позволит прогнозировать весенние подъема уровня реки, которые могут приводить к подтоплениям территорий населённых пунктов и инфраструктуры, расположенных вблизи реки. Также изменения ледового режима могут служить индикаторами климатических изменений, происходящих в бассейне реки, а знание водного режима реки необходимо для планирования судоходства, особенно в условиях сезонных изменений уровня воды и ледовых явлений и оптимизации транспортных маршрутов и рисков.

Знания о водном и ледовом режимах помогут для более точных расчетов объема стока при проектировании и возможном дальнейшем строительстве приливной электростанции в Пенжинской губе.

Описание поста

Гидрологический пост расположен у южной окраины села Каменское, расположен на правом берегу, состоит из реперов и свай. Отметка нуля поста – 7,21 абс, открыт 01.10.1956. Гидроствор № 1 находится в 0,7 км ниже гидропоста, оборудован переправой с ездовым и разметочным тросами, гидроствор № 2 (зимний) – в 1,5 км выше. Толщина льда измеряется на середине реки [6].

Долина реки слабоизвилистая, шириной 2–4 км по верху, склоны покрыты кустарником и низкорослыми деревьями, правый склон – очень крутой, высотой 40–60 м, левый – террасированный. К долине примыкает крупнохолмистая местность. Пойма левобережная, шириной 2–3 км, начинает затопляться при уровне 900 см [6].

Русло извилистое, песчано-галечное, местами каменистое. Правый берег очень крутой скальный, левый высотой 6–10 м. Во время межени обнажаются многочисленные осередки и косы [6].

В данной работе будут использованы данные, полученные с сайта АИС ГМВО за 2008–2022 гг. [1], а также данные из гидрологических ежегодников за 1968–1970 гг. [4–6].

Водный режим

По данным АИС ГМВО [1] были построены графики хода расходов воды за период 2008–2012 гг. (рис. 1). Черными линиями на графике обозначены среднегодовые расходы воды.

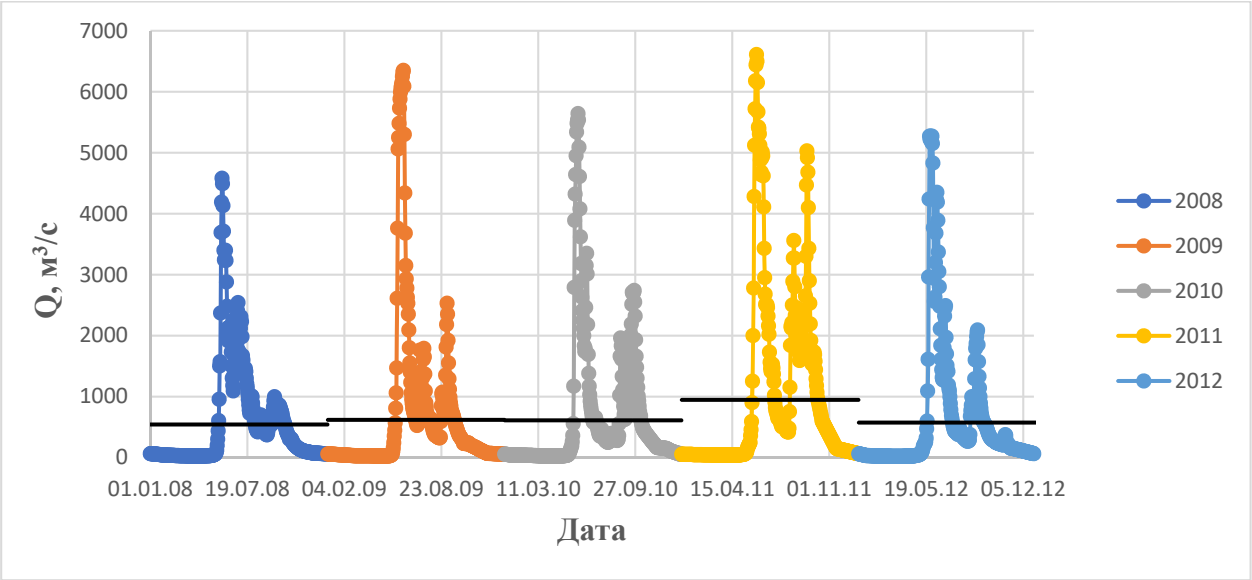


Рис. 1. Ежедневный ход расходов воды р. Пенжина – с. Каменское за 2008–2012 гг.

Как видно из графика, максимальные расходы воды соответствуют периоду половодья, также заметен характерный паводок, наблюдающийся осенью, после прохождения которого наступает осенне-зимняя межень, длительностью около 6–8 мес. Половодье характеризуется резким подъемом воды и увеличением расхода в несколько раз, нередко сопровождается паводками и длится около двух месяцев. За этот период проходит до 85 % всего стока реки. Зимняя межень отличается низкими уровнями и расходами в течение всего времени, питание реки в этот период преимущественно подземное.

По классификации рек А. И. Воейкова [3] р. Пенжина относится к первой группе, типу I – реки, получающие питание от таяния снега, на равнинах и в невысоких горах до 1000 метров.

Отношение максимального расхода к среднегодовому составляет от 6. 2 до 10. 3, что означает, что по классификации рек Б. Д. Зайкова [7] р. Пенжина относится к I группе – реки с весенним половодьем, а в этой группе к Восточно-Сибирскому типу.

Восточно-Сибирский тип характеризуется высоким весенним половодьем, частыми летними паводками и очень низкой зимней меженью. Такой тип характерен для территории, Яно-Индигирского района, Камчатки, Сахалина и расположенной к востоку от Енисея. Многие реки с площадями бассейнов в десятки и даже тысячи квадратных километров зимой полностью перемерзают [7].

Ледовый режим

Для определения продолжительности ледовых явлений на р. Пенжина, пост с. Каменское, были проанализированы данные о ежедневных уровнях воды, взятых с АИС ГМВО за 2008–2022 гг., включающие в себя данные о ледовых явлениях. Для каждого года определялась дата начала любого установившегося ледового явления, дата начала полного ледостава, дата окончания ледостава и дата полного очищения ото льда. На рис. 2 представлена продолжительность

полного ледостава. Как видно из графика, в последние десятилетия, продолжительность ледостава составляла от 140 до 203 дней, что означает, что она уменьшилась, по сравнению с архивными данными за 1968–1970 гг. (214–215 дней) [4–6]. Однако данное предположение будет еще уточняться в последующих работах.

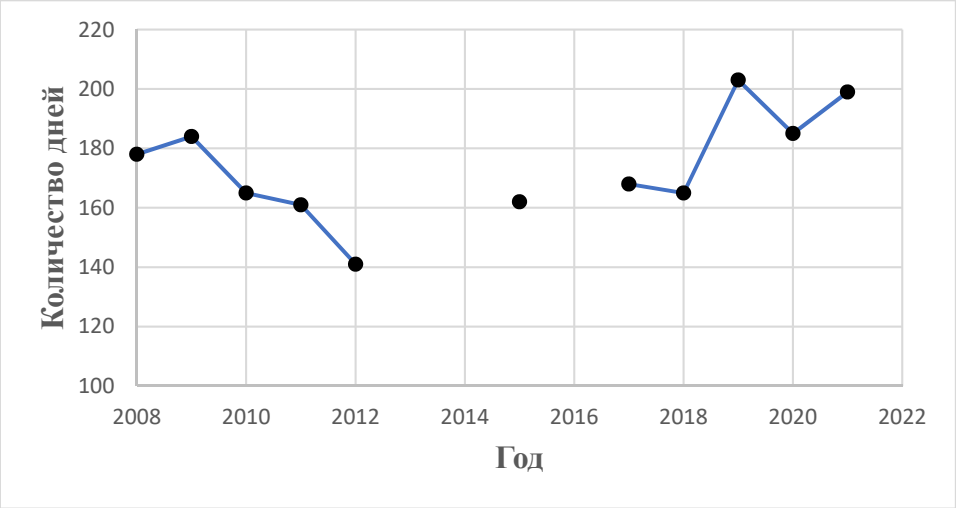


Рис. 2. Продолжительность ледостава за период 2008 – 2022 гг.

На рис. 3 представлена разница между появлением ледовых явлений и началом полного ледостава р. Пенжина. – с. Каменское за 2008–2022 гг. Длительность установления полного ледостава за этот период изменялась от 24 до 60 дней, в то время как в 1968–1970 гг. [4–6], это значение составляло всего 6–13 дней. Это связано с тем, что по данным гидрологических ежегодников, река в этот период замерзала полностью, а по данным АИС ГМВО [1] наступал лишь неполный ледостав. Для расчетов продолжительности ледостава использовалась дата полного покрытия реки льдом.

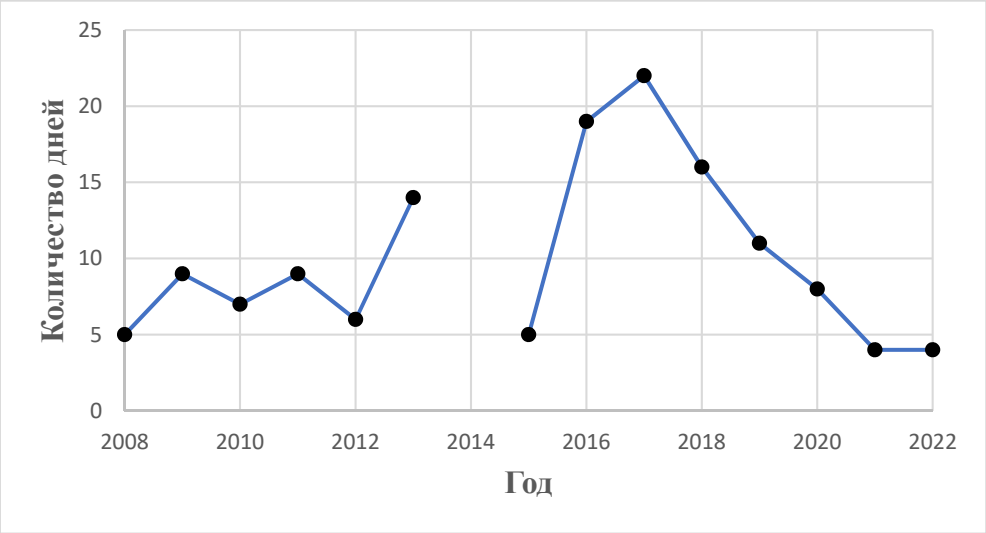


Рис. 3. Длительность освобождения реки ото льда за период 2008–2022 гг.

В ходе анализа ледовых явлений, было замечено, что в конце октября на р. Пенжина устанавливается неполный ледостав, и только к концу ноября-началу декабря, река полностью замерзает.

По данным за 2008–2022 гг. был построен сезонный ход толщины льда (рис. 4). В начале измерений (конец октября – начало ноября) толщина льда составляет от 15 до 30 см и нарастает до 100 – 130 см (за исключением 2016 г.) к середине марта, после чего практически не изменяется до периода таяния.

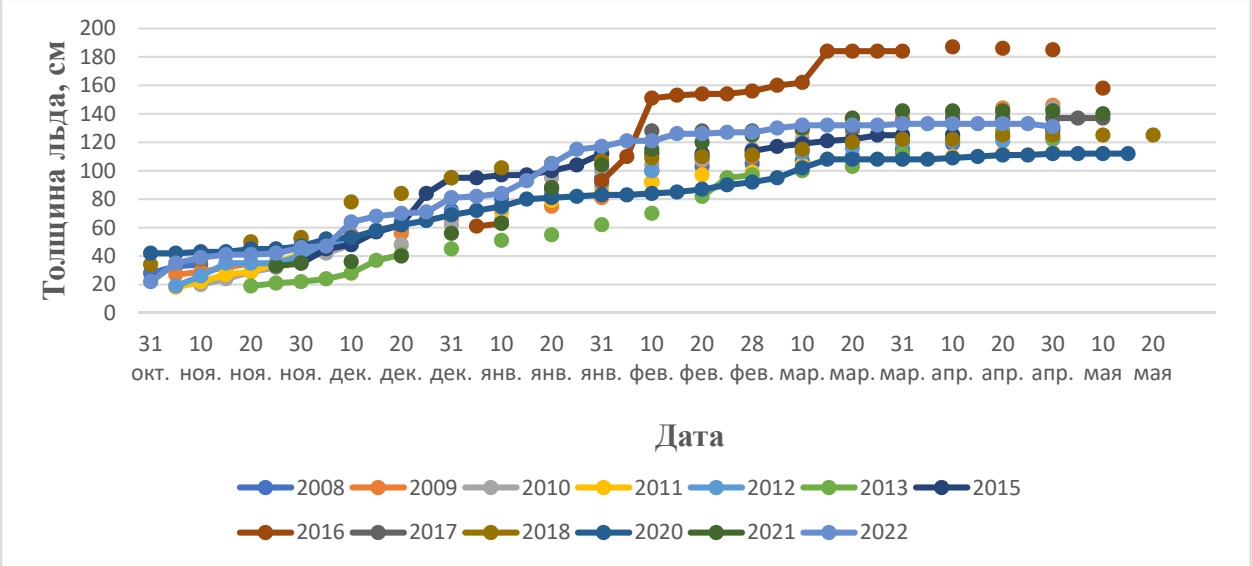


Рис. 4. Сезонный ход нарастания льда за период 2008–2022 гг.

Также был построен ход максимальных значений толщины льда за каждый год (рис. 5). Тренда на увеличение или снижение выявлено не было.

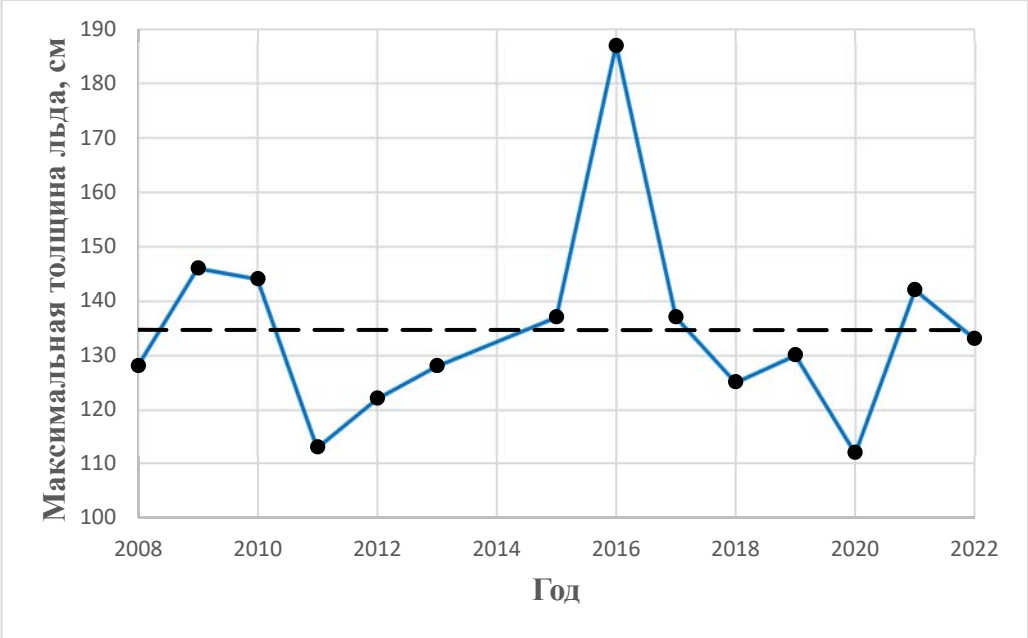


Рис. 5. Максимальная толщина льда за 2008 – 2022 гг.

Восстановление расходов воды

В связи с тем, что в открытом доступе на АИС ГМВО [1], есть ежедневные уровни воды, но нет измеренных и рассчитанных ежедневных расходов воды, было принято решение попытаться восстановить ежедневные расходы воды по измеренным уровням. Для этого за период 2008–2010 гг. были построены кривые связи расходов и уровней Q(H) для свободного русла (рис. 6), но для удобства вычислений, в отличие от классического представления, оси были поменяны местами.

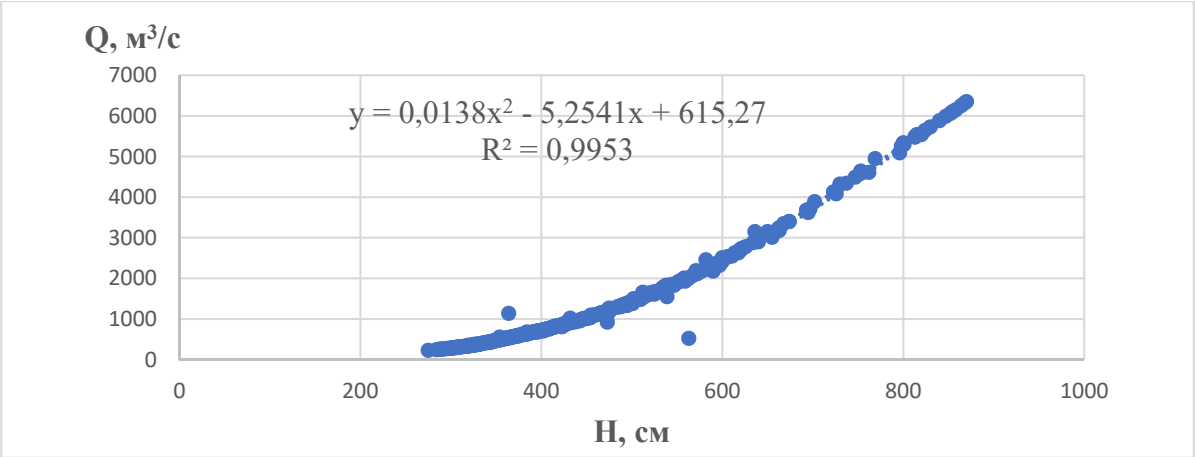


Рис. 6. Кривая Q(H) для свободного русла за период 2008–2010 гг.

Затем с помощью различным уравнений были рассчитаны ежедневные расходы воды для 2011–2012 гг. (рис. 7, 8). Наилучшей аппроксимацией получившейся кривой стало уравнение, представленное на рисунке 6. Среднее отклонение от данных из АИС ГМВО [1] составило 2,1 и 2,4 % соответственно.

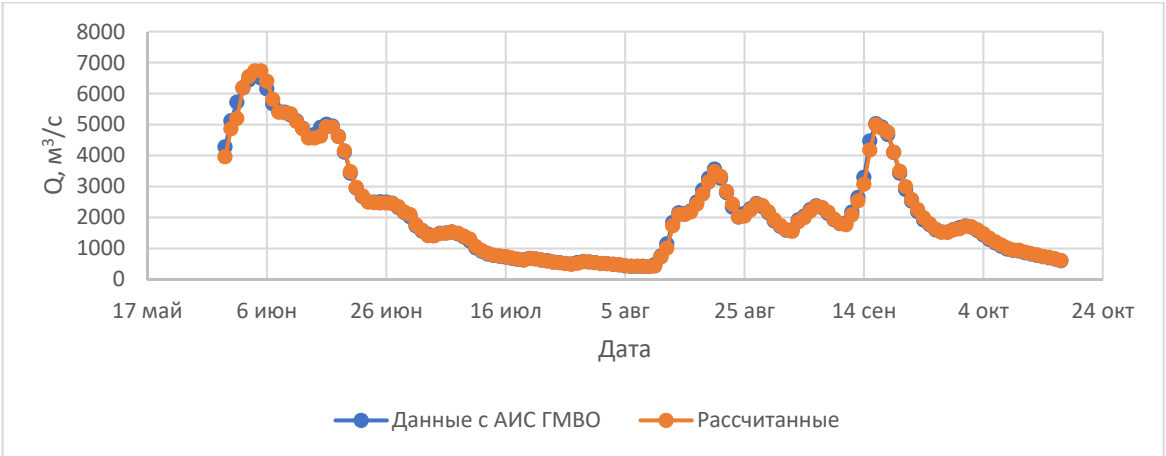


Рис. 7. Ежедневные расходы воды за период свободного русла, взятые из АИС ГМВО и рассчитанные по уравнению линейной регрессии за 2011 год

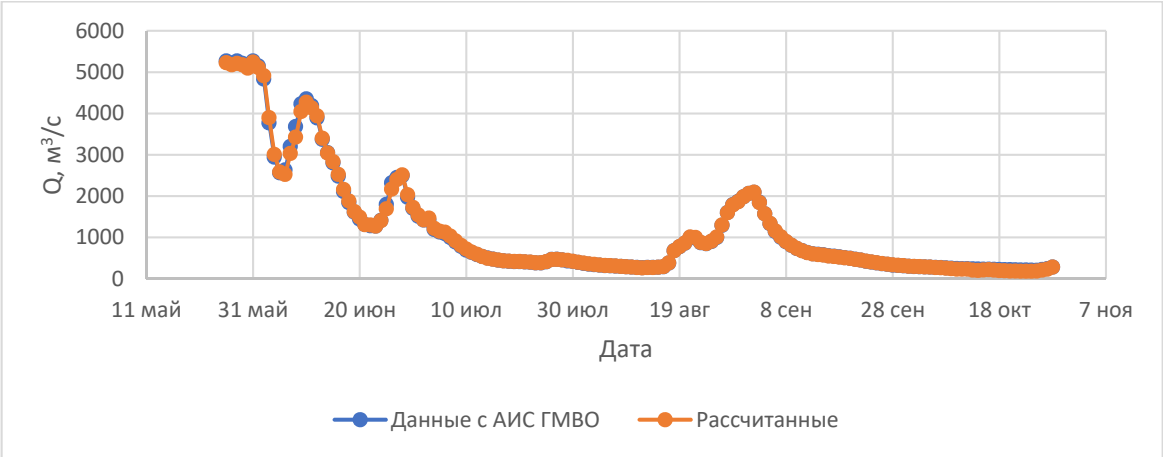


Рис. 8. Ежедневные расходы воды за период свободного русла, взятые из АИС ГМВО и рассчитанные по уравнению линейной регрессии за 2012 год

Таким образом, полученное уравнение регрессии можно использовать для восстановления ежедневных расходов воды по ежедневным уровням для ближайших 2–3 лет наблюдений.

Благодарность

Авторы выражают благодарность Малышевой А. С. (МГУ им. М. В. Ломоносова) и Титиевской Е. В. (РГПУ им. А. И. Герцена) за помощь в поиске и цифровизации исходных данных из гидрологических ежегодников.

Работа выполнена в ТОИ ДВО РАН (Рег. № 124022100077–0) при поддержке РНФ (грант № 23-77-10001).

Список литературы

1. Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО). URL: https://gmvo. skniivh.ru/ (Дата доступа: 17.02.2025)

2. Большая советская энциклопедия. URL: https://dic. academic.ru/ (дата обращения: 17.02.2025)

3. *Воейков А И.* Климаты земного шара, в особенности России. Санкт-Петербург : Картогр. заведение А. Ильина, 1884. 640 с.

4. Гидрологический ежегодник. 1968 г. / под ред. М. А. Комковой, М. Р. Чернышовой. Магадан, 1969. Т. 8, Вып. 8, Т. 9, Вып. 7. 87 с.

5. Гидрологический ежегодник. 1969 г. / под ред. М. А. Комковой, М. Р. Чернышовой. Магадан, 1969. Т. 8, Вып. 8, Т. 9, Вып. 7. 1970. 179 с

6. Гидрологический ежегодник. 1970 г. / под ред. М. А. Комковой, М. Р. Чернышовой. Магадан, 1969. Т. 8, Вып. 8, Т. 9, Вып. 7. 1972. 256 с.

7. *Зайков Б Д.* Очерки гидрологических исследований в России / Под ред. канд. геогр. наук А. П. Доманицкого. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1973. 325 с.

8. Климат России. Научно-прикладной справочник. Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД». URL: http://aisori. meteo.ru/. (дата обращения: 30.05.2015).

9. Современный гидрологический режим нижнего течения реки Пенжины и первые сведения о гидрологических процессах в ее эстуарии (по результатам экспедиции 2014 г.) / С. Л. Горин, М. В. Коваль, А. А. Сазонов [и др.] // Исследования водных биологических ресурсов Камчатки и Северо-Западной части Тихого океана. 2015. Вып. 37. С. 33–52.

УДК 556.54

Гидрологическое обоснование гидроэнергетических параметров Тельмамской ГЭС

Д. Н. Величко (dmitriimacho@gmail.com), Е. Н. Сутырина (ensut78@gmail.com)
Иркутский государственный университет, г. Иркутск

Аннотация. Цель исследования состояла в выполнении комплекса водохозяйственных и водно-энергетических расчетов для предложенной авторами схемы размещения Тельмамской ГЭС. В ходе данной работы была собрана вся имеющаяся исходная гидрологическая информация о среднемесячных расходах воды на постах Мамакан – Тельмама и Мамакан – Мамаканская ГЭС; по уравнению водного баланса восстановлены ряды расходов в створе Тельмамской ГЭС за многолетний период; рассчитаны расходы в створе Тельмамской ГЭС; с применением средств ГИС QGIS и данных SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) установлено соответствия объёмов и площадей определённым уровням водохранилища, выражаемое батиграфическими (топографическими) зависимостями. Рассчитано регулирование стока по календарному гидрологическому ряду по разностно-интегральным кривым. Определены значения мощности и выработки электроэнергии на проектируемой ГЭС при выбранной схеме размещения створа плотины и заданных отметках УМО (уровня мёртвого объёма) и НПУ (нормального подпорный уровня).

Ключевые слова: Тельмамская ГЭС, гидрологические расчеты, водно-энергетические расчеты, регулирование стока, выработка электроэнергии, мощность ГЭС, створ плотины, УМО, НПУ.

Актуальность

Тельмамская ГЭС – проектируемая гидроэлектростанция на р. Мамакан, в бассейне реки Лена. Гидроузел будет строится в суровых климатических условиях Сибири, на многолетнемерзлых грунтах. ГЭС будет находиться в одном каскаде с Мамаканской ГЭС и позволит увеличить суммарную выработку электроэнергии в Мамско-Бодайбинском горнопромышленном районе.

Цель работы – выполнение комплекса водохозяйственные и водно-энергетические расчетов для заданной схемы размещения Тельмамской ГЭС.

В ходе исследования требовалось выполнить задачи:

- собрать исходную гидрологическую информацию о среднемесячных расходах воды на постах Мамакан – Тельмама и Мамакан – Мамаканская ГЭС за многолетний период; восстановить ряд расходов в створе Тельмамской ГЭС по уравнению водного баланса;
- с применением средств ГИС QGIS и данных SRTM выявить соответствия объёмов и площадей определённым уровням водохранилища, которое определяется батиграфическими (топографическими) зависимостями
- рассчитать регулирование стока по календарному гидрологическому ряду по разностно-интегральным кривым;
- определить мощности и выработки электроэнергии на проектируемой ГЭС при выбранной схеме размещения створа плотины и заданных отметках УМО И НПУ.

Выбранная тематика исследования особо актуальна в наше время, так как для развития Мамско-Бодайбинского района требуется мощная энергетическая

база, поэтому помимо существующей Мамаканской здесь необходимо построить Тельмамскую ГЭС. Основным потребителем электроэнергии станет горно-рудный комбинат «Сухой Лог».

Материалы и методы

На рис. 1 представлен вариант размещения створа Тельмамской ГЭС, который показан красной линией. На этом же рисунке показана зона затопления, определенная при предложенном авторами варианте НПУ и определенная с использованием с применением средств ГИС QGIS и данных SRTM.

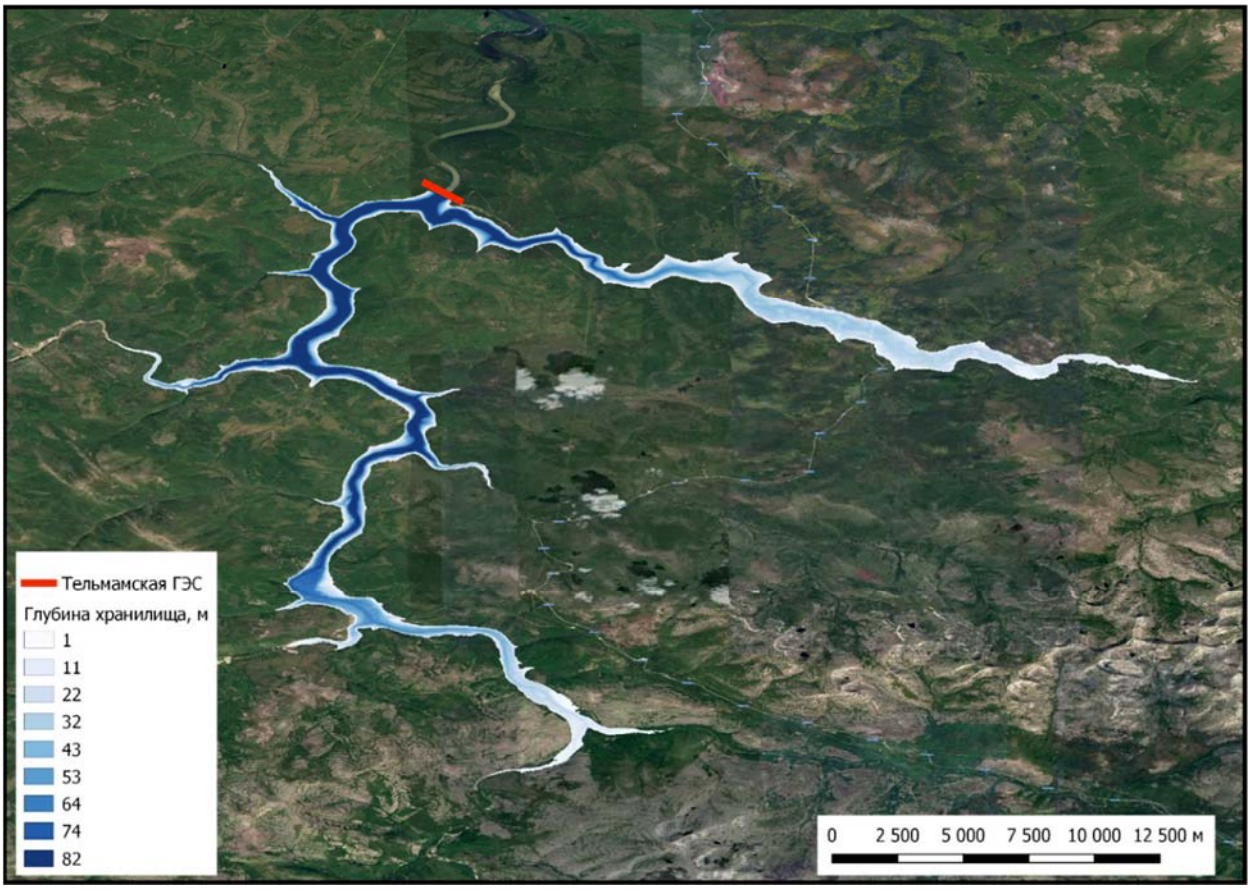


Рис. 1. Створ размещения (красная линия) и зона затопления проектируемым водохранилищем Тельмамской ГЭС

По данным SRTM построены батиграфические кривые. Кривая объемов показана на рис. 2.

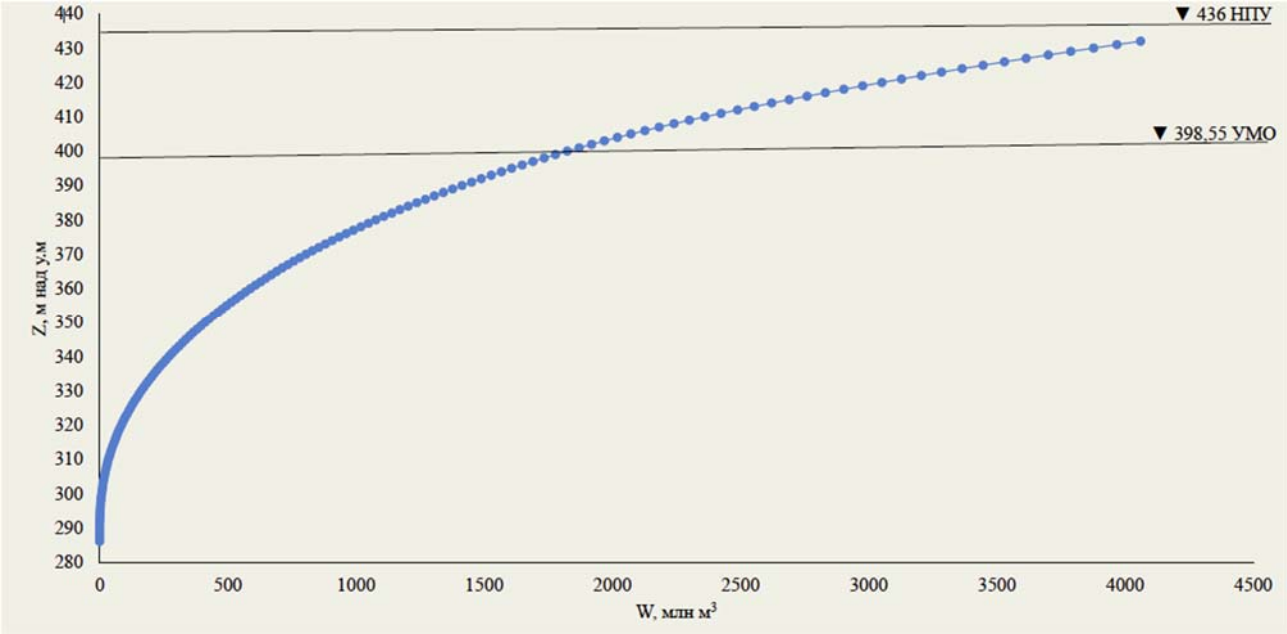


Рис. 2. Кривая связи уровней в верхнем бьефе водохранилища Тельмамской ГЭС и объемов водохранилища

Результаты исследования

УМО и НПУ принято авторами на уровне: УМО – 398, 55 м НПУ – 436 м. УМО задано, так чтобы разница объемов при НПУ и УМО составила примерно 1/2 от годового объема стока, чего по расчетным данным достаточно для достижения высокого показателя использования. Мёртвый объем проверен на возможность вместить наносы, которые будут отлагаться в водохранилище за период его эксплуатации в данной работе за 100 лет и более. Объём наносов за период эксплуатации в 100 лет составит $W_н = 14{,}3$ млн м^3. Время заиления мёртвого объёма равняется 12249 лет. Для во избежание прогрева воды и ухудшения ее качества в ходе работы проверено, что средние глубины при УМО составляли более 2,5 м, а площади мелководий с глубинами менее 2 м занималине более 15 % от общей площади зеркала при УМО.

Величина сработки водохранилища (разность между НПУ и УМО) по современным представлениям о проектировании и эксплуатации гидроузлов не должна превышать 1/3 от максимального напора при НПУ. В более ранних проектах это положение на выполнялось [1]. В данной работе глубина сработки составляет 37,45 м при напоре 150 м.

Полезный объем взял близким к половине годового стока, что позволяете зарегулировать сток с использованием почти 98 % стока для выработки электроэнергии.

Значения расходов в створе Тельмамской ГЭС за период с 2008 по 2022 г. были определены по уравнению водного баланса на основании использования расходов и уровней в створе Мамаканской ГЭС.

Дальше произведен расчет регулирования расходов Тельмамской ГЭС с помощью построения разностно-интегральных кривых стока (РИК) [2], показанных на рис. 3: основная кривая (синяя) – отвечает пустому водохранилищу

(УМО); контрольная (оранжевая) отвечает полному водохранилищу (НПУ); между ними (серая) – разностно-интегральная кривая зарегулированного стока, которая показывает возможность регулирования расходов при заданном объеме регулирующей емкости водохранилища.

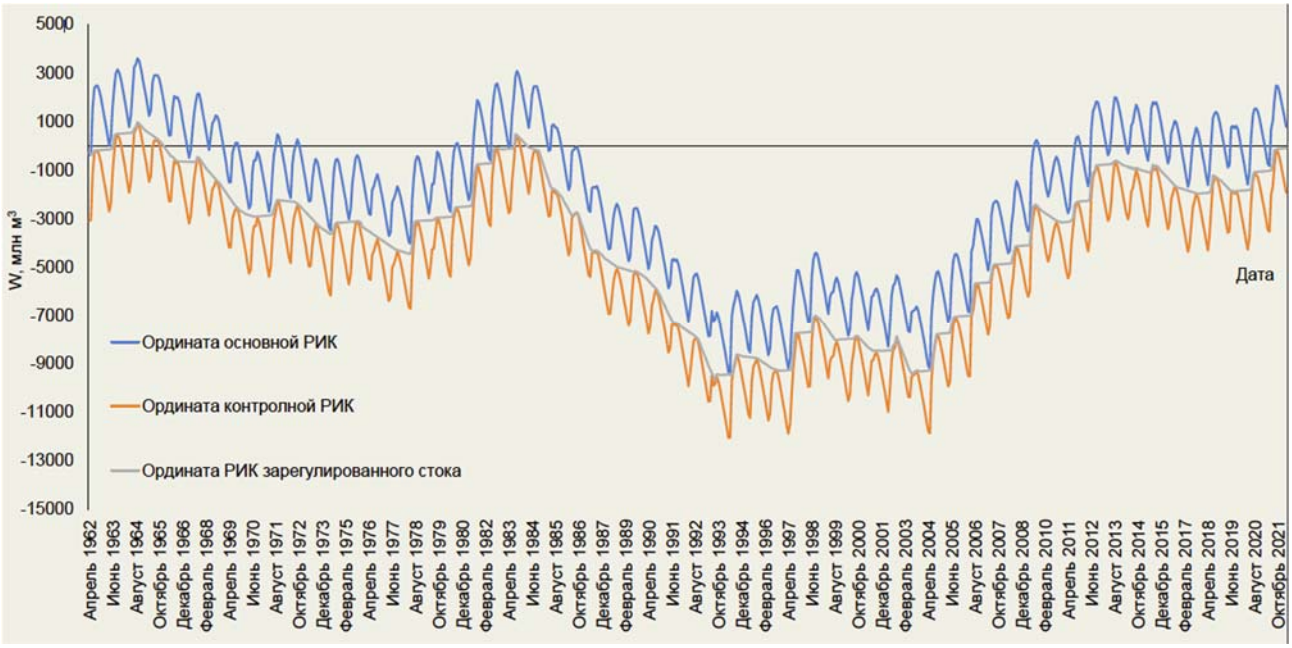


Рис. 3. Разностно-интегральные кривые

Далее были произведены водно-энергетические расчеты и составлен сокращенный паспорт водно-энергетических характеристик Тельмамской ГЭС (табл.)

Таблица

Паспорт водно-энергетических характеристик Тельмамской ГЭС

1. Характеристики стока	
Среднегодовой сток W, млн м^3	5605
Максимальный среднемесячный расход $Q_{макс}$, м^3/с	1134
Минимальный среднемесячный расход $Q_{мин}$, м^3/с	9,16
Среднемноголетний расход Q, м^3/с	178
2. Характеристики водохранилища	
Полный объём водохранилища $W_{полн}$, млн м^3	4446
Мёртвый объём водохранилища $W_{УМО}$, млн м^3	1758
Полезный объём водохранилища $W_{полез}$, млн м^3	2688
Коэффициент ёмкости водохранилища β , %	47,9
Глубина сработки водохранилища $h_{срб}$, м	37,5
Отметка уровня воды при НПУ $Z^{ВБ}_{НПУ}$, м	436
Отметка уровня воды при УМО $Z^{ВБ}_{УМО}$, м	398,6
Площадь зеркала при НПУ $Ω_{НПУ}$, млн м^2	99,4
Площадь мелководий с глубиной до 2 м при НПУ, млн м^2	3,2
Площадь зеркала при УМО $Ω_{УМО}$, млн м^2	44,4
Площадь мелководий с глубиной до 2 м при УМО, млн м^2	2,3

Окончание табл.

3. Характеристика зарегулированного режима ГЭС	
Максимальный зарегулированный расход $Q^{зар}_{макс}$, м^3/с	600
Минимальный зарегулированный расход $Q^{зар}_{мин}$, м^3/с	70
Объём холостого сброса $W_{хсбр}$, млн м^3	93
Объём используемого стока $W_{исп}$, млн м^3	5506
Коэффициент использования стока $К_{исп}$, %	98
Максимальный расход ГЭС $Q^{ГЭС}_{макс}$, м^3/с	320
Минимальный расход ГЭС $Q^{ГЭС}_{мин}$, м^3/с	70
Максимальный напор $Н_{макс}$, м	150
Минимальный напор $Н_{мин}$, м	110
Средневзвешенный напор $Н_{ср.вз}$, м	140
Среднегодовая выработка электроэнергии ГЭС по зарегулированному водотоку $Э^{ГЭС}_{ср}$, млрд кВт·ч	1,80
Максимальная мощность ГЭС $N^{ГЭС}_{макс}$, МВт	403
Минимальная мощность ГЭС $N^{ГЭС}_{мин}$, МВт	65

Заключение

В ходе данной работы для выполнения комплекса водохозяйственных и водно-энергетических расчетов были определены мощности и выработки электроэнергии Тельмамской ГЭС: максимальная мощность составила 403 МВт, минимальная 65 МВт и среднегодовая выработка электроэнергии составила 1,80 млрд кВт·ч, что превосходит этот показатель по сравнению с предложенным ранее проектом [1]. Средствами ГИС QGIS определена площадь зоны затопления, которая при выбранном НПУ составила 99,4 млн м^2. При представленном авторами варианте размещения площади мелководий с глубинами менее 2 м будут занимать около 5 %, что позволит избежать прогрева воды и ухудшения ее качества.

Список литературы

1. Проектирование Тельмамской ГЭС на реке Мамакан. Технология Бетонирования монолитной пролетной конструкции на гребне плотины // Архив электронных ресурсов СФУ: сайт. URL: http://elib. sfu-kras.ru/bitstream/handle/2311/30871/diplom_zlobin_m. s. pdf?sequence=1 (дата обращения: 05. 12. 2024).

2. *Сутырина Е. Н., Фролов С. В., Стулень А. А.* Водохозяйственные расчёты : учеб. пособие. Иркутск : Изд-во Иркут. гос. ун-та, 2019. 82 с.

УДК 556.537

Горизонтальные деформации берегов меандрирующих рек и их связь с характеристиками водности половодья (на примерах рек Кеть и Чулым в нижнем течении)

Д. А. Вершинин (daversh@rambler.ru), Д. А. Карташова (kartashova-darya@bk.ru)
Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск

Аннотация. Работа направлена на установление связи между смещением в плане бровки вогнутого берега, водности и морфометрическими показателями. Оценка размывов берегов рек выполнена путём совмещения разновременных космоснимков высокого разрешения (менее 1 м/пиксель) средствами программного продукта ArcGIS с частотой съемки через 1–5 лет. В качестве морфометрических показателей размывов берегов были приняты длина излучины и степень развитости; в качестве показателя водности – расход, который был превышен 30 дней в году. Деформации берегов были оценены по средним и максимальным скоростям отступания берегов. В итоге получены статистически значимые уравнения зависимости средней и максимальной скорости размыва берега от расхода, а также зависимости слабой степени для средней скорости размыва берега и различных функций. Полученные результаты частично можно использовать для прогнозирования береговых деформаций рек Кеть и Чулым в нижнем течении.

Ключевые слова: русловые процессы, размывы берегов, излучины.

Введение

Одна из наиболее опасных форм проявления русловых деформаций – размывы берегов рек, создающие реальную или потенциальную угрозу разрушения населенных пунктов, инженерных и других объектов, могущие приводить к неблагоприятным ситуациям и причинять ущерб водному хозяйству и инженерным объектам на приречных территориях [10]. Томская область в высокой степени подвержена негативному влиянию речных горизонтальных деформаций. Размывы берегов рек Оби, Томи, Чулыма, Васюгана, Парабели, Кети и Тыма достигают 25 м/год, что ежегодно приводит к разрушению жилых домов, инженерно-хозяйственных объектов и коммуникаций [8].

В конце 1950-х гг. начато изучение русловых деформаций рек Томской области сотрудниками кафедр географии и гидрологии ТГУ А. А. Земцовым, Д. А. Бураковым и позднее продолжено Ю. И. Каменсковым, В. А. Льготиным, Н. С. Евсеевой, В. С. Хромых и др. [по 5]. Осуществлено рекогносцировочное исследование горизонтальных деформаций Оби и её крупных притоков – Кети, Чулыма и Тыма в пределах Томской области. Вышеуказанными учёными были проанализированы аэрофотоснимки, топокарты и лоции за 1929–1965 гг., проведены натурные наблюдения у ряда населённых пунктов и получены количественные показатели скоростей и площадей размыва берегов, установлена направленность развития этого процесса и возможные причины интенсивных деформаций, а также даны ориентировочные прогнозы их дальнейшего развития на 20–50 лет вперёд [2–4]. Группой сотрудников кафедры гидрологии ТГУ под руководством

Ю. И. Каменскова проводились исследования размывов берегов различными способами [6].

Кроме ученых ТГУ регулярные стационарные наблюдения за размывом берегов на рассматриваемой территории выполнялись Томской геологоразведочной экспедицией (ТГРЭ) с 1978 г. Наблюдение береговых деформаций производилось в рамках Программы комплексного изучения экзогенных геологических процессов на территории Томской области. С 1978 по 1984 г. геоморфологическим отрядом ТГРЭ, под руководством В. А. Льготина, создано 23 русловых поста у населённых пунктов в долинах Оби, Чулыма, Кети, Томи [2]. Начиная с 1995 г. наблюдения за деформациями берегов на стационарах ТГРЭ продолжаются сотрудниками ОГУП «Территориальный Центр Томскгеомониторинг». А. О. Крутовским разработана оригинальная методика оценки количественных параметров разрушения берегов путем интеграции цифровых снимков с локальными ГИС и предложена экспресс-методика специализированных полевых гидрологических работ для оценки и прогноза динамики берегов [7].

Объект, материалы и методы исследования

Современные средства дистанционного зондирования Земли позволяют анализировать размыв берегов с высокой степенью детальности на опасных участках – точность снимков превышает годовые значения скоростей размыва берегов. Ранними исследованиями авторов [1] установлено, что наибольшие темпы горизонтальных деформаций на р. Чулым наблюдаются на участке в нижнем течении, где средние скорости размыва достигают 8,8 м/год, а максимальные – 35,9 м/год. Некоторые излучины подмывают населенные пункты Томской области – Чердаты, Вознесенка, Первомайское, Комсомольск, Минаевка. Наиболее интенсивные размывы берега наблюдаются у с. Первомайское и с. Комсомольск – 11–12 м/год. На р. Кеть максимальные деформации берега наблюдаются на излучине, которая располагается в районе с. Белый Яр – 8,2 м/год, при этом средний размыв по излучинам редко превышает 2 м/год.

Река Чулым образуется слиянием рек Белый и Чёрный Июс, берущих начало с Кузнецкого Алатау в Хакасии. Длина – 1799 км, площадь бассейна – 134000 км². Протяженность р. Чулым на территории Томской области 725 км [2]. Половодье начинается во второй половине апреля и продолжается около 3 месяцев. Максимальный расход воды в замыкающем створе (с. Батурино) составляет в среднем 3450 м^3/с. Река Кеть берёт начало из болот Обь-Енисейского водораздела, протекает по Западно-Сибирской равнине, по территориям Красноярского края и Томской области. В Обь Кеть впадает справа двумя рукавами – Тогурская Кеть (ниже города Колпашево) и Копыловская Кеть, текущая вдоль Оби до Нарыма на 2246 км от устья Оби. Длина – 1621 км (805 км в пределах Томской области), площадь бассейна – 94200 км² [2]. Половодье начинается, в среднем, во второй половине апреля, продолжительность половодья около 3 месяцев. Максимальный расход воды составляет, в среднем, 1650 м^3/с.

В данном исследовании оценка горизонтальных деформаций была выполнена в нижнем течении рек Кеть (9 излучин от п. Белоярское до устья) и Чулым

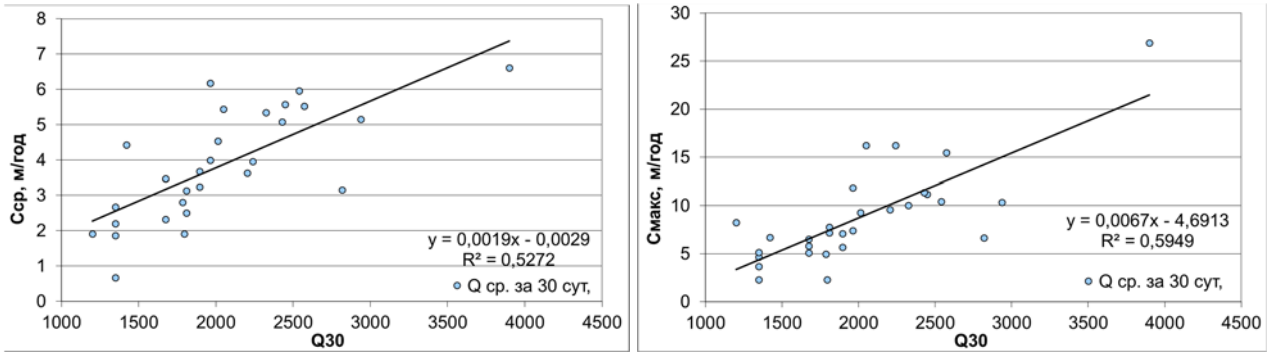
(8 излучин от с. Зырянское до устья). Длина излучин изменяется от 1180 м до 3350 м, показатель степени развитости – от 1,2 до 2,3. Оценка размывов берегов рек выполнена путём совмещения разновременных космоснимков высокого разрешения (менее 1 м/пиксель) средствами программного продукта ArcGIS с частотой съемки через 1–5 лет.

В качестве морфометрических показателей были приняты длина излучины (S, м) и степень развитости (S/λ), деформации берегов были оценены по средним ($C_{ср}$, м/год) и максимальным ($C_{макс}$, м/год) скоростям отступания берегов. В качестве показателя водности реки принят расход, который был превышен 30 дней в году, осредненный за годы между снимками (Q_{30}, $м^3/с$) с каждого поста на исследуемом участке: с. Батурино, с. Зырянское на р. Чулым и д. Родионовка на р. Кеть.

Результаты и выводы

Темпы размыва берегов свободно меандрирующих рек однозначно зависят от размеров рек и их водности. Косвенно водность может быть оценена порядком реки N, отмечается, что рост скоростей размыва берега происходит при N более 14, что соответствует, в том числе нижнему течению Чулыма. В среднемноголетнем рассмотрении получены весьма однозначные связи порядков рек, среднемноголетних расходов и среднемноголетних темпов размывов берегов [6]. Однако водность весьма изменчива как от года к году, так и в многолетней перспективе, что отражается и на изменчивости размывов берегов.

Между водностью потока и деформациями берегов устанавливаются определенные устойчивые соотношения. В нижнем течении рек Чулыма и Кети к таковой относится зависимость между расходом, который был превышен 30 дней в году и скоростью размыва берегов (рис. 1). Функция $C=f(Q_{30},)$ показывает статистически значимую линейную связь, согласно которой чем больше расход воды в половодье, тем выше скорости размыва берегов.



а *б*

Рис. 1. График зависимости средних (*а*) и максимальных (*б*) скоростей размыва ($C_{ср}$ и $C_{макс}$, м) от расхода, который был превышен 30 дней в году (Q_{30}, $м^3/с$)

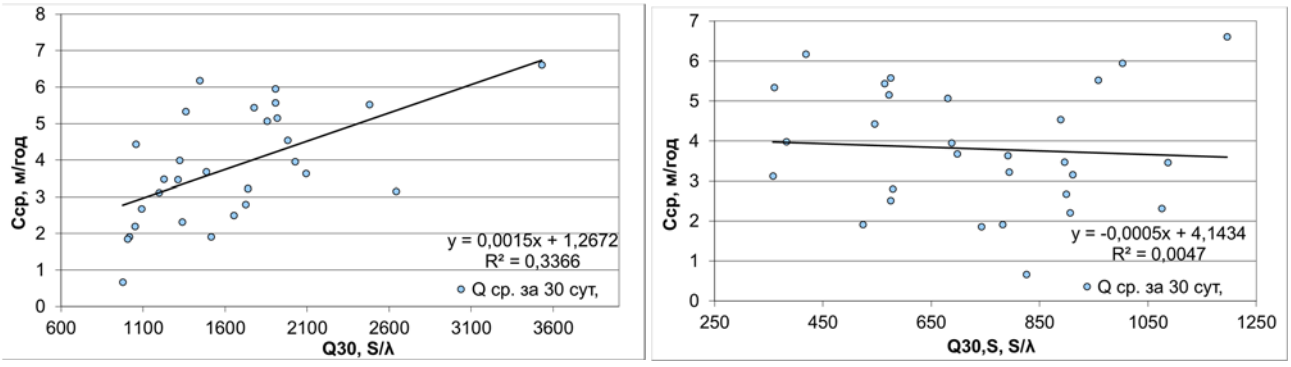
Тем не менее, практический интерес представляет прогноз смещения береговой линии не только в зависимости от изменения среднемноголетних расхо-

дов, но и от морфометрических показателей. Ранее отмечалось, что высокие показатели средних скоростей размывов берегов излучин ($C_{ср} \geq (2{,}5–3{,}0)$ м/год) лучше описываются уравнением $C_{ср} = f(S)$ [1]. Также утверждалось, что скорости размыва берегов зависят от степени развитости излучин [9]. Согласно гидроморфологической теории руслового процесса [7], темпы размыва берегов меандрирующих рек становятся максимальными при достижении степени развитости излучин величины 1,4–1,6, с увеличением степени развитости плановые деформации год от года начинают уменьшаться. Увеличение длины излучины при прочих равных условиях также сказывается на уменьшении скорости размыва берега. С учётом вышесказанного уравнение зависимости средней скорости размыва излучины от этих параметров было предложено ранее [1] следующим образом:

$$C_{ср} = f(Q_{30}/(|1{,}6 – S/\lambda| + 1))/ S, \quad (1)$$

где $C_{ср}$ – средняя скорость размыва излучины, м; Q_{30} – расход, который был превышен 30 дней в году, осредненный за годы между снимками, м^3/с; S/λ – степень развитости излучины; S – длина излучины, м.

Принимая во внимание данное уравнение, были построены графики функций $C_{ср}$=f (Q_{30}, S, S/λ) и $C_{ср}$=f (Q_{30}, S/λ). Результаты приведены на рис. 2. Связь между смещением в плане бровки вогнутого берега и параметрами в выражении 1 оказалась неоднозначна и слабой степени статистической зависимости. Применение показателей водности и степени развитости рек однозначно указывает на рост средних скоростей размыва, однако коэффициент детерминации несколько ниже, чем для функции C=f(Q_{30},).



а *б*

Рис. 2. График зависимости средних скоростей размыва ($C_{ср}$, м):
а – от расхода, который был превышен 30 дней в году (Q_{30}, м^3/с) и степени развитости излучины (S/λ); *б* – расхода, который был превышен 30 дней в году (Q_{30}, м^3/с), степени развитости излучины (S/λ) и длины излучины (S, м)

Большой разброс точек позволяет рассматривать эти зависимости как отражение общей закономерности. Возможно, это связано с изменением уклона долины реки, что требует дополнительного уточнения. Скорости размывов берегов ежегодно имеют разную интенсивность и хорошо коррелируются с предложенным показателем водности. Морфометрические показатели мало изменяются за короткий промежуток времени, поэтому их применение в зависимости позволит

распространить ее не только на примененных в исследовании излучинах, но и на не исследованных реках. Таким образом, функция $C_{ср}$=f (Q_{30}, S, S/λ) требует выполнения более детального анализа и учета дополнительных факторов.

Список литературы

1. Проблемы русловых процессов рек Западной Сибири и результаты исследования в этой области / Д. А. Вершинин, В. А. Земцов, Н. Г. Инишев, А. С. Тарасов, Е. А. Домрачев // Тридцать третье пленар. межвуз. совещ. по пробл. эрозионных, русловых и устьевых процессов. Нижневартовск, 2018. С 30–38.

2. *Евсеева Н. С., Земцов А. А.* Деформации берегов р. Кети и связанные с ними процессы // Вопросы географии Сибири. 1978. Вып. 11. С. 121–129.

3. *Земцов А. А., Бураков Д. А.* Боковая эрозия реки Оби и возможности ее прогноза // Геоморфология, 1972. С. 61–64.

4. *Земцов А. А.* Деформации берегов в среднем течении Оби за 20 лет (1965– 1985 гг.) // География и природные ресурсы. 1990. № 4. С. 46–51.

5. *Земцов А. А.* Проблемы географии Западной Сибири / Земцов А. А., Хромых В. С. // Вопросы географии Сибири. Томск : Изд-во ТГУ, 1999. Вып. 23. С. 5–10.

6. *Каменсков Ю. И.* Особенности применения и эффективность различных способов оценки плановых деформаций речных русел // Человек и вода : тез. докл. к науч.-практ. конф. «Водные ресурсы Томской области, их рациональное использование и охрана». Томск, 1990. С. 21–24.

7. *Кондратьев Н. Е., Попов И. В., Снищенко Б. Ф.* Основы гидроморфологической теории руслового процесса. Л. : Гидрометеоиздат, 1982. 272 с.

8. *Крутовский А. О.* Способы повышения эффективности геоэкологического мониторинга при исследовании деформаций берегов рек у населенных пунктов (на примере крупных рек Томской области : автореф. дис. … канд. гегр. наук. Томск, 2002. 147 с.

9. *Куракова А. А.* Размывы пойменных берегов Оби и Иртыша и их связь с морфологией русла / Куракова А. А. // Географический вестник. 2022. № 1(60). С. 40–59.

10. Раздвоенные русла больших и крупнейших рек: условия формирования, рассредоточение стока и морфодинамика рукавов / Р. С. Чалов, А. А. Куракова, А. А. Камышев, Н. М. Михайлова // Геоморфология. 2022. № 2. С. 72–88.

УДК 551.510.42(571.1)

Картографирование и расчеты гидрографических характеристик с использованием аэрофотосъемки и ГИС

С. В. Вихренко (ssnnee195@mail.ru), И. А. Лисина (lisina.ia@dvfu.ru),
В. А. Костык (kostyk.va@dvfu.ru)
Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток

Аннотация. Важной составляющей процесса мониторинга гидрометеорологической обстановки является проведение наблюдений за параметрами окружающей природной среды на станциях и постах Росгидромет традиционными методами. Однако в условиях недостаточной изученности для оценки гидрографических характеристик все чаще рассматривается возможность применения современных методов дистанционного зондирования Земли и аэрофотосъемки с помощью беспилотных летательных аппаратов. На примере бассейна р. Извилинки выполнена аэрофотосъемка части водосбора нижнего течения реки, тахеометрическая съемка, обработаны результаты радарной съемки поверхности Земли и спутниковые снимки. Обработка выполнялась фотограмметрическим методом, карты высот и ортофотопланы построены в системе координат WGS 84. Для определения гидрографических характеристик в геоинформационном ПО совмещены пространственные данные. Точность расчета гидрографических характеристик находится в пределах 10%-ной погрешности.

Ключевые слова: гидрографические характеристики, цифровая модель рельефа, Приморский край, ортофотоплан.

Введение

Расчеты гидрографических характеристик речных водосборов практики (расчет наводнений, затоплений, максимального и минимального стока и т. д.) проводят с помощью традиционных методов куда входят источники данных в виде: топографических карт, данных справочника и натурных наблюдений. Охватить натурными наблюдениями весь бассейн довольно сложно. Отдельные части, например, замыкающий створ реки исследуется с помощью современных методов (аэрофотосъёмка, съемка с профилографа). Современные технологии дистанционного зондирования земли (ДЗЗ) позволяют изучать большие водосборные бассейны, не прибегая к натурным наблюдениям, однако полезным является уточнение и сравнение полученных результатов ДЗЗ с натурными наблюдениями. Внедрение цифровых методов ДЗЗ способствует уменьшению трудозатратности гидрографических вычислений. Для натурных измерений современные технологии представляют перспективное направление поскольку трудоемкость проведения полевых работ резко снижается благодаря беспилотным летательным аппаратам (БПЛА), автоматизированным комплексам, которые используются не повсеместно. В работе рассмотрены варианты обработки и применения данных современных технологий, а также дистанционные методы в изучении водосборного бассейна. Для проверки достоверности полученных результатов использованы справочники и топографическая карта. Цель работы: картографирование территории, расчет гидрографических характеристик с использованием аэрофотосъемки и ГИС для обновления паспорта гидрологического поста на примере р. Извилинки у с. Извилинка (включая примыкающую к посту территорию) [1].

Материалы и методы

Река Извилинка протекает на территории Приморского края и является притоком р. Уссури, берет свое начало в горах Сихотэ-Алиня (рис. 1).

Рис. 1. Схема расположения района исследования р. Извилинка

Рельеф бассейна реки горный, состоит из хребтов горной системы Сихотэ-Алиня с высотами до 800 метров. Территория бассейна покрыта лесами хвойно-широколиственных пород. Вершины сопок покрыты тундрами и каменистыми россыпями, ниже находятся заросли кедрового стланика и елово-пихтовые леса. Почвы зависят от рельефа местности. На сопках преобладают бурые лесные оподзолённые почвы. Гумусный горизонт имеет вертикальную протяженность равную 6–8 см, который переходит в аллювиальный горизонт с мощностью 30–40 см. и более. Климат района относится к умеренному, характерна холодная, но при этом ясная зима со снежным покровом до 60 сантиметров.

Для р. Извилинка была выполнена съемка местности с малого БПЛА DJI Phantom. Полученные фотоснимки использованы для построения ортофотоплана местности, цифровой модели рельефа, карты высот. В работе использовано фотограмметрическое программное обеспечение Agisoft PhotoScan, которое позволяет выполнить все операции по обработке.

Ортофотоплан выполнен на основе плотного облака точек, полученного путем маркировки опознавательных точек на фотоснимках в замыкающем гидрологическом створе реки. Опознавательными знаками стали опоры моста и дорожные столбы, которые были обозначены в тахеометрической съемке. Модель после действий запуска и первичного выравнивания фотографий позволила на втором круге моделирования загрузить все оставшиеся маркеры в трудно идентифицируемых точках затем запуск и обработка фотоснимков с заполненной таблицей панели привязки по всем точкам.

Для расчета гидрографических характеристик по данной территории исследования была использована цифровая модель рельефа (ЦМР) Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) с разрешением 30 метров, которое было обработано в ArcGIS for Desktop 10. 8. [3].

Результаты

Совмещенные в ПО ArcGISC пространственные данные: карта-высот и тахеометрия и объединеннеы в ПО Agisoft PhotoScan тахеометрия и аэрофотосъёмка позволили получить схемы, по которым определялись гидрографические характеристики. Общее количество обработанных фотографий с БПЛА составило – 242 шт. В результате обработки данных был получен ортофотоплан и карта высот для замыкающего гидрологического створа (рис. 2).

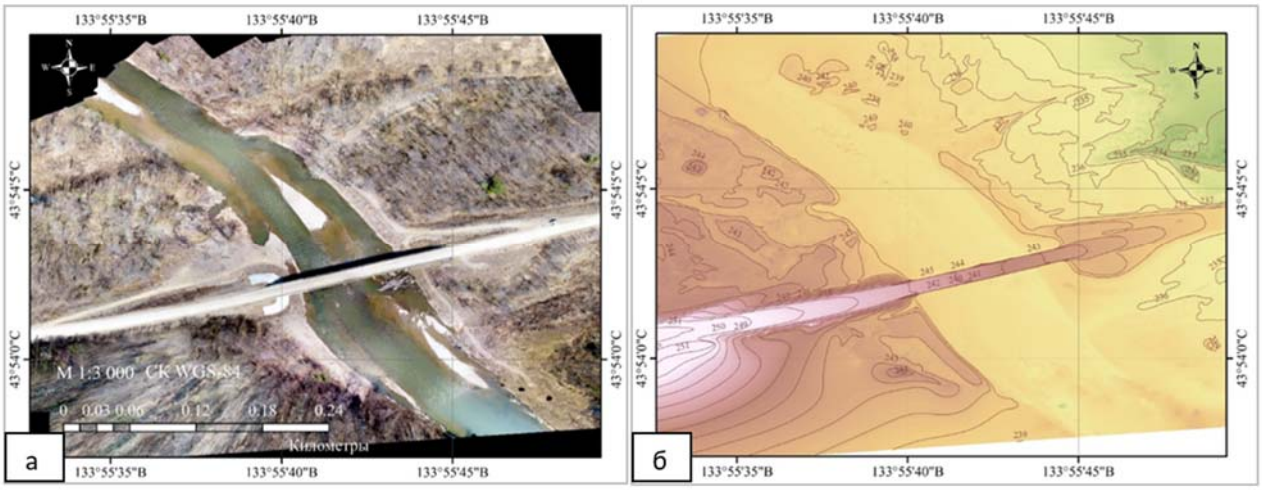


Рис. 2. Ортофотоплан (а) и карта высот (б) нижнего течения р. Извилинка СК WGS-84

Определенные с помощью дистанционных методов гидрографические характеристики бассейна сравнивались с аналогичными данными, полученными из справочника «Ресурсы поверхностных вод» [2].

В таблице представлено сравнение натурных значений со значениями, полученными при помощи ГИС.

Таблица

Сравнение результатов

Характеристика, е. и.	Значение по [2]	Значение по ЦМР	Разница, %
Площадь бассейна, км^2	1170	1194,7	2,1
Длина реки, км	64	63,9	0,2
Коэффициент извилистости		0,821	
Длины всех рек бассейна, км		1593,1	
Густота речной сети км/км^2		1,33	
Средняя высота водосбора, м	810	825,6	1,9
Средний уклон водосбора, %	23,9	26,0	8,1
Максимальная ширина водосбора, км		43,9	
Лесистость, %	98	98,6	0,6

Окончание табл.

Характеристика, е. и.	Значение по [2]	Значение по ЦМР	Разница, %
Средняя ширина водосбора, км		23,9	
Ширина речной долины по замыкающему створу, км		1,99	
Средняя ширина речной долины по реке, км		1,46	

Разница была рассчитана по формуле:

$$\Delta = \frac{P_Н - P_{ЦМР}}{P_Н} * 100\ \%, \quad (1)$$

где $P_Н$ – величина из [2], $P_{ЦМР}$ – величина, полученная в ГИС.

Из таблицы видно, что опубликованная информация по морфометрическим характеристикам не полная для бассейна р. Извилинка. И в данном случае результаты ДЗЗ позволяют получить дополнительные количественные гидрографические характеристики для оценки рассматриваемого водосбора. Кроме того, разница между оцениваемыми параметрами не превышает 8,1 % (в среднем 2,6 %), что дает возможность достаточно уверенно использовать данные ДЗЗ для определения гидрографических характеристик.

Заключение

При помощи геоинформационного ПО и открытых пространственных данных были рассчитаны гидрографические характеристики водосбора р. Извилинка: площадь бассейна, длина реки, коэффициент извилистости, длины всех рек бассейна, густота речной сети, средняя высота водосбора, средний уклон водосбора, максимальная ширина водосбора, средняя ширина водосбора, ширина речной долины по замыкающему створу, средняя ширина речной долины по реке, лесистость. Отклонение гидрографических характеристик, полученных картографическим методом от натурных данных составило от 0,2 до 8,8 % (≤ 10 %), что свидетельствует о достаточной высокой точности данных полученных в ПО ArcGIS.

Список литературы

1. Определение гидрографических характеристик картографическим способом / М-во природных ресурсов и экологии РФ, ГГИ Росгидромета ; отв. ред.: Е. В. Орлова, Н. Н. Бобровицкая. СПб., 2018. 179 с.

2. Ресурсы поверхностных вод СССР : в 20 т. Л. : Гидрометеоиздат, 1972. Т. 18. Вып. 3. 627 с.

3. 30-Meter SRTM Elevation Data Downloader / NASA EarthData, 2022. URL: https://dwtkns.com/srtm30m/ (дата обращения: 02.02.2025 г.)

УДК 556.54

Оценка руслового и грунтового стока в устьевых системах Селенгинского и Приморского побережий Байкала

С. Х. Габриелян (imperator. gs24@mail.ru)[1], Е. А. Ильичёва (lenail3663@mail.ru)[1,2], М. В. Павлов (maksimpavlov_v@mail.ru)[2], Ю. И. Шкимелис (jcraet@mail.ru)[1], А. А. Ушкалов (lolitamen@mail.ru)[2]

[1]*Иркутский государственный университет, г. Иркутск*
[2]*Институт географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, г. Иркутск*

Аннотация. Проведен анализ рядов данных наблюдений за распределением стока в устьевых системах рек Селенгинского и Приморского побережий Байкала, с учетом их морфогенетического типа и оценочной величины подземного (грунтового) стока или берегового регулирования. Основная задача публикации показать роль грунтовой составляющей в формировании стока через толщи отложений устьевых областей рек с высокой гидравлической связью речных и подземных вод, рассмотрены: дельта Селенги, селевые конусы выноса рек Сармы и Голоустной и эстуарно-дельтовые системы рек Анги и Бугульдейки. Учет объемов грунтовых вод, аккумулирующихся в отложениях пойм в течение зимней фазы режима и их отдачи в половодье и весенние паводки имеет весомое значение в баланса стока в устьях рек, что при относительно близком подпорном уровне приемного водоема создает условия для выхода вод из русел и затоплений значительных территорий с развитой хозяйственной инфраструктурой.

Ключевые слова: Байкал, устьевые системы, баланс стока, грунтовое регулирование, гидравлическая связь.

Введение

Многолетнее изучение стока в устьевых системах байкальских рек показывает невязку баланса измеренных расходов в вершинах и в различной степени разветвленной русловой сети устьев, что, на первый взгляд могло бы быть обусловлено недостаточной точностью измерений и расположением гидропостов на протоках. Однако при исследовании стока в однорукавных устьевых системах рек Анги и Бугульдейки была выявлена значительная невязка между условно верхним и нижнем створами, что гипотетически указывает на задержку и неравномерную разгрузку через отложения берегов в русла устьевых систем или подрусловым стоком, непосредственно в акваторию приемного водоема.

Типизация морфогенетических типов устьевых систем Байкала выполнена согласно классификации В. Н. Михайлова [5] и в последствии дополнено специфическими модификациями для байкальского побережья в работах [2; 3]. Селенгинское побережье в основном представлено многорукавной дельтой выдвижения на мелководном взморье. Устья рек Сарма и Голоустная на побережье Приморского хребта имеют внешнее сходство с выдвигающимися дельтами по морфологии и разветвленной русловой сети. С морфогенетической точки зрения, имеющей важную функциональную роль в распределении стока, эти объекты относятся к псевдодельтам, так как созданы пролювиальными конусами выноса, в толщи которых врезаются современные каналы стока. Выдвижение псевдодельт

происходит за счет фитогенных берегов. Устье р. Бугульдейки представлено однорукавной дельтой выдвижения, прошедшей эволюционный путь развития от эстуария. Классической эстуарно-дельтовой системой можно считать устье р. Анга. Механизмы трансформации речного стока имеют свою специфику для каждого морфогенетического типа устья [4; 7–9].

Результаты и обсуждения

Многолетние наблюдения за распределением стока в разветвленных УС (Селенга, Сарма, Голоустная) показали невязку баланса стока между входным створом и русловой системой от 10–20 % в маловодные фазы водности (март), до 50 – 70 % – в период большой водности многоводных периодов. В однорукавных системах Анги и Бугульдейки потери стока составляют от 7 до 10 % на каждые 3–5 км от входного створа до устья.

В рамках представленного доклада рассмотрим распределение и аккумуляцию стока в УС реки Сармы за лето и осень 2024 г. Расположение пунктов наблюдений показано на рис. 1.

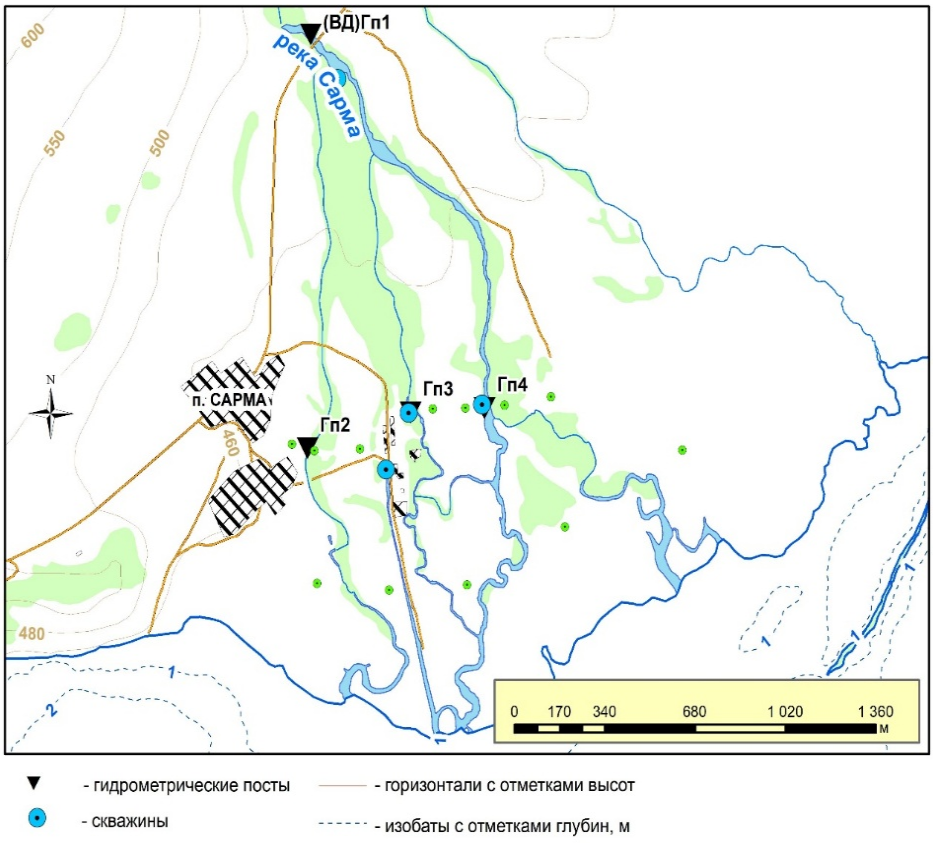


Рис. 1. Расположение гидрологических створов и скважин в УС Сарма

Распределение стока по трем рукавам псевдодельты р. Сармы происходило по-разному: на спаде половодья более 75 % стока проходило через левый рукав, два остальных рукава осуществляли сток от 5 до 8 % (рис. 2). Предположительно, потери речного стока компенсируются фильтрацией в теле конуса и последующим подрусловым стоком в Байкал. Невязка летом составила чуть более

18 %, вероятно, такое значение невязки связано с более суровыми зимними условиями, длительным существованием наледей и холодной весной, что снизило скорости фильтрации талых и полых вод в почво-грунты тела конуса псевдодельты.

Рис. 2. Сток по русловой системе псевдодельты р. Сарма 2024 г.

В период осенней межени невязка стока составила 14 %, доли стока по основным рукавам устьевой системы распределились от почти 18 % в правой до почти 64 % в левой протоке псевдодельты (рис. 2). Во многом распределение стока зависит и от гипсометрического положения русел, и от водно-физических свойств руслоформирующих наносов и почво-грунтов пойменных комплексов [7; 8].

В гидрологическом режиме выделяются половодье и паводки. Зимняя межень характеризуется крайне низким стоком или полным его отсутствием в феврале начале марта. Во время обследования (июнь 2024 г.) метки уровня высоких вод достигали 1 м и более над бровками русел и в межрукавных пространствах.

На устьевом участке, в 1 км от современной береговой линии Байкала, обследован искусственный канал, дренирующий подземные воды конуса, который можно рассматривать как еще одно русло реки. Уровень грунтовых вод располагается на незначительных глубинах, что является причиной обводнения межрукавных пространств. Исследования распределения стока показывают, что более 50 % может идти не поверхностным стоком по рукавам, за счет грунтового регулирования стока или подрусловым стоком [1; 6–9].

Для учета подрусловой составляющей в устьевой области р. Сармы были пробурены 2 скважины и исследован объем стока через искусственный канал. В скважинах отбирались пробы грунтов последовательно через 10 см для дальнейшего исследования водно-физических свойств грунтов, а также измерялась скорость наполнения скважин грунтовыми водами и рассчитывался дебет. Как показывалось в таблице невязка стока составляла 14 %, которые как мы считаем фильтруются через толщи пойменных отложений в межрукавных пространствах. Для расчета распределения стока мы представляем следующую балансовую модель:

$$Q_{ВД}=Q_{ГП2}+q_{К}+Q_{ГП3}+q_{СКВ}+Q_{ГП4},$$

где $Q_{ВД}$ – расход на вершине дельты; $Q_{ГП2}$ – расход правой протоки; $q_К$ – дебет искусственного канала; $Q_{ГП3}$ – расход центральной протоки; $q_{СКВ}$ – дебет скважины ГП4; $Q_{ГП4}$ – расход левой протоки. Для расчета подземной составляющей учтена площадь поперечного профиля межрукавного пространства и интенсивность (скорость фильтрации или наполнения скважины). По рассчитанным данным грунтовый сток в межрукавных пространствах псевдодельты р. Сарма составил 0,32 м^3/с (6 % от стока воды в ВД).

Таблица

Баланс распределения стока

	Русловой сток				Грунтовый сток		
№ поста	ВД	Сарма ГП2	Сарма ГП3	Сарма ГП4	Скважина ГП4	Скважина ГП3	Канал
Q, м^3/с	6,1	1,11	0,25	3,91	0,10	0	0,22
Q, %	100 %	18 %	4 %	64 %	2 %	0 %	4 %
Невязка руслового стока – 14 %					Доля грунтовой составляющей стока – 6 %		

Таким образом, можно предположить, что непосредственная разгрузка вод с устьевой системы в озеро составляет 8 % и может являться величиной подруслового стока. Для детализации структуры стока, мы планируем оптимизировать количество, положение в рельефе межрукавных пространств и глубину заложения скважин для изучения берегового регулирования стока.

Выводы

Проведен обзор наблюденных данных по распределению стока в устьевых системах различного генезиса. В балансе стока рассматриваемых объектов выявлена значительная невязка, составляющая в отдельные годы до 50–70 % стока, сопоставимая со значениями руслового стока магистральных рукавов или отдельных притоков. Обоснована необходимость оптимизации наблюдений за процессами берегового регулирования и его учета в воднобалансовых моделях.

Исследования выполнялись в рамках гранта РНФ (№ 25-27-00229 «Роль пойменно-террасовых комплексов в распределении и аккумуляции стока дельты р. Селенги») по материалам полевых работ, входящих в исследования ИГ СО РАН (№ государственной регистрации № АААА-А21–121012190059–5).

Список литературы

1. Гидроморфологический мониторинг русловой сети дельты р. Селенги / Ю. И. Шкимелис, Е. А. Ильичева, М. В. Павлов [и др.] // Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии : материалы VI Всерос. науч.-практ. конф. Иркутск, 19–22 дек. 2023 г. Иркутск : Изд-во ИГУ, 2024. С. 104–109.

2. *Ильичева Е. А., Павлов М. В.* Природные факторы формирования устьев притоков Байкала // География и природные ресурсы. 2022. Т. 43, № S5. С. 83–91. https://doi.org/10.15372/GIPR20220509.

3. *Ильичева Е. А.* Морфоструктура побережий озера Байкал как фактор формирования различных морфогенетических типов устьевых систем // Экологические проблемы бассейна озера Байкал : сб. материалов Всерос. науч. конф. с междунар. участием. Улан-Удэ, 28 авг. – 1 сент. 2022 г. Улан-Удэ : Байк. ин-т природопользования СО РАН, 2022. С. 54–58. https://doi.org/10.31554/978-5-7925-0621-3-2022-54-58

4. К вопросу о распределении стока в устьевых системах псевдодельт западного побережья озера Байкал / Е. А. Ильичева, М. В. Павлов, А. А. Ушкалов [и др.] // Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России : материалы V Всерос. науч.-практ. конф. Иркутск, 23–25 нояб. 2022 г. Иркутск : Изд-во ИГУ, 2023. С. 388–396.

5. *Михайлов В. Н.* Гидрология устьев рек. М. : Изд-во Моск. ун-та, 1998. 176 с.

6. *Нежиховский Р. А.* Русловая сеть бассейна и процесс формирования стока воды (Методические основы и практика прогнозов паводочного стока рек). Л. : Гидрометеорол. изд-во, 1971. 474 с.

7. *Павлов М. В., Ильичева Е. А.* Морфогенез Сарминского и Селенгинского побережий озера Байкал // Вестник Бурятского государственного университета. Биология, география. 2017. № 4. С. 116–132.

8. *Павлов М. В., Ильичева Е. А.* Современный этап рельефообразования Сарминского и Селенгинского побережий озера Байкал // Безопасность природопользования в условиях устойчивого развития : материалы Междунар. науч.-практ. конф. Иркутск, 25–29 сент. 2017 г. Иркутск : Изд-во ИГУ, 2017. С. 18–27.

9. Результаты мониторинговых гидроморфологических исследований в устьевых системах рек Сармы, Анги, Бугульдейки / С. Х. Габриелян, Е. А. Ильичева, М. В. Павлов [и др.] // Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии : материалы VI Всерос. науч.-практ. конф. Иркутск, 19–22 дек. 2023 г. Иркутск : Изд-во ИГУ, 2024. С. 26–33.

УДК 556.06

Учет временных аналогов при построении регрессионной модели для характеристик речного стока

Е. В. Гайдукова (oderiut@mail.ru), Д. М. Филатов (filat77@yandex.ru)
Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург

Аннотация. Предлагается алгоритм получения уравнения регрессии (регрессионной модели), который можно использовать для более эффективных прогнозов гидрологических характеристик. В основе разрабатываемого подхода лежит метод получения регрессионной модели с учетом лет-аналогов по зависимой и по независимым переменным. В качестве зависимой переменной был выбран расход воды, а независимыми переменными (предикторами) стали метеоэлементы (максимальные, минимальные и средние температуры воздуха, осадки, снегозапасы, температуры на глубинах почвы до 320 см) и ретроспективные данные по расходу воды. Апробация подхода произведена на речных водосборах Северо-Западного региона: р. Ловать – г. Великие Луки, метеостанция Великие Луки; р. Сороть – д. Осинкино, метеостанция Пушкинские горы. Оценка качества моделей показала эффективность полученного подхода получения эффективных регрессионных моделей.

Ключевые слова: корреляция, год-аналог, прогнозы, расходы воды.

Введение

Эффективное применение регрессионных зависимостей для прогноза гидрологических характеристик речных водосборов отмечают многие исследователи. Так, например, для некоторых рек Узбекистана рассчитаны многофакторные зависимости между стоком рек вегетационного периода и атмосферными осадками [6]. Для прогноза уровня воды реки Мзымта (Краснодарский край) предложены методики, основанные на регрессионном анализе и на использова-

нии нейросетевых технологий, дающие примерно равные результаты [4] и на основе теории Марковских процессов с дискретным временем [5]. Использование множественной регрессии с двумя предикторами – расходом воды за предшествующий период и осадками, привело к улучшению прогнозов на р. Нарым (река в Восточно-Казахстанской области Казахстана, правый приток Иртыша) [2], а для реки Амыл (Красноярский край) сравнительный анализ методик прогноза максимальных уровней воды показал, что однофакторные зависимости имеют более высокие коэффициенты детерминации, чем модель множественной регрессии [3]. Регрессионные уравнения могут показывать свою эффективность и в сложных природных условиях, см. например, [1].

Цель исследования заключается в разработке алгоритма получения уравнения регрессии (регрессионной модели), который можно использовать для более эффективных прогнозов гидрологических характеристик.

Методика исследования и исходные данные

Основу разрабатываемого подхода составляют этапы регрессионного анализа, которые можно конкретизировать следующим образом: 1) спецификация модели; 2) построение модели; 3) интерпретация модели; 4) проверка гипотез о характере влияния переменных на зависимую; 5) прогнозирование значения зависимой переменной; 6) оценка качества модели.

Прогнозирование по уравнению регрессии подразумевает знание независимых переменных, по которым определяется прогнозное значение зависимой переменной. В данном исследовании зависимой переменной будет расход воды, а независимыми переменными (предикторами) метеоэлементы и ретроспективные данные по расходу воды.

Отмечено, что получение достоверного прогнозного регрессионного уравнения связано с тем, что при его построении должна быть учтена предполагаемая заблаговременность прогноза и возможные вариации зависимой и независимых переменных. Если аналогичный прогнозируемому процессу ход изменения предикторов и предиктанта отсутствовал, то регрессионное уравнение, скорее всего, будет неэффективным.

Таким образом, в этапы регрессионного анализа следует подключить следующий алгоритм: 1) выбор зависимой и набора независимых переменных; 2) снижение размерности пространства независимых переменных (построение корреляционной матрицы); 3) выбор года-аналога по зависимой переменной; 4) выбор года-аналога по независимым переменным; 5) построение регрессионной модели с учетом лет-аналогов.

Апробация подхода производилась на речных водосборах Северно-Западного региона России. Предиктантами служили среднесуточные расходы воды за 2018, 2019, 2020 гг., предикторами являлись среднесуточные расходы с 1955 по 1980 г. и с 2008 по 2017 г., а также метеорологические характеристики за тот же период времени с суточным разрешением: максимальные, минимальные и средние температуры воздуха, осадки, снегозапасы, температуры на глубинах почвы до 320 см. Были выбраны следующие гидропосты и метеостанции: р. Ловать – г.

Великие Луки (F = 3270 км^2), метеостанция Великие Луки, р. Сороть – д. Осинкино (F=3170 км^2), метеостанция Пушкинские горы.

Построение корреляционных матриц и их анализ позволили исключить из рассмотрения максимальные и минимальные величины температур, так как была обнаружена очень тесная корреляция с значениями среднесуточной температурой воздуха. Ряды температур на глубинах почвы содержат малое количество данных с большими пропусками, за исключением ряда наблюдений за температурой на глубине 80 см.

Следующий этап заключался в отборе значимой корреляции расходов воды от года к году для нахождения годов-аналогов, были задействованы и метеорологические данные.

На заключительных этапах строились регрессионные уравнения по годам-аналогам и производилась апробация на независимом материале – 2018, 2019 и 2020 гг.

После формирования данных по гидрометеорологическим характеристикам, их компоновки и обработки были построены и проанализированы хронологические графики, например (рис. 1). Видно, что за последнее десятилетие высота половодья гораздо ниже, чем было ранее, и подобных низких половодий практически нет на всем протяжении хронологического графика.

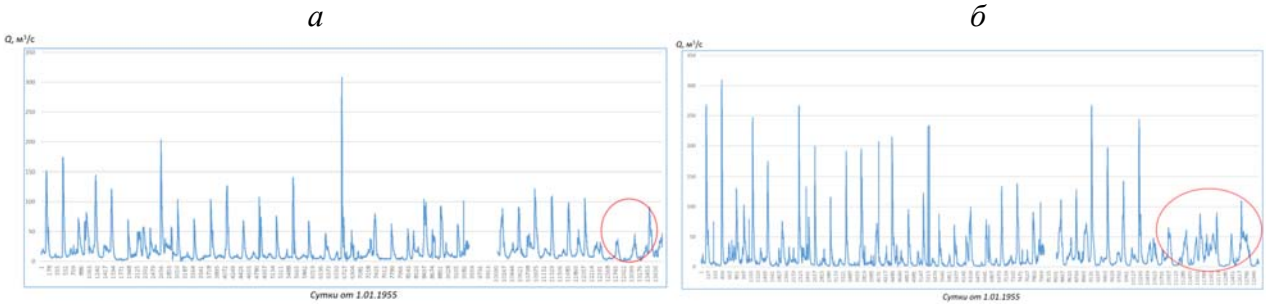


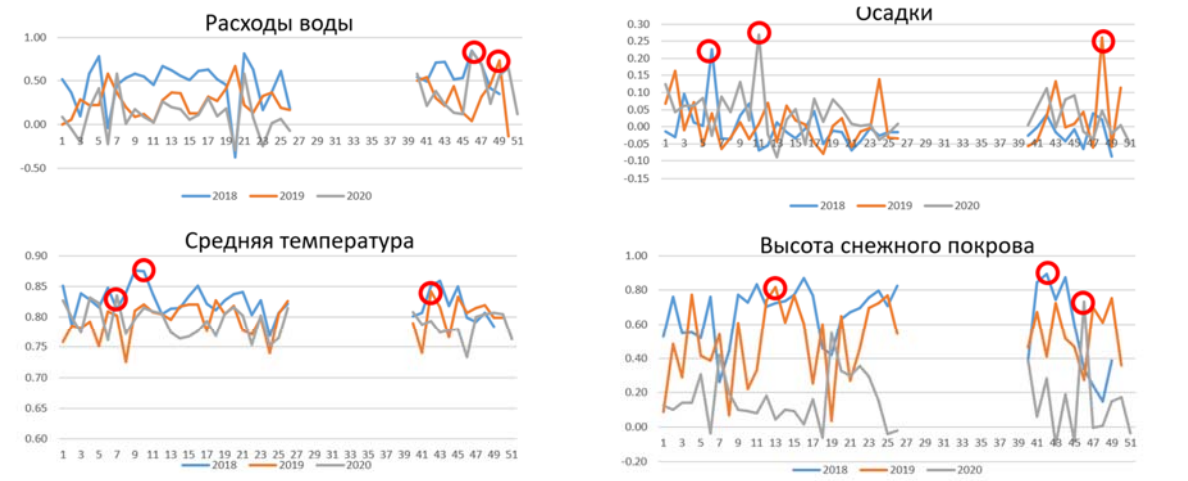
Рис. 1. Хронологический график:
а – р. Ловать – г. Великие Луки; *б* – р. Сороть – д. Осинкино

Хронологические графики по метеоэлементам какие-либо особенности не выявили, хотя стоит отметить, что температуры почвы на всех глубинах незначительно увеличились.

Применение разработанного эффективного алгоритма для прогнозов по регрессионным моделям

На этапе «Поиск лет-аналогов» строились корреляционные матрицы, показывающие связь всех лет между собой с суточным разрешением. Для наглядности и обоснованного поиска строились графики, по осям которых располагались коэффициент корреляции и годы. Выдающиеся точки показывают наибольшие коэффициенты корреляции. Видно, что все-таки существует связь именно внутри частей ряда, т. е. до 1980 г. и после. В ходе анализа выявлены года-аналоги по стоку и метеоэлементам. Получено, что это разные годы (рис. 2).

Результаты апробации разработанного подхода на независимом материале показаны на рис. 3. Были построены регрессионные модели с учетом года-аналога только по стоку (вариант 1) и с учетом года-аналога по стоку и по метеоэлементам (вариант 2). При прогнозе учитывались разные годы.



р. Ловать – г. Великие Луки

год	Q	X	S	T
2018	2014 (0.85)	1960 (0.23)	2010 (0.89)	1963 (0.88)
2019	2017 (0.74)	2016 (0.26)	1967 (0.82)	2010 (0.84)
2020	2014 (0.83)	1965 (0.27)	2014 (0.73)	1961 (0.84)

р. Сороть – д. Осинкино

год	Q	X	S	T
2018	1975 (0.86)	2015 (0.14)	1977 (0.83)	2011 (0.85)
2019	2009 (0.62)	2009 (0.15)	2015 (0.88)	2010 (0.82)
2020	2018 (0.80)	1973 (0.14)	2014 (0.42)	2015 (0.80)

Рис. 2. Годовая корреляция

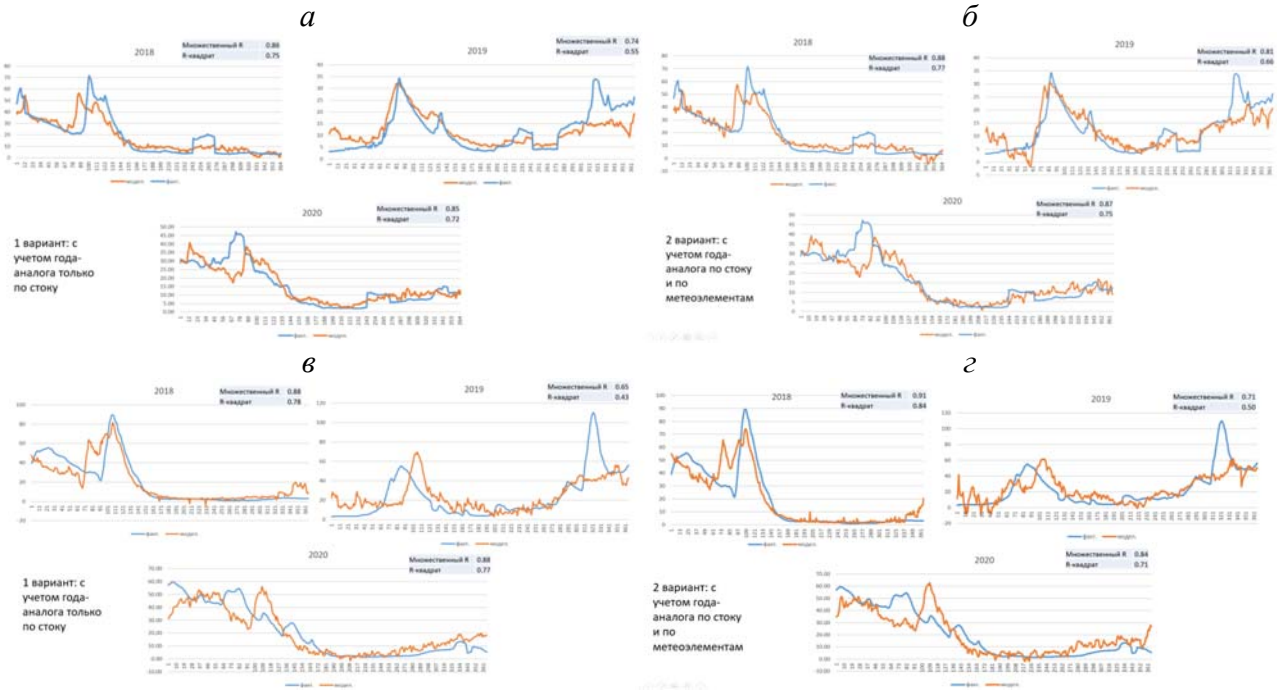


Рис. 3. Результаты апробации алгоритма по различным вариантам:
а, б – соответственно первый и второй варианты апробации, р. Ловать – г. Великие Луки;
в, г – соответственно первый и второй варианты апробации, р. Сороть – д. Осинкино

Оценка эффективности по критерию S/σ (соотношение среднеквадратической погрешности и среднеквадратического отклонения) показала эффективность двух вариантов получения модели (табл.).

Таблица

Оценка эффективности полученных моделей

Река – пункт	Ловать – г. Великие Луки			Сороть – д. Осинкино		
Год	2018	2019	2020	2018	2019	2020
Вариант 1: с учетом года-аналога только по стоку						
σ	17,1	8,42	12,0	23,4	23,1	19,4
S	8,62	5,63	6,32	10,9	17,5	9,34
S/σ	0,50	0,67	0,53	0,47	0,76	0,48
Вариант 2: с учетом года-аналога по стоку и по метеоэлементам						
σ	17,1	8,42	12,0	23,4	23,1	19,4
S	8,45	4,94	6,02	9,46	16,3	10,5
S/σ	0,48	0,59	0,50	0,40	0,70	0,54

Следует отметить, что по всем годам получены удовлетворительные результаты. Но есть существенный недостаток подхода, который заключается в том, что должно пройти какое-то время в прогнозируемом году, чтобы подобрать год-аналог по гидрологическим и метеорологическим характеристикам. Чем дальше дата выпуска прогноза от начала года, тем точнее результат.

К положительным сторонам подхода относится возможность выпускать прогнозы с различной заблаговременностью (краткосрочные, среднесрочные, долгосрочные). В данном случае суточная заблаговременность.

Следует отметить, чувствительность регрессионной модели к изменениям метеорологических характеристик: имеется неплавный год гидрографа.

Были попробованы разные варианты построения регрессионной модели, например, без года-аналога и только расходы воды года-аналога, результаты хуже.

Конечно, данное исследование можно назвать первым приближением к проблеме, и разработанный алгоритм будет срабатывать при тщательном подборе предикторов и не для всего года, а по фазам водности года.

Заключение

В ходе выполнения исследования получены следующие результаты:

– проанализирован метод регрессионного анализа и перспективы его использования в гидрологических прогнозах;

– разработан алгоритм получения эффективных регрессионных моделей;

– создана база данных гидрометеорологической информации по водосборам рек Ловать и Сороть;

– получены регрессионные модели с учетом лет-аналогов.

Разработан алгоритм построения эффективных регрессионных моделей и получены прогнозные модели для речных водосборов Северо-Западного региона с учетом разработанного алгоритма. Оценка качества моделей показала их эффективность.

Список литературы

1. Долгосрочный прогноз стока рек АЗРФ с использованием регрессионных зависимостей / Е. В. Гайдукова, А. О. Яновская, М. С. Дрегваль, А. А. Батмазова // Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России : материалы V Всерос. науч.-практ. конф. / отв. ред. Е. Н. Сутырина. Иркутск, 2023. С. 59–67.

2. *Карамолдоев Ж. Ж., Калашникова О. Ю.* Прогноз притока воды в Токтогульское водохранилище на вегетационный период // Вестник БГУ. № 3 (23). 2012.

3. Сравнительный анализ методик прогноза максимальных уровней и объема стока периода половодья горной реки / В. П. Галахов, О. В. Ловцкая, С. Ю. Самойлова, Е. В. Мардасова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333, № 2. С. 193–203.

4. Сравнительный анализ методов математического моделирования уровня воды в реке горного типа (на примере реки Мзымта) / Е. А. Семенчин, Н. Г. Титов, М. В. Кузякина, К. А. Лебедев // Фундаментальные исследования. 2014. № 12-5. С. 952–957.

5. *Титов Н. Г., Кузякина М. В., Лебедев К. А.* Применение равенства Маркова для прогнозирования уровня воды в реке с крутым падением водотока // Научный альманах. 2015. № 9 (11). С. 1126–1129.

6. *Хакимова, З. Ф., Собирова Н. Р.* Вопросы долгосрочных прогнозов стока горных рек на период вегетации // Использование водных ресурсов в условиях изменения климата. Уфа : Башкир. гос. аграр. ун-т, 2022. С. 46–51.

УДК 556.5

Оценка распределения фтора в воде байкальской экосистемы

И. М. Гуляев (fsxv.svsvs@mail.ru)[1,2], В. И. Гребенщикова (vgreb@igc.irk.ru)[2], О. А. Бархатова (barhat@geogr.isu.ru)[1]

[1]*Иркутский государственный университет, г. Иркутск*
[2]*Институт геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН, г. Иркутск*

Аннотация. Водную экосистему оз. Байкал составляют несколько взаимосвязанных компонентов: байкальская вода (поверхностная и глубоководная), подземные воды из скважин, вода многочисленных притоков Байкала, холодные и горячие минеральные источники вокруг оз. Байкал и единственный сток р. Ангары, отражающая все это водное разнообразие. Известно, что в речных водах Байкальского региона наблюдается дефицит некоторых жизненно важных элементов, в том числе фтора. Рассматриваются особенности распределения фтора в воде сопряженных компонентов экосистемы Байкала. Концентрация фтор-ионов в воде экосистемы Байкала была определена потенциометрическим методом с применением системы капиллярного электрофореза «Капель». Исследование представляет собой результаты мониторинга, который проводился в период с 1997 по 2022 г. Определены вероятные причины высоких и низких концентраций фтора в воде из различных компонентов. Рассмотрены возможные источники фтора поступления и особенности распределения в воде Байкальского бассейна.

Ключевые слова: фтор, байкальская экосистема, подземная вода, притоки, Ангара.

Введение

Фтор (F), присутствующий в природной воде, относится к биогенным элементам и является важным микроэлементом, необходимым для здоровья человека и биоты. Однако его концентрация должна быть строго контролируемой,

так как недостаток, так и избыток фтора может приводить к негативным последствиям. В связи с важностью фтора для здоровья и риском негативных последствий при его избытке или недостатке, во многих странах установлены нормативы на содержание фтора в питьевой воде. Обычно оптимальный уровень фтора в питьевой воде составляет от 0,5 до 1,5 мг/дм^3 [1]. Средняя концентрация F в речных водах мира составляет 0,09 мг/дм^3 [2].

Большая часть территории Прибайкалья относится к биогеохимической провинции с дефицитом F в поверхностных водах [3]. В пределах Южного Прибайкалья и Забайкалья средняя концентрация F в природных водах составляет 0,2 мг/дм^3 [4]. По природным источникам поступления F в поверхностные воды территорию Прибайкалья можно разделить на две части – западную, включающую южную часть Сибирской платформы, и восточную, представленную горными сооружениями, обрамляющими оз. Байкал (Забайкалье).

Чехол Сибирской платформы сложен соленосными осадочно-терригенными отложениями фанерозойского возраста, не содержащими фтористой минерализации. Поверхностные воды здесь обеднены F. В то же время Забайкалье характеризуется широким развитием гранитоидов с повышенным содержанием F и присутствием фторсодержащих рудопроявлений.

Юг Забайкалья характеризуется интенсивным развитием редкометальных гранитоидов с высокими концентрациями фтора и наличием флюоритовой минерализации. Концентрации фтора в поверхностных водах соответствуют ПДК (0,7–1,5 мг/дм^3), но чаще всего они ниже этих значений, составляя 0,2–0,3 мг/дм^3 (рис. 1) [5]. Огромный ангаро-витимский батолит, сложенный палеозойскими гранитоидами и монцонитами, выходит на поверхность на северо-востоке и востоке Байкальской рифтовой зоны. Климат и направление ветра в Байкальском регионе также имеют значение. Направление ветра от алюминиевых заводов часто проходит вдоль долины Ангары в сторону оз. Байкал. Таким образом, весной в снегу оз. Байкал и, следовательно, в байкальской воде наблюдается небольшое повышение концентрации фтора [6].

Рассмотрим распределение F в воде сопряженных компонентов Байкальской экосистемы – минеральные источники, скважины, притоки, Байкал, исток Ангары. Отбор воды и анализ проводился в 1998–2022 гг., было отобрано 876 проб (рис. 2, табл. 1). Определение массовой концентраций F в воде выполнен потенциометрическим методом с применением системы капиллярного электрофореза «Капель» в ЦКП «Изотопно-геохимические исследования» ИГХ СО РАН [6].

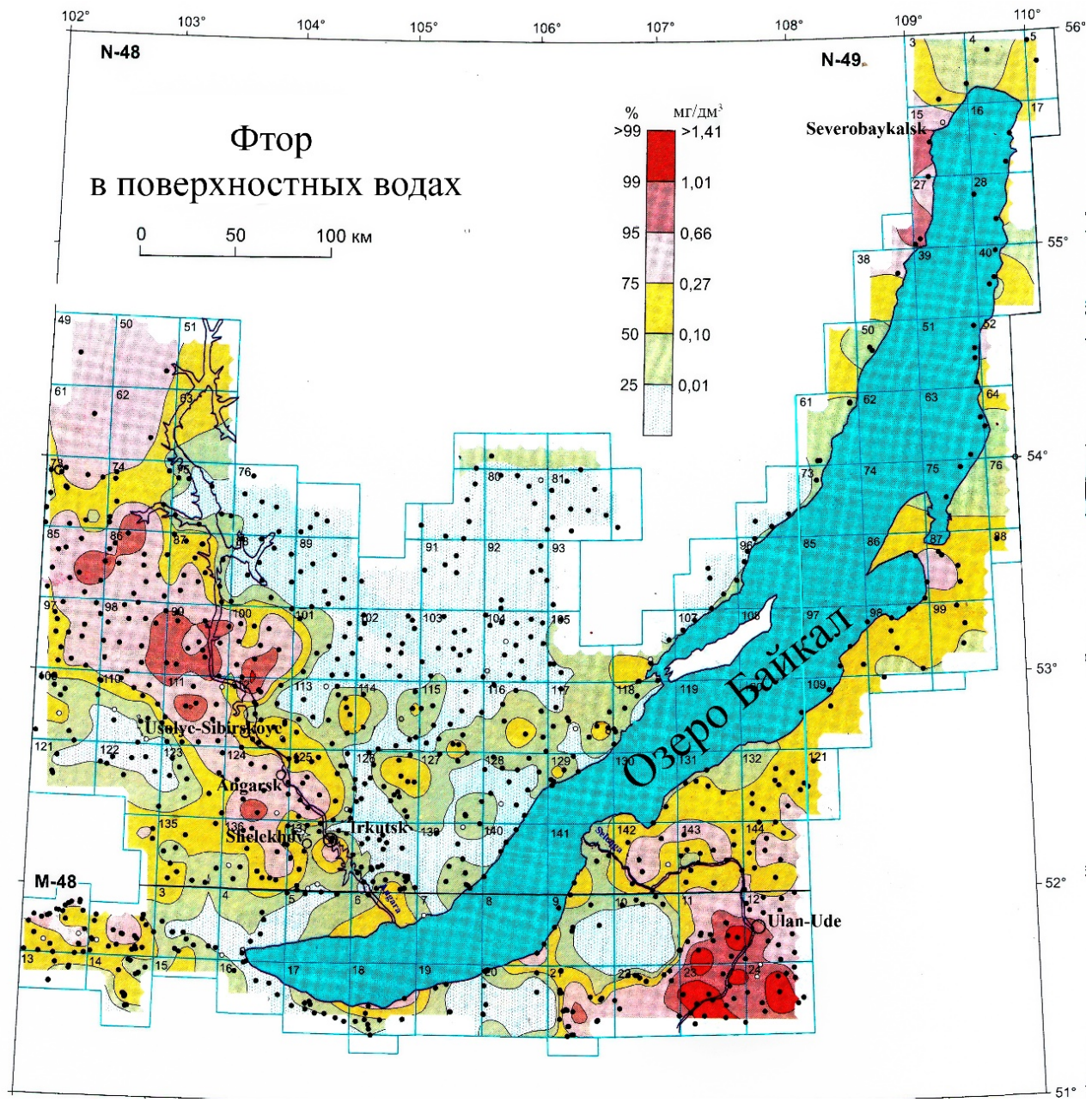


Рис. 1. Распределение концентраций фтора (мг/дм^3) в поверхностных водах Байкальского региона [5]

Таблица 1

Концентрации F (мг/дм^3) в воде сопряженных компонентов экосистемы Байкала

Показатель	Минеральные источники	Скважины	Притоки	Байкал	Исток
Количество значений	32	23	214	118	489
Максимум	23	1,13	0,65	0,40	0,30
Минимум	0,1	0,07	0,02	0,16	0,11
Среднее	11	0,35	0,17	0,22	0,21
Медиана	12	0,30	0,13	0,22	0,20

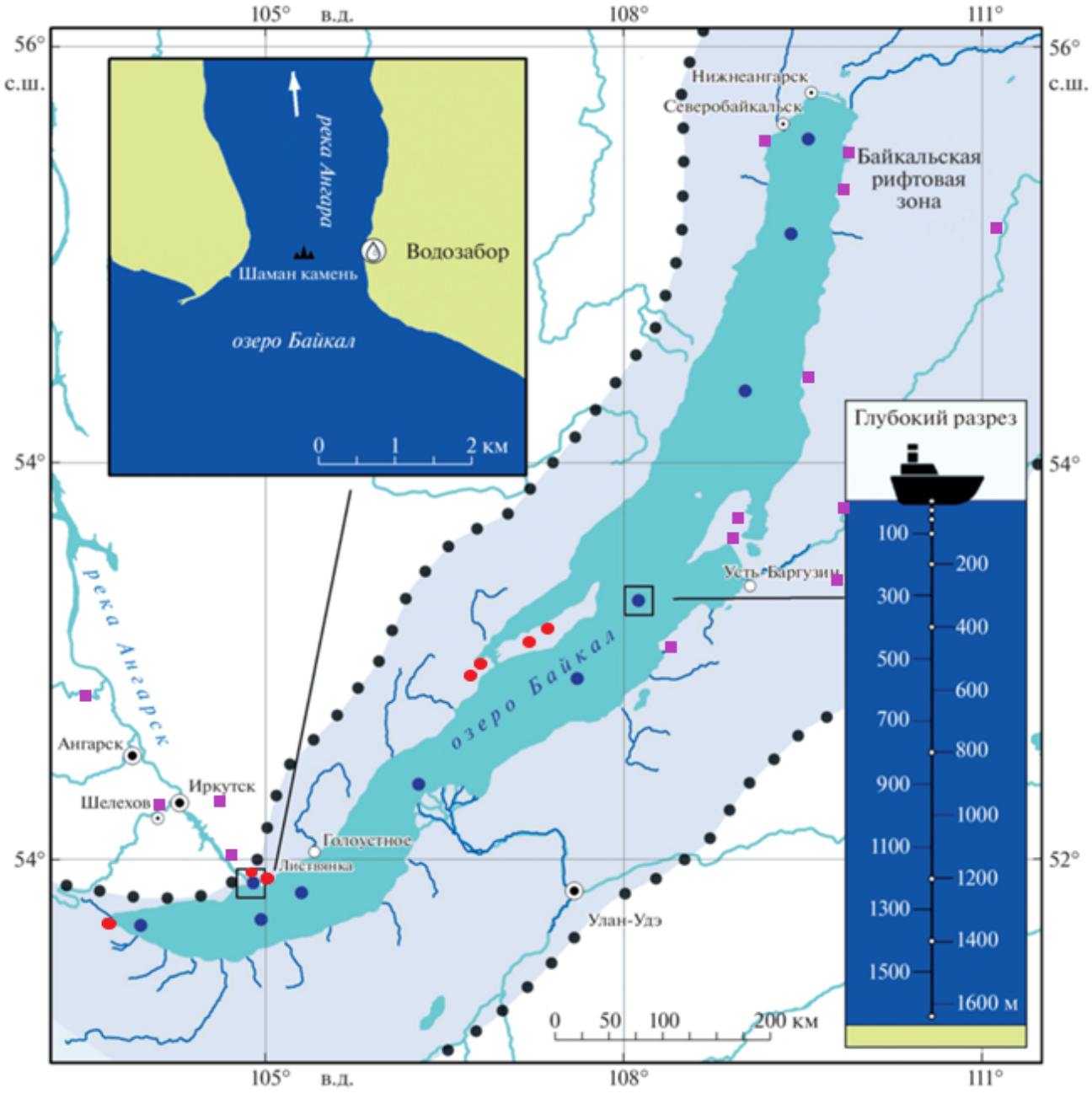


Рис. 2. Схема отбора проб воды из сопряженных компонентов экосистемы Байкала: синими точками отмечена байкальская вода, квадраты с точками – места отбора проб глубоководных вод и воды из ангарского источника, красными точками – вода из скважин, фиолетовые квадраты – вода из минеральных источников

Минеральные источники

На берегах Байкала отмечается значительное количество холодных и горячих минеральных источников, часто с повышенной (иногда в 100 раз) концентрацией F относительно средних значений в речной воде Байкальского региона. Информация по содержанию F в 13 горячих источниках (32 определения фтора в разное время года) (по авторским и литературным данным [3]) вблизи Байкала показала изменения его концентрации от более 20 до 2 мг/дм^3, а в холодных источниках $\leq$ 0,2 мг/дм^3 (холодные источники в поселках Худяково и Никола) (рис. 3).

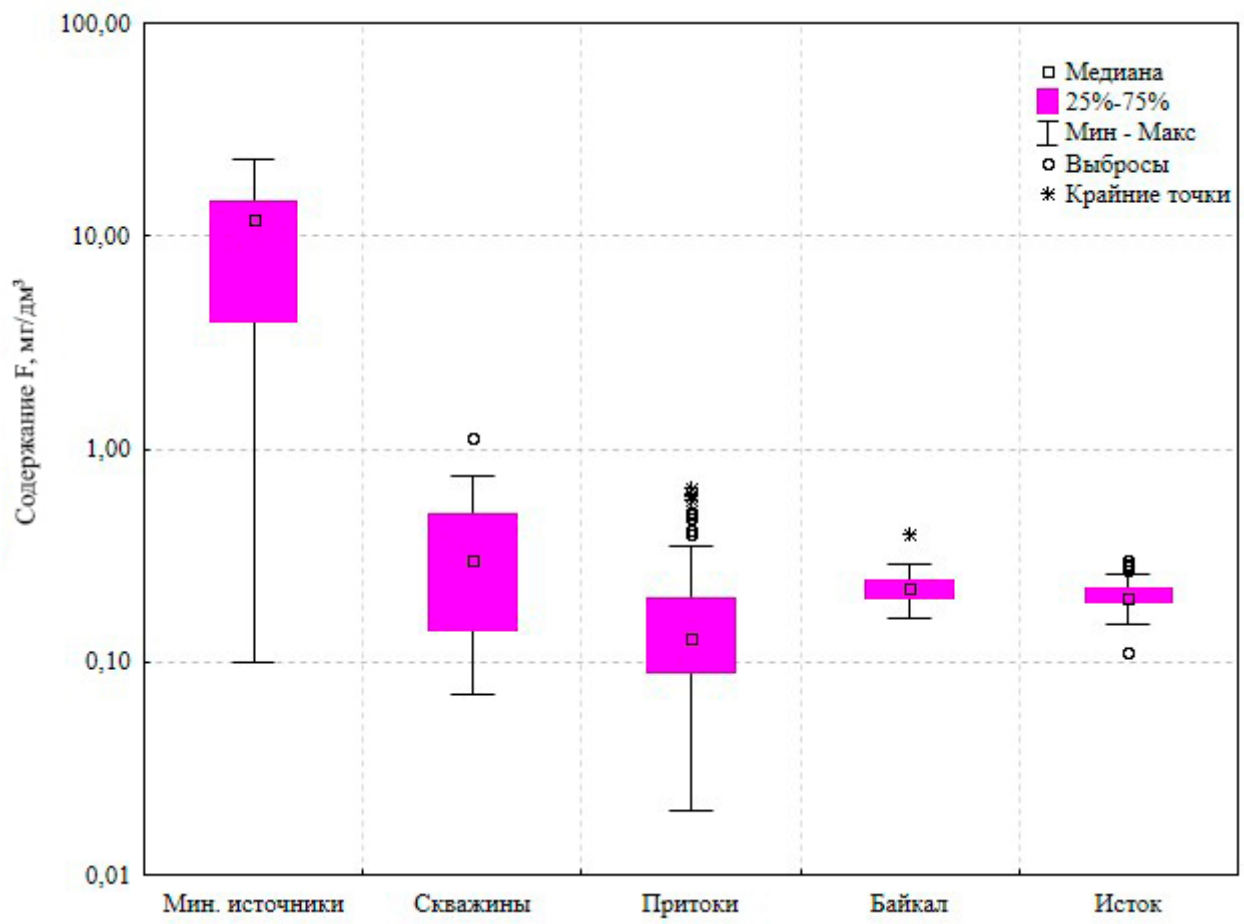


Рис. 3. Распределение концентраций F в сопряженных водных компонентах экосистемы Байкала (мг/дм^3)

Примером горячих источников с высокой концентрацией F являются Котельниковский, Змеиный и др. Источники с более низкой концентрацией (2–3,5 мг/дм^3) – Горячинск, Фролиха, Хакусы и др. Повышенные концентрации F в горячих минеральных источниках фиксируют их связь с более глубинными флюидно-гидротермальными системами Байкальской рифтовой зоны [3]. Поскольку в горячих источниках часто отмечаются и рудные элементы, то Е. В. Скляров предполагал, что некоторые термальные источники могут быть «природными загрязнителями» редкими и рудными элементами для воды Байкала [7].

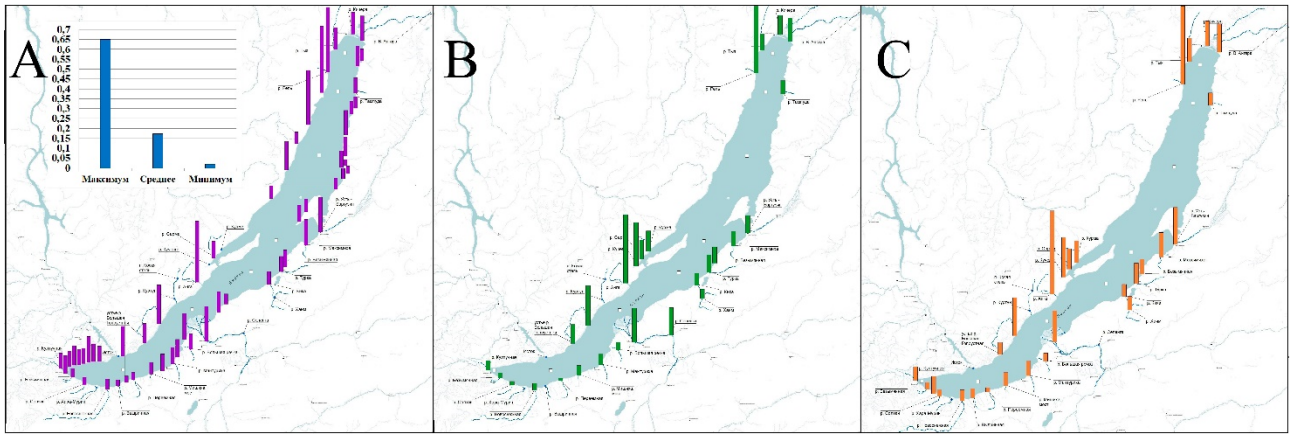
Подземная вода (скважины)

За время отбора воды вокруг Байкала изучено 17 скважин. Выполнено 23 анализа на определение F. Подземная вода из скважин имеет менее высокие концентрации F, чем вода горячих минеральных источников, но иногда достигает нормальных значений ПДК – 0,75 мг/дм^3 (на острове Ольхон, пос. Еланцы и др.). Повышенные концентрации фтора в подземных водах были обусловлены расположением, так как на западном побережье Байкала в вблизи о. Ольхон залегают палеопротерозойские гранитоиды и субщелочные породы [8]. Высокий уровень фтора также обусловлен глубиной залегания водоносного горизонта,

как, например, в поселке Ольха (глубина 310 м), где добывается столовая минеральная вода «Иркутская» [9] (рис. 3). Связь фтора с вмещающими породами, осушаемыми глубоководными водами, можно проследить по его относительно высокой концентрации в воде из скважин.

Притоки Байкала

В период с 2007 по 2022 г. в разные сезоны были опробованы воды в устьях 30–35 притоков оз. Байкал. Вода притоков заметно различается по концентрациям F, что обусловлено влиянием различных по составу дренируемых коренных пород. Соответственно геологической карте Байкала повышенные содержания F (0,3–0,65 мг/дм^3) отмечаются в устьях крупных притоков, которые дренируют разновозрастные гранитоидные породы, – реки Рель, Анга, Верхняя Ангара, Бугульдейка, Кучелга, Усть-Баргузин и др. В истоке р. Селенги содержание F может достигать 0,6 мг/дм^3, что обусловлено антропогенным фактором за счет промышленных объектах на ее берегах. В большинстве притоков в юго-восточной части Байкала (реки Снежная, Хара-Мурин, Слюдянка и др.) концентрации F низкие – 0,05–0,1 мг/дм^3 (рис. 4). Здесь основной состав горного массива Хамар-Дабан с низкими концентрациями фтора представлен вмещающими породами. В юго-западной части оз. Байкал многочисленные притоки (Ангасолка, Маритуй, Половинка, Шумиха и другие реки) дренируют архейские метаморфические породы (мраморы, кварциты, кристаллические сланцы и др.). Концентрации ионов фтора в устьях этих притоков были в два раза выше, чем в юго-восточных притоках (до 0,2 мг/дм^3). Они были близки к значениям для воды из оз. Байкал и истока р. Ангары.



A: лето 2007 г., *B: весна 2019 г.,* *C: осень 2019 г.*

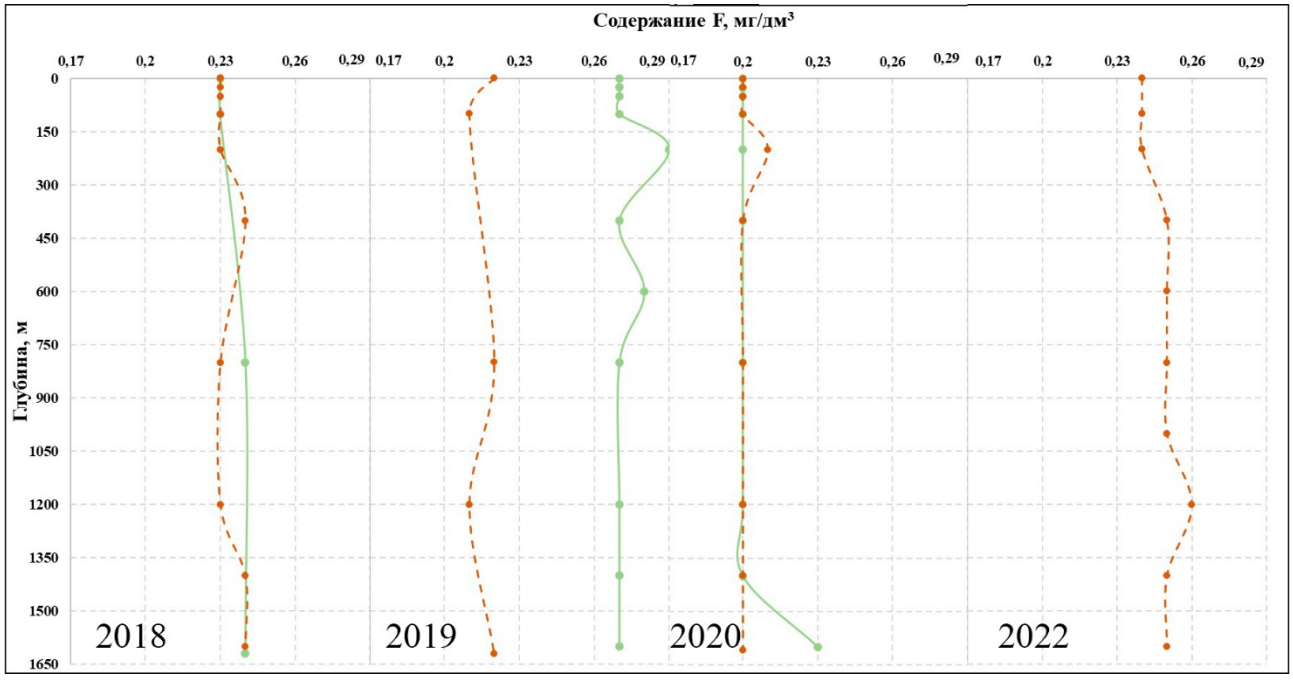
Рис. 4. Распределение концентраций ионов фтора (мг/дм^3) в воде устьев притоков Байкала

В юго-западной части оз. Байкал многочисленные притоки (реки Ангасолка, Маритуй, Половинка, Шумиха и др.) дренируют архейские метаморфические породы (мраморы, кварциты, кристаллические сланцы и др.). Концентрации ионов фтора в устьях этих притоков были в два раза выше, чем в юго-восточных притоках (до 0,2 мг/дм^3). Они были близки к значениям для воды из оз. Байкал и

истока Ангары. В истоке р. Селенги концентрация F в разные сезоны иногда достигала 0,4 мг/дм^3, но здесь также может сказываться антропогенный фактор из-за промышленных объектов в ее бассейне.

Вода Байкала

Выполнено 118 анализов воды на определение концентраций фтора. В глубинной и поверхностной воде оз. Байкал содержание фтора не превышает 0,2–0,3 мг/дм^3. Заметных изменений содержаний F от поверхности озера на глубину 1640 м в разное время года в течение 2018–2022 гг. не отмечено (рис. 5). Максимальная концентрация фтора (от 0,4 до 0,54 мг/дм^3) была зафиксирована только два раза, весной и осенью 2020 г., в поверхностных водах центральной части оз. Байкал, напротив устья р. Селенги, где концентрация фтора достигала 0,4 мг/дм^3 (рис. 3). Это может быть объяснено только быстрым течением при резкой смене погоды (шторм, ураган, сильный ветер и т. д.) в устье р. Селенги и на оз. Байкал или разовым повышением концентрации фтора в воде р. Селенги из-за антропогенного воздействия промышленные предприятия в его бассейне. Возможно влияние частых сейсмических движений в 2020 г. в Байкальском регионе.



Прямые линии обозначают весну, штрих – осень

Рис. 5. Распределение концентраций F (мг/дм^3) в поверхностных и глубоких водах оз. Байкал в 2018–2020 и 2022 гг.

Вода истока р. Ангары

Ежемесячный контрольный отбор проб на участке источника Ангара позволил получить результаты анализа на содержание ионов фтора на основе 488 проб воды, отобранных с 1998 по 2022 г. (рис. 6, табл. 1). Концентрации F– в воде из истока были довольно низкими (до 0,11 мг/дм^3); максимальное значение редко достигало 0,3 мг/дм^3, а среднее значение и медиана были одинаковыми

(0,2 мг/дм^3). Другими словами, концентрация F– в пять-десять раз ниже, чем ПДК для питьевой воды (0,7–1,5 мг/дм^3). В течение исследуемого периода с 1997 по 2003 г. в воде истока были зафиксированы относительно высокие концентрации фтора (рис. 6). Затем начиная с 2007 г. наблюдалось очевидное снижение концентраций фтора. В период с 2017 по 2022 г. среднегодовые концентрации ионов фтора в воде истока Ангары незначительно возросли и составили 0,22–0,23 мг/дм^3 (рис. 5). Это может быть связано с увеличением туристического потока в этот период в южном бассейне оз. Байкал и у истоков Ангары [10]. В последние годы (с 2020 по 2022 г.) концентрация фтора в истоке р. Ангары несколько возросла. Это может быть связано с увеличением числа туристов.

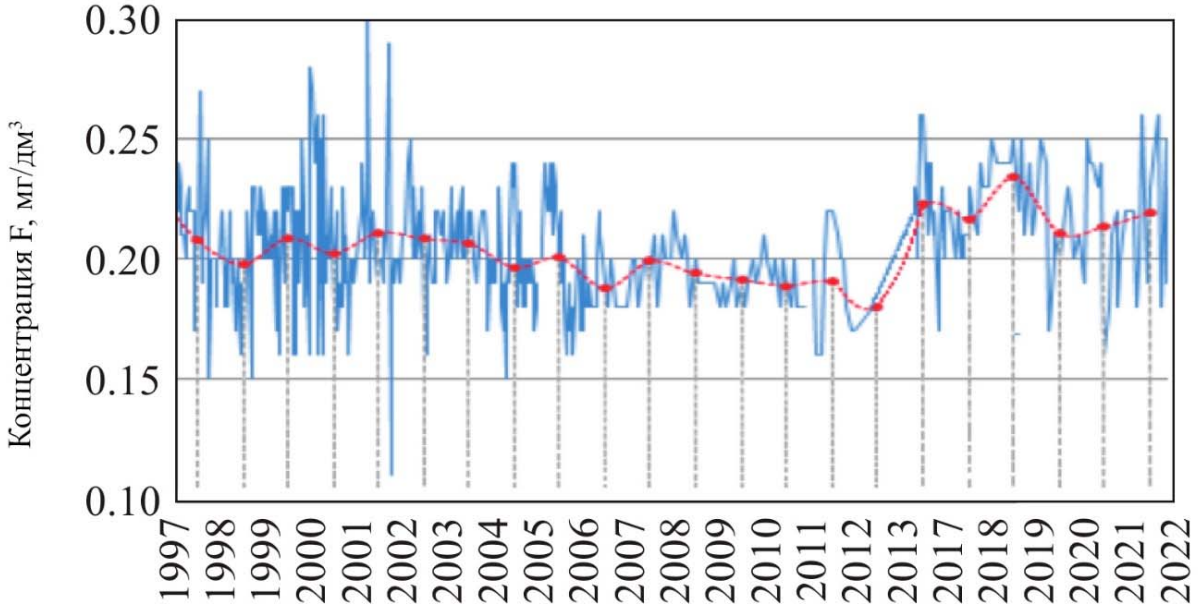


Рис. 6. Месячные (синий) и среднегодовые концентрации (красный) ионов фтора в воде источника Ангара за период с 1998 по 2022 г. (мг/дм^3)

Заключение

Анализ полученной геологической и геохимической информации о распределении концентраций фтора в воде сопряженных компонентов экосистемы Байкала позволяет сделать следующие выводы:

1. Дефицит фтора на территории Прибайкалья является результатом сложного сочетания геологических, геохимических, гидрологических, климатических и биологических факторов. Однако заводы по производству алюминия, работающие в регионе более 60 лет, демонстрируют значительное поступление фтора и его негативное воздействие на окружающую почву, снег и речную воду, а также на людей, живущих вблизи заводов.

2. Значительные различия в концентрациях фтора в различных водных компонентах экосистемы Байкала указывают на влияние его приуроченности к Байкальской рифтовой зоне, где часто происходят землетрясения и геодинами-

ческие подвижки, сопровождающиеся незначительными изменениями концентраций фтора в оз. Байкал и, следовательно, в истоке Ангары. В то же время активность термальных источников, окружающих его, продолжается.

3. Изменение климата и резко континентальный климат (с –40 °С до 35 °С) в Байкальском регионе, частые потепления и засухи (с 2000 по 2014 г.), а также снижение промышленной нагрузки в регионе в эти годы привели к незначительному увеличению содержания фтора в истоке Ангары. Похолодание в период с 2017 по 2020 г. сменилось повышением уровня воды в оз. Байкал, наводнениями на притоках и р. Ангары.

4. Повышенные концентрации фтора в воде из скважин на о. Ольхон и в некоторых прибрежных районах оз. Байкал, которые были близки к необходимым для здоровья человека, указывают на воздействие осушенных гранитоидных пород с относительно высокими концентрациями фтора на грунтовые воды.

5. Некоторые факторы обеспечивают стабильность байкальской воды и ее безопасность: возможное попадание глубинных элементов в байкальскую воду и ее обновление, отложение токсичных элементов в устьях многочисленных притоков на геохимических барьерах и т. д.

6. Для сохранения чистоты воды в экосистеме Байкала, которая имеет глобальное значение (охраняется ЮНЕСКО), необходимо значительно улучшить комплексный туризм, рекреацию и социально-экономическое развитие вокруг оз. Байкал.

Список литературы

1. Fluoride contamination, consequences and removal techniques in water: a review. URL: https://pubs. rsc. org/en/content/articlehtml/2022/va/d1va00039 (дата обращения: 28.02.2025).

2. *Добровольский В. В.* География микроэлементов: глобальное рассеяние // Москва: Мысль. 1983. – 272 с.

3. Ломоносов И. С. Геохимия и формирование современных гидротерм Байкальской рифтовой зоны. Новосибирск : Наука, 1974. 168 с.

4. Rare earth elements in tributaries of Lake Baikal (Siberia, Russia) / O. A. Sklyarova, M. V. Pastukhov, N. A. Zagorulko [et al.] // Applied Geochemistry. 2017. Vol. 82. P. 164–176.

5. Геохимия окружающей среды Прибайкалья (Байкальский геоэкологический полигон) / В. И. Гребенщикова, Э. Е. Лустенберг, Н. А. Китаев, И. С. Ломоносов // Новосибирск: Академическое изд-во "Гео", 2008. 236 с

6. Методика измерений массовой концентрации хлорид-ионов в питьевых, поверхностных и сточных водах меркуриметрическим методом / С. А. Хахалин. М., 1997. С. 4–9

7. Natural pollutants of Northern Lake Baikal / E. V. Sklyarov, O. A. Sklyarova, A. V. Lavrenchuk, Yu. V. Menshagin // Environ Earth Sci. 2015. Vol. 74. P. 2143–2155

8. Байкаловедение. Кн. 1. Новосибирск : Наука, 2012. 320 с.

9. Алиева В. И., Загорулько Н. А. Влияние природных и техногенных факторов на гидрохимический состав рек промышленной зоны г. Иркутска // Вода: химия и экология. 2013. № 6(60). С. 16–21.

10. Роль антропогенных факторов в развитии экологического стресса в литорали озера Байкал (акватория пос. Листвянка) / А. Н. Сутурин, Е. П. Чебыкин, В. В. Мальник [и др.] // География и природные ресурсы. 2016. № S6. С. 43–54.

УДК 504.03:711.4(556)

Экологические индикаторы состояния водных объектов

В. М. Ерошкин (vadimeroshkin99@gmail.com), Л. Д. Чепинога (chepinogal20@mail.ru), Е. В. Потапова (e.v.potapova.isu@mail.ru)
Иркутский государственный университет, г. Иркутск

Аннотация. Число инвариантов экологических индикаторов и индикаторов устойчивого развития настолько разнообразно, но до сих пор не актуально для чёткой оценки показателей как качества, так и динамики показателей сред. Представлено более десяти определений термина «экологический индикатор», представлено несколько групп индикаторов по различным направлениям. Одиннадцать элементов аспекта «Вода» по отчетности в области устойчивого развития G4, пять индикаторов GRI раздела «303 Вода», 14 индикаторов устойчивого развития, категории «В. Экологические индикаторы», группы «В-1. Водные ресурсы».

Ключевые слова: индекс, водный объект, базовые индикаторы, динамика показателей, нефинансовая отчётность**.**

«Экологический индикатор» – настолько же расхожее, растиражированное и неопределённое понятие, как и «индикатор» и «экологический» по отдельности. Однако существует дополнительная неопределенность относительно того, что такое индикатор и что такое индекс (не для математиков), а также иерархия территориальной размерности через глобальные, региональные, местные и другие варианты (не для географов). Безусловным пониманием этих терминов, в контексте статьи по экологии, в частности водных ресурсов, является всё то, что характеризует состояние водной среды. Поисковые запросы по «экологический индикатор» в сети Интернет дают тысячи ссылок ответов и большинство из них соответствуют параметрам.

Из самых распространённых и не вызывающих особых сомнений следует отметить, что за экологический индикатор принимают следующие показатели:

1) некий признак, характеризующий обычно всё-таки – экосистему (но благодаря «экосистеме МТС» или как обычно к ужасу науки, даже это слово имеет совершенно противоположные смыслы);

2) лишь фрагмент информации о окружающей среде, несущий определённый смысл;

3) количественный показатель (как измеренный, так и рассчитанный), который помогает получить представление о состоянии окружающей среды или здоровья человека;

4) знак, указатель, символ, признак, свойственный системе или процессу, на основании которого производится качественная или количественная оценка тенденций изменений, определение или оценочная классификация состояния экологических систем, процессов и явлений;

5) компоненты и элементы природного территориального комплекса, позволяющие оценивать как её состояние и динамику, так и эффективность мер обеспечения экологической безопасности [3];

6) показатель прошедший процесс отбора и/или агрегирования, который отслеживается с течением времени, чтобы его можно было использовать для принятия решений;

7) признаки эффективности в рамках системы менеджмента, позволяющие постоянное улучшение экологических показателей в соответствии с установленными целями;

8) параметр или его значение, описывающий состояние среды, влияние на людей, экосистемы и материалы, давление на среду, движущие силы и реакции, управляющие этой системой.

Имеются вполне оригинальные определения, в контексте некоторых научных направлений, например: базовые индикаторы экологической результативности; биологические показатели здоровья окружающей среды; организмы – индикаторы различного состояния (водных объектов); латентные индикаторы экологической напряженности региона; экологические индикаторы эффективности функционирования агропромышленной территории опережающего развития. Среди которых – «водопотребление в расчете на единицу (в физическом или стоимостном выражении) продукции (сельскохозяйственного сырья и продукции из него), производимой на предприятии [1].

Существует значительное число руководящих документов по оценке деятельности предприятий, хозяйственной и иной деятельности территориальных уровней и в границах сектора экономики, где необходимая отчётность, в том числе государственная также разделяется по некоторому числу показателей, значительная часть которых являются индикаторами, как функционирования самой организации, так и её давления на водные объекты и ресурсы.

В «Руководстве по отчетности в области устойчивого развития G4» деятельность предприятия рассматривается в разрезе нескольких категорий: экономической, экологической и социальной. В свою очередь каждая категория подразделяется на несколько аспектов. Так, экологическая категория подразделяется на такие аспекты, как материалы, энергия, вода, биоразнообразие, выбросы, сбросы и отходы. Аспект «Вода» рассматривается в разрезе трёх групп показателей и состоит минимум из 11 элементов [2] (табл. 1):

Таблица 1

Элементы показателей аспекта «Вода»

Код	Показатель	Элементы
G4-EN8	Общее количество, общий объём забираемой воды с разбивкой по источникам	1) поверхностные воды, включая болота, реки, озера и океаны; 2) подземные воды; 3) дождевые воды, собираемые и сохраняемые организацией; 4) сточные воды другой организации; 5) муниципальные и другие системы водоснабжения

Окончание табл. 1

Код	Показатель	Элементы
G4-EN9	Источники воды, на которые оказывает существенное влияние водозабор субъекта хозяйственной деятельности	1) размер источника воды; 2) отнесен ли данный источник к охраняемым территориям (на национальном или международном уровне); 3) ценности с точки зрения биоразнообразия (например, разнообразие и число видов эндемиков, общее количество охраняемых видов); 4) ценности или важности источника воды для местных сообществ и коренных народов
G4-EN10	Доля и общий объем многократно и повторно используемой воды организацией	1) общий объем воды 2) объем в процентах от общего объема водозабора, отражаемого показателем G4-EN8

В «Базовых индикаторах результативности деятельности организации» (для разнообразных отчётов) экологические индикаторы также рассматриваются в разрезе нескольких аспектов: материалы, энергия, вода, выбросы, сбросы и отходы, продукция и услуги. Для аспекта «Вода» в нем предусмотрены следующие показатели:

1) потребление свежей воды на собственные нужды, единицы измерения – тыс. $м^3$, источником данных для этого показателя является форма № 2-ТП (водхоз) годовая «Сведения об использовании воды» Росстата.

2) удельное потребление воды в натуральном выражении – отношение использованной воды (всего) к объёму произведенной за отчетный период продукции в натуральном выражении, единицы измерения – тыс. $м^3$/ед.,

3) доля повторно использованной воды в общем объёме расхода воды на собственные нужды, единицы измерения – проценты, источником данных для этого показателя является форма № 2-ТП (водхоз), как и для первого показателя.

Известным источником, в том числе экологических индикаторов деятельности организации являете нефинансовая отчётность ESG, и разнообразные руководства к её предоставлению, например Глобальная инициатива по отчётности (Global Reporting Initiative, GRI). В главе/разделе «Охрана окружающей среды» такой отчётности рекомендуется использовать ряд показателей, дающих возможность как непосредственной оценки деятельности предприятия, так и сопоставления его деятельности в динамике, в отрасли и на территории. Обычно используется пять индикаторов раскрытия информации для раздела водообращения (табл. 2).

Безусловно, отдельно место занимают индикаторы устойчивого развития (ОЭСР, Организация экономического сотрудничества и развития) и КУР ООН (Комиссия ООН по устойчивому развитию), как сложная зависимость, выводимая из базовых данных, которые как правило не возможно применять для интерпретации изменений, но с их помощью можно оценить состояние экономических, социальных или экологических переменных. Обычно выделяют индикаторы состояния, давления и реагирования.

Таблица 2

Характеристика индикаторов GRI в разделе 303 «Вода»

Индикатор GRI	Раскрываемая информация	Комментарии / исключения
301-1	Обращение с водой как с общим ресурсом	
301-2	Управление неблагоприятным воздействием сбросов в водоемы	
301-3	Забор воды	Раскрывается как удельный показатель на тысячу долларов выручки и на единицу продукции
301-4	Сброс воды	Показатель, раскрываемый частично, без разбивки по типу назначения, иногда в совместно с производителями
301-5	Водопотребление	Общий расхода воды, разбивка потребления воды по источникам раскрыта в целом и по каждому отчетному сегменту

В результате многолетних исследований, совместными усилиями ученых различных научных направлений многих стран мира при непосредственном участии 58-го комитета СКОПЕ (ISEM) при ЮНЕП удалось достичь согласия относительно общих базовых свойств (чувствительности к давлению, изменениям; способности к агрегативности в общей системе индикаторов; простоте интерпретации показателей; научной обоснованности полученных индексов индикатора), которыми должны обладать индикаторы и индексы [5]. Концептуальное и целенаправленное назначение использования показателей динамики природной среды при условии их удовлетворения четырём вышеуказанным базовым свойствам сводится к представлению в обобщённой форме данных организации по следующим основным направлениям:

– количественная и/или качественная комплексная оценка состояния и динамики конкретной экосистемы, например водного объекта в целом или его отдельных компонентов;

– численные значения параметров и показателей характеризующих свойства исследуемых водных объектов;

– численные значения какого-либо показателя и/или их совокупности, характеризующей взаимодействие и взаимосвязи между экосистемами, в том числе водоохранной зоны;

– численное значение параметров характеристик исследуемых процессов и явлений, протекающих в экосистемах;

Среди индикаторов устойчивого развития, категории «В. Экологические индикаторы», группы «В-1. Водные ресурсы» (табл. 3, 4) [4].

Экологические индикаторы должны быть первостепенно значимыми механизмами, достижения целей устойчивого развития каждой организации и территориального субъекта. Их важность заключается в неповторимом секторальном или интегральном контексте, сформулированном в уникальном как на социаль-

ном уровне, так и на административно-территориальном. Представление отчетности по основным индикаторам экологической результативности является обязательством организации.

Таблица 3

Три группы индикаторов раздела «Защита запасов и качества пресной воды»

Индикаторы – движущая сила	68. Ежегодное изъятие подземных и поверхностных вод, в % от доступного объема 69. Потребление воды на душу населения
Индикаторы текущего состояния	74. Запасы подземных вод ($м^3$) 75. Концентрация фекальных Coli-форм в источниках пресной воды (число на 100 мл) 76. Показатели биохимического и химического потребления кислорода по водным источникам
Индикаторы реагирования	80. Обработка сточных вод (% обслуживаемого населения всего и по типам обработки)

Таблица 4

Три группы индикаторов раздела «Защита океанов, морей и береговых зон»

Индикаторы – движущая сила	70. Вылов морских организмов (т) 71. Прирост населения в береговых зонах (%) 72. Выбросы нефти в прибрежные зоны (т) 73. Накопление соединений азота и фосфора в прибрежных водах (т)
Индикаторы текущего состояния	77. Отклонение запасов 78. Отношение этого отклонения к реальным запасам 79. Индекс развития морских водорослей
Индикаторы реагирования	81. Участие в соглашениях, касающихся морей (да/нет)

Если хотя бы попытать осмысленно упростить всё вышесказанное, то за экологический индикатор можно принять значимый элемент информации, необходимый в конкретном случае для анализа динамического состояния как конкретного водного объекта, так и в территориальном контексте или водного бассейна. Помимо указанных выше считаем необходимым отметить следующие (табл. 5):

Таблица 5

Примеры экологических индикаторов для водных объектов

Тип индикатора	Примеры
Состояние	Показатели вод – химические, физические, биологические; структура водоохранной зоны; типы землепользования; специфика основного водопользования и др.
Динамика	Временные и площадные изменения индикаторов состояния (береговая линия, расход, число водопользователей и др.)
Давление	Анализ показателей непосредственной, например рекреационной нагрузки с разбивкой на сезоны; изменение типов землепользования; объёмы водозабора и др.
Другие	Статус водного объекта, совокупный анализ, например по данным всех гидрологических постов или существующих исследований, обеспеченность и реализация опасных явлений

Динамика круговорота вод на Земле и его взаимодействие с человеческим обществом приводят к разнообразным пространственно-временным моделям качественного состава и доступности водных ресурсов и воздействиям, связанным с водой, экстремальными явлениями на жизнь, развитие и устойчивость экосистем, обществ и отдельных людей. В связи с чем доступность информации, её анализ и индикационные характеристики позволят эффективнее обеспечивать безопасность как среды обитания людей в целом, так и контролировать проблемы, в том числе качества водных ресурсов.

Список литературы

1. Воеводина Л. А., Экологические индикаторы эффективности функционирования агропромышленной территории опережающего развития // Экология и водное хозяйство. 2020. № 4(07). С. 22–40
2. Руководство по отчетности в области устойчивого развития G4 Swedish International Development Cooperation Agency (Sida), 2013 104 с.
3. Экологическое просвещение граждан. Официальный сайт Верхнекурмоярского сельского поселения Котельниковского муниципального района Волгоградской области. URL: https://xn--b1agaayanfmbpdcoz2a1p. xn--p1ai/ekologicheskoe-prosveshhenie-grazhdan/ (дата обращения 28.02.2025)
4. Tarasova N. P., Kruchina E. B. Indices and indicators of sustainable development // Materials of the international conference Sustainable development: nature – society. Человек. 2006. Т. 1. С. 127.
5. UN-Water. URL: https://www.unwater.org/ (дата обращения 28.02.2025)

УДК 551.510.42(571.1)

Прогноз сроков появления льда и установления ледостава на реке Умбе с использованием нейронных сетей

С. А. Канашин (ckanashin@yandex.ru)
Государственный гидрологический институт, г. Санкт-Петербург

Аннотация. Отмечается, что разработка и усовершенствование методов прогнозирования характеристик ледового режима является одной из важных задач, необходимой для комплексного использования водных ресурсов. В последнее время методы глубокого обучения получают широкое распространение в целях прогнозирования различных климатических и гидрологических характеристик. Представлена разработка нейронной сети с использованием методов глубокого обучения для прогноза сроков появления льда и установления ледостава на р. Умбе с учетом исторических данных о метеорологических и гидрологических характеристиках. Рассмотрены варианты применения различных архитектур нейронных сетей, уточнены их преимущества и недостатки.

Ключевые слова: ледовый режим Кольского полуострова, прогноз сроков замерзания, нейронные сети.

Ледовый режим рек, озер и водохранилищ оказывает существенное влияние на работу водозаборных сооружений, водного транспорта, эксплуатацию гидротехнических сооружений, сроки действия ледовых дорог, дорожное строительство, прокладку нефте– и газопроводов. Рациональное использование водных ресурсов в зимний период возможно на основе прогноза ледовых явлений

[1]. Одним из прогнозируемых элементов ледового режима рек являются сроки появления льда и установления ледостава. Особую актуальность исследование этих фаз ледового режима приобретает в условиях современного изменения климата.

Систематический выпуск прогнозов сроков появления ледовых явлений в нашей стране начался в 40-х годах прошлого столетия и к настоящему времени в этой сфере достигнуты значительные успехи. В основе краткосрочных прогнозов ледовых явлений лежит применение не только физико-статистических зависимостей, но и строгих решений, основанных на использовании уравнения теплового баланса. Долгосрочные прогнозы ледовых явлений базируются на учете закономерностей развития атмосферных процессов и преемственности их изменения, в течении последующего периода времени [2]. Однако многие методики разработаны в середине XX в. и в настоящее время нуждаются в уточнении.

За последнее десятилетие глубокое обучение – направление машинного обучения, основанное на использовании многослойных искусственных нейронных сетей – кардинально изменило подход к созданию статистических моделей в различных сферах. Оно находит применение в задачах классификации изображений, машинного перевода, распознавания речи и многих других областях. Науки о Земле, в том числе гидрология, не являются исключением.

Преимущество использования глубоких нейронных сетей обусловлен их высокой универсальностью и эффективностью. Совокупность этих качеств наряду с быстрым увеличением объемов накопленных данных об окружающей среде и ростом доступности вычислительных ресурсов позволяет рассматривать глубокие нейронные сети как новое поколение математических моделей. Они способны не только дополнить, но и потенциально заменить существующие методы моделирования геофизических процессов [3].

Основным предиктором для прогноза сроков появления первичных ледовых явлений и установления ледостава является накопленная сумма отрицательных температур воздуха. В условиях современного изменения климата увеличение сумм отрицательных температур воздуха (рис. 1) приводит к увеличению периода замерзания рек от появления первичных ледовых явлений (ПЛЯ) до установления ледостава. Существенное влияние на формирование ледовых явлений оказывают атмосферные осадки. Увеличение их количества в период становления ледостава способствует образованию снежуры и шуги, что изменяет тип и сроки формирования ледового покрова.

В качестве объекта исследования выбрана р. Умба, протекающая на Кольском полуострове. Ледовые и гидрологические характеристики были собраны по гидропосту порог Паялка. Метеорологические данные получены с метеорологической станции в пос. Умба. В качестве предикторов прогностической зависимости были выбраны суточные данные: даты наступления ледового явления, тип ледового явления, накопленная сумма отрицательных температур воздуха, накопленная сумма осадков, уровень воды. База данных собрана с 1936 по 2021 г. за период с 1 октября по 31 января соответствующего водохозяйственного года. Выбор такого временного периода продиктован наиболее ранним началом температуры воздуха через 0 °С и наиболее поздней датой формирования ледостава.

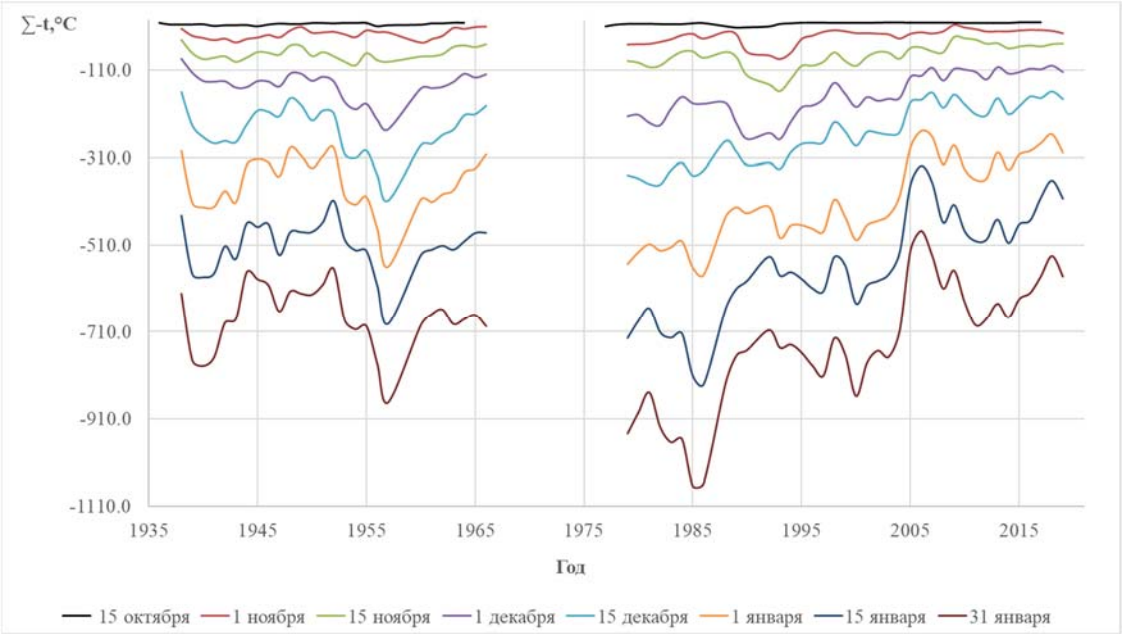


Рис. 1. Скользящее среднее сумм отрицательных температур воздуха за характерные даты

Нейронные сети были разработаны на языке программирования Python с использованием библиотеки AutoKeras – мощного инструмента автоматического машинного обучения (AutoML). AutoKeras значительно упрощает процесс создания, обучения и оптимизации нейросетей, автоматизируя подбор их структуры и гиперпараметров.

Обучение модели производилось с помощью кросс-валидации. Из всего набора данных выделен независимый набор данных для оценки точности работы модели (с 2010 по 2019 г.). На первом этапе оставшиеся данные были разделены на обучаемый и тестовый наборы в соотношении 80 и 20 % соответственно. На втором этапе модель обучалась на всех оставшихся данных, и результат ее прогноза оценивался по независимым данным.

Для прогноза дат появления льда были использованы дополнительные климатические параметры: облачность, направление ветра, скорость ветра, температура почвы, атмосферное давление (рис. 2).

Прогноз сроков установления ледостава с использованием дополнительных климатических параметров не дал хорошего результата, поэтому обучение нейронной сети проводилось с использованием основных предикторов (рис. 3).

Созданные нейронные сети имеют 5 слоев: входной, выходной и три скрытых слоя. Скрытые слои представляют собой полносвязные Dense-слои с функцией активации ReLu. Функция активация необходима для эффективного обучение модели, добавления нелинейности, ускорения обучения. Для каждой эпохи обучения рассчитывалась метрика accuracy (отношение верно предсказанных классов ледовых явлений к общему количеству примеров), значения которой с каждой эпохой улучшались. Было выполнено 50 циклов обучения с 100 эпохами в каждом. Значения метрик для модели с дополнительными климатическими параметрами приведены в табл. 1.

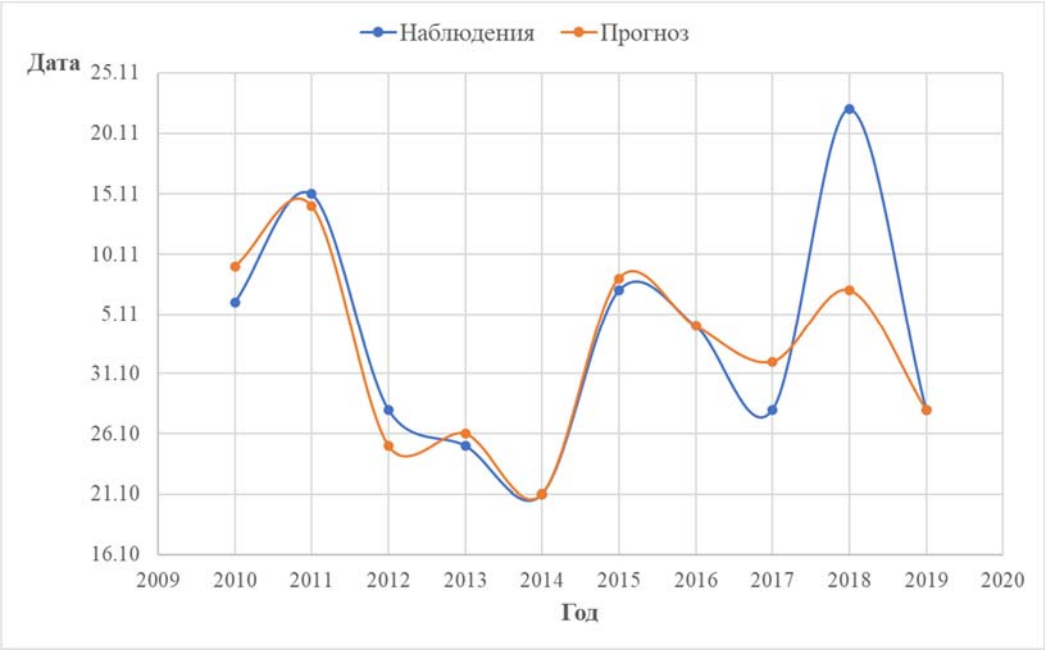


Рис. 2. Прогноз первичных ледовых явлений на р. Умба – порог Паялка

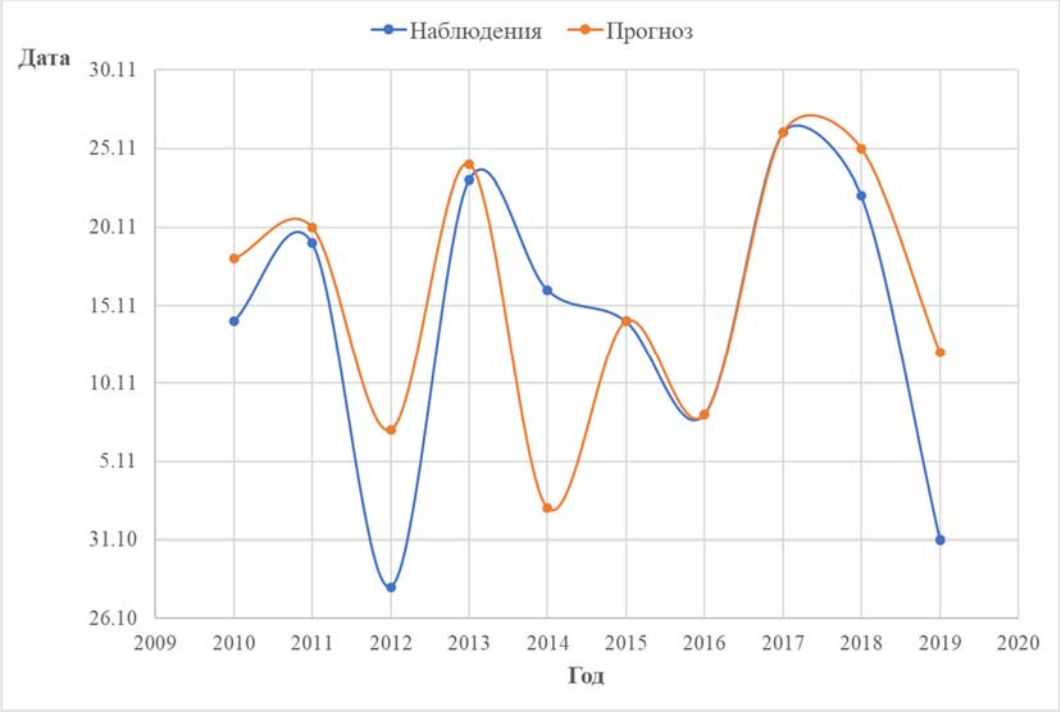


Рис. 3. Прогноз дат установления ледостава на р. Умба – порог Паялка

Таблица 1

Оценка работы нейронной сети для прогноза дат появления льда

Метрика	Значение
Accuracy	0,88
Recall	0,86
Precision	0,88
F1-score	0,87

Как показано в табл. 2 и на рис. 2 и 3, применение нейронных сетей обеспечивает точные прогнозы сроков появления первичных ледовых явлений и приемлемые результаты для дат установления ледостава. Однако для повышения точности прогнозирования требуется более детальный анализ структуры и слоев обученных нейронных сетей. Так, например, можно изменить архитектуру модели, заменив скрытые Dense-слои на слои типа LSTM (Long Short-Term Memory). Идея LSTM состоит в том, чтобы позволить каждому шагу RNN выбирать информацию для просмотра из некоторого более крупного набора информации [4]. Основная проблема стандартных RNN заключается в затухании градиента, что затрудняет обучение моделей на длинных последовательностях. LSTM решает эту проблему с помощью специальной структуры сети. Как правило, классифицированные ряды достаточно несбалансированны из-за учета поздних дат установления ледостава. Для настройки модели и учета наименьших классов (первичные ледовые явления) можно использовать метод SMOTE (Synthetic Minority Over-sampling Technique), который позволяет добавить данные наименьших классов с помощью метода ближайшего соседа. Кроме того, в некоторых случаях увеличение числа классов, например, вводом класса для неустойчивого ледостава, может дать улучшенные результаты из-за ручной балансировки классов.

Таблица 2

Результаты работы модели на независимых данных

Год	Дата появления первичных ледовых явлений		Дата установления ледостава	
	Наблюдения	Прогноз	Наблюдения	Прогноз
2010	6. 11	9. 11	14. 11	18. 11
2011	15. 11	14. 11	19. 11	20. 11
2012	28. 10	25. 10	28. 10	7. 11
2013	25. 10	26. 10	23. 11	24. 11
2014	21. 10	21. 10	16. 11	2. 11
2015	7. 11	8. 11	14. 11	14. 11
2016	4. 11	4. 11	8. 11	8. 11
2017	28. 10	1. 11	26. 11	26. 11
2018	22. 11	7. 11	22. 11	25. 11
2019	28. 10	28. 10	31. 10	12. 11

Таким образом, используя продолжительные ряды наблюдений за гидрологическими и метеорологическими характеристиками применение нейронных сетей позволяет существенно улучшить существующие методики прогнозирования параметров ледового режима рек Кольского полуострова. Возможность использования большого числа предикторов позволяет строить уникальные прогностические зависимости различных типов замерзания рек, учитывать естественную и искусственную зарегулированность водотоков, морфологические особенности русел, климатические изменения и др.

Список литературы

1. *Георгиевский Ю. М., Шаночкин С. В.* Гидрологические прогнозы : учебник. СПб. : Изд. РГГМУ, 2007. 436 с.
2. *Георгиевский Ю. М.* Краткосрочные и долгосрочные прогнозы ледовых явлений на реках, озерах и водохранилищах : учеб. пособие. Л. : Изд. ЛПИ, 1986, с. 50.
3. *Ayzel, G. V.* Deep neural networks in hydrology: the new generation of universal and efficient models // Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences. Vol. 66 (1). P. 5–18.
4. *Christopher Olah* Understanding LSTM Networks//colah's blog URL: https://colah.github.io/posts/2015-08-Understanding-LSTMs/ (дата обращения: 19.02.2025)

УДК 504.03:711.4(556)

Экосистемные услуги водных объектов

Е. Б. Кручина (kruchinael@mail.ru)[1], Е. В. Потапова (e.v.potapova.isu@mail.ru)[2]
[1]*Институт глобального климата и экологии им. академика Ю. А. Израэля, г. Москва*
[2]*Иркутский государственный университет, г. Иркутск*

Аннотация. В соответствии с Международной инициативой TEEB используется четыре группы основных экосистемных услуг, которые полностью соотносятся с сервисами водных объектов. Задача оценки благ природной среды до сих пор остаётся частично нерешённой. Предлагается использовать для получения итоговой цены лексикографические предпочтения, социальную справедливость, деонтологическую и не гуманитарную стоимость при непосредственном включении таксы и бонитета ресурса потребительской и без потребления для создания объективной глобальной стандартной основы учёта природного капитала водных объектов.

Ключевые слова: ценность, польза, вода, водопользование, сервис, экономическая оценка.

Экосистемные услуги, преимущественно бесплатные сервисы, предоставляемые природными объектами (окружающей природной средой), благодаря которым люди могут укрепить своё благополучие и усилить процветание. Несмотря на давнее время появления как понятия, так и использования подходов анализа, значительное число научных работ по вопросам выявления и оценки, интерес и методы продолжают появляться. С одной стороны, люди, в основной массе перестали жить в пещерах и шалашах, ходить на охоту и собирать еду, с другой стороны наши методы очистки воздуха и воды далеки от идеальных или дороги, в сравнении с водно-болотными угодиями и лесными экосистемами. Шопоголизм фактически заменил многие варианты активного отдыха, но все эти изменения не сделали нас счастливее и здоровее.

В соответствии с Международной инициативой TEEB (The Economics of Ecosystems and Biodiversity), которая ставила своей целью привлечение внимание и проведение первичной оценки экономической выгоды от сохранения и оптимизации использования биоразнообразия, была создана сложная система выявления различных выгод от природы «хорошего качества», т. е. полезной и более дорогой (ценной) будет чистая река, а не та в которую осуществляются сбросы сточных вод и не контролируются смывы с окружающей территории. TEEB пыталась анализировать выгоды, объяснять значимость и актуализировать

неотложность первостепенных действий с использованием пяти итоговых показателей:

D0: научные и экономические основы, политические издержки и издержки бездействия,

D1: политические возможности для национальных и международных политиков,

D2: поддержка принятия решений для местных администраторов,

D3: бизнес-риски, возможности и показатели.

D4: собственность граждан и потребителей [2].

Современная работа группы исследователей TEEB включает в себя определение ценности нескольких крупных блоков:

– целостные и системные решения к экономике сельского хозяйства, которая связана со сложными цепочками логистики стоимости, в том числе в контексте использования воды и водных объектов;

– состояние, использование, проблемы и перспективы прибрежных (в основном прилегающих к морям) местообитаний, где сконцентрирована значительная часть человечества и проявляются многие глобальные проблемы;

– учёт богатства, включая учёт природного капитала (NCA);

– исследование особенностей экосистемных услуг в странах и регионах.

Использование этих векторов для оценки услуг водных объектов приведёт к осознанию истинного территориального и ресурсного ВВП.

Классическая классификация экосистемных услуг включает четыре группы:

1. Provisioning (англ.) – как снабжение чем-то материальным, сырьём.
2. Regulating (англ.) – как регулирование природных процессов.
3. Supporting (англ.) – как поддержание условий, даже существования.
4. Cultural (англ.) – культурные, духовные сервисы.

Но не стоит забывать о вопросах политики, обеспечение безопасности, информационное значение, например генетических ресурсов, охраны здоровья и, конечно, превалирующие желания краткосрочных выгод.

Для водных объектов в общем виде можно указать лишь некоторые следующие направления реализации экосистемных услуг (табл.).

Таблица

Примеры экосистемных услуг для водных объектов

Услуги	Примеры
Обеспечивающие, материальные	Чистая вода, рыба, водоросли, энергия, жизнь водным организмам и объектам – рифам, манграм, вода для специальных видов водопользования
Регулирующие, регламентирующие	Влияние на климат и микроклимат, круговороты веществ и воды, в том числе как часть геологического, депонирование углерода, особые микроклиматические условия, коридоры для перемещения.
Вспомогательные, поддерживающие	Очищение воды, средообразование, фотосинтез, ил, осадочные породы, обитатели водоёмов и прибрежных территорий, нерестилища.
Культурные	Отдых, наука, образование, религия, искусство, аттрактивность территории, священные объекты

В структуре базового землепользования России водные объекты относятся к категории земель водного фонда, а вот прилегающие территории, несмотря на наличие водоохранных зон, могут относиться к фактически любой другой категории и тем более назначения. Всё это усложняет не только первичную оценку ценности – не цены, а совокупности свойств водных объектов, их пользу и значимость для людей. Ещё более затруднительно получить финансовый эквивалент изменений, особенно антропогенную трансформацию и варианты влияния и загрязнений.

Содержание и использование водных объектов с учётом их экосистемных услуг можно оценивать по следующим методам:

А) Потребительская стоимость, складывается:

– из стоимости прямого использования (анализ внутреннего и внешнего рынка, учета затрат производственной функции конкретного объекта),

– стоимости непрямого использования (анализ рынка альтернативных видов использования, учета затрат на непроизводственное использование, гедонистическое ценообразование (бренд территории, ключевой объект), условная оценка (перспективы аналогов);

– альтернативной или мнимой альтернативной стоимости (метод восстановительной стоимости (если вложить средства в очищение, водоподготовку, строительство инфраструктуры для оптимизации и рационализации использования, создание охранного статуса), учёт затрат на смягчение последствий, учёт затрат которых можно избежать.

Б) Стоимость использования без потребления – традиционный альтруизм существования (условная оценка, условный выбор). Высокий охранный статус.

Стоимость на выходе, включающая социальную справедливость (особенно для различных вариантов использования одного водного объекта и для водных объектов, принадлежащих разным регионам и странам), деонтологическую стоимость (моральные и нравственные обязательства, например перед людьми живущими ниже по течению или будущими поколениями), лексикографические предпочтения (посредством последовательного сравнения количества благ, отличающих конкретный объект или объектов в регионе), не гуманитарную стоимость (от сбора платы за посещение, до платы за загрязнение), в совокупности основаны на оценке в рамках группы (иногда нескольких), совещательном и совместном, особенно международного уровня, анализе оценки.

Многие альтернативные ценности экосистемных услуг водных объектов находятся в прямом и тем более в косвенном конфликте, большинство из которых не разрешимы, например региональные системы таксации и бонитет ресурсов. Информирование и решения для основных и уязвимых групп потребителей водных объектов и прилегающих территорий в границах водоохранных зон: лиц, принимающих решения на государственном и местном уровнях, бизнесменов и широкой общественности не могут быть приняты в одностороннем порядке и иногда на уровне одного государства для трансграничных объектов.

Ещё в 2007 г. Министры окружающей среды стран G8+51, в Потсдаме (Германия), инициировали «проведение глобального анализа экономических выгод биологического разнообразия, для сравнения ущерба, связанного с его сокращением и отказом от принятия защитных мер, с затратами на эффективное сохранение» [3].

Печально, что первым пунктом решения многих проблем водных объектов в России будет не небрежность и плохое управление, не определение стоимости наносимого и накопленного ущерба, а лишь исполнение существующих законодательных актов при использовании водных объектов и содержании водоохранных зон.

Постоянная конфронтация между природой, экономикой и благосостоянием приводит нас к незамедлительному определению концепции экосистемных услуг, иначе потеря их, как ожидается, будет стоить 18 % мирового экономического производства к 2050 г. [1]. Плотность и сложность этой мириады взаимодействий между человеком и природой скрывает реальные показатели ценности и необходимые компромиссы решений.

3 марта 2025 г. в штаб-квартире ООН состоялась организационная сессия высокого уровня по подготовке к Конференции ООН по водным ресурсам 2026 г., которая предопределила вызовы и пути решения Цели устойчивого развития № 6 в обеспечении доступности и устойчивом управлении водными ресурсами и санитарии для всех на Земле [4]. Систематическая оценка стоимости экономического вклада экосистемных услуг в человеческое благосостояние и в пользу выполнения простых шагов, направленных на предотвращение потери или сокращения этого вклада.

Необходимо исключить даже вероятность заключения, что конкретный водный объект исчерпал свою экологическую ёмкость и непригоден для дальнейшего использования. Это «смертный приговор» для его обитателей, территории и людей этого района. Создание объективной глобальной стандартной основы для учёта природного водного капитала, его стоимостная оценка – инструмент, помогающий перенастроить неисправный экономический компас, перенаправить вектор потребительской экономики, которые приводит нас к решениям, пагубным для текущего процветания и для благосостояния будущих поколений.

Список литературы

1. Anderson R. Nature's gift: The economic benefits of preserving the natural world. UK. BBC News, 2010.
2. Официальный сайт TEEB. URL: https://teebweb. org (дата обращения: 28.02.2025).
3. Сукхдев Паван (Pavan Sukhdev) Экономика экосистем и биоразнообразие: обобщающий отчёт. TEEB, 2010. 52 с.
4. UN-Water. URL: https://www.unwater. org/ (дата обращения: 28.02.2025).

УДК 504.064.2

Оценка загрязнения донных отложений Иркутского водохранилища тяжёлыми и редкоземельными металлами

М. С. Мазилкин (oooazis148@gmail.com)[1,2], В. А. Бабичева[2]
[1]*Иркутский государственный университет, г. Иркутск*
[2]*Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск*

Аннотация. Актуальность работы обусловлена необходимостью анализа ранее не использованных данных по концентрации химических элементов в донных отложениях Иркутского вдхр. в виду его особой важности для региона и уникальности с точки зрения протекания осадочных процессов. Цель работы: определение уровня загрязнения донных отложений Иркутского вдхр. тяжёлыми металлами и редкими элементами. Методы исследования: содержание металлов в пробах определялось на масс-спектрометре, масс-спектрометре с индуктивно-связанной плазмой и нейтронно-активационным анализом в Университете Силезии (Польша). Для представления данных в визуальной форме использовалась ГИС-система «QGis». Результаты: на четырёх участках Иркутского водохранилища определено для 16 точек содержание 40 химических элементов. Установлено, что распределение основных загрязнителей имеет сходный характер – представлено Zr и Y в многократно превышающих средние для Прибайкалья концентрации, реже Ni и Cr в превышающих целевые, но неопасных концентрациях. Максимально зафиксированное превышение по Zr – в 20 раз больше фоновой концентрации (863 мг/кг), источник поступления не установлен. Наблюдаются повышенные концентрации Rb, Sc, Yb, Co.

Ключевые слова: водный объект, донные отложения, тяжёлые металлы, редкоземельные металлы, загрязнение.

Введение

Иркутское водохранилище, первое из всего Ангарского каскада ГЭС, выделяется среди других тем, что происходящие в нём процессы практически не зависят от расположенных выше по течению других гидротехнических объектов, а также своей высокой проточностью и меньшими объёмами аккумуляции вещества в донных отложениях [1]. В исследовании последних однако существует значительная проблема – на текущий момент отсутствуют федеральные или областные стандарты оценки загрязнения ДО или их качества, поэтому полученные данные обычно сравнивают либо с нормативами по другим регионам, либо с фоновыми или средними по региону концентрациями. Определение уровня загрязнения донных отложений Иркутского водохранилища тяжёлыми металлами и редкими элементами путём проведения вышеупомянутого сравнения и является целью работы.

Объекты и методы исследования

Пробы донных отложений отбирались в 2010 г. лабораторией инженерной геологии и геоэкологии ИЗК СО РАН для Иркутского и Братского водохранилищ. Для Иркутского водохранилища они отбирались в четырёх основных районах – у побережья в районе д. Новогрудинина и Мельничной Пади, у побережья

в районе пос. Тальцы, у побережья пос. Патроны и в Чертугеевском заливе, в общей сложности отобрано 16 проб на глубине от 0,7 до 15 м. Имеющаяся информация о местоположении, глубине и дате отбора проб представлена в табл. 1 и на рис. 1.

Первичный анализ полученных проб на физико-механические свойства производился силами ИГиГ ИЗК СО РАН, анализ на содержание тяжёлых металлов и редких элементов проводился в Университете Силезии, возможности которого по определению концентраций химических веществ значительно превосходили и превосходят текущие возможности лаборатории. Университетом Силезии был проведён анализ образцов донных отложений на содержание в них 40 элементов, таких как: Au, Ag, As, Ba, Be, Bi, Br, Cd, Co, Cr, Cs, Cu, Hf, Hg, Ir, Mo, Ni, Pb, Rb, Sb, Sc, Se, Sr, Ta, Th, U, V, W, Y, Zn, Zr, La, Ce, Nd, Sm, Eu, Tb, Yb, Lu. Определение концентраций проводилось при помощи масс-спектрометров (в том числе с индуктивно-связанной плазмой), а также нейтронно-активационного анализа.

Таблица 1

Исходные данные точек отбора проб

Название точки	Дата отбора	Широта	Долгота	Описание места отбора	Глубина отбора, м
I-1–10	27.06.2010	52 °9'57,6"	104 °22'47,6"	Левобережье, верховье залива, пос. Падь Мельничная	1,0
I-2–10	19.07.2010	52 °9'23,6"	104 °25'8,7"	Левобережье, основная акватория, севернее д. Новогрудинина	15,0
I-3–10	19.07.2010	52 °8'43,7"	104 °25' 8,3"	Левобережье, верховье залива, южнее д. Новогрудинина	3,5
I-4–10	19.07.2010	52 °9'12,47"	104 °25'1,97"	Левобережье, основная акватория, д. Новогрудинина	0,7
I-5–10	19.07.2010	52 °8'45,57"	104 °25'6,29"	Левобережье, устье залива, южнее д. Новогрудинина	12,0
I-6–10	20.07.2010	52 °0'0,3"	104 °39'49,7"	Правобережье, верховье залива севернее пос. Тальцы	1,5
I-7–10	20.07.2010	51 °59'51,9"	104 °39'44,4"	Правобережье, устье залива севернее пос. Тальцы	3,0
I-8–10	20.07.2010	52 °9'46,4"	104 °27'2,5"	Правобережье, верховье залива севернее пос. Патроны	2,0
I-9–10	20.07.2010	52 °9'38,1"	104 °27'15,6"	Правобережье, устье залива севернее пос. Патроны	1,0
I-10–10	20.07.2010	52 °9'35,0"	104 °27'2,4"	Правобережье, основная акватория севернее пос. Патроны	7,0
Irk-1–10	17.03.2010	-	-	Правобережье, Чертугеевский залив	–
Irk-2–10	17.03.2010	-	-		–
Irk-3–10	17.03.2010	-	-		–
Irk-4–10	17.03.2010	-	-		–
Irk-5–10	17.03.2010	-	-		–
Irk-6–10	17.03.2010	-	-		–

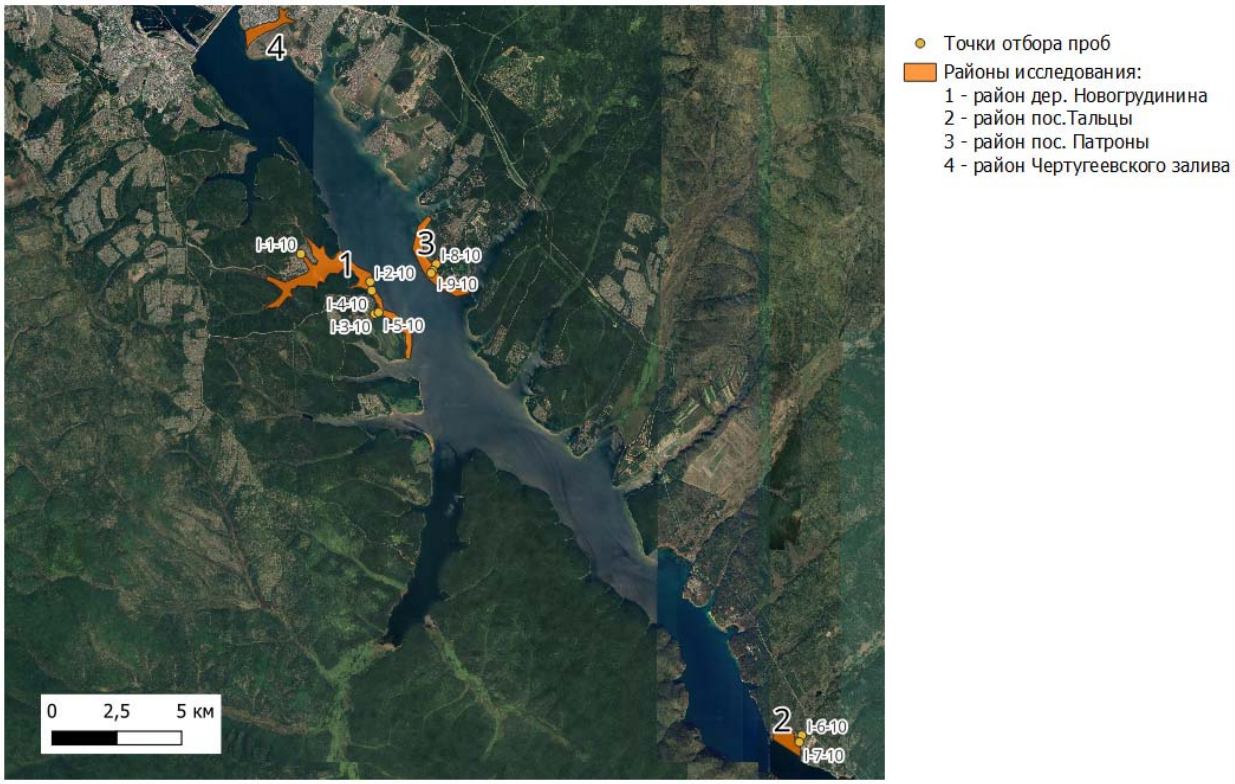


Рис. 1. Карта-схема размещения районов исследования и точек отбора проб

В виду отсутствия федеральных и региональных нормативов концентрации донных отложений сравнение производилось по представленным в иных работах фоновым и средним концентрациям, а также региональным нормативам для других регионов. Использованы предложенные в работе «Геохимия окружающей среды Прибайкалья: байкальский геоэкологический полигон» фоновые для Прибайкалья концентрации V (109 мг/кг), Cr (111 мг/кг), Co (10 мг/кг), Ni (44 мг/кг) и Cu (41 мг/кг) [2]. Для оценки концентрации редких элементов использовались средние значения содержания Sc (12,6 мг/кг), Y (10,5 мг/кг), Yb (4,4 мг/кг), La (42 мг/кг), Rb (53,1 мг/кг), Cs (6,8 мг/кг), Zn (42,5 мг/кг), Au (8,5 мг/т), Mo (4,3 мг/кг) из публикации «Рудные и редкие химические элементы в окружающей среде Прибайкалья (коренные породы, почвы, донные отложения)» [3]. Критерии загрязнённости донных отложений оценивались по методике из норматива «Нормы и критерии оценки загрязненности донных отложений в водных объектах Санкт-Петербурга», оценивающей загрязнение по Cd, Cr, Cu, Pb, Hg, Ni, Zn, As [4]. Ранее он использовался в 2015 г. в работе «Содержание тяжёлых металлов в донных отложениях реки Енисей в районе Красноярска», и такое применение в рамках одной речной системы несколько увеличивает актуальность его использования в текущем исследовании [5].

Обсуждение результатов и выводы

В табл. 2 представлены концентрации в долях от фоновых значений (по работе «Геохимия окружающей среды Прибайкалья: байкальский геоэкономический полигон») [2].

Таблица 2

Концентрации в долях от фоновых значений

Название точки	Концентрация (в долях от фоновых значений)				
	Co	Cr	Cu	Ni	V
I-1–10	1,000	1,315	0,537	1,205	0,927
I-2–10	1,111	1,514	0,756	1,682	1,257
I-3–10	1,056	1,333	0,756	1,614	1,239
I-4–10	1,111	1,550	0,585	1,455	1,138
I-5–10	1,000	2,189	0,561	1,364	1,202
I-6–10	0,944	0,937	0,537	1,000	0,991
I-7–10	0,889	1,108	0,512	1,091	0,982
I-8–10	1,278	1,324	0,854	1,818	1,284
I-9–10	1,056	1,748	0,512	1,432	1,138
I-10–10	1,167	1,414	0,829	1,500	1,128
Irk-1–10	1,333	1,414	0,902	1,795	1,183
Irk-2–10	1,278	1,369	0,976	1,886	1,220
Irk-3–10	1,111	1,432	0,707	1,705	1,193
Irk-4–10	1,056	1,495	0,683	1,636	1,156
Irk-5–10	1,111	1,432	0,585	1,614	1,101
Irk-6–10	1,222	1,387	0,780	1,795	1,257

Исходя из приведённых данных, концентрации Co в 12 из 16 случаев превышают фоновую вплоть до 1,278 от неё, в двух случаях равняются данной концентрации, ещё в двух наблюдаются ниже фоновой. Территориально превышения наблюдаются по всем точкам в Чертугеевском зал., а также у пос. Патроны. В районах пос. Падь Мельничная и д. Новогрудинина наблюдаются как превышения, так и равные фоновому значения, по точкам в районе пос. Тальцы концентрации ниже фоновой. Концентрации Cr в 15 из 16 случаев превышают фоновую вплоть до 2,189 от неё, в одном случае наблюдается концентрация ниже фоновой. Территориально превышения наблюдаются у пос. Патроны и д. Новогрудинина, наименьшие значения в районе пос. Тальцы. Концентрации Cu во всех случаях ниже фоновой, наибольшая концентрация составляет 0,976 от неё, территориально концентрации в Чертугеевском заливе несколько выше, наименьшие концентрации фиксируются в районе пос. Тальцы. Концентрации Ni в 15 из 16 случаев превышают фоновую вплоть до 1,886 от неё, в одном случае концентрация равна фоновой. Территориально концентрации в Чертугеевском заливе в среднем несколько выше таковых на других участках, наименьшие концентрации фиксируются в районе пос. Тальцы. Концентрации V в 13 из 16 случаев превышают фоновую вплоть до 1,284 от неё, в трёх случаях наблюдаются концентрации ниже фоновой. Территориально показатели точек в районах пос. Патроны, д. Новогрудина и Чертугеевского залива приблизительно схожи, наименьшая концентрация ванадия зафиксирована в районе пос. Падь Мельничная, оставшиеся концентрации ниже фоновой расположены в районе пос. Тальцы.

По максимальным значениям концентраций произведено ранжирование – оценено число максимальных значений концентраций для каждого из районов. По его результатам при помощи ГИС-системы QGis создана карта-схема, представленная на рис. 2.

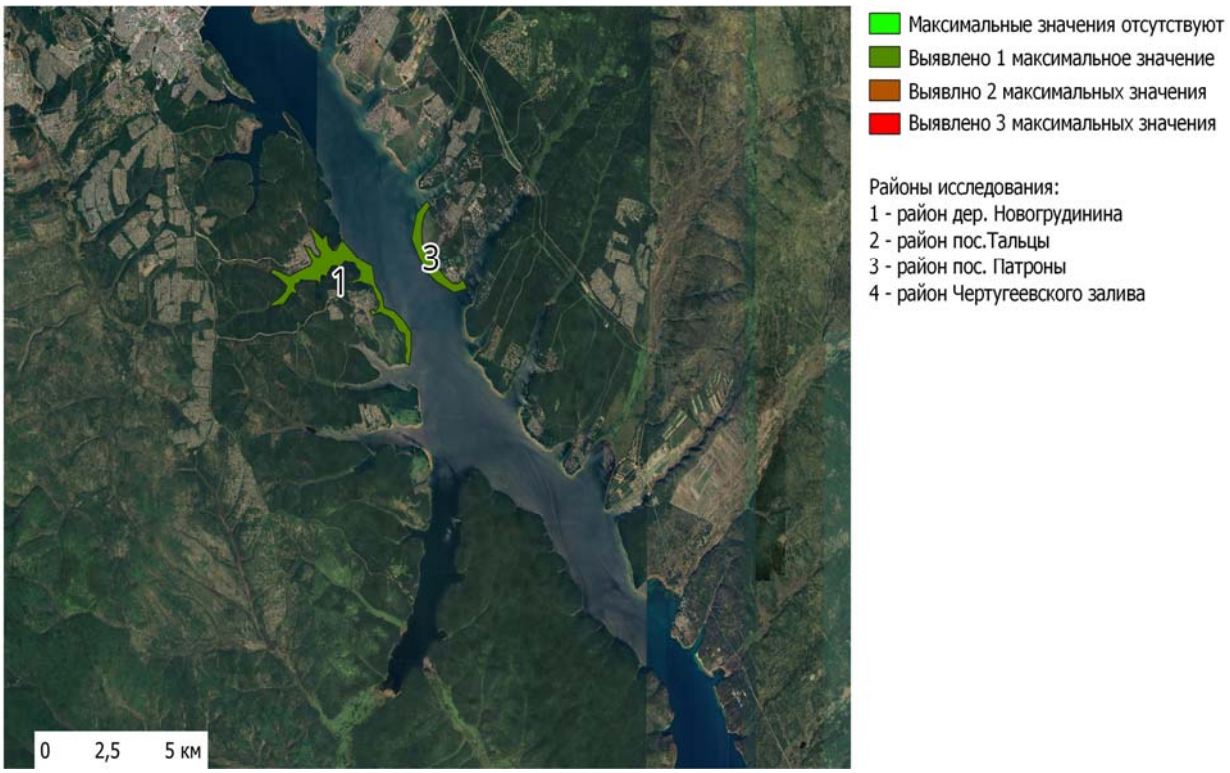


Рис. 2. Карта-схема ранжирования районов исследования по концентрациям

По результатам данной части анализа возможно выявить наименее загрязнённый данными веществами участок – район пос. Тальцы, а также в среднем наиболее загрязнённый – район Чертугеевского зал. Контекст описываемых районов, а именно рекреационно-туристическая зона с фактически отсутствием судоходства и особым пропускным режимом для автотранспорта в районе пос. Тальцы и интенсивное судоходство, имеющиеся предприятия и антропогенная нагрузка от мкр. Солнечный для Чертугеевского зал., служит дополнительным подтверждением выводов.

Для редких элементов использовались данные по среднему содержанию из публикации «Рудные и редкие химические элементы в окружающей среде Прибайкалья (коренные породы, почвы, донные отложения)» [3]. В табл. 3 представлены концентрации, выраженные в долях от средних значений.

По результатам расчётов превышения по содержанию Au отсутствуют на всех точках, максимальное значение – 0,706 от средней концентрации. Превышения по содержанию Cs отсутствуют на большинстве точек (15 из 16), максимальное значение равняется средней концентрации (I-6-10, район пос. Тальцы). Превышения по содержанию Mo отсутствуют на всех точках. Превышения по содержанию Rb присутствуют на большинстве точек (11 из 16), максимальное

значение – 1,695 от средней концентрации (I-6-10, район пос. Тальцы). Превышения по содержанию Sc присутствуют на всех точках, максимально средняя концентрация превышена ровно в полтора раза (I-8–10, район пос. Патроны).

Таблица 3

Концентрации в долях от средних значений

Название точки	Концентрация (в долях от средних значений)								
	Au	Cs	Mo	Rb	Sc	Y	Zr	La	Yb
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I-1–10	-	0,412	-	0,942	1,230	3,238	7,765	1,062	1,045
I-2–10	0,706	0,676	-	1,130	1,468	2,857	5,435	1,160	0,886
I-3–10	-	0,750	-	1,507	1,460	2,857	5,976	1,169	1,000
I-4–10	-	0,485	-	1,507	1,405	3,238	8,894	1,226	1,091
I-5–10	-	0,397	-	0,753	1,444	4,571	20,306	1,807	1,591
I-6–10	-	1,000	-	1,695	1,365	2,762	4,706	1,057	0,841
I-7–10	-	0,838	-	0,942	1,270	2,571	4,800	1,017	0,864
I-8–10	-	0,779	-	1,130	1,500	2,857	4,706	1,202	0,955
I-9–10	-	0,544	-	1,318	1,365	3,619	14,141	1,429	1,250
I-10–10	-	0,706	-	1,318	1,381	2,857	6,800	1,140	0,977
Irk-1–10	-	0,882	-	1,507	1,492	2,571	4,212	1,214	0,932
Irk-2–10	-	0,853	-	1,507	1,492	2,571	3,859	1,198	0,841
Irk-3–10	-	0,544	-	1,507	1,444	2,857	4,965	1,186	1,000
Irk-4–10	-	0,647	-	0,942	1,429	3,143	6,635	1,167	1,045
Irk-5–10	-	0,735	-	0,942	1,460	3,333	7,529	1,305	1,114
Irk-6–10	-	0,779	-	1,507	1,468	2,857	4,518	1,176	0,932

Примечание: концентрации, помеченные значком «-», отсутствуют по причине ухода исходных данных за нижний предел измерения, по типу «менее 0,5», не дающего возможности определить реальное значение, однако нижний предел измерений как золота, так и молибдена ниже фоновых значений.

Превышения по содержанию Y присутствуют на всех точках, максимально средняя концентрация превышена в 4,751 раза (I-5-10, район д. Новогрудинина) – 48 мг/кг на левом берегу Ангары при возможных 100 мг/кг в данной местности). Превышения по содержанию Zr присутствуют на всех точках, максимально средняя концентрация превышена (I-5-10, район д. Новогрудинина) в 20,306 раза – 863 мг/кг при 200–300 мг/кг кларка для горных пород, также присутствует значительное превышение в 14,141 раза (I-9-10, район пос. Патроны) – 601 мг/кг при 200–300 мг/кг кларка для горных пород. Превышения по содержанию La присутствуют на всех точках, максимально средняя концентрация превышена в 1,807 раза (I-5-10, район д. Новогрудинина) – 75,9 мг/кг на левом берегу Ангары при возможных 270 мг/кг в данной местности. Превышения по содержанию Yb присутствуют в шести точках, максимально фоновая концентрация превышена в 1,593 раза (I-5-10, район д. Новогрудинина).

По максимальным значениям концентраций произведено ранжирование – оценено число максимальных значений концентраций для каждого из районов. По его результатам при помощи ГИС-системы QGis создана карта-схема, представленная на рис. 6.

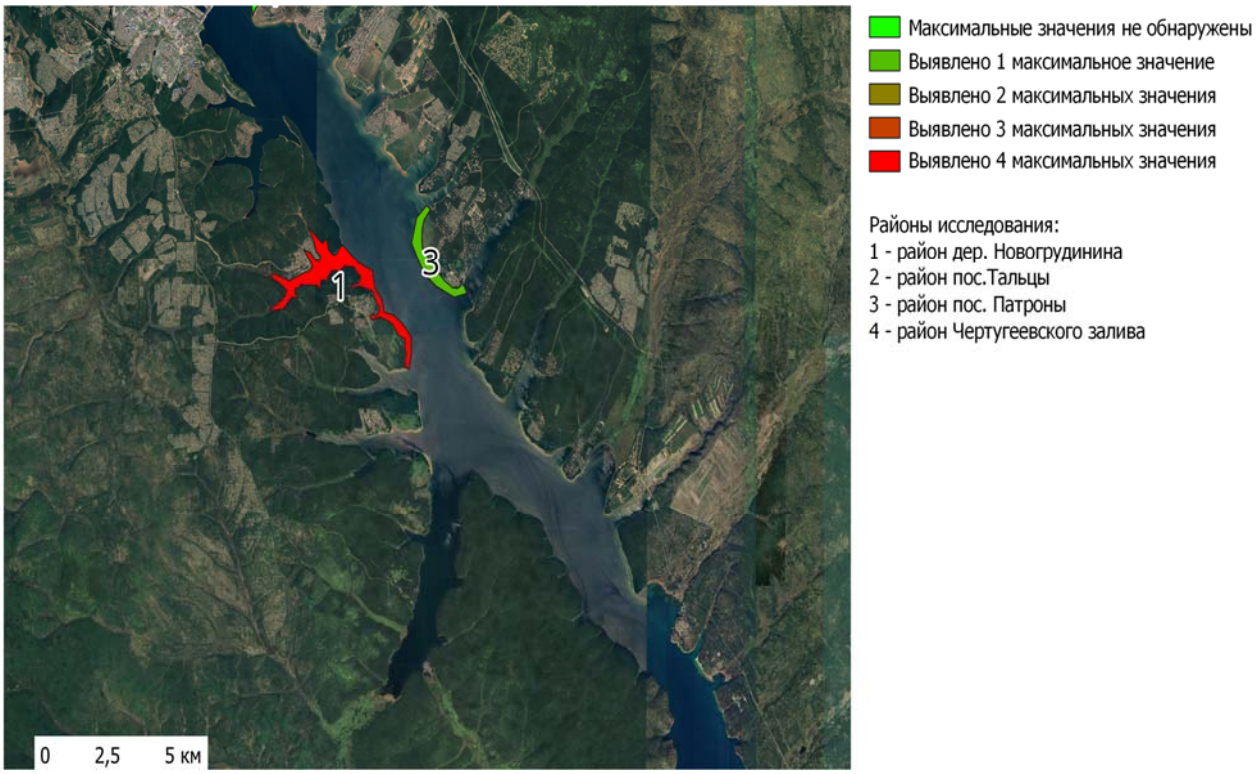


Рис. 3. Карта-схема ранжирования районов исследования по концентрациям

По результатам данной части анализа обнаружена точка с наибольшими превышениями средних значений – I-5-10 в районе д. Новогрудинина – концентрация циркония в пробе в три раза превышает среднее значение даже для горных пород. Существует второй очаг повышенной концентрации циркония на берегу у пос. Патроны в точке I-9-10. Само по себе содержание циркония в Иркутском водохранилище в несколько раз превышает средние значения и нуждается в дополнительном изучении.

Согласно нормативу «Нормы и критерии оценки загрязненности донных отложений в водных объектах Санкт-Петербурга», для пылеватых донных отложений загрязнённость определяется по двум нормативам – целевому уровню и уровню вмешательства [4]. Превышение первого показывает, что отложения загрязнены, превышение второго – что они являются опасно загрязнёнными. Концентрации в долях от значений целевого уровня представлены в табл. 4, концентрации в долях значений уровня вмешательства – в табл. 5.

Из расчётов следует, что превышения целевого уровня, характеризующего отсутствие загрязнения, замечены только по Cr (2,430 раза) и Ni (2,371 раза), причём наблюдаются во всех точках отбора. Превышений уровня вмешательства, по Cr и Ni не наблюдается, т. е. серьёзная экологическая опасность от данного загрязнения отсутствует. По остальным элементам загрязнение отсутствует.

По результатам расчётов при помощи ГИС-системы QGis создана карта-схема, отражающая сильную и слабую загрязнённость районов исследования, представленная на рис. 4.

Таблица 4

Концентрации в долях от значений целевого уровня

Название точки	Концентрация (в долях от значений целевого уровня)							
	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
I-1–10	0,135	-	1,460	0,472	-	1,514	0,152	0,541
I-2–10	0,243	-	1,680	0,665	-	2,114	0,152	0,547
I-3–10	0,243	-	1,480	0,665	-	2,029	0,143	0,494
I-4–10	0,216	-	1,720	0,515	-	1,829	0,143	0,429
I-5–10	0,216	-	2,430	0,494	-	1,714	0,143	0,435
I-6–10	0,162	-	1,040	0,472	-	1,257	0,143	0,576
I-7–10	0,189	-	1,230	0,451	-	1,371	0,152	0,547
I-8–10	0,270	-	1,470	0,751	-	2,286	0,162	0,553
I-9–10	0,216	-	1,940	0,451	-	1,800	0,124	0,429
I-10–10	0,189	-	1,570	0,730	-	1,886	0,143	0,441
Irk-1–10	0,270	0,583	1,570	0,794	-	2,257	0,267	0,806
Irk-2–10	0,216	0,417	1,520	0,858	-	2,371	0,238	0,771
Irk-3–10	0,270	-	1,590	0,622	-	2,143	0,152	0,553
Irk-4–10	0,162	-	1,660	0,601	-	2,057	0,162	0,529
Irk-5–10	0,135	-	1,590	0,515	-	2,029	0,124	0,435
Irk-6–10	0,270	-	1,540	0,687	-	2,257	0,133	0,559

Примечание. Концентрации, помеченные значком «-», отсутствуют по причине ухода исходных данных за нижний предел измерения, по типу «менее 0,5», не дающего возможности определить реальное значение.

Таблица 5

Концентрации в долях от значений уровня вмешательства

Название точки	Концентрация (в долях от значений уровня вмешательства)	
	Cr	Ni
I-1–10	0,384	0,252
I-2–10	0,442	0,352
I-3–10	0,389	0,338
I-4–10	0,453	0,305
I-5–10	0,639	0,286
I-6–10	0,274	0,210
I-7–10	0,324	0,229
I-8–10	0,387	0,381
I-9–10	0,511	0,300
I-10–10	0,413	0,314
Irk-1–10	0,413	0,376
Irk-2–10	0,400	0,395
Irk-3–10	0,418	0,357
Irk-4–10	0,437	0,343
Irk-5–10	0,418	0,338
Irk-6–10	0,405	0,376

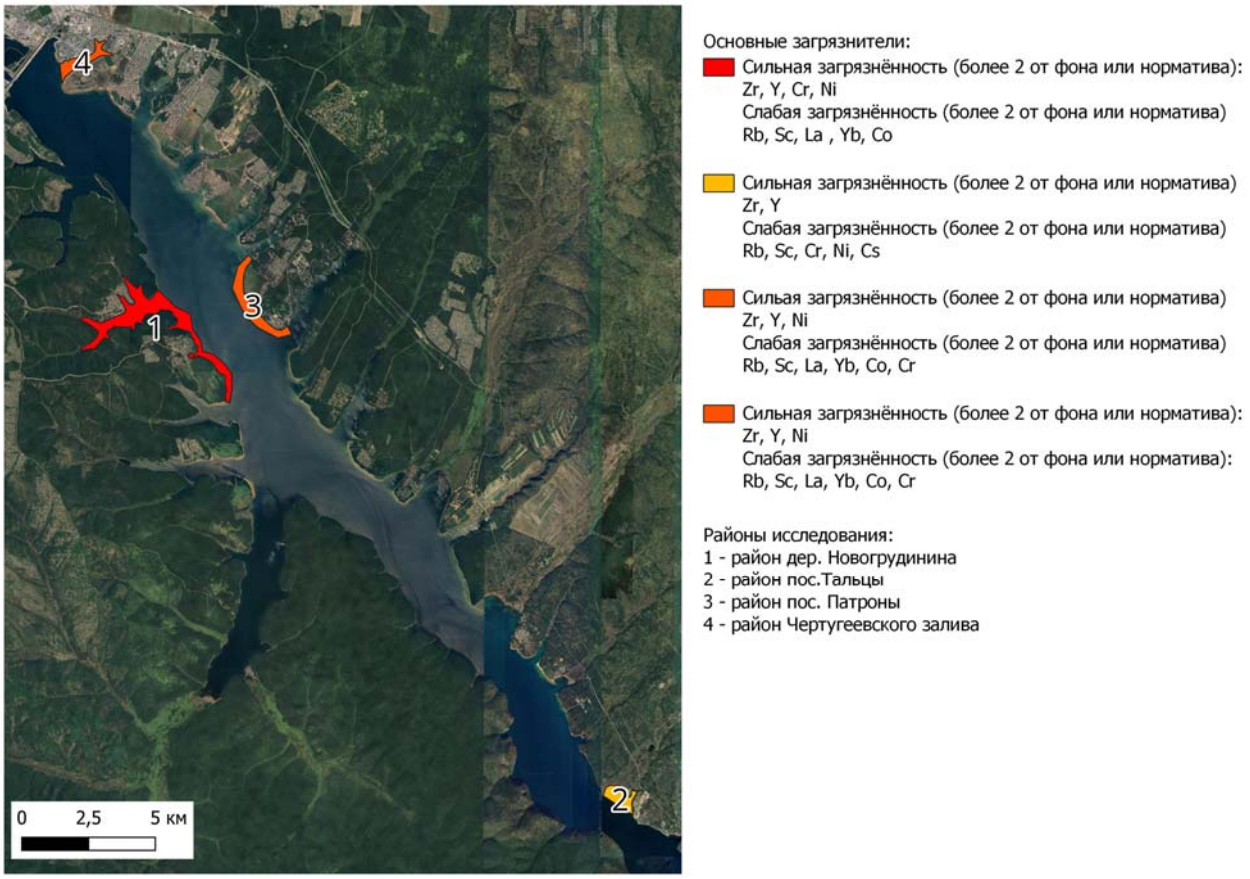


Рис. 4. Общая карта-схема загрязнения Иркутского вдхр. металлами

В результате работы выявлено, что характер загрязнения Иркутского водохранилища тяжёлыми металлами и редкими элементами достаточно однороден по загрязняющим веществам – во всех случаях сильное загрязнение представлено Zr и Y, иногда дополняется Ni, реже Cr, они также встречаются в меньших концентрациях. Остальные элементы встречаются в концентрациях, превышающих фоновые или средние значения не более чем в 2 раза. В силу отсутствия нормативов по содержанию Zr и Y в донных отложениях невозможно определить, какую экологическую опасность несут данные концентрации. При этом в оз. Байкал концентрации Zn близки к средним значениям, т. е. существенно ниже [6]. Концентрации Ni и Cr превышают целевой уровень, однако ниже уровня вмешательства, т. е. серьёзной экологической опасности не представляют, как в целом и оставшиеся элементы.

Повышенную актуальность имеет вопрос генезиса, установленного в донных отложениях средней части водохранилища (районы д. Новогрудинина и пос. Патроны) Zr и его возможной экологической опасности в связи с высокой концентрацией. Интерес представляет актуализация данных по этому элементу.

Список литературы

1. *Карнаухова Г. А.* Процессы осадкообразования в водохранилищах Ангарского каскада : дис. … д-ра. геогр. наук: 25. 00. 27. Пермь, 2009. – 319 с.

2. Геохимия окружающей среды Прибайкалья (Байкальский геоэкологический полигон) / В. И. Гребенщикова, Э. Е. Лустенберг, Н. А. Китаев, И. С. Ломоносов. Новосибирск : Гео, 2008. 236 с

3. *Китаев Н. А., Гребенщикова В. И.* Редкие и рудные элементы в окружающей среде Прибайкалья (коренные породы, донные отложения, почвы) : монография. Иркутск : Изд-во ИГУ, 2014. 123 с

4. Нормы и критерии оценки загрязненности донных отложений в водных объектах Санкт-Петербурга. Региональный норматив // КОДЕКС: сайт. URL: https://docs.cntd.ru/document/352042722 (дата обращения: 11.03.2025).

5. Содержание тяжёлых металлов в донных отложениях реки Енисей в районе Красноярска / Д. В. Дементьев [и др.] // Известия ТПУ. 2015. Т. 326, № 5. С. 91–98.

6. Научные результаты. Изучение эволюции водных экосистем Прибайкалья с различной геохимической обстановкой и техногенной нагрузкой. // ИГХ СО РАН : сайт. URL: http://igc.irk.ru/ru/item/2816-nauchnye-rezultaty (дата обращения: 11.03.2025).

УДК 551.465

Мониторинг Полярной фронтальной зоны по данным экспедиционных исследований на вековом разрезе «Кольский меридиан»

Т. М. Максимовская

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

Аннотация. Рассматриваются характеристики участка Полярной фронтальной зоны Баренцева моря на разрезе «Кольский меридиан» в условиях климатических изменений последних десятилетий. В работе использовались данные контактных измерений основных термохалинных показателей и данные о положении прикромочной ледовой зоны. Показано, что самый северный из фронтальных разделов Полярной фронтальной зоны Баренцева моря на оси разреза «Кольский меридиан» находился на расстоянии от 48 до 290 км от кромки ледовых полей в период исследования. Наблюдались градиенты температуры до 0,20 °С/км, солености до 0,025 епс/км. Положение рассматриваемой фронтальной зоны остается квазистационарным на межгодовом масштабе и меняется внутри года, смещаясь на юг в период ледообразования и возвращаясь к северу в летний период.

Ключевые слова: Полярная фронтальная зона, градиент температуры и солености, «Кольский меридиан», Баренцево море

Введение

Баренцево море является областью взаимодействия вод атлантического и арктического происхождения (рис. 1). Направление распространения течений Баренцева моря во многом определяется рельефом дна [7]. Атлантические воды поступают в западную часть моря двумя потоками [8]. Основной поток теплых и соленых атлантических вод затекает в море преимущественно в области Медвежинского желоба с водами Нордкапского течения. Кроме того, с Норвежским и Мурманским прибрежными течениями распространяются в восточном направлении воды с температурой более 3 °С и соленостью менее 34,4 епс. Арктические воды, поступающие вместе с дрейфующими льдами с севера и северо-востока,

формируются под влиянием таяния льдов. Вследствие этого они характеризуются отрицательной температурой и пониженной соленостью. Одним из важных следствий взаимодействия атлантических и арктических вод на акватории Баренцева моря является наличие Северной Полярной фронтальной зоны [2] (в литературе часто используется термин Полярный фронт (ПФ)) [6]. Это область с повышенными горизонтальными и вертикальными градиентами термохалинных характеристик. Считается, что фронтальная зона в рассматриваемом районе Баренцева моря является квазистационарной, а ее положение привязано к склонам крупных поднятий Шпицбергенской, Центральной банок и возвышенности Персея.

Для Баренцева моря разработана сеть стандартных разрезов, которые позволяют выполнять мониторинг сезонных и межгодовых изменений океанографических параметров на пути следования вод атлантического происхождения, которые определяют гидрологический режим моря. Одним из наиболее продолжительных по длительности выполняемых измерений (первые работы были выполнены в мае 1900 г. [1]), является разрез «Кольский меридиан», проходящий вдоль меридиана 33°30′ в. д. «Кольский меридиан» пересекает несколько фронтальных зон, самая северная из которых является участком ПФ Баренцева моря и существует благодаря взаимодействию теплых вод Северной ветви Нордкапского течения и холодных вод с пониженной соленостью вод течения Персея. На протяжении зимнего периода данный участок ПФ находится в непосредственной близости к ледовой кромке. Работы на разрезе проводятся с целью непрерывного мониторинга морской среды, что способствует повышению качества прогноза ожидаемых изменений.

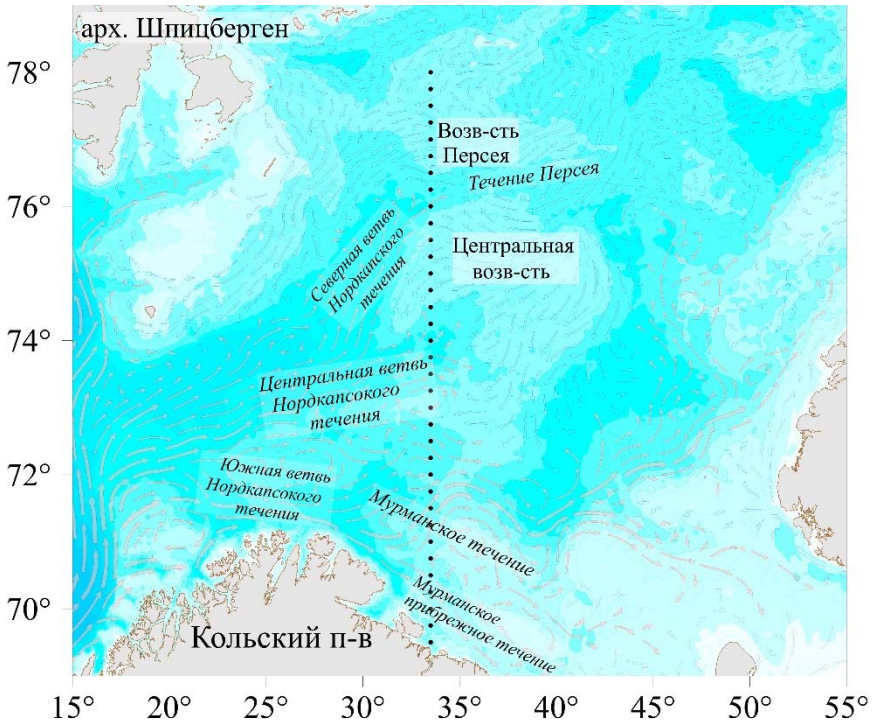


Рис. 1. Схема поверхностной циркуляции вод в западной части Баренцева моря. Черными точками обозначены станции разреза «Кольский меридиан».

Одним из ключевых факторов, определяющих гидрологический режим Баренцева моря и одновременно отражающих его изменчивость, является наличие ледяного покрова [9]. Он влияет на взаимодействие между водной поверхностью и атмосферой, что сказывается на тепловом балансе моря и характере взаимодействия вод разного генезиса, особенно в деятельном слое океана. Средняя граница распространения льда в Баренцевом море проходит к северу от ПФ [10] и называется Прикромочной ледовой зоной (ПЛЗ). ПЛЗ определяется как переходная область между свободным ото льда морем и плотным дрейфующим льдом. ПЛЗ простирается от условной линии, где 15 % поверхности моря покрыто льдом, до положения изолинии 80 % концентрации ледового покрова [11]. Вблизи ПЛЗ в теплый период года обычно наблюдается отдельная халинная фронтальная зона, которую также называют Арктической фронтальной зоной (АФЗ). Ее существование обусловлено появлением большого объема талых вод. Влияние этих вод может прослеживаться в области, удаленной от ледовой кромки на расстояние в несколько десятков километров [2].

В последние десятилетия Арктика потеплела больше других регионов [5]. Потепление сопровождалось видимыми изменениями в наблюдениях за арктическим морским льдом: его площадь и толщина сокращаются, что приводит к значительному сокращению объема льда. Это также сказывается на объеме поступающих в Баренцево море арктических вод.

Цель работы: оценить изменчивость характеристик Полярного фронта в северо-западной части Баренцева моря по данным контактных наблюдений на регулярно выполняемом гидрологическом разрезе «Кольский меридиан» в условиях изменения климата.

Материалы и методы

В работе использовались данные экспедиционных исследований, выполненные на НИС «Дальние Зеленцы» в период с 2008 по 2023 г. на разрезе «Кольский меридиан» (рис. 1). Измерения основных гидрологических параметров морской среды выполнялись методом СТД-профилирования с помощью СТД-зонда SEEACAT SBE 19 plus V2. В работе использовалась серия океанологических измерений, которые выполнялись от 69°30′ с. ш. вдоль меридиана 33 °30′ в. д. до достижения ледовой кромки с дискретностью 10–30 морских миль. Рассматриваемые измерения были выполнены 26 августа 2008 г., 12 августа 2009 г., 13–17 июля 2017 г., 29 ноября – 4 декабря 2017 г., 14–16 мая 2018 г., 12–14 марта 2022 г., 4–8 января 2023 г., 24–27 апреля 2023 г., 8–15 мая 2023 г., 20–26 ноября 2023 г.

Для верификации и дополнения результатов визуальных наблюдений за кромкой льда, выполнявшихся с борта НИС, использовались данные из архива U. S. NATIONAL ICE CENTER (U. S. NATIONAL ICE CENTER (U. S. National Ice Center: [сайт])» → «U. S. NATIONAL ICE CENTER (U. S. National Ice Center: [сайт]; URL: https://usicecenter.gov/Products/ArcticHome, дата обращения: 20.09.2024 г.)) о ежедневном положении прикромочной ледовой зоны в даты выполнения контактных измерений.

Классификация ежемесячной аномалии ледовых условий выполнялась по методике [12]. Среднемесячные аномалии ледовитости сравнивались с заданными величинами стандартного отклонения ледовитости от 27-летней нормы. В качестве критерия оценки теплового состояния вод Баренцева моря использовалось соотношение аномалий температуры воды в слое 0 – 50 м на стандартных станциях разреза «Кольский меридиан» (69°30′ – 74° с. ш. с дискретностью 30′) [4] для каждого периода (месяца), в которые выполнялись контактные измерения, и среднеквадратичного отклонения температуры воды также по пяти градациям: положительная очень высокая, положительная высокая, около нормы, отрицательная высокая и отрицательная очень высокая.

Результаты и обсуждение

Рассматриваемые измерения были выполнены преимущественно в зимний период, когда на акватории Баренцева моря происходит ледообразование. Период ледообразования в Баренцевом море обычно начинается в начале октября с северных районов моря и длится до марта-апреля, когда ледовый покров достигает своего максимального развития [3]. К началу периода ледообразования относятся исследования, выполненные в ноябре 2017 г., январе и ноябре 2023 г. В это время наблюдается взаимодействие относительно гомогенных вод, не подверженных радиационному прогреву и дополнительному распреснению вследствие таяния льда.

В конце ноября 2017 г. и январе 2023 г. измерения выполнялись в условиях очень большой положительной аномалии температуры вод в слое 0–50 м и большой отрицательной аномалии ледовитости западного района Баренцева моря. Соответственно, воды были теплее нормы, а площадь, покрытая ледовым покровом, меньше, чем в «нормальный» период. В такой «нормальный» по ледовитости западного района Баренцева моря и аномалии температуры вод на разрезе были выполнены измерения в ноябре 2023 г. В рассматриваемые периоды измерений температура воздуха имела отрицательные значения, преобладающее направление ветра менялось от года к году, средняя скорость ветра не превышала 6,3 м/с. Положение южной границы термической фронтальной зоны варьировало от 76°15′ в ноябре 2017, январе 2023 гг. до 76°30′ в ноябре 2023 г. (табл. 2). Ширина фронтальной зоны составляла около 30 км, по вертикали граница термической фронтальной зоны распространялась от поверхности до 100–150 м. В связи с тем, что в начале зимнего периода ледовый покров формируется с севера моря в южном направлении, фронтальная зона была удалена на значительные расстояния от ледовой кромки. Так, в ноябре 2017 г. термическая и халинная фронтальные зоны находились почти в 300 км от ледовой кромки. Максимальный горизонтальный градиент температуры в начале периода ледообразования превышал климатический в 10–16 раз, максимальный градиент солености – в 13–25 раз.

Таблица 2

Характеристики ПФ на разрезе Кольский меридиан

Период измерений	Положение ледовой кромки, с. ш.	Положение северной точки разреза, с. ш.	Положение термического ФР, с. ш.	Вертикальное положение терм. ФЗ, м	Положение халинного ФР, с. ш.	Вертикальное положение хал-й ФЗ, м
2008 август	78 °38'	78 °30'	76 °15'	20–150	76 °15'&78 °40'	0–45&0–30
2009 август	78 °32'	78 °30'	76 °15'	20–150	76 °15'&78 °45'	0–60&0–35
2017 июль	78 °35'	78 °44'	76 °15'	30–150	76 °00'&77 °45'	0–100&0–15
2017 ноябрь	79 °21'	78 °48'	76 °37'	0–100	76 °00'	0–110
2018 май	77 °57'	77 °44'	76 °15'	0–100	76 °15"	0–55
2022 март	77 °09'	77 °16'	76 °15'	0–150	76 °15'	0–55
2023 январь	77 °55'	78 °00'	76 °22'	0–150	76 °30'	0–55
2023 апрель	75 °21'	76 °00'	75 °37'	0–60	75 °45'	0–55
2023 май	75 °49'	76 °24'	76 °07'	0–150	76 °07'	0–27
2023 ноябрь	77 °45'	78 °00'	76 °37'	0–150	76 °37'	0–27

В конце периода ледообразования, когда площадь ледяного покрова на акватории Баренцева моря имеет максимальные значения, были выполнены измерения в мае 2018 г., марте 2022 г., апреле и мае 2023 гг. Все измерения этого периода были выполнены в условиях очень высокой (май 2018 г.) и высокой положительной аномалии (март 2022 г., апрель и май 2023 г.) температуры на разрезе и нормальной (март 2022 г. и апрель 2023 г.) и большой отрицательной аномалии (май 2018 и 2023 гг.) ледовитости западного района Баренцева моря. Преобладающий ветер в марте 2022 г. и апреле 2023 г. имел северное направление и среднюю скорость 11. 7 и 10. 7 м/с, в мае 2018 г. преобладал восточный ветер (4,6 м/с), в мае 2023 г. – южный (4,8 м/с). В рассматриваемый период положение термической и халинной фронтальной зоны на разрезе совпадало. Относительно начала зимнего периода произошло смещение положения фронтальной зоны в южном направлении на расстояние 110 км в апреле 2023 г. и на 55 км в остальные периоды. Ширина фронтальной зоны варьировала от 30 до 55 км. На максимально близком расстоянии от ледовой кромки фронтальная зона находилась в апреле 2023 г. В период измерений три северные станции разреза находились в пределах прикромочной ледовой зоны. Фронтальная зона была смещена в южном направлении до 75°30′ с. ш. Вероятно, смещение положения фронтальной зоны в южной направлении было вызвано воздействием северного ветра, который имел довольно высокую среднюю скорость (10,7 м/с). Через две недели измерения на разрезе были выполнены повторно. Фронтальная зона сместилась на 76°00′ с. ш. при этом преобладал южный ветер, который и отнес льды с арктическими водами на север.

В августе 2008 и 2009 гг. ПЛЗ наблюдалась севернее 78 °30′ с. ш. Максимальные горизонтальные градиенты температуры были отмечены на 76 °30′ с. ш.

вдоль оси разреза. В поле солености при этом наблюдалась ступенчатая структура с двумя максимумами, соответствующими ПФ (южнее) и АФЗ (севернее). В эти периоды наблюдались отрицательные большие аномалии температуры вод на разрезе при положительных больших (2008 г.) и очень больших (2009 г.) аномалиях ледовитости западного района Баренцева моря. В нормальный по температуре вод и ледовитости в летний период выполнялись измерения 15 – 17 июля 2017 г. ПЛЗ наблюдалась на 78°35′ с. ш. Верхний 20–25-метровый слой был прогрет до 2 °С. Область максимальных вертикальных градиентов температуры прослеживались под прогретыми водами до 150 м. Ширина фронтальной зоны составила около 55 км, перепад температуры на горизонте 30 м – 3,1 °С. Севернее 78°30′ с. ш. арктические воды имели отрицательную температуру от поверхности до дна и находились в пределах ПЛЗ. Максимальный горизонтальный градиент температуры был в 12 раз больше климатического значения, градиент солености – больше в 14 раз. В поле солености на разрезе выделяются две зоны повышенных градиентов. Первая область наблюдалась в области склона банки Персея, где находится участок Полярной фронтальной зоны. На расстоянии 65 км от ледовой кромки существовала вторая область повышенного градиента, она проявляется сильнее в распределении солености. Здесь наблюдался слой 0–10 м наиболее распресненных и холодных вод, образованных непосредственно в процессе таяния льдов в области исследования с минимальной величиной солености 32,1 епс. Также можно отметить, что такое распределение в [2] называют «ступенчатым», выделяя типы внутренней структуры фронтальных зон наряду с «перемежающимися». На данном участке Полярного фронта такой «ступенчатый» тип характерен только для летнего сезона в распределении солености, когда происходит активное таяние льда. Таким образом, первая зона относится к Полярному фронту Баренцева моря. Вторая же соответствует АФЗ, образование которой связывается с таянием льдов в теплый период года.

Смещение границы термической фронтальной зоны в рассматриваемый период происходило в весенние месяцы в южном направлении. Так, в начале периода ледообразования (январь и ноябрь) термическая составляющая Полярного фронта находилась над склоном банки Персея, а в конце этого периода (апрель, май) она наблюдалась над Центральной возвышенностью. В наибольшей близости к ледовой кромке (48–72 км) фронтальная зона находилась в конце периода ледообразования (апрель и май 2023 г.), что было связано со смещением арктических вод вместе с ледовым покровом в южном направлении. Халинная фронтальная зона имела большую изменчивость, нежели термическая. В конце периода ледообразования была отмечена более сложная структура распределения температуры в области Полярной фронтальной зоны, относительно первых месяцев сезона. Наблюдалось «перемежающееся» распределение температуры, для которого характерно чередование холодных и теплых участков различной ширин, разделенных локальными фронтами. Формирование такой структуры могло быть вызвано как адвективными процессами, так и действием вихрей, которые часто образуются во фронтальной зоне [2].

Заключение

В работе представлены результаты океанографических наблюдений, выполненных с борта НИС «Дальние Зеленцы» преимущественно в северной части разреза Кольский меридиан в разные сезоны 2008–2023 гг. Приводятся положение и характеристики участка Полярного фронта Баренцева моря на разрезе Кольский меридиан в период активного ледообразования, максимального ледового покрова, перехода к ледотаянию и в летний период, когда положение ледовой кромки занимает наиболее северное положение. Рассматривался преимущественно довольно динамичный верхний 0–50 м слой вод, как подверженный большей изменчивости со стороны системы океан-лед-атмосфера. Показано, что самый северный из фронтальных разделов Полярной фронтальной зоны Баренцева моря на оси разреза Кольский меридиан находился на расстоянии от 48 до 290 км от кромки ледовых полей. Градиенты температуры варьировали от 0,10 до 0,20 °С/км, солености – от 0,012 до 0,025 епс/км, ширина фронтальной зоны не превышала 55 км. Положение рассматриваемой фронтальной зоны является квазистационарным и может меняться в зависимости от сезона. Так, в течение периода ледообразования происходит смещение фронтальной зоны в южном направлении от склона возвышенности Персея к Центральной возвышенности. В начале периода, в ноябре 2017 и 2023 гг., она находилась на 76°30′ с. ш., к январю 2023 г. продвинулась в южном направлении к 76°15′ с. ш., ближе к концу ледообразования в календарные весенние месяцы смещалась к 76°00′ с. ш., а в отдельные периоды (апрель 2023 г.) к 75°30′ с. ш.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № FMWE-2024-0028.

Список литературы

1. 120 лет океанографических наблюдений на разрезе «Кольский меридиан» / А. Л. Карсаков, А. Г. Трофимов, М. Ю. Анциферов [и др.]. Мурманск : ПИНРО им. Н. М. Книповича, 2022. 146 с.
2. *Родионов В. Б., Костяной А. Г.* Океанические фронты морей Северо-Европейского бассейна. М. : ГЕОС, 1998. 290 с.
3. Система Баренцева моря / под ред. академика А. П. Лисицына. М. : ГЕОС, 2021. 672 с.
4. Climate and cyclic hydrobiological changes of the Barents Sea from the twentieth to twenty-first centuries / G. G. Matishov, D. V. Moiseev, O. S. Lyubina [et. al] // Polar Biology. 2012. Vol. 35. P. 1773–1790.
5. IPCC, 2023: Sections. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland. P. 35–115. https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647
6. *Kolås E. H., Fer I., Baumann T. M.* The Polar Front in the northwestern Barents Sea: Structure, variability, and mixing // Ocean Science. 2024. Vol. 20, N 6. P. 895–916. https://doi.org/10.5194/os-20-895-2024
7. *Loeng H., Ozhigin V., Ardlandsvik B.* Water fluxes through the Barents Sea // ICES Journal of Marine Science. 1997. Vol. 54. P. 310–317.
8. *Oziel L., Sirven J., Gascard J. C.* The Barents Sea frontal zones and water masses variability (1980–2011). // Ocean Science. 2016. Vol. 12. P. 169–184. https://doi.org/10.5194/os-12-169-2016
9. Polyakov I. V., Pnyushkov A., Carmack E. Stability of the arctic halocline: A new indicator of arctic climate change // Environmental Research Letters. 2018. Vol. 13, N 12. P. 125008. https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaec1e
10. Skillful prediction of northern climate provided by the ocean / M. Årthun, T. Eldevik, E. Viste [et al.] // Nature Communications. 2017. Vol. 8. P. 15875. https://doi.org/10.1038/ncomms15875
11. On the definition of marginal ice zone width / C. Strong[et al.] // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2017. Vol. 37, N 7. P. 1565–1584. https://doi.org/10.1175/JTECH-D-16-0171.1
12. Zhichkin A. P. Peculiarities of interannual and seasonal variations of the Barents Sea ice coverage anomalies // Russian Meteorology Hydrology. 2015. Vol. 40. P. 319–326. https://doi.org/10.3103/S1068373915050052

УДК 504.4.062.2(912. 438)

Реки как коридоры природно-экологического каркаса города Иркутска

А. И. Михалёва (mihalevaanna42@gmail.com), Е. В. Потапова (e.v.potapova.isu@mail.ru)
Иркутский государственный университет, г. Иркутск

Аннотация. Представлена карта-схема и анализ основных элементов (ключевых, транзитных (коридоров) и точечных, линейных) природно-экологического каркаса г. Иркутска. Описаны транзитные территории (реки) города, состояние их естественного покрытия. Отмечены функциональные особенности элементов каркаса. Методы исследования: обобщение, полевые методы, а также картографический метод.

Ключевые слова: реки, природно-экологический каркас, транзитные территории, коридоры.

Водные объекты, особенно в городах выполняют значительное число функций и экосистемных услуг и подвергаются наибольшему влиянию хозяйственной и иной деятельности. С одной стороны, все водоёмы и водотоки, а также прилегающие территории – водоохранные зоны, зоны санитарной охраны, в соответствии с законодательством России обладают значительными охранными статусами, в том числе исключительно государственную собственность, с другой стороны неправильная организация (нарушений условий доступа, замусоривание, отсутствие на значительных участках ливневой канализации, рекреационная переэксплуатация и др.) и слабое контролирование происходящих изменений, приводят к деградации как прибрежных территорий, так и самих водных объектов. Поэтому всесторонние варианты анализа необходимы для оптимизации и рационализации их использования.

Природно-экологический каркас (далее – ПЭК) города представляет собой озелененные участки (парки, скверы и т. д.), которые расположены на его территории [1]. Он призван выполнять функции поддержки экологической стабильности, в частности необходим для сохранения местообитания различных видов флоры и фауны в условиях хозяйственного освоения. На данный момент ПЭК также является своеобразным способом для оценки зеленой инфраструктуры города и может быть использован для планировочных решений по оптимизации городской среды [2]. Для многих населённых пунктов нашей страны не существуют карт ПЭК, поэтому подобные работы имеет смысл вводить в градостроительные проекты. В связи с этим была разработана карта-схема ПЭК и были рассмотрены особенности ПЭК г. Иркутска.

Практическая значимость такой работы высока, так как подобная карта может стать отличным вариантом визуализации информации, что позволит не только по-новому взглянуть на ситуацию озеленения города, но и будет способствовать развитию его инфраструктуры и интенсификации процессов благоустройства. ПЭК даст возможность сохранить природные и природно-антропо-

генные системы в оптимальном состоянии. Поэтому конструирование экологического каркаса для конкретной территории составляет одну из важнейших задач градостроительства.

ПЭК города включает в себя три важные составляющие:

1) природную, связанную природными особенностями, т. е. ландшафтной структуры территории;

2) экологическую, связанную с улучшением городской среды;

3) ландшафтно-морфоструктурную, которая содержит как природные, так и хозяйственные элементы территории, определяющие внешний облик.

Различают площадные, транзитные и точечные элементы каркаса, зависящие не только от площади, но и от принадлежности, например земельного участка (табл.).

Таблица 1

Элементы ПЭК и их функции

Элементы ПЭК	Функциональные группы ПЭК	Основные функции элементов ПЭК	Виды объектов ПЭК
Ключевые	Поддерживающая	Средообразующие; санитарно-гигиенические; экологические; декоративно-планировочные; научно-познавательные	Парки, скверы, рощи, сады, бульвары
Транзитные (коридоры)	Транспортная	Санитарно-гигиенические; декоративно-планировочные; глобальные	Водоохранные зоны рек
Точечные	Рекреационная	Декоративно-планировочные; научно-познавательные; экологические	Общедоступные озелененные и благоустроенные территории площадь которых меньше 30 тыс.м^2 парки, скверы, сады и т. д.
	В зависимости от назначения объекта	Декоративно-планировочные; медико-социальные; санитарно-гигиенические;	Озеленение территорий образовательных учреждений, учреждений здравоохранения, озеленение территорий культовых объектов
Линейные	Транспортная	Декоративно-планировочные	Насаждения вдоль улиц

В зависимости от того к какой функциональной группе ПЭК относится озелененная территория, она выполняет свои функции.

Составленный ПЭК г. Иркутска состоит из 16 ядер, 4 транзитных территорий (рек), 35 озелененных территорий общего пользования, 9 озелененных территорий ограниченного пользования, 5 озелененных территории специального назначения. Это благоприятный показатель для крупного города.

Коридоры, являются экологически активными осями, выполняющие шумоподавление и обладающие другими защитными функциями. Они обеспечивают поддержание целостности зелёного каркаса за счет связывания разрозненных резерватов, содействуют перемещению подвижных компонентов природы

по озелененным участкам вдоль рек. К ним относят: озелененные коридоры транспортной инфраструктуры, водоохранные зоны и поймы крупных рек, долины малых рек, защитные лесопосадки и т. д. [3]. Транзитные территории – это участки, благодаря которым осуществляются экологические связи между ключевыми территориями. Они могут представлять собой не препятствующие экологическим связям обширные участки ландшафта между ключевыми территориями («связующий ландшафт»). Это могут быть линейные элементы ландшафта (долины рек), называемые «экологическими коридорами» [4].

Коридорами каркаса на территории г. Иркутска являются: водоохранные зоны рек (Иркут, Ангара, Ушакова, Кая) (рис. 1). Водоохранной зоной является территория, примыкающая к акватории рек, на которой устанавливается специальный режим хозяйственной и иных видов деятельности с целью предотвращения загрязнения, засорения, заиления и истощения водных объектов, а также сохранения среды обитания объектов животного и растительного мира. Ширина водоохранной зоны р. Ангары (протяжённость 1779 км) составляет 200 м, р. Иркут (протяжённость 488 км) – 200 м, р. Ушаковки (протяжённость 70 км) также 200 м и р. Каи (протяжённость 40 км) – 100 м [5].

В пределах водоохранных зон устанавливаются береговые и прибрежные защитные полосы, на территориях которых вводятся дополнительные ограничения природопользования шириной от 20 до 200 м в зависимости от уклона и характера прилегающих земель.

Большая часть транзитных территорий имеют естественное покрытие, однако древесно-кустарниковые формы занимают уже значительно меньшую площадь и находятся в угнетенном состоянии. Помимо общего нарушения специального режима водоохранных зон, идет неконтролируемая вырубка и без того скудного озеленения [6]. Рекреационная нагрузка на прирусловые территории, особенно в летнее время, привела на некоторых участках к полной деградации травянистого покрова и значительному ухудшению состояния древесно-кустарниковых форм [7].

Соблюдение специального режима на территории водоохранных зон является составной частью комплекса природоохранных мер по улучшению санитарного, гидрологического, гидрохимического, гидробиологического и экологического состояния водных объектов и благоустройству их прибрежных территорий, и улучшению качества природно-экологического каркаса города.

Оценка коридоров каркаса ПЭК г. Иркутска позволяет сделать вывод о том, что нужно разработать меры для повышения эстетического и функционального состояния зелёных насаждений. Также стоит снизить и контролировать антропогенную нагрузку на эти территории, особенно нарушающую требования законодательства, например заезды автомобилей.

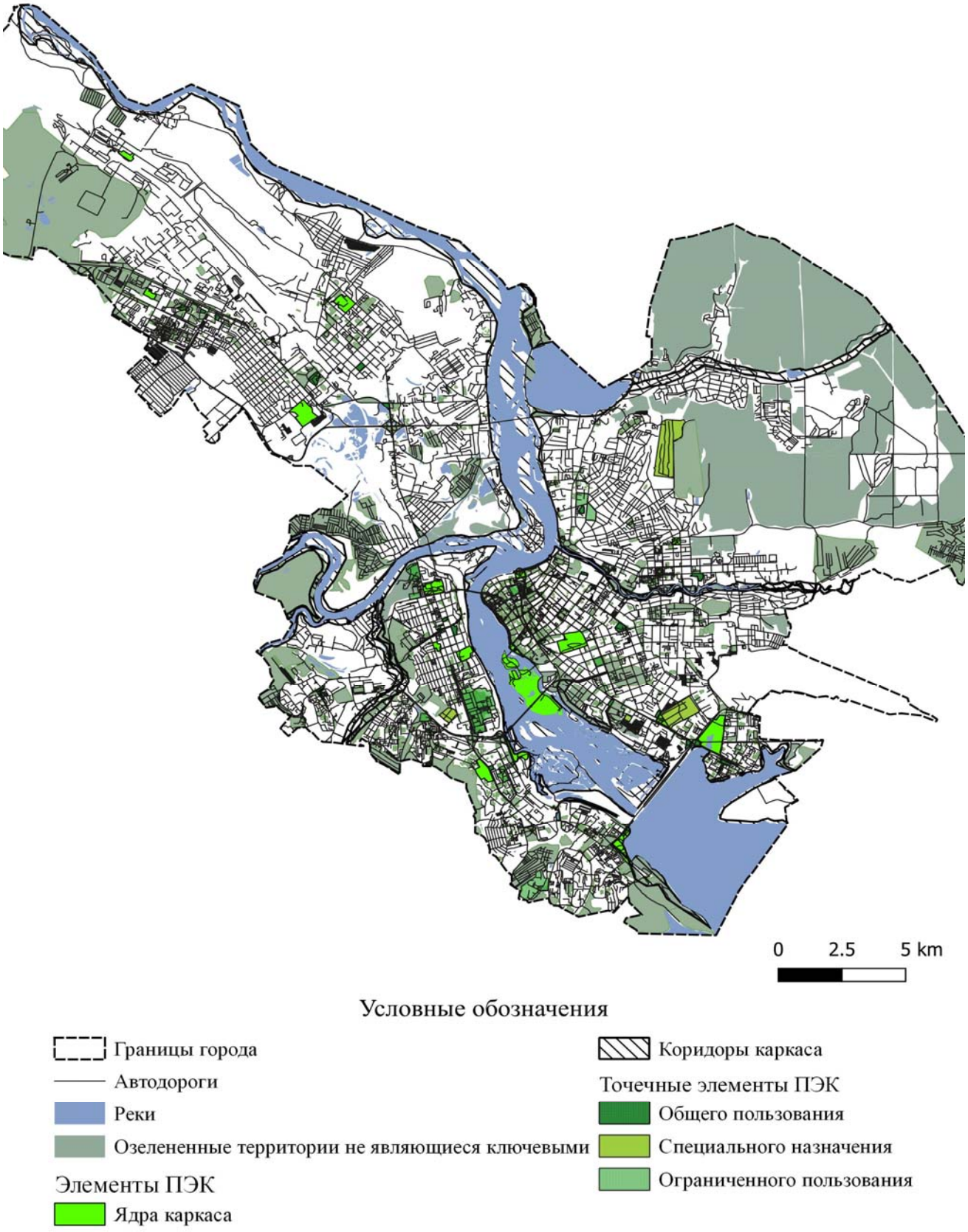


Рис. Карта-схема природно-экологического каркаса Иркутска

Список литературы

1. *Кочуров Б. И.* Теоретические основы оценки комфортности проживания населения урбанизированной территории. Наука, власть и общество перед лицом экологических рисков и опасностей. Саратов : Наука, 2007. С. 56–58.
2. *Еникеева Л. М.* Урбанизированная ландшафтная архитектура в формообразовании современного города // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. С. 56–66.
3. *Батуев А. Р., Лопаткин Д. А.* Обоснование и картографирование территориальной структуры экологического каркаса региона // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2008. Т. 1, № 1. С. 56–75.
4. *Никитин А. В.* Проблемы формирования природно-экологического каркаса урбанизированных территорий (на примере г. Казани) // Известия КазГАСУ. 2010. С. 88–89.
5. *Потапова Е. В.* Общая экология. В 3 ч. Ч. 2. Методы полевых исследованийт: учеб. пособие. Иркутск : Изд-во ИГУ. 2015. 155 с.
6. ГОСТ 28329-1989 «Зеленые стандарты» Озеленение городов. URL: https://garden-class.ru/docs/GOST.pdf (дата обращения: 28.01.2025).
7. *Георгица И. М.* Специфика городского экологического каркаса // Ярославский педагогический вестник. 2011. № 2. С. 133–136.

УДК 504.4.054

Содержание частиц микропластика в реке Вороне выше и ниже по течению от города Кирсанова

К. С. Непрокина (kolkova-kseniya@mail.ru),
Т. И. Зиновьева (zinovieva.t4tyana@yandex.ru),
А. В. Воронков (antonvoronkov123123@gmail.com)
Тамбовский государственный университет им. Г. Р. Державина, г. Тамбов

Аннотация. Рассматривается содержание микропластика в р. Вороне выше и ниже по течению от города Кирсанова. Описаны методика отбора проб, использованное оборудование, пробоподготовка, а также методы идентификации частиц микропластика в пробах. Даны их качественные и количественные характеристики. Среди них: количество частиц микропластика, их вид и цвет. Максимальное содержание частиц обнаружено в с. Вячка ниже по течению, минимальное – в поселке Терны выше по течению. Выявлено, что г. Кирсанов оказывает незначительное негативное влияние в части загрязнения реки микропластиком. Самые распространенные частицы по виду – волокна, по цвету – белые, красные, черные. Единично по виду встречаются гранулы, по цвету – серые, коричневые, синие, зеленые, желтые.

Ключевые слова: микропластик, загрязнение рек микропластиком, р. Ворона.

Введение

Зачастую современные блага цивилизации создают не только удобства для людей, но и наносят непоправимый урон природе. Только за последние 10 лет в мире было произведено больше пластиковых изделий, чем за предыдущее столетие. Одноразовая посуда, пакеты, упаковка, бутылки и различные емкости, синтетический текстиль – самые распространенные виды пластикового мусора. Лишь пять процентов от его объема в конечном итоге подвергается переработке и используется повторно.

Пластик наносит серьезный ущерб окружающей среде, начиная с его производства и заканчивая утилизацией. Заводы, выпускающие пластиковые изделия, выделяют в атмосферу до 400 млн т углекислого газа в год и примерно 800 видов животных сегодня находятся под угрозой вымирания из-за поедания и отравления пластиком.

Негативному влиянию подвержены все среды: водная, почвенная, воздушная. Однако вода, являясь важнейшим компонентом жизни на земле, заслуживает особого внимания. По данным экологов ООН, каждый год в океан попадает около 13 миллионов тонн пластиковых отходов [8]. Они при измельчении под воздействием факторов окружающей среды способны вызывать массу проблем для живых организмов [15]. Это влияние оказывается путем токсичных выделений из частиц пластика химических веществ различной степени токсичности (например, бисфенол-А, фталат, диоксин, метан и т. д.) [6; 7], механических повреждений органов желудочно-кишечного тракта. Помимо этого, частицы микропластика имеют адсорбирующие свойства, что позволяет им накапливать на своей поверхности другие загрязняющие вещества (например, тяжелые металлы) и патогенные микроорганизмы [13]. Реки несут свои воды в мировой океан, следовательно могут служить одним из источников его загрязнения микропластиком. Поэтому понимание уровня загрязнения рек его частицами – важная тема для исследований наряду с другими гидрохимическими загрязнителями.

Мониторингом загрязнения вод в р. Вороне в границах Тамбовской области занимаются различные организации и представители научного общества области. Основной организацией является Тамбовский ЦГМС – филиал ФГБУ «Центрально-Черноземное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды». Среди исследователей можно отметить: М. Е. Буковского, С. Н. Дудника, И. С. Решетова, Н. Н. Коломейцеву и других. Их работы посвящены разнообразному спектру методов оценки качества воды [1–4].

Однако все эти исследования и наблюдения не включают в себя оценку загрязнения реки частицами микропластика.

Цель работы – определить содержание микропластика в р. Вороне выше и ниже по течению от г. Кирсанова.

Объект исследования – р. Ворона в районе г.Кирсанова.

На первоначальных этапах исследования нами были отобраны пробы воды объёмом 2 м^3 каждая. Пробы отбирались в августе 2024 г. в двух точках на р. Вороне (рис.):

1 – выше по течению от г. Кирсанова в районе пос. Терны,

2 – ниже по течению от Кирсанова в районе с. Вячка.

Оборудование и методы исследования

Пробоотбор осуществлялся с помощью сачка из нержавеющей сетки с размером ячейки 40 мкм методом стационарной фиксации (точка 1) и траления (точка 2) с глубины 15–20 см от поверхности воды. Выбор данных параметров основан на опыте отечественных [5; 9] и зарубежных [10; 12] коллег.

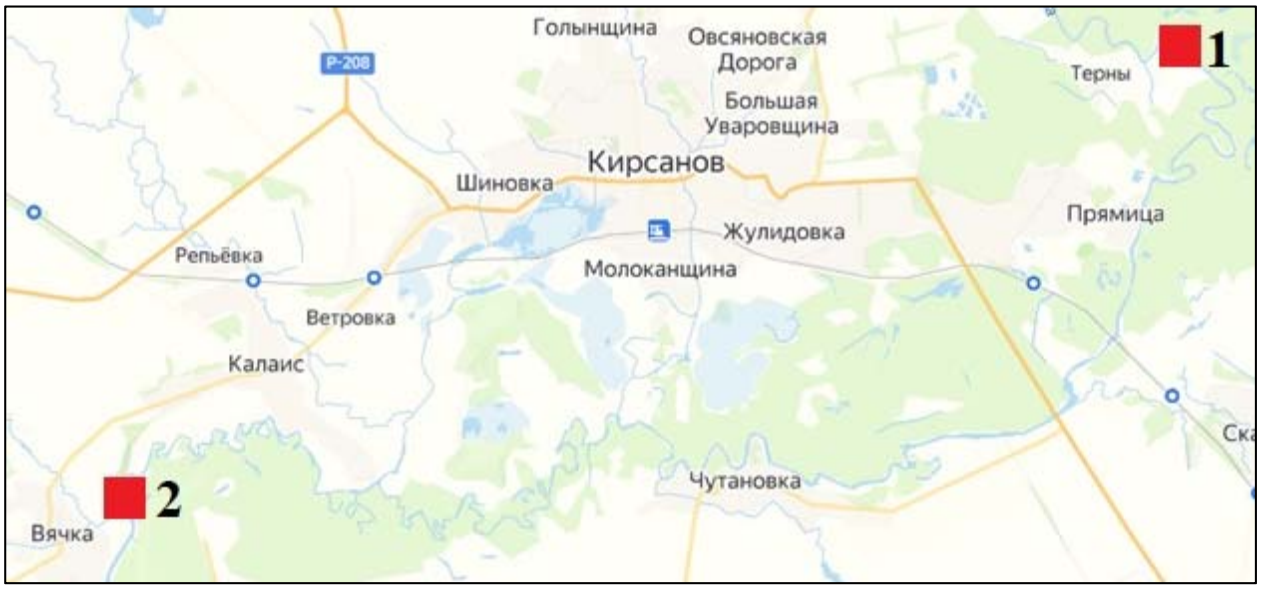


Рис. Карта-схема точек отбора проб

Пробоподготовка и выделение частиц микропластика осуществлялись на основании методики «Лабораторные методы анализа микропластика в морской среде: рекомендации для количественного анализа синтетических частиц в воде и донных отложениях (программа исследования морского мусора NOAA) [14].

После завершения всех пробоподготовительных этапов согласно упомянутой методике, была проведена визуальная идентификация частиц микропластика фракцией 0,04–5 мм, подсчет их количества. В качестве оборудования использовался микроскоп Levenhuk (40-кратное увеличение).

Идентификация проводилась с использованием руководства по визуальной идентификации и классификации пластиковых частиц [11].

Качественный анализ микропластиковых частиц осуществлен с помощью метода горячей иглы [5]. В качестве иглы применялся паяльник с заточенным жалом (пятно контакта 0,5 мм).

Результаты исследования

В ходе исследования были получены данные, представленные в таблице.

Из анализа таблицы следует, что больше частиц микропластика количественно обнаружено в районе села Вячка (ниже по течению от г. Кирсанова). На точке выше по течению от города Кирсанова (пос. Терны) их незначительно меньше. Видовой состав частиц представлен преимущественно волокнами. Единично встречаются гранулы.

Цвет частиц в точке отбора № 1 преимущественно красный и белый. Также обнаружены серые, коричневые, черные и синие частицы. В точке отбора № 2 лидирующую количественную позицию имеют частицы белого цвета. Также встречаются черные, красные, зеленые, синие и желтые частицы.

Таблица

Содержание частиц микропластика в пробах

№ пробы	Место отбора	Количество частиц, шт.	Вид частиц, шт.	Цвет частиц, шт.
	пос. Терны	30	волокно – 29 гранула – 1	серый – 4 коричневый – 1 черный – 4 белый – 8 красный – 9 синий – 3
	с. Вячка	35	волокно – 34 гранула – 1	черный – 5 белый – 25 красный – 2 зеленый – 1 синий – 1 желтый – 1

Выводы

В заключение можно сделать вывод о том, что г. Кирсанов оказывает незначительное негативное влияние на загрязнение реки микропластиком и в основном оно касается загрязнения реки волокнами. Видовой состав частиц микропластика в обеих точках отбора проб идентичен. Цвет частиц незначительно отличается. Черный, белый, красный и синий цвета также присутствуют выше и ниже по течению от г. Кирсанов.

Список литературы

1. *Буковский М. Е., Коломейцева Н. Н.* Сапробность рек на участках с различной антропогенной нагрузкой в годы разной водности // Поволжский экологический журнал. 2013. № 4. С. 368–373.

2. *Буковский М. Е., Коломейцева Н. Н., Решетов И. С.* Геоэкологическая оценка состояния реки Вороны в среднем течении // Вестник Тамбовского университета. Серия: естественные и технические науки. 2013. Т. 18, № 1. С. 440–444.

3. *Буковский М. Е., Решетов И. С., Мещеряков А. С.* Оценка качества воды в среднем течении реки Вороны методом биоиндикации // Современное состояние водных биоресурсов : материалы 3-й Междунар. конф. / под ред. Е. В. Пищенко, М. А. Барсукова, И. В. Морузи. ФГБОУ ВПО НГАУ, 2014. С. 140–142.

4. *Дудник С. Н., Буковский М. Е., Колкова К. С.* Динамика изменения индекса загрязнённости вод в реке Вороне на створах выше и ниже по течению от г. Кирсанова // Эколого-географические проблемы регионов России : материалы IV Всерос. науч.-практ. конф., посвящ. 130-летию со дня рождения первого зав. кафедрой географии ПГСГА, проф. К. В. Полякова. Самара, 15 янв. 2013 г. Самара : Самар. гос. соц.-пед. ун-т, 2013. С. 140–143.

5. *Ершова А. А., Макеева Н. Н., Ясинский С. В.* Микропластик в поверхностных и подземных водах крупного города в бассейне р. Волги (на примере Нижнего Новгорода) // Вопросы географии. 2023. № 157. С. 402–420.

6. *Пипия Л. К., Елкин А. Г.* Переработка пластмасс: Оценка рынка и перспективы // Наука за рубежом. 2018. № 75. URL: http://www.issras.ru/global_science_review/Nauka_za_rubejom_n75.pdf (дата обращения: 04.02.2025).

7. Познавательный экологический портал Keep Truckee Green / Known Health Hazards of Plastics. URL: https://www.keeptruckeegreen.org/known-healthhazards-of-plastics-1-7/. (дата обращения: 04.02.2025).

8. Риа новости. URL: https://ria.ru/20171110/1508554568.html?ysclid=m8hcjb239i649960214 (дата обращения: 03.02.2025).

9. Скрининг содержания микропластика в поверхностных водах Российских рек / Ю. А. Франк, Е. Д. Воробьев, С. Н. Рахматуллина [и др.] // Экология и промышленность России. 2022. Т. 26, № 9. С. 67–71.

10. Distribution, characteristics, and research status of microplastics in the trunk stream and main lakes of the Yangtze River: A review / Fang-ting Wanga, Ke Baob, Chang-sheng Huanga [et al.] // China Geology. 2022. Vol. 5. P. 171−184. https://doi.org/10.31035/cg2022002

11. Guide for the visual identification & classification of plastic particles / Laura A. T. Markley, Charles T. Driscoll, Brady Hartnett [et al.]. USA, 2024. P. 37.

12. Identification and Quantification of Microplastics in Aquaculture Environment / Shuo Xiang, Yuqun Xie, Xuemei Sun [et al.] // Frontiers in Marine Science. 2022. P. 1–10 https://doi.org/10.3389/fmars.2021.804208

13. Impacts of micro and nanoplastics on human health / Sridhar Jayavel, Boopalakrishnan Govindaraju, Johni Rexliene Michael [et al.]. // Bull Natl Res Cent. 2024. Vol. 48, N 110. https://doi.org/10.1186/s42269-024-01268-1

14. Julie Masura Laboratory Methods for the Analysis of Microplastics in the Marine Environment. Recommendations for quantifying synthetic particles in waters and sediments / Julie Masura, Joel Baker, Gregory Foster // NOAA Technical Memorandum NOS-OR&R-48. USA, 2015. P. 39.

15. Nanoplastics formed during the mechanical breakdown of daily-use polystyrene products / M. T. Ekvall, M. Lundqvist, E. Kelpsiene [et al.] // Nanoscale Advances. 2019. https://doi.org/10.1039/C8NA00210J

УДК 556.024(504.5)

Экологическое состояние водных объектов, подверженных антропогенному воздействию в бассейнах рек Озерной и Уки (Камчатский край) по результатам экспедиционных исследований 2023–2024 гг.

А. А. Паскочина[1], В. С. Болдырев[2], Д. Д. Данилин[1],
Д. В. Мишин[1,3](miwindv@gmail.com)

[1]Камчатский филиал Тихоокеанского института географии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский
[2]Волгоградский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии» (Средневолжский филиал ФГБНУ «ВНИРО»), г. Волгоград
[3]Государственный океанографический институт им. Н. Н. Зубова, г. Москва

Аннотация. Осенью 2023 и 2024 гг. выполнены полевые мониторинговые исследования в бассейнах рек Озерной и Уки (Камчатский край). Состав работ включал в себя гидрометрические и гидрохимические наблюдения in situ на водотоках. Также отобраны пробы воды с целью определения макроионного состава и валового содержания элементов в пробе. По результатам экспедиционных исследований выявлены многократные превышения ПДК в местах техногенной нагрузки на малые и средние водотоки в бассейнах исследуемых рек. Приводится обзор результатов экспедиционных исследований, а также их сравнение между собой.

Ключевые слова: гидрология, лимнокрен, гидрохимия, экология, Камчатский край.

Введение

Для осуществления оценки экологического состояния водотоков в верховьях рек Озерной и Уки осенью 2023 и 2024 гг. выполнены экспедиционные исследования. Полевые работы включали в себя гидрометрические и гидрохимические исследования. Актуальность такого рода исследований заключается в получении информации о текущем состоянии водных объектов, их качественных и количественных характеристиках.

Методы исследований

Оценка экологического состояния водотоков осуществлялась в ходе подготовительных и рекогносцировочных работ в поле. Состав работ включал измерения морфометрических показателей рек (ширина русла, глубина в створе наблюдений), измерение скоростей течения рек, установку временного гидрологического поста на основном водотоке, оперативные измерения гидрохимических показателей, в том числе экспресс-тест, отбор проб воды на определения макроионного состава, для дальнейшего анализа в лабораторных условиях. Район проведения работ в долинах рек Озерной и Уки, расположенных на территории Камчатского края, представлен на схеме ниже (рис.). Станции наблюдений и отбора проб воды были назначены по результатам анализа имеющихся на тот момент материалов гидрохимических и гидрологических исследований, а также по согласованию с основным заказчиком работ (табл. 1). Полевые исследования направлены на выявление мест и объёмов поступления загрязняющих веществ в природные водотоки с целью поиска путей по снижению техногенной нагрузки.

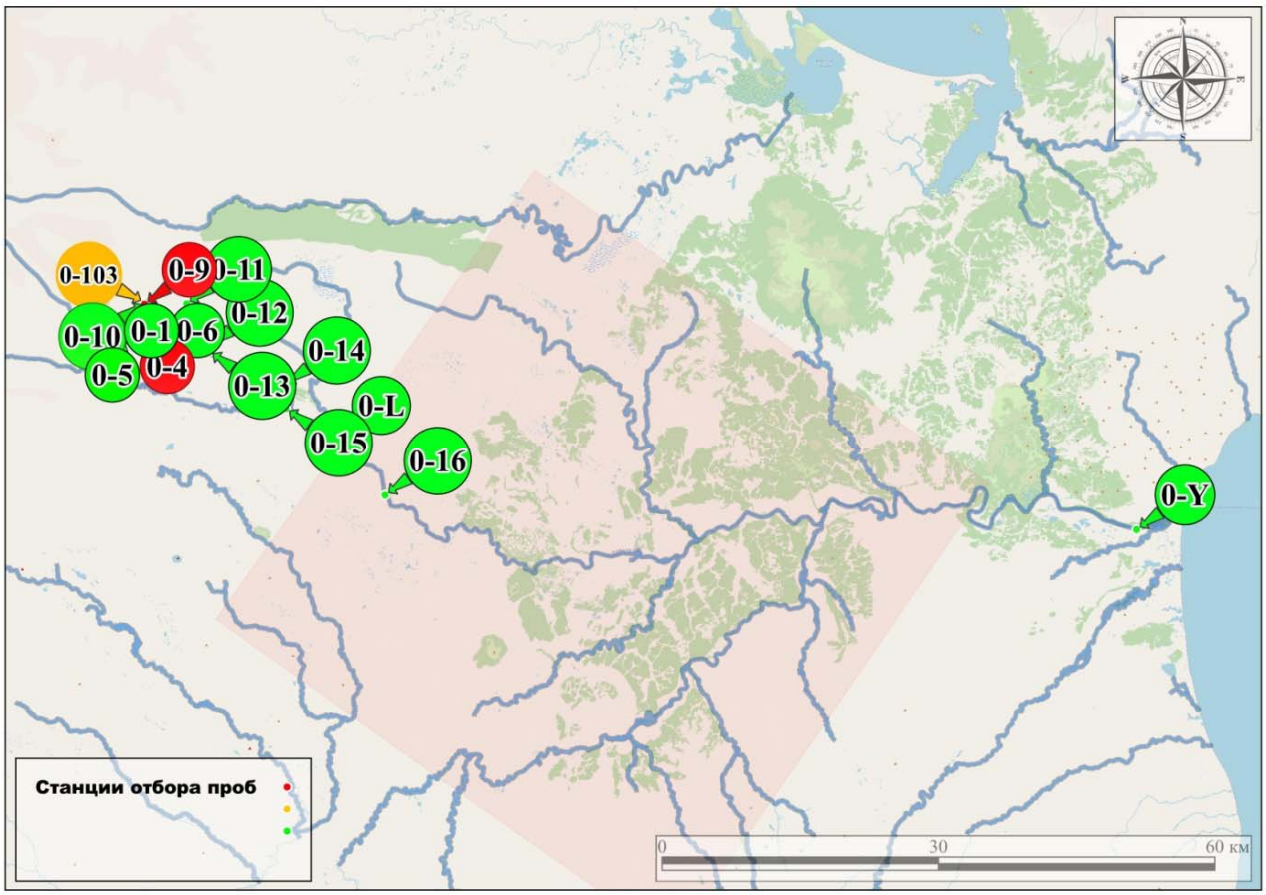


Рис. Схема расположения точек проведения экспедиционных исследований

Таблица 1

Расшифровка станций проведения экспедиционных исследований и отбора проб воды

Станции	Название	Станции	Название
Бассейн р. Уки		**Бассейн р. Озерная**	
О-3	р. Перевальная (фоновый створ)	**О-14**	р. Левая Озерная
О-103	р. Перевальная (выше руч. Нежный)	**О-15**	р. Правая Озерная
О-10	р. Перевальная (ниже руч. Нежный)	**О-L**	р. Озерная (Ламутская)
О-11	р. Перевальная	**О-16**	р. Озерная
О-8	руч. Нежный (после стоков ОГМК)	**О-У**	р. Озерная (7 км выше устья)
О-9	руч. Нежный	**О-4**	руч. Хомут
Бассейн р. Озерной		**О-6**	Устье руч. Эталонный
О-1	Лимнокрен р. Левая Озерная	**О-7–1**	руч. Эталонный-1
О-5	р. Левая Озерная (выше руч. Хомут)	**О-7–2**	руч. Эталонный-2
О-13	р. Левая Озерная (ниже руч. Хомут)	**О-12**	руч. б/н (ПК 547+20)

Ценность этих исследований в том, что в бассейнах этих рек обитают 20 видов пресноводных, прибрежных рыб и рыбообразных [1]. Великолепное состояние биоресурсной базы, большое разнообразие объектов лова, комплекс других природных условий, предопределяет важнейшее значение и перспективы для рекреационно-туристической деятельности среди прочих водных объектов Камчатского края Реки Озёрная Восточная и Ука составляют около 4 % нерестового фонда тихоокеанских лососей Карагинской подзоны и обеспечивают до 10 % её уловов этих рыб. Удельная продуктивность бассейнов достигает 1,4–2,35 т/км^2, а удельная рыбопродуктивность нерестилищ – 3,64–9,57 кг/м^2 (одни из самых высоких показателей не только среди рек восточного побережья Камчатки, но и Камчатки в целом) [2].

Гидрохимические характеристики. Во время полевых работ на водотоках с помощью портативных полевых приборов и датчиков Hanna Instrument осуществлялись экспресс-измерения величин основных гидрохимических показателей воды на всех исследуемых створах рек [3].

Большинство проб воды являются ультрапресными с минерализацией 37–60 мг/м³. Минерализация отдельных проб воды в зонах техногенного воздействия превышает 100 мг/м³: В устье руч. Хомут (ст. О-4) – 138 мг/м³, в устье руч. Эталонный – 101 мг/м³ (ст. О-6). Примечательно, что в ручье Эталонный минерализация 2024 г. превышает значение измерений прошлого 2023 г почти в два раза (ст. О-7-1) – 544 мг/л, в устье руч. Хомут (ст. О-4) – 160 мг/л, в устье руч. Эталонный – 282 мг/л (ст. О-6). Порядок значений на уровне или выше прошлого 2023 г.

По химическому составу пробы воды с фоновых створов (О-1, О-3) и контрольных створов (О-10, О-11, О-13, О-14), являются гидрокарбонатно-кальциевыми. Сульфаты составляют 13–19 % состава, доля натрия 10–11 %.

Пробы воды в зонах повышенного техногенного воздействия (ст. О-4, О-6, О-7-1, О-7-2, О-9) имеет сульфатно-кальциевый состав. Процентное содержание сульфатов в них более 45 %-экв/м³, а в руч. Хомут (ст. О-4) сульфаты являются

основным анионом. Эти пробы кислые, показатель pH в них ниже 6,5, поэтому гидрокарбонаты в них не представлены или их очень мало. При этом доля магния выше, чем в фоновых пробах – 13–16 %-экв/м³, а доля натрия ниже – 2–7 %-экв/м³. В катионном составе присутствует железо.

Солевой состав руч. Б/н (О-12) можно назвать промежуточным или переходными между двумя предыдущими типами вод. В анионном составе гидрокарбонаты и сульфаты имеют равные доли – эти воды гидрокарбонатно-сульфатно-кальциевые.

Состав проб воды из р. Правая Озерная (О-15) и Озерная (О-16) типично фоновый: в анионном составе преобладают гидрокарбонаты – около 40 %-экв/м³, а содержание сульфатов ниже, чем в остальных пробах – 5–6 %-экв/м³.

При оценке качества воды по гидрохимическим показателям использовался интегральный индекс загрязнения воды (далее – ИЗВ), рассчитанный по 6-ти приоритетным ЗВ, имеющим наиболее высокие значения отношений концентраций ЗВ к их ПДК. И стоит отметить, что по микроионному составу пробы воды в зонах повышенного техногенного воздействия (ст. О-4, О-6, О-7-1, О-7-2, О-9) имеет на порядок более высокий уровень загрязнения тяжелыми и переходными металлами.

Интегральные гидрохимические индексы ИЗВ показывают, что в 2023 г. в водотоках дренирующих участок открытых горных работ и промплощадки обогатительного комплекса и хвостового хозяйства – ручьи Хомут (ст. О-4), Эталонный-1,-2 (ст. О-7-1, О-7-2) и Нежный (ст. О-9) – качество воды соответствует последнему 7-му (чрезвычайно грязные воды) и предпоследнему 6-му (очень грязные воды) классу (табл. 2).

Таблица 2

Класс качества воды в рассматриваемых точках по результатам расчета ИЗВ в 2023-2024 гг. в бассейнах рек Озерная и Ука

Станция	ИЗВ 2023 г.	Класс качества воды	ИЗВ 2024 г.	Класс качества воды
Бассейн р. Уки				
О-10	2,29	III (умеренно загрязненная	0,10	I (очень чистая)
О-8	–	–	32,0	VII (чрезвычайно грязная)
О-9	6,65	VI (очень грязная)	62,4	VII (чрезвычайно грязная)
Бассейн р. Озерной				
О-1	1,41	III (умеренно загрязненная)	0,03	I (очень чистая)
О-5	1,74	III (умеренно загрязненная)	0,09	I (очень чистая)
О-14	1,30	III (умеренно загрязненная)	0,04	I (очень чистая)
О-4	42,1	VII (чрезвычайно грязная)	48,9	VII (чрезвычайно грязная)
О-6	6,66	VI (очень грязная)	0,25	I (очень чистая)
О-7–2	18,5	VII (чрезвычайно грязная)	30,9	VII (чрезвычайно грязная)
О-12	0,58	II (чистая)	–	–
О-У	-	-	0,03	I (Очень Чистая)

Крайне тяжелая экологическая ситуация складывалась в 2023 г. в руч. Хомут, где ИЗВ достиг значений 42,05, что в 72,5 раза выше, чем в фоновых условиях и в несколько крат, до 2 порядков, превышены нормативы качества воды по

меди и ртути. При сравнении со свежими данными 2024 г. ситуация с содержанием тяжелых металлов в пробах воды схожая. Выявлено превышение ПДК по меди, даже выше чем в прошлом году в 1,5 раза. Также остаются превышения по таким тяжелым металлам: марганцу; алюминию; цинку и железу.

В руч. Эталонный (ст. О-6) в приустьевой зоне и в его истоках (ручьях Эталонный-1 и Эталонный-2) экологическая ситуация ненамного лучше, чем в руч. Хомут. В 2023 г. ИЗВ достигал значений 12,63–18,5 (7 класс – чрезвычайно грязные воды) – в верхнем течении, 6,66 (6 класс – очень грязные воды) – в нижнем (при впадении в р. Левую Озерную), что в 22–32 раза и 11,5 раз выше, чем в фоновых условиях. В 2024 г. в верхнем течении значение ИЗВ превысил 30.

В руч. Нежный (бассейн р. Уки) экологическая ситуация так же достаточно тяжелая – токсичность по ИЗВ в 2023 г. составила 6,65, что соответствует 6-му (предпоследнему) классу качества (очень грязные воды), т. е. ситуация примерно такая же как в устье руч. Эталонного. Интегральная токсичность воды в руч. Нежный в 11,5 раз выше, чем в фоновых условиях. В 2024 г. ситуация изменилась не в лучшую сторону. Превышение составило от 30 до 60 на всём протяжении водотока.

Наиболее чистые воды в руч. б/н (ПК 547+20, ст. О-12), дренирующем Хадейскую ВТС, – ИЗВ=0,58 (2 класс качества – «чистые»), и в р. Озерная ст. О-16 (44,1 км ниже устья руч. Хомут) – ИЗВ=1,05 (на границе между 3 класс «умеренно загрязненных» и 2 класс «чистых»). В 2024 г. ситуация кардинально не поменялась. Основного стока рек пока ещё достаточно, чтобы поддерживать концентрацию загрязняющих веществ на предельно допустимом уровне.

Выводы

Исходя из полученных данных, в малых водотоках в зоне техногенного воздействия ОГМК природные воды в настоящее время относятся к категории чрезвычайно грязных (7 класс) и очень грязных (6 класс). В их водах превышены рыбохозяйственные нормативы по 7–9 тяжелым металлам. Загрязнение достигает экстремальных значений (кратностей превышений фона и нормативов ПДК) – в десятки, а по отдельным металлам (медь) – в сотни раз. Из этого возможно заключить, что в настоящее время перенос потенциально опасных загрязняющих веществ техногенного происхождения оказывает существенное негативное влияние на качество природных поверхностных вод в 3 нижележащих малых водотоках, относящихся к высшей рыбохозяйственной категории.

Работа выполнена в рамках государственного задания КФ ТИГ ДВО РАН по теме «Структурно-функциональная организация, динамика и продуктивность наземных и прибрежных экосистем на Дальнем Востоке РФ. Разработка научных основ и экономических инструментов устойчивого природопользования» (№ ЕГИСУ 124012700496-4).

Список литературы

1. *Шейко Б. А., Фёдоров В. В.* Глава 1. Класс Cephalaspidomorphi – Миноги. Класс Condrichthyes – Хрящевые рыбы. Класс Holocephali – Цельноголовые. Класс Osteichthyes – Костные

рыбы // Каталог позвоночных Камчатки и сопредельных морских акваторий. Петропавловск-Камчатский : Камчат. печат. двор, 2000. С. 7–69.

2. *Коростелев С. Г., Улатов А. В.* Данные исследований 2023 г. по воздействию Озерновского горно-металлургического комбината (ОГМК) на состояние ихтиофауны рек Озерная и Ука (Северо-Восточная Камчатка); Сохранение биоразнообразия Камчатки и прилегающих морей : материалы XXV Всероссийской научной конференции. Петропавловск-Камчатский, 14–15 нояб. 2024 г. Петропавловск-Камчатский ; М. : Изд-во Центра охраны дикой природы, 2024. С 168–175.

3. *Шадрина А. А., Токранов А. М.* Предварительные результаты обследования верхнего течения реки Левая Озерная (Северо-Восточная Камчатка) в 2023 году // Современные научные подходы в фундаментальных и прикладных исследованиях : сб. ст. Междунар. науч. конф. Санкт-Петербург, Август 2024). СПб. : ГНИИ «Нацразвитие», 2О24. 60 с.

УДК 551.465

Мониторинг состояния Черного моря

А. А. Воронцов (vorv10921@gmail.com), А. М. Булыгин (bam524@mail.ru),
О. Г. Вишнев (vishniovoleg@meteo.ru)
ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», г. Обнинск

Аннотация. Рассмотрено современное состояние мониторинга Черного моря специалистами Росгидромета посредством введения в практику нового справочного издания в виде «Бюллетеня гидрометеорологического состояния Черного моря», в состав которого входят материалы разных видов наблюдений за каждый год при помощи различных наблюдательных платформ, включая суда, ИСЗ, буи и гидрометеорологические станции. Эти ежегодные Бюллетени Черного моря предоставляют первичную информацию для выработки обоснованных управленческих решений на различных уровнях от локального до федерального.

Ключевые слова: Черное море, температура воды, соленость воды, мониторинг

Изменения климата, происходящие в последние десятилетия, в том числе – глобальное потепление, делают особенно актуальными исследования текущих изменений режима морей РФ и их прибрежных регионов. Важными особенностями внутренних южных морей являются современные возможности использования их рекреационных составляющих, таких как теплый климат, теплое море, целебное воздействие морских и воздушных ванн и многое другое. Чёрному морю принадлежит особая роль. Главным природным ресурсом Черного моря является климат. Климат в значительной степени определяет возможное использование побережья этих морей для создания курортов, домов отдыха, кемпингов.

С другой стороны, рекреационные возможности прибрежных зон южных морей определяются не только воздействиями внешних глобальных природных факторов, но и антропогенным воздействием. В частности, экологическое состояние Черного моря в связи с расширением транспортировки углеводородов, увеличения интенсивности судоходства и других видов человеческой деятельности в береговой зоне продолжает ухудшаться. На изменения гидрологического режима моря, вызванные антропогенным фактором (изъятием части стока рек), накладываются региональные проявления климатических изменений, которые

могут усиливать или ослаблять негативные последствия хозяйственной деятельности. Глобальные изменения климата определяют значимые, в том числе и негативные изменения состояния Чёрного моря. Достоверная оценка происходящих изменений может позволить своевременно спланировать и выполнить адаптационные мероприятия с целью уменьшения возможных негативных последствий.

Понятие «мониторинг», применяемое как метод научного исследования, связанный непосредственно с изучением окружающей среды, можно определить как регулярные наблюдения, оценка состояния и прогноз ее состояния. Для морей России положения государственного мониторинга водных объектов уже узаконено Водным кодексом Российской Федерации № 74-ФЗ (с изм.). В связи с этим организация комплексного мониторинга состояния Черного моря является, безусловно, актуальной задачей [4; 7]. В рамках этого мониторинга было принято решение о подготовке и выпуске ежегодных бюллетеней гидрометеорологического состояния Черного моря [6]. Начиная с 2019 г. такой бюллетень [2]. готовится и рассылается заинтересованным организациям. В Бюллетенях за 2020–2023 гг. представлена также информация и по Азовскому морю [3]. В настоящий момент времени к печати готовится Бюллетень гидрометеорологического состояния Черного моря за 2024 г.

Отметим, что подготовка материалов Бюллетеней проводится на основе объединенной базы данных [5], в которую после проведенного сравнения и проведения дополнительного контроля были добавлены исторические материалы, собранные МГИ РАН [9], Бюллетени содержит оперативную информацию по текущему состоянию морей. Под оперативной понимается информация, полученная с лицензированных наблюдательных платформ в течение анализируемого года. В Бюллетене использованы также исторические данные для оценки происходящих тенденций изменения состояния морей.

Настоящий Бюллетень содержит:

– материалы наблюдений на прибрежных метеорологических станциях, входящих в систему международного обмена. Представлены метеорологические данные шести стран: РФ, Румынии, Грузии, Турции, Болгарии и Украины;

– данные наблюдений на морских гидрометеорологических станциях и постах российского сектора Черного моря;

– материалы наблюдений, выполняемые штурманским составом судов, находившихся в акватории морей (добровольные судовые наблюдения);

– данные глубоководных океанографических наблюдений, проводимых с борта научно-исследовательских судов Росгидромета, научно-исследовательских судов и заякоренных надводных и подводных наблюдательных платформ Академии наук РФ;

– данные глубоководных океанографических наблюдений, получаемые с помощью профилирующих буев, выполняющих наблюдения в рамках международной программы АРГО (рис. 1);

– данные дистанционного зондирования с помощью искусственных спутников Земли (рис. 2–3).

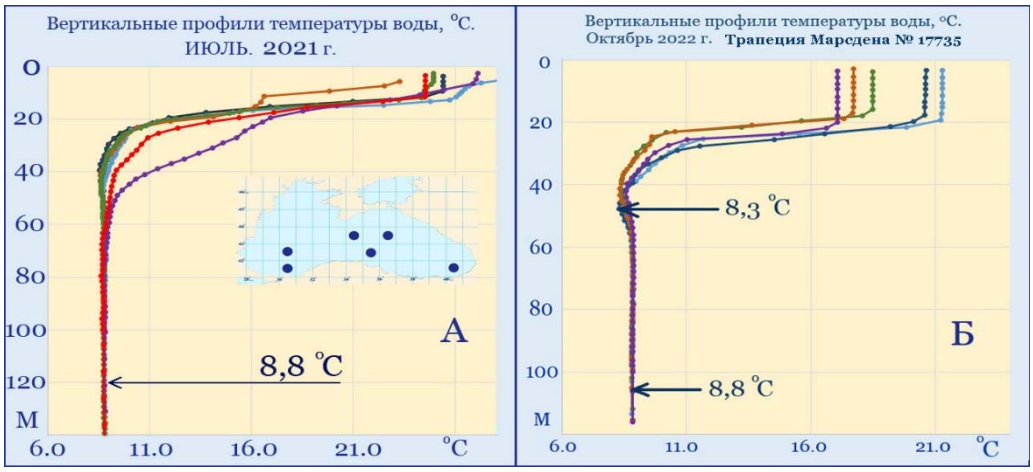


Рис. 1. Вертикальные профили температуры воды (измерения буем АРГО)

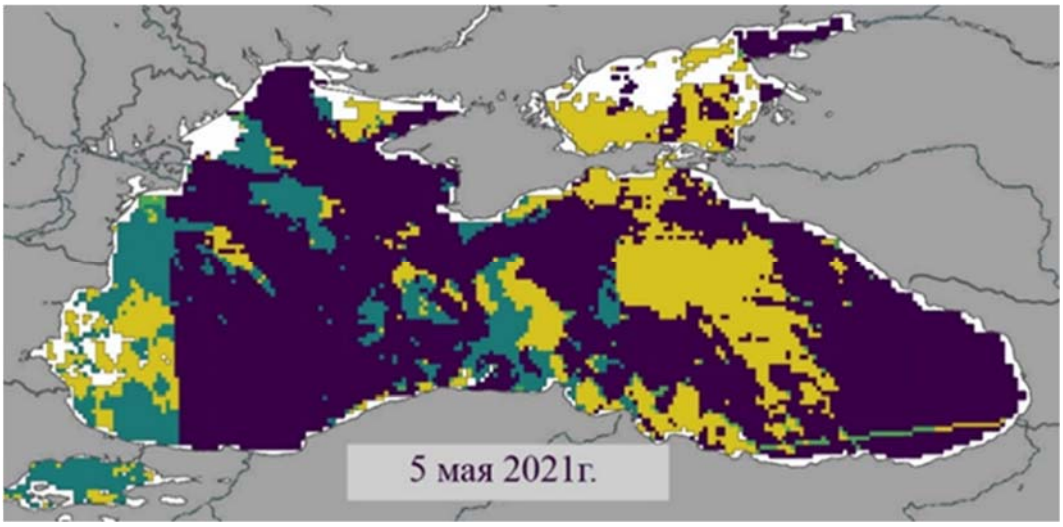


Рис. 2. Ночная температура поверхности Черного моря по данным ИСЗ

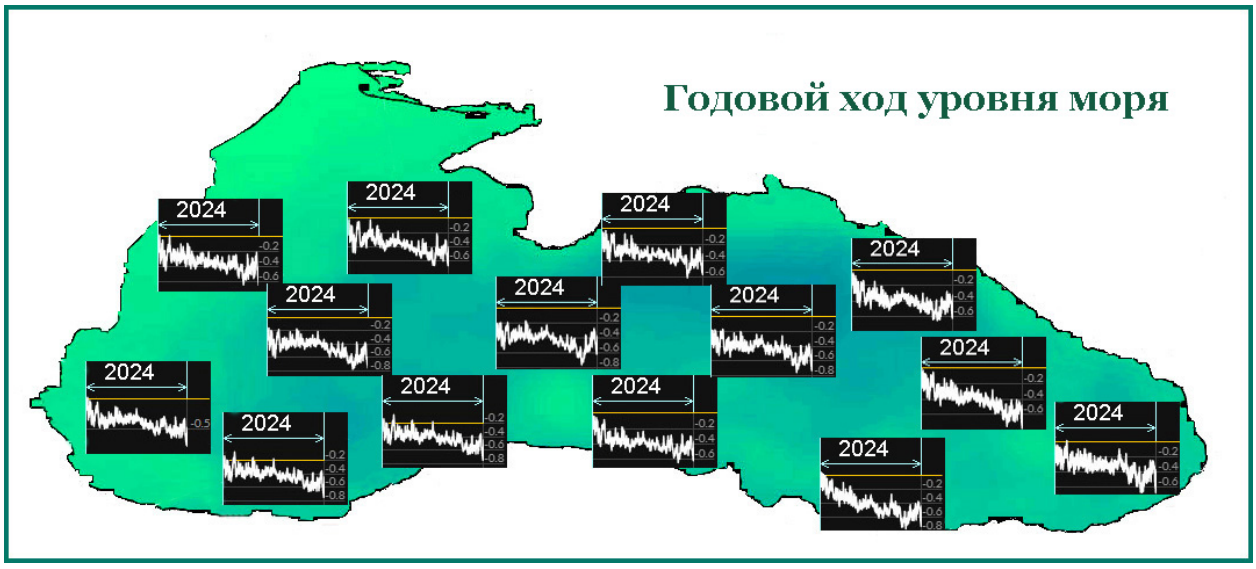


Рис. 3. Годовой ход уровня моря по данным ИСЗ

В Бюллетенях представлены и данные модельных расчетов. В частности, приводятся карты максимально возможных и наиболее вероятных значений высот волн, карты поверхностных течений (рис. 4).

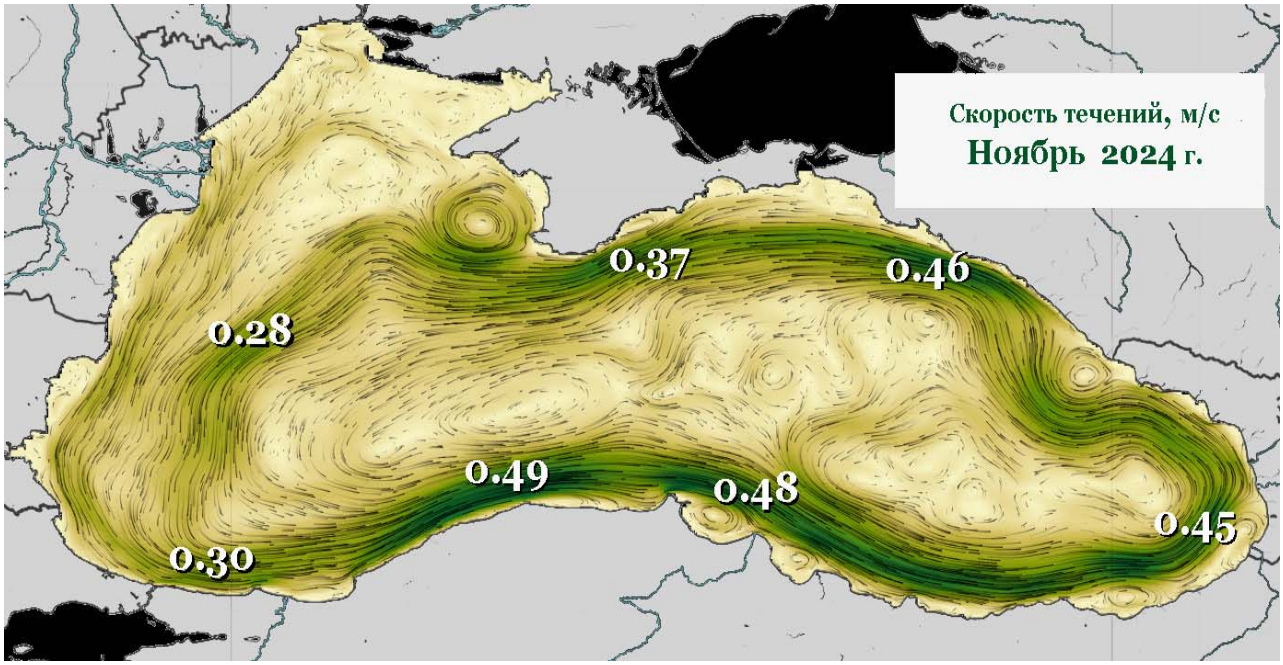


Рис. 4. Карта поверхностных течений Черного моря по модельным расчетам (расчет выполнен в рамках проекта Коперникус)

Бюллетень издается в виде отдельной книги, содержащей аналитический обзор текущего состояния Черного моря с большим количеством иллюстративного материала: графиков, таблиц, карт. Непосредственно данные наблюдений, как в исходном, проконтролированном виде, так и виде рассчитанных статистик собраны в Приложениях к Бюллетеню. Приложения записаны на CD-диск, поставляемый с каждым экземпляром Бюллетеня. Список данных, включаемых в Приложениях, может несколько меняться от года к году. Например, Бюллетень за 2023 г. содержит 27 приложений [3]:

– таблицы статистик гидрологических параметров на морских станциях и постах Чёрного и Азовского морей (трехсреднее, квантили, размах), температура воды;

– основные статистики первого порядка гидрологических параметров на морских станциях и постах Чёрного и Азовского морей, температура воды;

– таблицы статистик гидрологических параметров на морских станциях и постах Чёрного и Азовского морей (трехсреднее, квантили, размах, солёность воды;

– основные статистики первого порядка гидрологических параметров на морских станциях и постах Чёрного и Азовского морей, солёность воды;

– таблицы статистик гидрологических параметров на морских станциях и постах Чёрного и Азовского морей (трехсреднее, квантили, размах), уровень моря;

– основные статистики первого порядка гидрологических параметров на морских станциях и постах Чёрного и Азовского морей, уровень моря;

– таблицы статистик гидрологических параметров на морских станциях и постах Чёрного и Азовского морей (трехсреднее, квантили, размах), высоты волн;

– основные статистики первого порядка гидрологических параметров на морских станциях и постах Чёрного и Азовского морей, высоты волн;

– аномалии среднемесячных и среднегодовых значений основных гидрологических параметров по данным наблюдений на МГ и МГП Азовского и Чёрного морей;

– карты-схемы мест, где были выполнены глубоководные судовые наблюдения в 2023 г.;

– координаты мест, где в 2023 г. были выполнены попутные судовые наблюдения;

– графики годового хода среднемесячных, максимальных и минимальных за месяц значений температуры воздуха на прибрежных метеорологических станциях Чёрного моря;

– графики среднесуточных, максимальных и минимальных за сутки значений температуры воздуха на метеорологических станциях побережья Чёрного моря в 2023 г.;

– графики среднесуточных, максимальных и минимальных за сутки значений температуры воздуха на метеорологических станциях побережья Азовского моря в 2023 г.;

– графики годового хода среднемесячных, максимальных и минимальных за месяц значений температуры воздуха на прибрежных метеорологических станциях Азовского моря;

– графики годового хода среднемесячного, максимального и минимального за месяц значений атмосферного давления на метеорологических станциях Азовского моря;

– графики годового хода среднемесячного, максимального и минимального за месяц значений атмосферного давления на метеорологических станциях Чёрного моря;

– графики среднесуточного, максимального и минимального за сутки значений атмосферного давления на уровне моря на гидрометеорологических станциях Чёрного моря;

– графики среднесуточного, максимального и минимального за сутки значений атмосферного давления на уровне моря на гидрометеорологических станциях Чёрного моря;

– розы ветров (средняя и максимальная за год скорость ветра) и повторяемость величин модуля скорости ветра за 2023 г. на гидрометеорологических станциях Азовского моря;

– розы ветров (средняя и максимальная за год скорость ветра) и повторяемость величин модуля скорости ветра за 2023 г. на гидрометеорологических станциях Чёрного моря;

– розы ветров (среднемесячные, максимальные значения) и повторяемость величин модуля скорости ветра за месяц в западной и северо-западной части Чёрного моря;

– розы ветров (среднемесячные, максимальные значения) и повторяемость величин модуля скорости ветра за месяц на полуострове Крым;

– розы ветров (среднемесячные, максимальные значения) и повторяемость величин модуля скорости ветра за месяц в восточной и северо-восточной части Чёрного моря;

– розы ветров (среднемесячные, максимальные значения) и повторяемость величин модуля скорости ветра за месяц в южной части Чёрного моря

– розы ветров (среднемесячные, а также среднегодовые, максимальные значения) и повторяемость величин модуля скорости ветра за месяц и за год в Азовском море;

– карты температуры поверхностного слоя Чёрного и Азовского морей;

– карты отклонения уровня Чёрного моря от геоида;

– карты скоростей течений в Чёрном море;

– карты высот волн в Чёрном море.

В Бюллетенях особое внимание уделено главным «болевым точкам» режима Черного моря. Первая проблема – начавшееся с середины 1990-х гг. потепление деятельного слоя моря. Среднегодовая температура поверхностного слоя воды за этот период выросла более чем на 2,2 °С [1]. Рост температуры поверхностных слоев воды ведет к уменьшению растворимости кислорода в воде. Отсутствие холодных зим на протяжении последнего десятилетия приводит к уменьшению поступающего из атмосферы кислорода. Текущая ситуация вызывает крайнюю обеспокоенность ввиду того, что на большей части акватории Черного моря исчезает или уже отсутствует слой воды с содержанием растворенного кислорода в концентрации, достаточной для поддержания популяции промысловых рыб и других гидробионтов. Материалы, представленные в Бюллетенях, показывают, что биоразнообразие Черного моря находится под угрозой.

Издаваемые ежегодно Бюллетени гидрометеорологического состояния Черного моря призваны привлекать внимание широкой общественности и управляющих органов к возникающим проблемам экологического характера и предоставляют первичную информацию для выработки обоснованных управленческих решений, как на локальном, так и на федеральном уровнях.

Список литературы

1. *Белокопытов В. Н.* Климатические изменения гидрологического режима Черного моря : дис. … д-ра геогр. наук. Севастополь, 2017. 377 с.

2. Бюллетень гидрометеорологического состояния Черного моря в 2019 году / В. М. Грузинов [и др.]. Обнинск : Артифекс, 2020. 194 с.

3. Бюллетень гидрометеорологического состояния Черного и Азовского морей в 2023 году / Булыгин А. М. [и др.]. Обнинск : ВНИИГМИ-МЦД, 2024. 208 с.

4. *Валле А. А.* О мониторинге гидролого-гидрохимического режима вод Черного моря // Системы контроля окружающей среды. 2021. Вып. 4 (46). С. 5–13. doi: 10.33075/2220-5861-2021-4-5-13

5. *Воронцов А. А., Баталкина С. А. Нефедова Г. И.* Специализированная база данных по гидрометеорологическим условиям прибрежной зоны морей России. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2023623536 от 19.10.2023 г.

6. Ежегодный гидрометеорологический бюллетень по Черному морю и его практическая реализация / В. М. Грузинов [и др.] // Труды ГОИН. 2021, вып. 222, С. 198–212

7. *Лебедев С. А., Кравченко П. Н.* Система комплексного мониторинга состояния морской среды Черного моря // Проблемы постсоветского пространства. 2019. Т. 6, № 3. С. 269–278. https://doi.org/10.24975/2313-8920-2019-6-3-269-278

8. Система экологического мониторинга Азово-Черноморского бассейна / Е. Е. Совга [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2022. № 2. С. 19–37. DOI: 10.22449/2413–5577–2022–2-19–37

9. Marine hydrophysical institute and All-Russian research institute of hydrometeorological information – world data center: comparison and development of Black Sea databases / E. Godin [et al.] // Bollettino di geofisica. 2021. Vol. 62, Supp. 1. P. 233–234

УДК 528.8.04(571.53)

Оценка индекса мутности NDTI рек Большой Ирети и Большой Белой

А. А. Пляскина (alinadensina@mail.ru)
Иркутский государственный университет, г. Иркутск

Аннотация. Дается оценка индекса мутности воды рек Большой Ирети и Большой Белой в Черемховском районе на основе спутниковых данных Sentinel 2 за период 2020–2024 гг. С помощью применения индекса мутности воды (NDTI – Normalized Difference Turbidity Index) выявлены пространственно-временные закономерности изменения качества водных объектов. Установлено, что зоны повышенной мутности коррелируют с участками активного антропогенного воздействия, включая населенные пункты и сельскохозяйственные территории, а также с естественными гидроморфологическими процессами, происходящими в протоках, старицах и на мелководьях. Полученные результаты могут служить основой для комплексного экологического мониторинга и оценки воздействия природных и антропогенных факторов на водные экосистемы региона.

Ключевые слова: мутность воды, Sentinel-2, индекс мутности NDTI, Большая Ireть, Большая Белая, гидроморфологические процессы, паводки, антропогенное воздействие, экологический мониторинг.

Введение

Актуальность исследования для Черемховского района Иркутской области обусловлена не только природными факторами, возрастающей антропогенной нагрузкой от жизнедеятельности местного населения, сельским хозяйством и промышленностью, но и социальной напряженностью, связанной с качеством воды в местных реках. В последние годы жители населенных пунктов, прилегающих к рекам Большая Ireть и Большая Белая, неоднократно выражали недовольство ухудшением качества воды, что проявлялось в изменении её цвета, запаха и прозрачности и массовой гибели рыбы. Эти события активно обсуждались в социальных сетях, где жители делились фотографиями и видеозаписями, демонстрирующими загрязнение рек и гибель рыбы. Многие жители связывали эти явления с деятельностью промышленных и угледобывающих предприятий, сель-

скохозяйственных организаций, расположенных вблизи водных объектов. Обращения от местных жителей поступали в Росприроднадзор и Роспотребнадзор и Природоохранную Прокуратуру, с требованием провести расследование и принять меры по улучшению экологической ситуации, однако их результаты не всегда удовлетворяли местное население, что подчеркивает необходимость более детального и независимого анализа состояния водных объектов. В этой области исследования использование спутниковых данных Sentinel-2 для оценки мутности воды с помощью индекса NDTI (Normalized Difference Turbidity Index) становится особенно актуальным. Этот метод позволяет не только выявить пространственно-временные изменения мутности воды, но и установить связь между антропогенной деятельностью, естественными факторами и ухудшением качества водных ресурсов.

Полученные данные помогут объективно оценить состояние водных объектов, что будет способствовать осведомленности местного населения и восстановлению доверия к природоохранным органам и предприятиям, соблюдающим требования охраны окружающей среды.

Объект исследования

Объектом исследования являются водные объекты реки Большая Иреть и Большая Белая, расположенной в Черемховском районе Иркутской области. В рамках исследования рассматривается также её основной приток, Голуметь.

Исследуемые реки подвержены естественным и антропогенным факторам, влияющим на их гидрохимические параметры, включая мутность воды. Среди природных факторов основное значение имеют сезонные колебания стока, эрозионные процессы и выпадение осадков, приводящее к увеличению концентрации взвешенных частиц. Антропогенное влияние связано с горнодобывающей деятельностью, сельским хозяйством и поселениями, расположенными в пределах бассейна реки.

Для оценки пространственно-временной изменчивости мутности воды применён анализ спутниковых снимков Sentinel-2 с использованием нормализованного разностного индекса мутности (NDTI).

Черемховский район расположен в пределах южной части Восточной Сибири, в центральной части Иркутской области, что определяет его резко континентальный климат с выраженной сезонностью [1]. Основное влияние на климат оказывают северо-западные и западные воздушные массы, а также значительная удалённость от океанов [2]. Средняя температура в январе составляет –20... –25 °С, минимальные температуры могут достигают –45 °С. Лето тёплое, средняя температура июля – +18...+20 °С, максимальные значения достигают +35 °С [1].

Годовое количество осадков варьируется в пределах 250–400 мм, большая их часть выпадает в летний период. Зимы малоснежные, что способствует глубокому промерзанию почвы. Ветра преобладают западные и юго-западные со средней скоростью 3–5 м/с, зимой возможны сильные восточные ветры и метели [3].

Продолжительность безморозного периода составляет около 90–110 дней, что ограничивает вегетационный сезон растений [1]. Существенные перепады

температур в течение года и короткое лето накладывают ежегодные ограничения на виды растительности и сельскохозяйственную деятельность.

Гидрографическая сеть района представлена бассейном р. Большой Белой, ее притоками – Большая Иреть, Голуметь и другими [3]. Вода пригодна для питьевого и технического водоснабжения. Река Белая имеет широкую заболоченную долину [4]. Реки Большая Иреть, Голуметь и Большая Белая принадлежат бассейну Ангары. Большая Белая образуется в результате слияния рек Баруун-Саган-Бильчир и Саган-Бильчир. На равнине р. Большой Белой, сливаясь с рекой Малой Белой, принимает название Белая и впадает в Ангару. Климат района резко континентальный с продолжительной холодной зимой и коротким жарким летом [1].

Почвенный покров Черемховского района формируется в условиях резко континентального климата и преобладания лесостепного ландшафта [5]. Основными почвами района являются дерново-подзолистые, чернозёмы оподзоленные и серые лесные почвы [6].

Чернозёмы оподзоленные и тёмно-серые лесные почвы распространены в равнинных частях района, в условиях умеренного увлажнения. Эти почвы обладают высокой плодородностью, но, вследствие склонности к эрозии требуют мелиорации для сельскохозяйственного использования. В поймах рек встречаются аллювиальные почвы с высокой влагоёмкостью, используемые для сенокосов и пастбищ [5].

На склонах и возвышенностях формируются маломощные каменистые почвы, отличающиеся низким содержанием гумуса и высокой эрозионной подверженностью [6]. Значительные площади заняты почвами техногенного происхождения в зонах добычи угля, что требует проведения рекультивационных мероприятий [7].

Территория района характеризуется преимущественно аграрной направленностью, многочисленными месторождениями разнообразного рудного, нерудного, камнесамоцветного, твердого топливно-энергетического, минерально-строительного сырья [7].

Методы исследования

Очевидно, что условием репрезентативности данных мониторинга является однородность водного тела реки на створе мониторинга. Разумеется, регулярная проверка однородности створов мониторинга по всем определяемым гидрохимическим характеристикам является крайне трудоемкой задачей. В статье представлена методика проверки однородности створа мониторинга с помощью анализа данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Эта методика включает в себя расчеты индекса мутности NDTI на основании спутниковых снимков Sentinel-2 в среде QGIS в пределах буферной зоны створа мониторинга, анализ однородности значений индекса мутности NDTI вдоль створа мониторинга. Приведена оценка однородности индекса мутности на р. Большой Белой и Большой Ирети до впадения в нее р. Малой Белой. Разумеется, однородность створа мониторинга по значениям индекса мутности не гарантирует его однородности по

всем гидрохимическим параметрам, однако отсутствие однородности по индексу мутности может служить признаком неоднородности речного потока на створе.

Нормализованный разностный индекс мутности (Normalized Difference Turbidity Index, NDTI) является показателем мутности воды, он характеризует уменьшение прозрачности воды из-за взвешенных минеральных и органических частиц, в водном объекте. Мутность может быть вызвана поступлением терригенных частиц с водосбора и эрозией береговой линии [8]. Индекс NDTI может принимать значения от −1,0 до +1,0. Чем выше значение индекса, тем больше мутность воды, т. е. выше содержание взвешенных частиц. Индекс NDTI рассчитывается по формуле [8]:

$$\mathrm{NDTI} = (\mathrm{Red} - \mathrm{Green}) / (\mathrm{Red} + \mathrm{Green}), \quad (1)$$

где Red – излучение поверхности Земли в красной области спектра; Green – в зеленой области спектра.

В качестве источников данных об интенсивности излучения в этих областях спектра использовались спутниковые снимки Sentinel-2, уровни обработки Level 1C и Level 2A [9]. При увеличении мутности река будет иметь высокие значения NDTI, так как концентрация взвешенных частиц увеличивает отражательную способность в красном диапазоне (RED) по сравнению с зеленым (GREEN).

Результаты исследования

Для проведения исследования были использованы данные спутниковых снимков Sentinel 2 за период 2020–2024 гг. [9]. Для оценки мутности водных объектов были построены карта-схемы однородности нормализованного разносного индекса мутности NDTI в пределах водных объектов на правой части на рисунках и в левой части, так же были выбраны участки с повышенным индексом мутности и для наглядности использованы спутниковые снимки территории. Карта-схема спутникового снимка, реклассифицированного по значениям NDTI за 2020 г., представлена на рис. 1.

Результаты исследования показывают, оцененные по данным спутниковых снимков Sentinel 2, что на территории исследования в 2020 г. значения вегетационного индекса NDTI варьируются от –0,33 до 0,07. В целом вода в реках Большая Белая, Больщая Иреть оценивается как чистая, на рисунке видно, что территория со значением индекса > 0 представляет собой районы с повышенным индексом мутности по естественным и техногенным причинам.

Карта-схема спутникового снимка, реклассифицированного по значениям NDTI за 2021 г., представлена на рис. 2. Результаты исследования показывают, оцененные по данным спутниковых снимков Sentinel 2, что на территории исследования в 2021 г. значения вегетационного индекса NDTI варьируются от –0,30 до 0,05. В целом вода в реках Большой Белой, Большой Ирети оценивается как чистая, на рисунке видно, что территория со значением индекса > 0 представляет собой районы с повышенным индексом мутности по естественным и техногенным причинам.

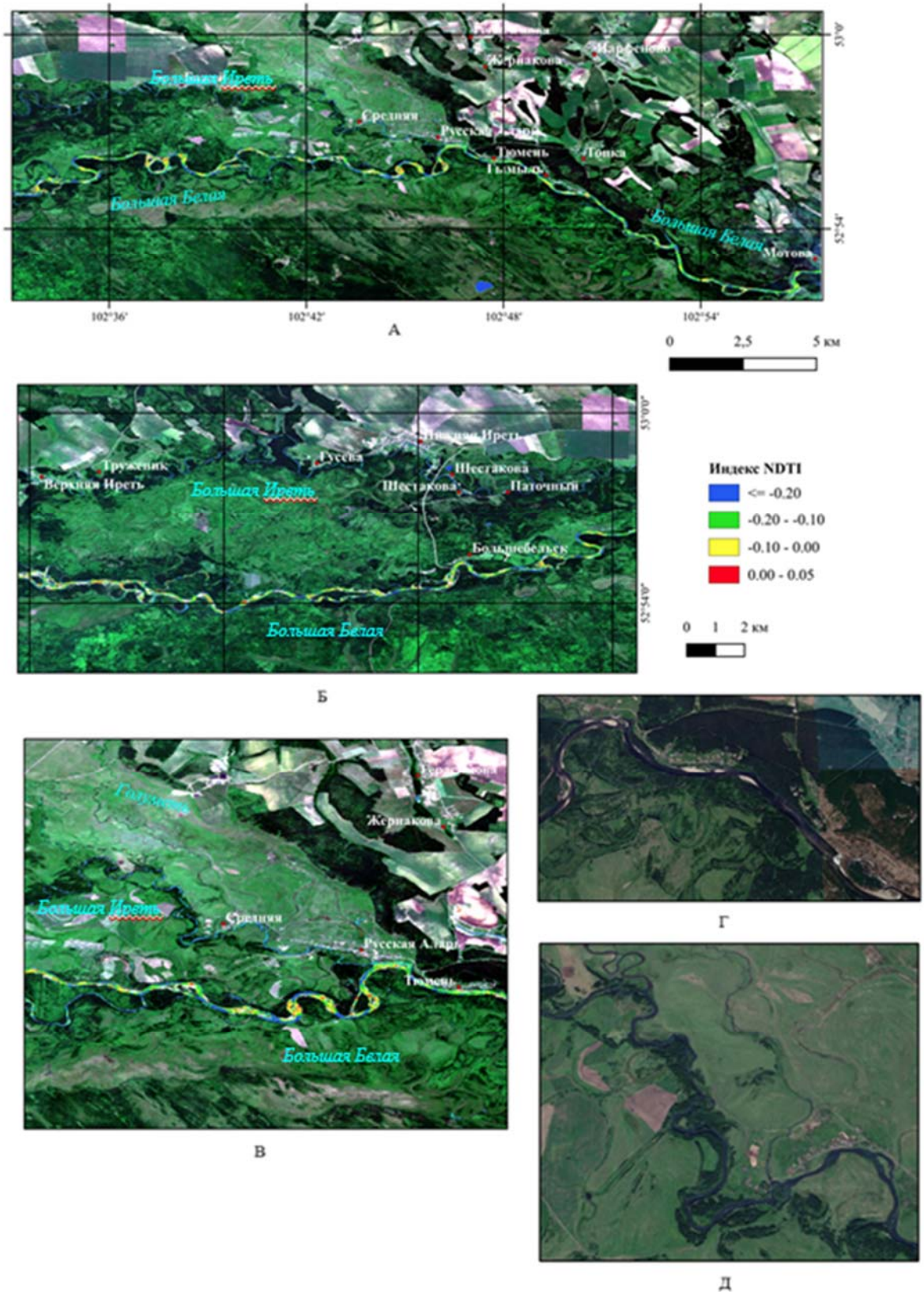


Рис. 1. Карта-схема спутникового снимка Sentinel 2 на район исследований, реклассифицированного по значениям NDTI за 2020 г. : А – Западная часть карта-схемы спутникового снимка, Б – Восточная часть карта-схемы спутникового снимка, В – Приближенная карта-схема района исследования, Г – Спутниковый снимок р. Большая Белая, Д – Спутниковый снимок р. Большая Ирель, Голуметь

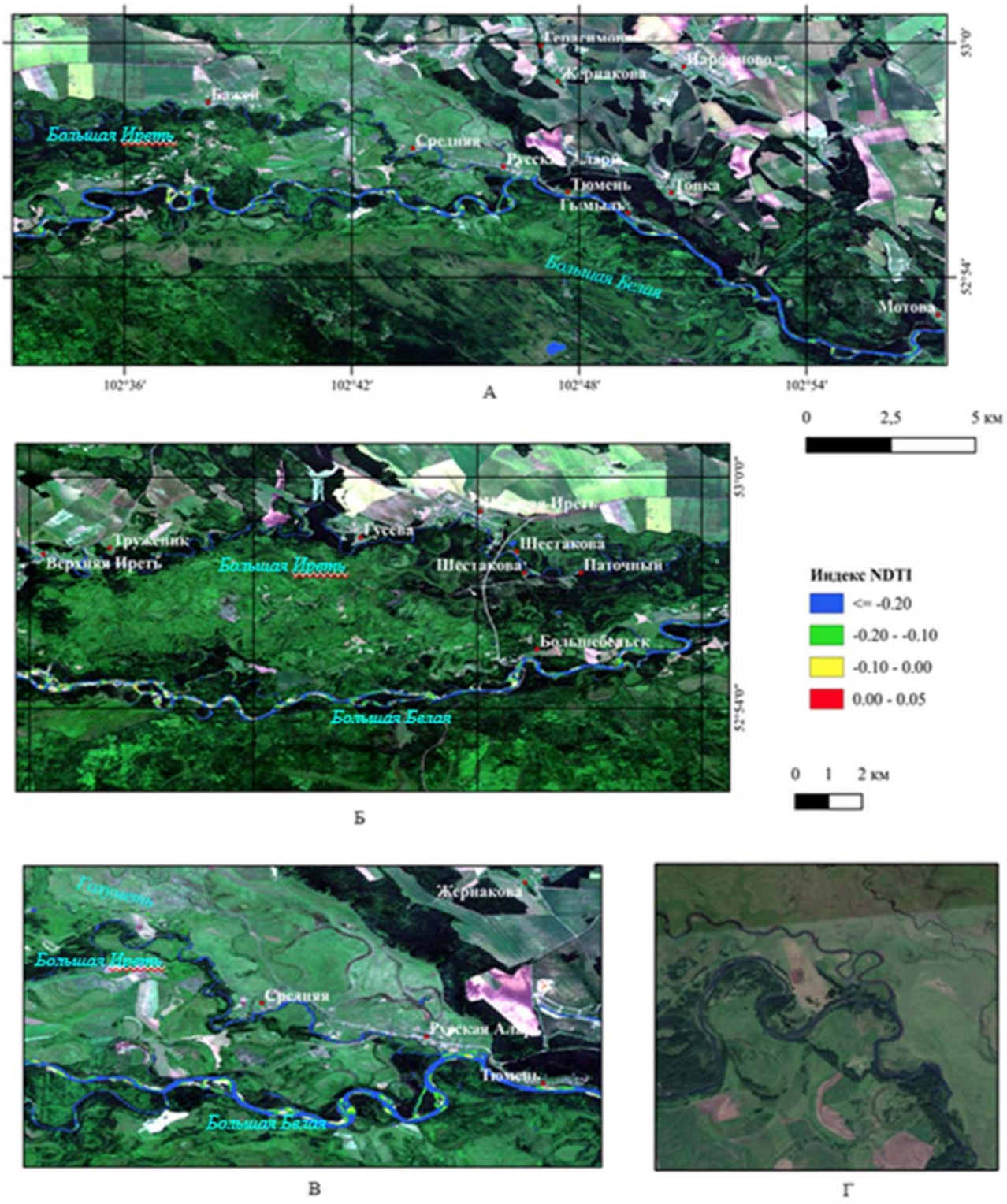


Рис. 2. Карта-схема спутникового снимка Sentinel 2 на район исследований, реклассифицированного по значениям NDTI за 2021 г. : А – Западная часть карта-схемы спутникового снимка, Б – Восточная часть карта-схемы спутникового снимка, В – Приближенная карта-схема района исследования, Г – Спутниковый снимок р. Большая Иреть, Голуметь

Карта-схема спутникового снимка, реклассифицированного по значениям NDTI за 2022 г., представлена на рис. 3.

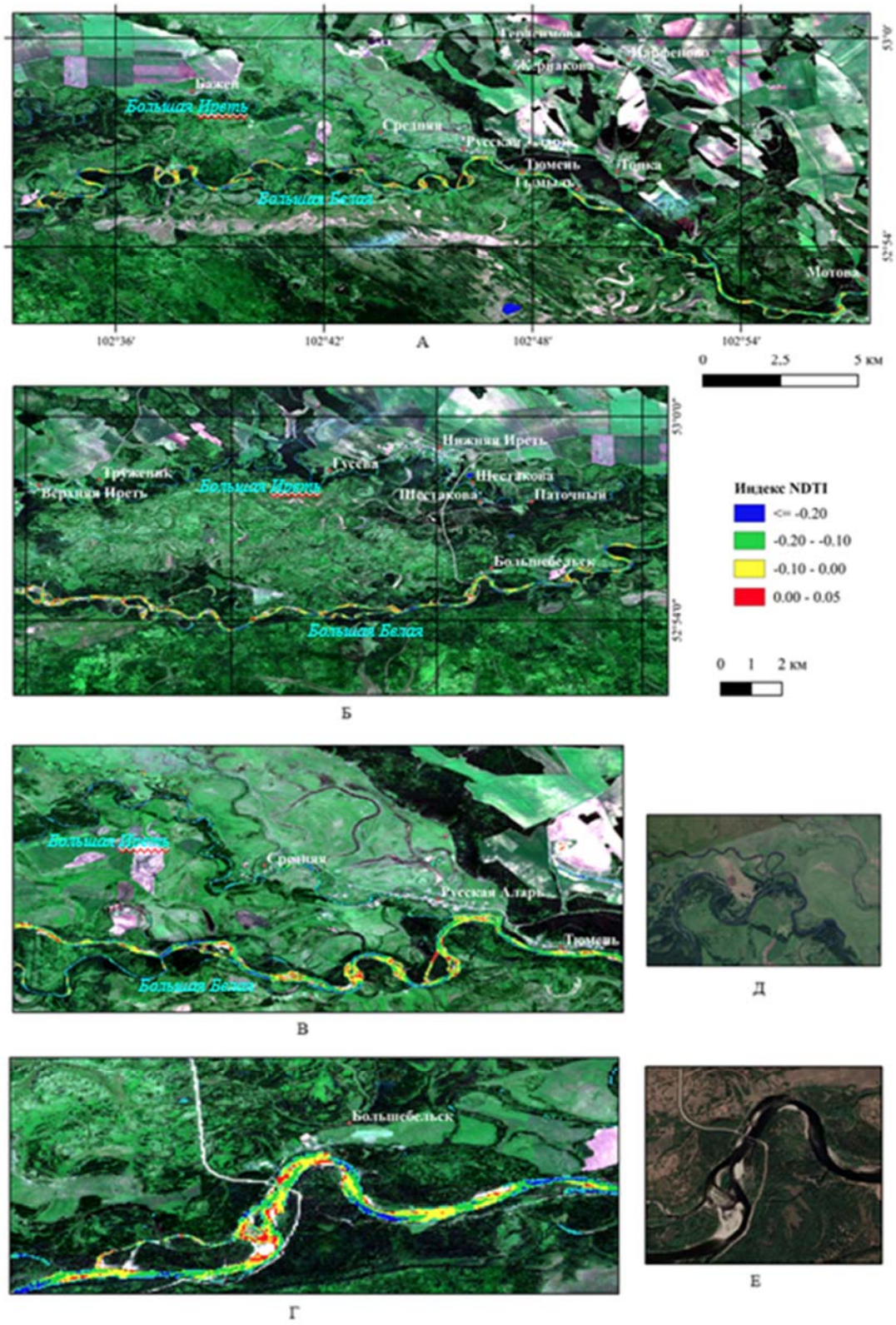


Рис. 3. Карта-схема спутникового снимка Sentinel 2 на район исследований, реклассифицированного по значениям NDTI за 2022 г. : А – Западная часть карта-схемы спутникового снимка, Б – Восточная часть карта-схемы спутникового снимка, В – Приближенная карта-схема района исследования западной части, Г – Приближенная карта-схема р. Большая Белая у с. Большебейск, Д – Спутниковый снимок р. Большая Ирель, Голуметь, Е – Спутниковый снимок р. Больша Белая у с. Большебейск

Результаты исследования показывают, что на территории исследования в 2022 г. значения индекса NDTI варьируются от –0,38 до 0,09. В целом вода в реках Большая Белая, Большая Иреть оценивается как чистая, на рисунке видно, что территория со значением индекса NDTI > 0 представляет собой районы с повышенным индексом мутности в основном по естественным причинам, связанным с понижением уровня воды в реках.

Карта-схема спутникового снимка, реклассифицированного по значениям NDTI за 2023 г., представлена на рис. 4.

Результаты исследования показывают, что на территории исследования в 2023 г. значения вегетационного индекса NDTI варьируются от –0,35 до 0,16.

На мелководьях скапливаются срубы деревьев и их остатки, образующиеся в местах лесосплава, из-за которых увеличивается концентрация органического вещества и повышается мутность воды реки перед мостом у с. Большебейск.

На рисунке 4 видно, что в основном индекс мутности имел значения в диапазоне –0,1 – 0,0. По естественным причинам мутность повышается в протоках, в старицах, перед и после осередках (0,5–0,16), в стреженях и заводях наблюдается низкий индекс мутности (–0,2…–0,1).

В целом индекс мутности р. Большая Белая в этот период выше среднего из-за паводков, связанных с повышением уровня реки после осадков. В июле 2023 г. в Черемховском районе, где протекают исследуемые реки и их притоки, был введен режим ЧС для оперативного устранения последствий стихии.

Карта-схема спутникового снимка, реклассифицированного по значениям NDTI за 2024 г., представлена на рис. 5.

Результаты исследования показывают, что на территории исследования в 2024 г. значения вегетационного индекса NDTI варьируются от –0,30 до 0,04. В целом вода рек Большая Белая, Большая Иреть оценивается как чистая, на рисунке видно, что территория со значением индекса > 0 представляет собой районы с повышенным индексом мутности в основном по естественным причинам.

Мутность воды р. Большой Белой увеличивается возле населенных объектов, таких как Русская Аларь, Гылымь и Тюмень. По всем рисункам видно, что это связано со смывом загрязняющих веществ в поверхностный объект: пыление от автотранспорта, смыв внесеннных удобрений с сельскохозяйственных угодий; а у р. Большая Иреть индекс мутности воды возрастает у с. Гусеева. Также возможно, что индекс мутности у с. Тюмень повышен из-за переноса загрязненных сточных вод из объекта накопления воды Вознесенского каменноугольного месторождения Ныгдинской площади компании «Востсибуголь» в р. Большая Белая через подземные воды.

Как мы видим, на композитных изображениях в натуральных цветах, вода в р. Голуметь довольно мутная, зеленая из-за привнесенных органических веществ через пойму реки. Такую же картину нам дает и пересчет в NDTI на рисунках 2020, 2021 и 2024 гг. Значения индекса в диапазоне –0,2…–0,3 отображаются на карте зеленым цветом и соответствуют почти чистой, замутненной воде.

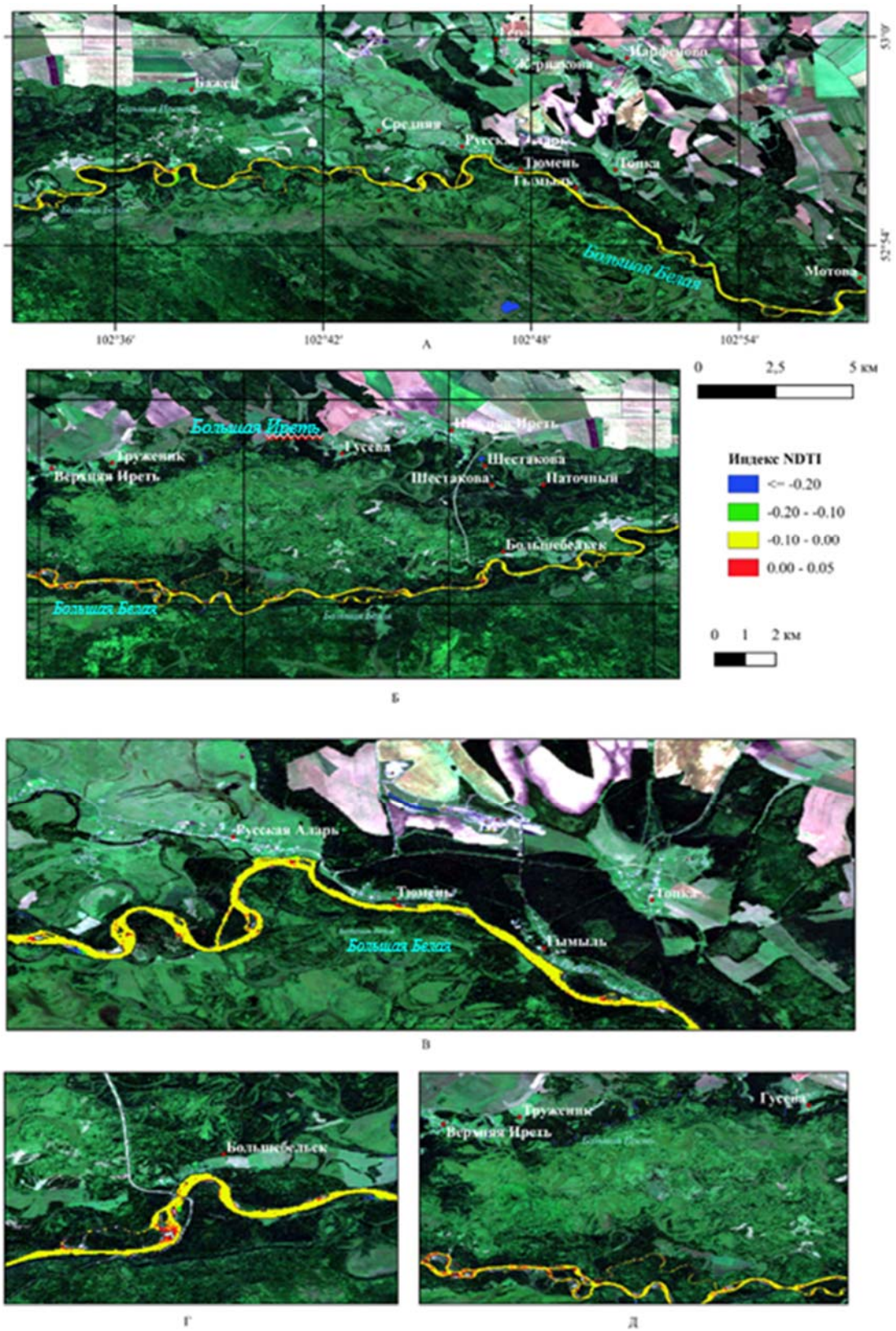


Рис. 4. Карта-схема спутникового снимка Sentinel 2 на район исследований, реклассифицированного по значениям NDTI за 2023 г. :
А – западная часть карта-схемы спутникового снимка, Б – восточная часть карта-схемы спутникового снимка, В – приближенная карта-схема района исследования западной части, Г – приближенная карта-схема р. Большой Белой у с. Большебейск, Д – приближенная карта-схема р. Большой Белой и Большой Ирети

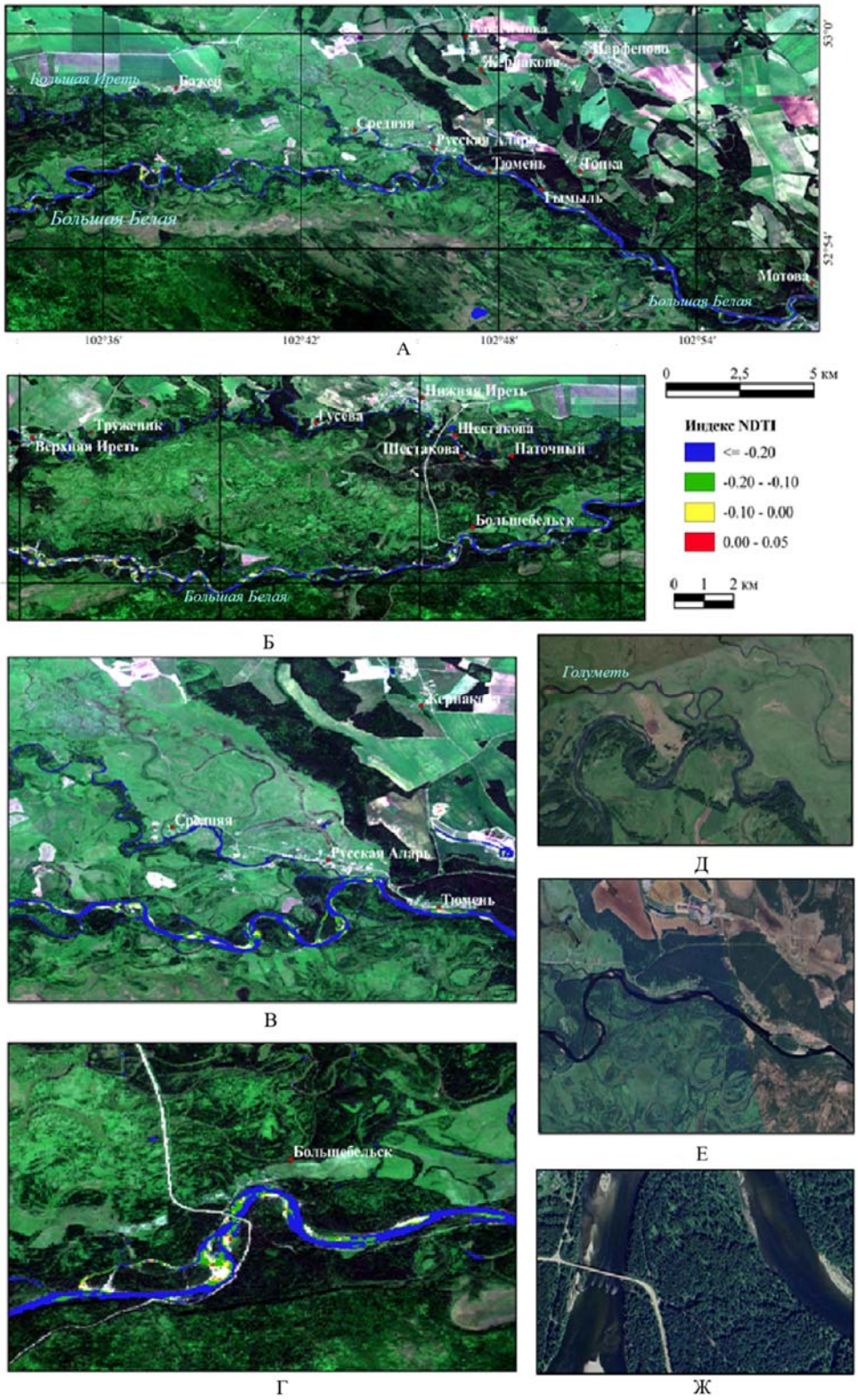


Рис. 5. Карта-схема спутникового снимка Sentinel 2 на район исследований, реклассифицированного по значениям NDTI за 2024 г.:
А – западная часть карта-схемы спутникового снимка, Б – восточная часть карта-схемы спутникового снимка, В – приближенная карта-схема района исследования западной части, Г – приближенная карта-схема р. Большой Белой у с. Большебейск, Д – спутниковый снимок р. Большой Ирети, Голуметь, Е – спутниковый снимок р. Большой Белой после впадения р. Большой Ирети, Ж – спутниковый снимок р. Большой Белой у с. Большебейск

2 августа 2024 г. Службой государственного экологического надзора были взяты пробы воды в реках Большая Иреть, Голуметь, Индон.

По результатам обследования установлено, что вероятными причинами гибели рыбы являются природные процессы, связанные с высокими температурами вод, что, в свою очередь, повлекло снижение объёма кислорода в водной массе и соответственно гибель рыбы. Изменение цвета воды, вероятно, было связано со смешением воды р. Голуметь с болотными массами, что наблюдалось с 2020 по 2023 г., но мор рыбы был зафиксирован только после 2023 г.

В летние периоды с 2020 по 2023 г. было зафиксировано изменение цвета воды, вероятно это было связано со смешением болотных масс с водой реки Голуметь, которая втекает в Большую Иреть, что наблюдалось на рисунках с 2020 по 2023 г., но мор рыбы был зафиксирован только в 2024г. у дер. Средняя.

По результатам мониторинга видно, как по естественным причинам мутность повышается в протоках, в старицах, перед и после осередков (0,00–0,05) на мелководных участках ветер и течение поднимают осадки со дна, течение может разрушать берега и поднимать в воду осадочные породы, в стреженях и заводях наблюдается низкий индекс мутности (–0,3…–0,2).

На мелководьях, где скапливаются срубы деревьев и их остатки, повышается концентрация органического вещества и индекс мутности воды как перед мостом у с. Большебейск.

По рис. 1–5 видно, что р. Большая Иреть на протяжении всего устья является чистой по индексу мутности в отличии от остальных рек, на которые влияет рельеф или внесение болотных масс через пойму благодаря питанию от подземных ключей. Температура воды круглогодично 3–5 °С. Река не замерзает в морозы, а летом в жару вода остается холодной.

Возле села Паточный есть водный объект искусственного происхождения, мутность воды в нем может быть вызвана выпадением осадков, чрезмерно размывающими склад вскрышной породы объекта накопленного воздействия.

Заключение

Индекс мутности воды в реках Большой Ирети и Большой Белой зависит от времени года. Индекс повышается по естественным причинам в периоды поводков и половодий, при выпадении большого количества осадков, так же в местах с сильным течением и эрозией береговой линии и подъемом осадочных пород со дна, по антропогенным причинам – со смывом удобрений с сельскохозяйственных угодий, пыления от автотранспорта, остатками срубов на мелководьях. Большая разница в мутности воды будет у рек с разным типом питания, мутная река будет пробегать через пойму, собирая органические вещества, река намного чище будет иметь больше подземное питание.

Список литературы

1. *Рекорд К. Г.* Географическое положение и климат Черемховского района Иркутской области // Вестник Иркутского государственного университета. География. 2020. Т. 34, № 2. С. 115–123.

2. *Голубев С. И.* Природные ресурсы Черемховского района: климат, почвы и гидрография // Геоэкологические исследования Иркутской области. Иркутск : Изд-во ИГУ, 2021. С. 90–105.

3. Гидрологическая характеристика рек Восточной Сибири / Ин-т водных проблем СО РАН. Иркутск, 2018. 142 с.

4. Государственный кадастр водных объектов Российской Федерации / М-во природ. ресурсов и экологии РФ. М. : Издат. дом, 2019. 256 с.

5. *Шмаков В. Н.* Почвенные ресурсы Черемховского района Иркутской области и их использование для сельского хозяйства // Вестник аграрной науки. 2022. Т. 44, № 3. С. 201–212.

6. *Ермакова Е. А.* Эрозия почв и методы борьбы с ней в Черемховском районе // Экология и сельское хозяйство. 2021. Т. 56, № 4. С. 123–130.

7. *Андреев К. Ю.* География и природные условия Черемховского района: климат, почвы, растительность и использование природных ресурсов // Вопросы географии и экологии Сибири. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2020. С. 105–112.

8. *Морозова Т. И.* Оценка пространственно-временной изменчивости мутности воды в реках с использованием индекса NDTI // Геоэкология. 2019. № 2. С. 45–57.

9. SentinelHub by Planet Labs. EO Browser. URL: https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/ (дата обращения: 01.03.2025).

УДК 628.3

Современный опыт урегулирования вопросов влияния складирования промышленных отходов на поверхностные и подземные воды для территории Иркутской области

С. С Салко (semen200128@gmail.com), О. А. Бархатова (barhat@geogr.isu.ru)
Иркутский государственный университет, г. Иркутск

Аннотация. Статья посвящена проблемам управления промышленными отходами в Иркутской области, включая их влияние на водные ресурсы. Описание охватывает различные виды отходов, образующиеся в теплоэнергетическом, горнодобывающем и лесопромышленном секторах, и их воздействие на экосистемы региона, в частности, на водоемы и подземные воды.

Целью работы является оценка влияния складируемых отходов от основных отраслей промышленности Иркутской области
Ключевые слова: промышленные отходы, водные ресурсы, экологическая безопасность.

Промышленные отходы – это вещества и материалы, образующиеся в процессе производственной деятельности и потребления товаров, которые не могут быть повторно использованы в тех же технологических процессах и требуют утилизации. Промышленное производство ведет к образованию отходов разных типов: твердых, жидких и газообразных, которые могут оказывать негативное воздействие на экологию, включая водные ресурсы. Поэтому важным аспектом является правильное управление отходами с целью предотвращения загрязнения окружающей среды и сохранения водных объектов.

Согласно Федеральному закону № 89-ФЗ «Об отходах производства и потребления», отходы классифицируются по степени опасности: чрезвычайно опасные (класс I), высоко опасные (класс II), умеренно опасные (класс III), мало опасные (класс IV) и отходы пятого класса (Класс V), которые считаются наименее опасными. Отходы пятого класса включают в себя такие материалы, как

строительные отходы, обрезки древесины и металлолома, а также остатки органических материалов. Несмотря на свою низкую опасность, они также требуют правильного обращения, поскольку неправильное их накопление и размещение могут привести к загрязнению почвы и водоемов [2].

Нормативно-правовая база в России включает несколько ключевых актов, регулирующих обращение с отходами. Основным документом является Федеральный закон № 89-ФЗ «Об отходах производства и потребления», который устанавливает правила обращения с отходами всех классов, включая отходы пятого класса. Важно, что для этих отходов также предусмотрены требования по их учету, утилизации и размещению, с целью минимизации риска загрязнения.

Отходы пятого класса, несмотря на отсутствие непосредственной угрозы для здоровья человека, должны храниться на специально оборудованных полигонах с защитой от внешних воздействий. Важно предотвращать их попадание в водоемы и грунтовые воды. Для этого используется герметизация мест складирования отходов, регулярный мониторинг состояния окружающей среды и применение технологий переработки отходов.

Ключевыми мерами защиты водных ресурсов являются создание специально оборудованных площадок для складирования отходов, использование мембранных покрытий для предотвращения проникновения загрязняющих веществ в землю и воду, а также регулярные экологические исследования, включая мониторинг качества водоемов и подземных вод. Применение технологий утилизации отходов, таких как переработка и безопасная утилизация, минимизирует риски для экосистем и водных объектов.

Основные предприятия с объектами размещения отходов

Иркутская область – один из крупнейших промышленных регионов России, где сосредоточены разнообразные предприятия. Экономическая активность региона способствует значительному образованию отходов, что оказывает влияние на экологическую ситуацию. В числе крупных источников отходов находятся теплоэнергетические предприятия, горнодобывающая промышленность и лесопромышленный комплекс.

1. Теплоэнергетические предприятия

Теплоэнергетика в Иркутской области представлена крупными ТЭЦ, такими как Ново-Иркутская ТЭЦ, ТЭЦ-9, ТЭЦ-10, которые принадлежат компании Иркутскэнерго. Эти предприятия имеют отходы, такие как зола и золошлаковые материалы, образующиеся в процессе сжигания угля и мазута.

Отходы складируются в больших объемах, занимая значительные земельные площади. Некоторые из них вымываются дождевыми и талыми водами, что приводит к загрязнению подземных вод.

2. Горнодобывающая промышленность

В горнодобывающем секторе региона основными отходообразователями являются золото- и угледобывающие компании, расположенные в Бодайбинском и Усть-Илимском районах. Наибольшие объемы отходов включают:

- вскрышные породы,
- шламы и шлаки,

- отходы флотации и цианирования.

Эти отходы оказывают влияние на экологическое состояние территории следующим образом:

- нарушение ландшафта и образование пустошей,
- загрязнение водных объектов отходами переработки.

3. Лесопромышленный комплекс

Лесопромышленный комплекс Иркутской области представлен рядом деревообрабатывающих и лесопильных заводов в Усть-Илимске, Братске и других районах. Основные отходы, образующиеся в ходе их деятельности, включают:

- опилки,
- кора,
- древесные отходы, которые не подлежат переработке.

Воздействие этих отходов на окружающую среду:

- загрязнение лесных территорий несанкционированными свалками древесного мусора,
- нарушение экосистем лесных районов,
- выбросы метана при гниении древесных отходов.

Основные экологические проблемы, связанные с загрязнением водных объектов и возможность их решения

Проблемы с водными объектами от складирования промышленных отходов в Иркутской области это [2]:

1. Загрязнение поверхностных вод отходами теплоэнергетических предприятий.

Проблема заключается в том, что зола и шлаки могут вымываться дождевыми и талыми водами, попадая в реку или озера, что приводит к загрязнению водных объектов. Такие отходы содержат тяжелые металлы (например, кадмием и свинцом), пыль и другие химические вещества, которые могут ухудшить качество воды и нарушить экосистемы водоемов.

Это также может повлиять на качество питьевой воды и сельское хозяйство, так как загрязненная вода может попадать в источники водоснабжения.

2. Загрязнение подземных вод отходами горнодобывающей промышленности.

Оставленные на открытых площадках или складированные без должной защиты отходы могут проникать в грунт и загрязнять грунтовые воды. В частности, отходы, содержащие цианиды и другие химические вещества крайне токсичны для живых существ, включая людей, делают воду непригодной для питья и сельского хозяйства.

Загрязнение подземных вод отходами горнодобывающей промышленности может привести к долгосрочным последствиям для экосистем региона. Помимо загрязнения водных ресурсов, это также может привести к деградации земель и утрате сельскохозяйственных угодий.

3. Загрязнение отходами лесопромышленного комплекса.

Влияние на водные объекты: При складировании древесных отходов загрязняющие вещества могут попадать в водоемы в ходе дождей или паводков.

Эти органические отходы, разлагаясь в водоемах, выделяют метан и другие вещества, которые ухудшают качество воды. Также это может привести к эвтрофикации, т. е. чрезмерному росту водорослей, который уменьшает содержание кислорода в воде, нарушая жизнь водных организмов.

Риски для экосистем: Загрязнители, такие как химические вещества, используемые в процессе обработки древесины, могут попадать в почву, что в дальнейшем приводит к загрязнению как поверхностных, так и подземных вод.

Потеря биоразнообразия водных экосистем: Загрязнение водоемов промышленными отходами, такими как тяжелые металлы или органические вещества, уничтожает жизнь в водоемах, нарушает экосистемы и ухудшает качество воды.

Загрязнение источников питьевой воды: Вода из загрязненных водоемов может попасть в водоснабжение населенных пунктов, что может привести к серьезным заболеваниям и угрозам для здоровья населения.]

Экономические потери: Загрязнение водных объектов, вызванное промышленными отходами, ведет к снижению урожайности сельскохозяйственных культур, нарушению рыбного промысла и ухудшению качества воды для хозяйственно-бытовых нужд.

Для решения проблем загрязнения водных объектов в Иркутской области, возникающих вследствие складирования и неправильного обращения с промышленными отходами, необходимо применять комплексные подходы, включающие технологические, организационные и административные меры [3]. Рассмотрим возможные решения для разных типов предприятий.

Проблемы, связанные с накоплением золы и золошлаковых материалов на теплоэнергетических предприятиях, требуют применения нескольких эффективных мер.

- ***Использование технологий очистки сточных вод****:* для предотвращения попадания загрязняющих веществ в водоемы необходимо внедрить системы очистки сточных вод, включающие фильтрацию и осаждение тяжелых металлов, а также обезвреживание химических веществ. Эти технологии позволят значительно уменьшить концентрацию токсичных веществ в сточных водах перед их сбросом в водоемы.
- ***Переработка золошлаковых отходов****:* Применение технологий переработки отходов, таких как использование золы и шлаков в строительной отрасли или в сельском хозяйстве, позволит снизить объемы складируемых отходов. Например, зола может быть использована как добавка в цемент или как удобрение, что способствует замкнутому циклу использования отходов.
- ***Герметизация складов отходов****:* Создание герметичных складов для золовых отходов с системой защиты от атмосферных осадков предотвратит вымывание загрязняющих веществ в грунтовые и поверхностные воды. Для этого могут быть использованы мембранные покрытия и системы водоотведения, которые обеспечат безопасное хранение отходов.
- ***Мониторинг качества водоемов****:* Регулярный мониторинг состояния воды в водоемах, расположенных вблизи теплоэнергетических объектов, позво-

лит своевременно обнаруживать загрязнение и принимать меры по его устранению. Использование автоматизированных систем мониторинга повысит эффективность контроля за качеством воды.

Для горнодобывающих предприятий Иркутской области, таких как золото- и угледобывающие компании в Бодайбинском и Усть-Илимском районах, которые образуют шламы, шлаки, вскрышные породы и отходы от цианирования и флотации, необходимы следующие меры:

- ***Замкнутое водоснабжение**:* Введение системы замкнутого водоснабжения на горнодобывающих предприятиях позволит исключить сброс загрязненных сточных вод в открытые водоемы. Вода будет очищаться и повторно использоваться внутри производственного цикла, что значительно снизит нагрузку на водные ресурсы.
- ***Фильтрация и нейтрализация отходов**:* для удаления токсичных веществ из сточных вод и отходов, содержащих цианиды и другие химикаты, можно применять биотехнологические методы и физико-химические методы, такие как активированные угли или мембранные технологии для очистки воды. Эти методы помогут безопасно утилизировать отходы, минимизируя их влияние на окружающую среду.
- ***Контейнеризация и изоляция отходов**:* для предотвращения загрязнения грунтовых и поверхностных вод отходами, содержащими токсичные вещества, необходимо использование специальных контейнеров и герметичных складов. Это позволит эффективно управлять отходами и предотвратить их распространение в окружающую среду.
- ***Рекультивация земель**:* для восстановления экосистем на территориях, подвергшихся горным работам, важно провести рекультивацию земель. Использование экологически безопасных методов, таких как восстановление почвы и засаживание растений, поможет восстановить экосистемы и улучшить состояние водоемов.

Для лесопромышленных предприятий Иркутской области, включая деревообрабатывающие и лесопильные заводы в Усть-Илимске и Братске, решением проблем загрязнения водных объектов могут быть следующие меры:

- ***Переработка древесных отходов**:* Введение системы переработки опилок, коры и других древесных отходов в биотопливо, пеллеты или древесные плиты снизит объем отходов, уменьшая их воздействие на экологию. Это позволит обеспечить замкнутый цикл переработки и сократить негативное влияние на водоемы.
- ***Организация полигонов для древесных отходов**:* для предотвращения загрязнения лесных территорий и водоемов необходимо создать специализированные полигоны для хранения древесных отходов с соблюдением всех экологических стандартов. Использование герметичных контейнеров и водоотводных систем обеспечит безопасность складирования отходов и предотвратит их попадание в водоемы.
- ***Биологические методы очищения водоемов**:* для очистки водоемов от органических загрязнителей, таких как древесные отходы, можно использовать

биотехнологии. Заселение водоемов водорослями и другими растениями, которые поглощают органические вещества, поможет уменьшить концентрацию загрязняющих веществ в воде и восстановить экосистему водоемов.

- ***Контроль выбросов метана**:* Введение системы мониторинга **метановых выбросов** с последующим использованием метана в качестве энергетического ресурса или его сжиганием позволит минимизировать выбросы парниковых газов и загрязнение воздуха.
- ***Ужесточение экологических стандартов**:* Важным шагом в решении проблемы загрязнения водоемов является ужесточение экологических стандартов для предприятий всех отраслей. Это включает в себя зеленые технологии, повышение ответственности за соблюдение норм экологической безопасности и создание стимулов для внедрения инновационных решений по переработке отходов.
- ***Государственный мониторинг**:* Создание эффективной системы государственного экологического мониторинга за состоянием водных объектов, с регулярными проверками качества воды и соблюдения экологических норм, позволит оперативно реагировать на загрязнение и предпринимать необходимые меры.
- **Образование и обучение работников:** Повышение уровня осведомленности работников предприятий о важности экологической безопасности и правильного обращения с отходами способствует минимизации рисков загрязнения. Проведение тренингов и программ обучения для сотрудников на всех уровнях производства является необходимым условием для устойчивого развития региона.

Заключение

В результате данной работы были выявлены основные проблемы, связанные с воздействием промышленных отходов на водные ресурсы Иркутской области. Несмотря на разнообразие отходов, образующихся в теплоэнергетическом, горнодобывающем и лесопромышленном секторах, общими последствиями являются загрязнение водоемов и подземных вод, что может привести к серьезным экологическим и экономическим проблемам.

Для решения этих вопросов необходимо внедрение эффективных технологий переработки отходов, герметизация складов и использование биотехнологий для очистки водоемов. Важным шагом является также повышение экологической осведомленности на всех уровнях промышленности и создание системы мониторинга качества водных ресурсов. Эти меры помогут существенно снизить негативное влияние на экосистему и водные объекты, обеспечивая устойчивое развитие региона.

Список литературы

1. Об отходах производства и потребления : федер. закон от 24 июня 1998 г. № 89-ФЗ. Ст. 4.1

2. *Тимофеева И. И., Соловьев А*. В. Экологическая ситуация Иркутской области, связанная с нефтяным загрязнением водоемов // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2021. № 24(4). С. 45–52.

3. *Петров В. А., Иванова М.* С. Оценка водных ресурсов территории Иркутской области // Экологический вестник. 2020. № 12(3). С. 98–105.

УДК 628.1

Гидрохимический анализ воды, используемой в технологическом цикле на ТЭЦ-1 города Читы

А. В. Сахновский (nice.sakhnovskiy03@mail.ru), О. А. Бархатова (barhat2006@mail.ru)
Иркутский государственный университет, г. Иркутск

Аннотация. Вода является жизненно важным природным ресурсом, используемым для различных целей, включая производство электроэнергии на тепловых электростанциях (ТЭЦ). Гидрохимический анализ воды, используемой на ТЭЦ, имеет решающее значение для обеспечения ее безопасности и эффективности использования. Тепловая электростанция (ТЭЦ) 1 г. Читы, расположенная в Забайкальском крае г. Чите, на берегу оз. Кенон, представляет собой важное производственное предприятие, которое обеспечивает электроэнергией как промышленные объекты, так и населенные пункты в регионе. Эта электростанция осуществляет процесс производства электроэнергии путем сжигания угля, который является основным видом топлива для данной ТЭЦ. Результаты гидрохимических исследований показали, что вода, используемая в технологическом цикле на ТЭЦ-1 г. Читы, содержит повышенное содержание жесткости, диоксида кремния и фосфатов, что приводит к образованию накипи, коррозии оборудования и снижению эффективности его работы.

Ключевые слова: ТЭЦ, технологический цикл, гидрохимический анализ воды

Целью данного исследования является определение гидрохимических характеристик воды, используемых на ТЭЦ-1 г. Читы, для оценки её качества и соответствия нормативным требованиям. Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

- провести отбор и подготовку проб воды для гидрохимического анализа;
- выполнение гидрохимического анализа;
- сравнение полученных данных с нормативными требованиями, установленными для воды, используемой на ТЭЦ;
- выявление возможных проблем, связанных с качеством воды, и разработка рекомендаций по их устранению.

Гидрохимический анализ – совокупность приёмов и методов для определения качественного и количественного состава вод. В зависимости от целей и задач анализа варьируются его полнота и направление. Основными показателями качества воды являются: ионный состав, минерализация, жёсткость, щёлочность, содержание неорганических и органических компонентов.

Характеристика объекта исследования (ТЭЦ-1 г. Читы)

ТЭЦ-1 г. Читы является ключевым объектом энергетики на территории Забайкальского края. Расположенная в западной части региона (рис. 1), эта станция обладает высокой мощностью и значительным вкладом в производство электроэнергии для потребителей. ТЭЦ-1 г. Читы осуществляет процесс генерации электроэнергии путем сжигания угля, который является основным видом топлива для данного энергетического объекта.

Рис. 1. Расположение ТЭЦ-1

ТЭЦ-1 г. Читы обеспечивает электроснабжение не только зоны своего прямого влияния, но и смежных районов Читы. Станция имеет технологическое оборудование, системы очистки отходов и другие составляющие, необходимые для обеспечения стабильного производства электроэнергии на территории региона [3].

Читинская ТЭЦ-1 берёт воду из оз. Кенон и сбрасывает её обратно подогретой.

Также для восполнения безвозвратного водопотребления на технологические нужды ежегодно производится подкачка воды из реки Ингода.

Для технических нужд на ТЭЦ-1 вода участвует в следующих технологических циклах (табл. 1):

- Обессоленная вода, получаемая путем обработки конденсата в системе обессоливания, используется для восполнения потерь пара в турбине, а также для питания выпарных установок.
- Сырая вода (вода из оз. Кенон или водохранилища), используется для охлаждения генераторов и других устройств.
- Техническая вода (охлажденная сырая вода), используется в градирнях для охлаждения циркулирующей воды.
- Продувочная вода (вода с высоким содержанием солей), удаляется из котлов и выпарных установок для предотвращения накипи.
- Водопроводная вода (вода из городского водопровода), используется для питья, приготовления пищи и других санитарных нужд.
- Вода из собственного водозабора (собственный водозабор ТЭЦ-1, расположенный на оз. Кенон) обеспечивает дополнительной водой питьевого качества.

Таблица 1

Расход воды ($м^3$) на предприятии за июнь 2024 г.

№ п\п	Наименование	Количество
1	Расход сырой воды	126 162,5
2	Расход обессоленной воды	21 323,3
3	Расход химически очищенной воды	77 687,4
4	Расход воды на служебные нужды:	27 151,8
4.1	Расход сырой воды на взрыхление электромагнитный преобразователь расхода, модель «МастерФлоу»	9000
4.2	Расход сырой воды на взрыхление, регенерацию, отмывку водород-катиона I ступени	8000
4.3	Расход сырой воды на взрыхление, регенерацию, отмывку натрий-катиона	0
4.4	Расход ЧОВ на взрыхление, регенерацию, отмывку водород-катиона II ступени	7000
4.5	Расход ЧОВ на взрыхление, регенерацию, отмывку фильтров Ан I и II ступенях	3000
4.6	Расход сырой воды на прочие потери (промывка смолы, угля, санитарные нужды цеха)	151,8

Отбор и подготовка проб воды для гидрохимического анализа

Состояние подготовки воды на энергетических предприятиях определяет не только их экономичность, но и их экологическое совершенство, точнее, степень их экологической безопасности [1].

Для оценки качества природных вод и вод на различных стадиях технологического процесса приняты нижеперечисленные показатели: взвешенные вещества, сухой остаток, минеральный остаток, прокаленный остаток, окисляемость, жесткость, щелочность, ионный состав воды, растворенные газы.

Растворенные в воде вещества вызывают те или иные неполадки в работе энергетического оборудования. В основном это связано с образованием накипных отложений и коррозии.

Удаление примесей, загрязняющих воду, т. е. предварительная водоподготовка, а также химический контроль за качеством воды в цикле электростанции, обеспечивает предупреждение образования накипи на поверхностях нагрева, исключает возможность коррозионных повреждений. Все это предполагает надежную и безаварийную работу электростанции.

Химический цех – это то структурное подразделение, которое служит для осуществления этих задач.

Отбор проб воды на ТЭЦ 1 г. Читы проводится в разных цехах на всём производстве, а именно: турбинный, пылевой, угольный, химический, турбинно-вращательный, а также в цехе санитарного обеспечения.

Водоподготовительная установка (схема обессоливания) предназначена для подготовки подпиточной воды котлов БКЗ-220-100.

Основным источником воды является вода оз. Кенон (табл. 2).

Таблица 2

Гидрохимические показатели воды водозабора ТЭЦ-1

Наименование показателя качества	Единица измерения	Показатель	ПДК	Превышение, раз
pH		8,13	8,3	0,97
Жесткость общая	мг-экв/дм^3	6,77	5	1,35
Щелочность общая	мг-экв/дм^3	32,5	2	16,25
Щелочность гидратн.	мг-экв/дм^3	0,036		
Кальций	мг/дм^3	64,95	46	1,41
Магний	мг/дм^3	45,1	12	3,76
Натрий	мг/дм^3	69,1	50	1,383
Железо	мг/дм^3	0,05	0,3	0,17
Медь	мг/дм^3	0,004	0,1	0,04
Силикаты	мг/дм^3	0,59	0,5	1,18
Сульфаты	мг/дм^3	238,2	350	0,68
Хлориды	мг/дм^3	80,3	50	1,60
Бикарбонаты	мг/дм^3	151,2	30–400	0,75
Карбонаты	мг/дм^3	2,2	5	0,44
Нитраты	мг/дм^3	0,3		
Нитриты	мг/дм^3	0,0		
Окисляемость	мг/дм^3	4,8	5	0,96
Солесодержание	мг/дм^3	599		

Вода содержит примеси в форме взвешенных веществ различной степени дисперсности. Для улавливания этих примесей служат механические фильтры [2].

В качестве фильтрующих материалов применяется антрацит и активированный уголь.

Обработка воды методом ионного обмена основана на способности ионитов вступать в ионный обмен с растворенными в воде солями.

По мере фильтрования воды через слой ионита, все большая часть его активных групп замещается ионами, поглощаемыми из воды. Когда обменная емкость ионита исчерпана, необходима его регенерация, т. е. обратное замещение его активных групп обмениваемым ионом.

Результаты гидрохимического анализа воды на ТЭЦ 1 г. Читы

Во время исследования (май-июль) в работе ТЭЦ-1 были задействованы 7 из 14 котлов. В холодное время года, примерно с середины осени и до 1 декады весны в работе находятся все 14 котлов.

Химический анализ воды, используемой для подпитки, показал следующие результаты, представленные в табл. 3.

Для проверки целостности и химического анализа воды были проверены котлы № 5 и № 6 (табл. 4 и 5).

Таблица 3

Качество воды используемой на подпитку теплосети и сетевой воды

	pH	Щёлочность (фенол), мкг-экв/ дм^3	Щелочность общая, мкг-экв/ дм^3	Жесткость общая, мкг-экв/ дм^3	Жесткость Са мкг-экв/ дм^3	Ик спектрофотометри, (мг-экв/л)$_2$	O_2, мкг/ дм^3	Взвешенные вещества, мг/дм^3	Нефтепродукты, мг/дм^3	Fe, мг/дм^3
Норма	8,3–9,5	н/н	н/н	н/н	н/н	*	50	5	1	н/н
	8,7	276	3754	8182	3664	13,5	11	4,53	0,57	0,11

Таблица 4

Котловая вода в котле № 5

Дата	Средина				Циклон					% продувки
	Гидратная щёлочность / Щ общая мкг-экв/ дм^3	pH	PO_4, мг/дм^3	SiO_2, мг/дм^3	Гидратная щёлочность / Щ общая мкг-экв/дм^3	pH	PO_4, мг/дм^3	SiO_2, мг/дм^3	Солесодержание	
Норма		9,5	10	0,1		9,5	10	0,1		
1	13/131	8,5	4	0,11	55/269	9,1	17	0,68	25	1,6
2	27/134	9,2	2,9	0,05	457/884	10,4	27	0,45	89	1,1
3	47/161	9,2	3,2	0,05	613/1096	10,6	33	0,46	125	0,9
4	54/199	9,4	3,6	0,07	542/910	10,4	32	0,6	101	1,1
5	58/182	9,3	4,2	0,08	490/1023	10,4	26	0,6	90	1,2
6	37/172	9,2	3,2	0,09	483/845	10,3	22	0,64	86	0,9
7	71/186	9,6	3	0,06	827/1277	10,7	28	0,65	151	0,6
8	55/195	9,4	2,4	0,1	634/1303	10,7	20	0,87	125	0,66
9	69/169	9,5	2,3	0,08	602/964	10,5	21	0,64	108	0,9
10	40/170	9,2	1,6		570/950	10,4	19		103	0,75
20	10/143	8,9	4,3	0,09	107/293	9,3	16	0,4	43	1,4
21	20/130	8,9	3,9	0,08	439/988	9,4	38	0,6	91	0,8
22	28/137	9,2	2,4	0,02	344/624	9,4	20	0,78	69	0,9
23	51/153	9	2,7	0,63	587/1013	9,4	25	2	98	0,9

Окончание табл. 4

Дата	Средина				Циклон					% продувки
	Гидратная щёлочность / Щ общая мкг-экв/ дм^3	pH	PO_4, мг/дм^3	SiO_2, мг/дм^3	Гидратная щёлочность / Щ общая мкг-экв/дм^3	pH	PO_4, мг/дм^3	SiO_2, мг/дм^3	Солесодержание	
24	40/159	9,3	2	0,19	520/887	9,3	20	1,7	83	0,7
25	27/120	8,9	1,9	0,26	663/1108	9,3	24	1,8	122	0,7
26	17/120	9,1	1,9	0,21	501/859	9,3	24	1,2	93	0,6
27	55/158	9,3	3,1	0,32	630/1047	9,4	29	1,7	111	0,98
28	53/172	9,5	3,3	0,12	812/1299	9,3	33	1	135	0,9
29	60/158	9,4	2,3	0,11	690/1049	9,3	21	1	105	0,7
30	51/161	9,6	2,7	0,09	898/1425	9,3	31	0,6	178	0,9
Среднемесячное	42/158	9,2	2,9	0,15	546/956	9,7	25	0,92	102	0,9

Примечание: в период с 11 июня по 20 июня котёл № 5 был выведен из строя для проведения мер устранения накипи и коррозий.

Таблица 5

Котловая вода в котле № 6

Дата	Средина				Циклон					% продувки
	Гидратная щёлочность /Щ общая мкг-экв/ дм^3	pH	PO_4, мг/дм^3	SiO_2, мг/дм^3	Гидратная щёлочность /Щ общая мкг-экв/дм^3	pH	PO_4, мг/дм^3	SiO_2, мг/дм^3	Солесодержание	
Норма										
1	59/177	9,4	5,6	0,06	393/768	10,4	29	0,49	85	1,4
2	47/172	9,4	4,6	0,08	394/774	10,4	31	0,56	76	1,1
3	45/170	9,3	4,6	0,04	343/707	10,3	28	0,5	71	0,9
4	50/192	9,4	4,4	0,08	420/799	10,4	28	0,5	80	1,3
5	57/170	9,4	3,7	0,07	365/693	10,3	23	0,6	73	1,2
6	32/194	9,4	4,7	0,11	473/877	10,5	27	0,66	97	0,86
7	76/200	9,6	4,9	0,06	510/910	10,6	31	0,62	99	1
8	80/242	9,6	5,5	0,14	494/1187	10,5	30	0,77	122	0,83
9	85/203	9,6	3,8	0,12	572/957	10,5	25	0,68	102	1
10	57/195	9,4	4,2	0,11	424/800	10,3	23	0,77	84	0,87
11	75/210	9,1	3,4	0,12	515/950	10,4	18	0,6	87	0,8
Среднемесячное	60,3/192,3	9,4	4,5	0,09	463,9/856,5	10,4	26,6	0,61	88,7	1

Примечание: в период с 11 июня котёл № 6 был выведен из строя для проведения мер устранения накипи и коррозий.

Анализируя полученные данные, видно, что все гидрохимические показатели, кроме O_2, соответствуют нормам. Однако пониженный показатель O_2 даёт нам понимать, что низкое содержание кислорода исключает коррозию внутренних поверхностей оборудования и трубопроводов системы регенеративного подогрева станции, а также вынос продуктов коррозии на теплообменные поверхности котлов [4].

Стоит заметить, что отсутствие CO_2, для работы ТЭЦ это очень положительный фактор, потому что наличие в сетевой воде свободной углекислоты (диоксида углерода CO_2) является катализатором кислородной коррозии. Это приводит к внутренней коррозии тепловых сетей и может вызвать выход из строя оборудования.

В связи с этим содержание CO_2 и соответствующее ему значение показателя pH в основных технологических потоках теплоэнергетических установок строго нормируются.

Для обеспечения работы отопительных систем важно, чтобы котловая вода была умягчённой и очищенной, а её химический состав соответствовал нормам и требованиям.

Из данных табл. 4, 5 мы видим, что содержание pH (водородный показатель) в циклоне превышает 9,5 и это говорит о том, что в данном участке повышено развитие коррозионных процессов. В следствии этого показателя котёл № 5 и № 6 были выведен из строя для проверки целостности котла и смазки антикоррозийным покрытием. После проведенных мероприятий водородный показатель понизился до нормы в котле № 5, следовательно, выведение из строя и проверка котла дало свои положительные результаты.

Превышение содержания фосфатов в котловой воде ТЭЦ может привести к образованию отложений фосфата натрия на стенках котлов. Они влияют на сварные швы котельного оборудования: ослабляют межкристаллитные границы, ухудшают механические свойства швов, снижают пластичность металла, провоцируют образование трещин и повышают хрупкость стали. В котлах № 5 и № 6 в циклоне, этот показатель в разы превышает норму. На сегодняшний момент на предприятии ТЭЦ 1 г. Читы не могут решить эту проблему, поэтому приходится постоянно контролировать целостность швов и производить еженедельную механическую очистку.

Заключение

Гидрохимический анализ воды, используемой в технологическом цикле на ТЭЦ-1 г. Читы, выявил повышенное содержание жесткости, диоксида кремния и фосфатов. Ухудшенное качество воды может привести к образованию накипи, коррозии оборудования и снижению эффективности его работы.

Накопление накипи в теплообменниках и трубопроводах приводит к снижению теплопередачи, увеличению расхода топлива и сокращению срока службы оборудования. Коррозия металла приводит к разрушению защитной оксидной пленки и дальнейшему развитию коррозионных процессов, что может привести к аварийным ситуациям и остановке работы ТЭЦ.

Во избежание негативных последствий необходимо внедрять комплекс мероприятий, направленных на водоподготовку используемой воды для улучшения её качества. К ним относятся: использование сорбционной обработки (в качестве сорбента применяют порошкообразный активный уголь, который поглощает гидрофобные вещества, в том числе углеводороды нефти и нефтепродуктов, органические соединения и металлы), применение электрохимических методов (они основаны на протекании химических процессов на электродах при пропускании через воду постоянного электрического тока. Такие методы позволяют минимизировать воздействие на окружающую среду).

Список литературы

1. Водоподготовка для ТЭЦ / А. А. Кандрушин, Л. Ф. Комарова, В. П. Терским [и др.]. СПб. : ВНИИГ, 2000. С. 187.
2. Водоподготовка на ТЭЦ: назначение и основные методы. URL: https://irkutsk.vagner-ural.ru/o_kompanii/stati-po-vodoochistke/vodopodgotovka-na-tec-naznachenie-i-osnovnye-metody/. (дата обращения: 05.03.2025).
3. Публичное акционерное общество Территориальная генерирующая компания № 14. URL: https://www.tgk-14.com/ (дата обращения: 05.03.2025).
4. *Юсупов Р. А., Сергеев С. Л.* Химия водной среды в теплоэнергетике. Казань, 2020. № 46. С. 12.

УДК 502.55:504.4.062.2

Экологическая составляющая обеспечения гидрологической безопасности

Н. М. Тропина (malevanskaya@inbox.ru), Е. В. Потапова (e.v.potapova.isu@mail.ru)
Иркутский государственный университет, г. Иркутск

Аннотация. Отмечено, что водные объекты являются источниками как обеспечения жизни, так и местами возникновения и реализации опасных явлений, в том числе связанными с загрязнениями вод, используемых для питьевого водоснабжения. Гидроэкологическая безопасность, включающая как структуру взаимосвязей между с одной стороны – окружающими природными экосистемами, водными объектами, с другой – хозяйством и населением, может быть гарантирована экономически эффективным и экологически безопасным водопользованием. Предложено шесть универсальных методов усиления возможности решения многих гидроэкологических проблем. Для обеспечения всех уровней безопасности каждый водный объект нуждается в собственной системе управления.

Ключевые слова: водопользование, опасные явления, водохозяйственный комплекс, гидроэкологическая безопасность, вода.

Значимость водных объектов в качестве основы жизни и деятельности человека предопределяет приоритет охраны водных объектов перед их использованием. Регулирование водных отношений осуществляется исходя из представления о водном объекте как о важнейшей составной части окружающей среды,

среде обитания объектов животного и растительного мира, в том числе водных биологических ресурсов, как о природном ресурсе, используемом человеком [1]. Но водные объекты являются опасными сами по себе и объектами, создающими опасные явления. По оценкам ВОЗ, в 2019 г. от утопления умерло 236 тыс. чел., когда на долю травм приходилось почти 8 % всех случаев смерти в мире. Утопление является третьей по значимости причиной смерти от непреднамеренных травм – на него приходится 7 % всех случаев смерти, связанных с травмами [2]. К 2024 г. сообщили о снижении уровня смертности от утоплений, но они остаются серьезной проблемой общественного здравоохранения, поскольку каждый час от происшествий на воде погибает более 30 чел., а только в 2021 г. утопления стали причиной смерти 300 тыс. чел. Почти половина всех случаев приходится на лиц младше 29 лет и четверть – на детей младше пяти лет [3]. В ежегодном докладе ВМО 2021 г. «Состояние глобальных водных ресурсов» указано, что последствия изменчивости и изменения климата часто проявляются через воду. Люди, фактически получив безграничную власть над природной средой, считая себя «венцом природы», забыли, что сами является малой частицей этой среды. И Природа всё чаще напоминает нам об этом катастрофическими проявлениями своего величия. Можно с уверенностью заключить, что вода – это жизнь и вода – это смерть.

Производственная деятельность многих секторов экономики – водный транспорт, энергетика, сельское и лесное хозяйство, коммунальные службы и др., в значительной степени подвержена влиянию неблагоприятных гидрометеорологических условий. Развитие новых технологий и хозяйственных инфраструктур усугубляет уязвимость экономики и жизнедеятельности общества от экстремальных проявлений окружающей среды. На обширной территории России, обладающей большим разнообразием климатических условий, наблюдается широкий спектр неблагоприятных и опасных гидрометеорологических явлений, которые могут нанести существенный экономический ущерб, как отдельным хозяйствующим субъектам, отраслям экономики в целом, так жизни и здоровью граждан. Ситуация усугубляется, тем что хозяйственная деятельность и многие объекты инфраструктуры также создают дополнительные опасности, например прорывы дамб и плотин.

Опасное природное явление – гидрометеорологическое или гелиогеофизическое явление, которое по интенсивности развития, продолжительности или моменту возникновения может представлять угрозу жизни или здоровью граждан, а также может наносить значительный материальный ущерб [5]. Перечень и критерии опасного природного явления по территории деятельности Иркутского УГМС разработаны в соответствии с РД 52.04.563−2013 «Инструкция по подготовке и передаче штормовых сообщений наблюдательными подразделениями», введенным в действие приказом Росгидромета № 730 от 27.12.2013, приказом ФГБУ «Иркутское УГМС» № 125 от 14.04.2014; согласованы Росгидрометом № 10-30-30/167 от 09.04.2014, утверждены начальником ФГБУ «Иркутское УГМС» 10.04.2014; введены в действие с 28.04.2014. Из нескольких десятков та-

ких явлений немногим меньше половины имеют отношение и к водным объектам или создают комплекс опасных явлений, как например сильные дожди приводят к паводкам.

Опасное природное явление, как событие природного происхождения или состояние элементов природной среды, как результат деятельности природных процессов, которые по своей интенсивности, масштабу распространения и продолжительности могут вызвать поражающее воздействие на людей, объекты экономики и окружающую среду. Они могут подразделяться: по характеру проявления – на прямые и косвенные; по масштабу – на объектные, локальные, региональные, национальные и глобальные; по типу проявления – на постоянные, периодические, эпизодические и мгновенные; по направленности развития – на нарастающие и убывающие и т. д. [4]. Все опасности связанные с водными объектами также можно разделить на группы, в контексте с контролирующими государственными подразделениями. Например:

1. Администрации субъектов и Правительство осуществляют законодательное нормирование и федеральное управление, в том числе таких объектов, как оз. Байкал.

2. Регионально водно-хозяйственный комплекс управляется Бассейновыми советами, осуществляющими рациональное использование, охрану водных объектов и разработку рекомендаций в области использования и охраны водных объектов в границах бассейнового округа, сейчас их в России двадцать один.

3. Уровень производства и хозяйственный комплекс регионально контролируется подразделениями Росприроднадзора.

4. Обеспечение населения водой надлежащего качества, контролирование качества вод осуществляется Роспотребнадзором.

5. Остаётся значительное число личных скважин, колодцев, мест неорганизованной рекреации, где люди должны проявлять собственную ответственность за возникновение, развитие и реализацию возможных гидроэкологических опасностей.

Безусловно, все эти подразделения и комплексы управления водохозяйственных комплексом взаимосвязаны как на государственном, так на территориальном и региональном уровнях. Но отличительно, что каждый водный объект обычно нуждается в собственной системе управления.

При реализации большинства опасных явлений, даже непосредственно не связанных с водными объектами, происходит их загрязнение в результате смывов с территории, при повреждении производственных объектов, кладбищ, скотомогильников, шламонакопителей и других объектов накопленного вреда на территории, повреждении системы водообеспечения, что приводит к опасности заболеваемости и смирности населения в результате употребления загрязнённой воды. Поэтому отдельным блоком опасностей именно гидроэкологической группы следует считать качество вод, особенно объектов питьевого назначения. В соответствии с водным кодексом РФ водные объекты используются для целей питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения, сброса сточных вод и (или) дренажных вод, производства электрической энергии, водного и воздушного

транспорта, сплава древесины и иных предусмотренных Водным кодексом целей. Приоритетом считается именно использование вод для питья, но уровни предельно-допустимых концентраций загрязняющих веществ выше для водных объектов рыбохозяйственного назначения. Это понятная особенность функционирования водных экосистем.

Гидроэкологическая безопасность, включающая как структуру взаимосвязей между с одной стороны – природными экосистемами, водными объектами, с другой – хозяйством и населением, при которых сроится экономически эффективное и экологически безопасное водопользование, определяется особенностями пространственно-временной изменчивости речного стока, его естественной зарегулированностью, отсутствием дефицита водных ресурсов и другими специфическими характеристиками. Возможные антропогенные и климатические изменения, в том числе глобальные, должны учитываться при оценке надежности выполнения гидрологических ограничений. Положения гидроэкологической безопасности водопользования в целом включает соответствующую оценку функций водных объектов, типизацию и формулировку гидрологических ограничений водопользования, перечень условий экономически эффективного и экологически безопасного использования водных объектов. Предупреждение или уменьшение рисков опасных гидрологических явлений во многом зависит от эффективности мониторинга состояния водных объектов, водного законодательства и характера водопользования.

Не менее значимой задачей в этой области является решение ряда методологических проблем изучения и обеспечения безопасности и эффективности водопользования, оценки вероятности опасных гидрологических явлений для речных бассейнов, регионов и субъектов РФ. Выявление гидрологических и экологических ограничений связаны с оценкой и прогнозом изменения водных ресурсов. Рассмотрение и решение этих проблем требует разработки новых подходов к изучению и обеспечению гидроэкологической безопасности, изучения пространственных особенностей возникновения природных и техногенных опасностей и рисков чрезвычайных ситуаций, создания современных (или совершенствования традиционных) средств гидрологических и водохозяйственных расчетов, совершенствования состава, структуры и содержания мониторинга водных объектов.

В связи с этим своевременные и достоверные сообщения о возникновении и развитии (усилении и окончании) неблагоприятных и опасных гидрометеорологических явлений, подаваемые наблюдательными подразделениями Росгидромета и ВМО, позволяют уменьшить негативное воздействие этих явлений на работу отдельных предприятий и экономики страны в целом.

Решение многих гидроэкологических проблем можно добиться различными универсальными методами, например:

- усилением понимания значимости и проблем каждого конкретного водного объекта;
- развитием системы наблюдательной сети гидрометеорологической службы с учётом международных программ;

- увеличением инвестиций с целью восполнения пробелов в сборе данных по основным гидроэкологическим показателям и оценке гидроэкологического статуса, включая криосферу, на страновом уровне;
- ускорением разработки методов анализа, например дешифрирования данных дистанционного зондирования земли и сквозных систем заблаговременных предупреждений об опасных явлениях для снижения воздействия экстремальных явлений на людей, жизнь и средства к существованию, экосистемы и экономику в целом во всех частях мира;
- улучшением системы долгосрочных и краткосрочных прогнозов и оповещения об опасностях, в соответствии с призывом генерального секретаря ООН о создании к 2027 г. систем заблаговременных предупреждений для всех [6];
- расширением обмена гидроэкологическими данными на уровне граничащих стран и международном уровне.

Безусловным является совместная работа сообщества в поддержку глобального понимания, разработки политики и планирования в целях реализации Перспективного видения и Стратегии ВМО в области гидрометеорологии для поддержки достижения целей в области устойчивого развития.

Список литературы

1. Водный кодекс Российской Федерации от 3 июня 2006 г. № 74-ФЗ (ред. от 08.08.2024) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.03.2025). URL: https://docs.cntd.ru/document/901982862 (дата обращения 28.02.2025)
2. Глобальный доклад об утоплении URL: https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/144002/WHO_NMH_NVI_14.1_rus.pdf (дата обращения 28.02.2025)
3. Пресс-релизы ВОЗ. URL: https://www.who. int/ru/news/item/13-12-2024-drowning-deaths-decline-globally-but-the-most-vulnerable-remain-at-risk (дата обращения 28.02.2025)
4. Термины МЧС России. URL: https://mchs.gov.ru/ministerstvo/o-ministerstve/terminy-mchs-rossii/term/507 (дата обращения 28.02.2025)
5. Типовой перечень и критерии опасных метеорологических явлений // Гидрометцентр России URL: https://meteoinfo.ru/hazards-definitions (дата обращения 28.02.2025)
6. UN-Water. URL: https://www.unwater. org/ (дата обращения 28.02.2025)

УДК 556.535.5

Особенности нарастания толщины льда на Камском водохранилище

Н. А. Шварёва (nata2004fac@mail.ru), К. Д. Микова (mikovak@yandex.ru)
Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь

Аннотация. Статья посвящена анализу особенностей нарастания толщины льда на Камском водохранилище. В ходе работы была использована информация по 9 гидрологическим постам (г/п) о толщине льда за период 1956–2023 гг. Исследование показало, что наибольшая интенсивность нарастания толщины льда на всех г/п, наблюдалась в период с ноября по февраль. Максимум интенсивности нарастания толщины ледяного покрова наблюдается в декабре, с интенсивностью почти 0,70 см/сут. Примерно в начале февраля интенсивность нарастания толщины ледяного покрова начинает снижаться и в марте уже не превышает 0,10 см/сут. Средняя толщина льда в конце зимы на г/п составляет 42–73 см. Наибольшие значения толщины льда 70–73 см характерны для постов, расположенных в мелководных заливах водохранилища (г/п Майкор, Висим, Ильинский, Усть-Кемоль). Небольшая толщина льда отмечалась на г/п Березники и Усть-Пожва, расположенных на верхнем, проточном в зимний период, участке водохранилища и на приплотинном участке у Камской ГЭС (42–53 см).

Ключевые слова: толщина льда, интенсивность нарастания толщины льда, Камское водохранилище.

Введение

Зимой почти все реки, озера и водохранилища в России покрываются льдом. На исследуемой территории продолжительность ледостава составляет 5–6 мес. Каждый год сроки появления льда и очищения водохранилищ ото льда меняются в довольно широких пределах. Исследование нарастания толщины льда имеют большое практическое значение для разных отраслей экономики. Организация зимних переправ, гидротехническое и дорожное строительство, прокладка нефте- и газопроводов в географических зонах, где ежегодно отмечаются устойчивые ледовые явления, требуют обеспечения надежными сведениями о ледовом режиме. Изучение ледового состояния и ледового режима водохранилищ имеет также большое значение для решения ряда научных и практических задач.

Ледовый режим водохранилищ – это совокупность закономерно повторяющихся процессов возникновения, развития и разрушения ледяных образований на водных объектах [9]. В разные годы характер нарастания толщины льда менялся в зависимости от различных гидрологических факторов, погодных условий не только по количественным показателям, но и по качественным признакам, как это свойственно многим ледовым процессам. Само нарастание толщины льда в водоемах происходит с начала ледостава путем кристаллизации воды на нижней поверхности ледяного покрова, промерзания шуги под ледяным покровом, а также за счет смерзания пропитанного водой снега, находящегося на ледяном покрове. Сроки начала ледовых явлений на водохранилищах позднее, нежели у рек, из-за того, что к моменту перехода температуры воздуха к отрицательным

значениям теплозапасы водных масс в водохранилищах больше, чем в речных водах в естественных условиях, вследствие увеличения глубины и снижения скорости течения на подпорных участках [3].

Исследованиям нарастания толщины льда посвящено много научных трудов. Например, в трудах таких ученых, Калинин В. Г. и Микова К. Д. (2006), Горбунова Я. М. (2020), были проведены анализы и выявлены закономерности процессов ледообразования на Камском водохранилище. Вопросами закономерности формирования ледового режима озер и водохранилищ в зависимости от различных факторов занимались: Кирвель П. И. (2007), Калинин В. Г. (2012, 2015), Овчинникова О. В. (2022). Влияние климатических изменений, так же оказывает существенное влияние на формирование толщины льда, более подробно это было рассмотрено в следующих трудах: Агафонова С. А. (2014); Магрицкий Д. В., Чалов, С. Р., Агафонова, С. А., Кузнецов, М. А., и др. (2019); Калинина В. Г., Микова К. Д. и Чичагов В. В. (2021).

Географическое положение и климат являются основными факторами влияния на характер замерзания водохранилищ. Нарастание льда происходит в результате теплообмена между ледяным покровом и атмосферой при отрицательном балансе тепла. Значительное влияние на распределение толщины льда по акватории оказывает снежный покров.

Исходные данные и методы исследования

В ходе работы были проанализированы ряды данных по толщине льда на 9 г/п Камского водохранилища: Березники, Висим, Добрянка, Камская ГЭС, Усть-Пожва, Майкор, Ильинский, Троица, Усть-Кемоль (рис. 1). По г/п использована информация о толщине льда за период 1956–2023 гг.

Результаты и обсуждение

Анализ среднемноголетних (1956–2023 гг.) величин толщины льда по месяцам на г/п Камского водохранилища (рис. 2) показал, что после установления ледостава нарастание толщины ледяного покрова в разных районах акватории водохранилища происходит по-разному. Ледовый режим не постоянен и находится под действием изменения ряда климатических факторов таких как температура воздуха, атмосферная циркуляция (ветровой режим), а также других не менее важных факторов как высота снега на льду, гидрологических характеристик водотока, особенностей подземного питания и морфологического строения местности. В течение периода ледостава толщина ледяного покрова изменяется под влиянием теплообменных процессов на верхней и нижней поверхностях, а также в толще льда и снега, находящегося на ледяном покрове [Донченко, 1987].

На Камском водохранилище более интенсивное нарастание льда происходит в период с ноября по январь (0,40–0,65 см/сут), что вполне можно объяснить тем, что в начале зимы наблюдаются обычно наименьшая толщина ледяного покрова, что способствует более интенсивному нарастанию. Максимум интенсивности нарастания толщины ледяного покрова приходится на декабрь, с интен-

сивностью почти 0,70 см/сут. В период с февраля по март, интенсивность нарастания несколько снижается (до 0,10–0,30 см/сут). Это связано с тем, что в середине зимы из-за увеличения толщины льда и высоты снега на льду, увеличивается теплоизоляция, что приводит к снижению интенсивности нарастания льда. С середины марта по апрель наблюдается уменьшение толщины ледяного покрова. Начиная с конца марта, еще до начала вскрытия, наблюдается уменьшение толщины льда на водохранилище. В середине апреля уменьшение толщины льда составляет 0,50 см/сут.

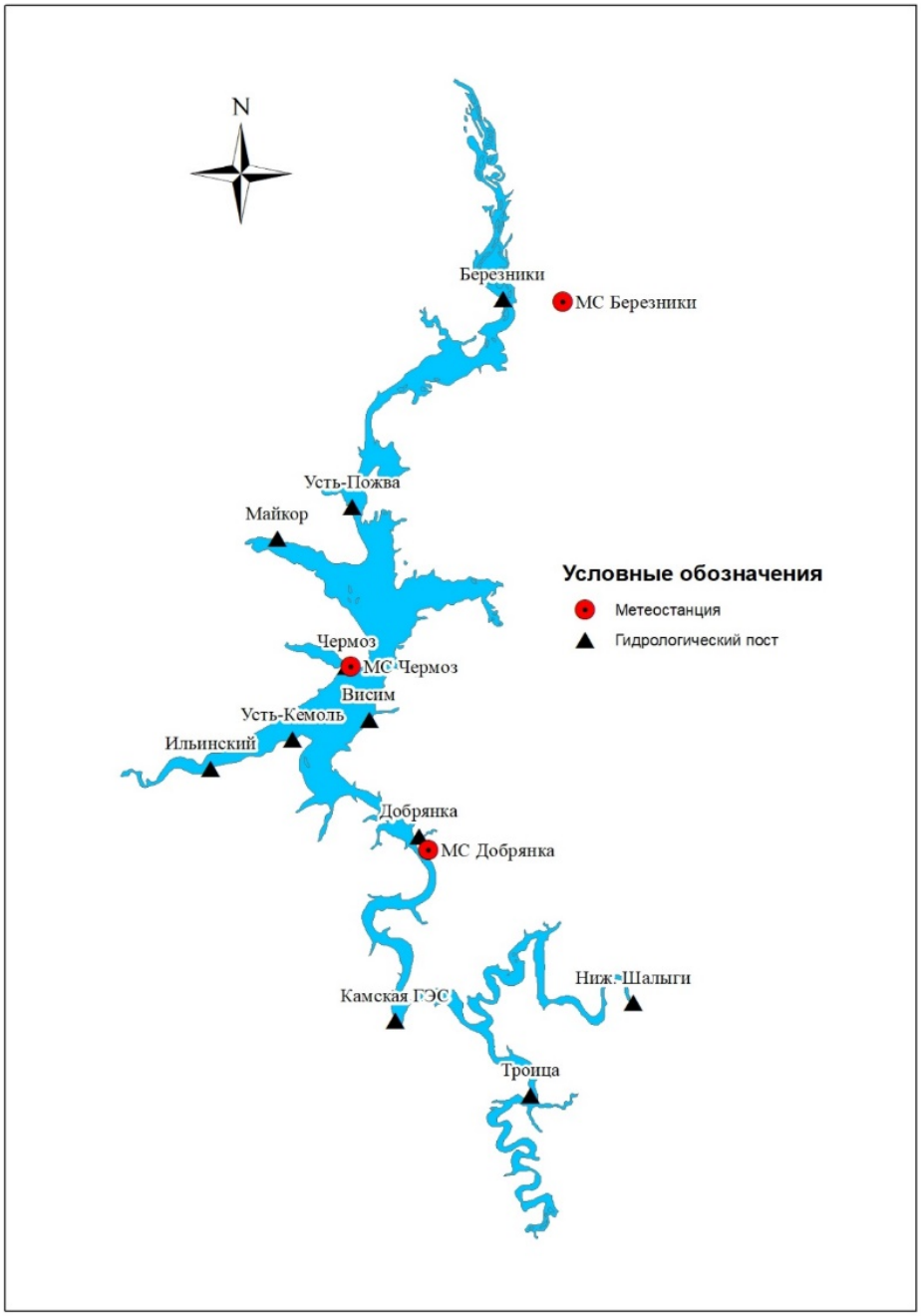


Рис. 1. Схема расположения гидрологических постов и метеостанций на Камском водохранилище

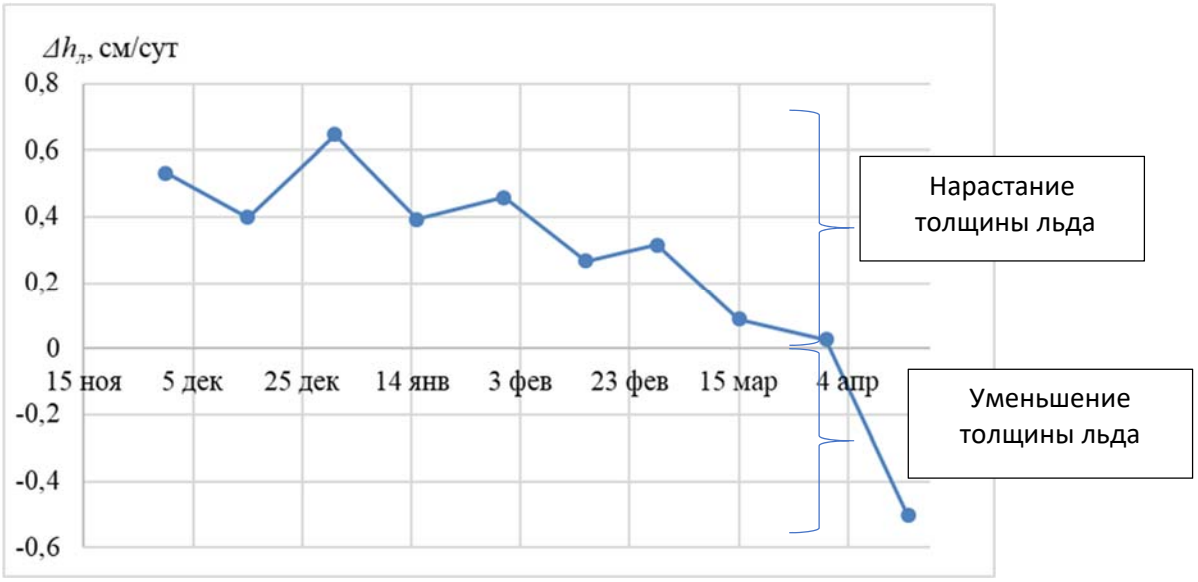


Рис. 2. Среднее по всем г/п Камского водохранилища изменение интенсивности нарастания толщины льда ($\Delta h_л$, см/сут) за период 1956–2023 гг.

В середине ноября средняя толщина льда по всем г/п наименьшая (9–18 см), так как ледостав только установился (табл.). Наибольшая толщина льда наблюдается на самом северном г/п Березники (15 см) и в мелководных заливах водохранилища (15–18 см), где ледостав установился раньше (г/п Висим, Майкор, Усть-Пожва, Ильинский). Небольшая толщина льда в это время отмечается на г/п Добрянка и Камская ГЭС (9 см). На г/п Добрянка небольшая толщина льда обусловлена работой Пермской ГРЭС, сбрасывающей теплые воды в Добрянский залив Камского водохранилища. На г/п Камская ГЭС небольшие толщины льда обусловлены более поздним, по сравнению с северными постами и постами в мелководных заливах, установлением ледостава. Лед здесь в середине ноября не успевает нарасти до больших значений. *В конце ноября* средняя толщина льда составляет 17–26 см (табл.). Более высокие значения толщины льда наблюдаются также в мелководных заливах, где расположены г/п Висим (26 см), Усть-Кемоль (26 см) и Майкор (25 см). На г/п Березники толщина льда несколько меньше (21 см), что может быть обусловлено сбросами Соликамско-Березниковского промузла. Небольшая толщина льда на г/п Камская ГЭС (17 см) и г/п.

Троица (19 см). За 15 дней толщина льда на г/п нарастает на 4–12 см. Больше всего толщина льда увеличилась на г/п Усть-Кемоль (+12 см), Майкор и Добрянка (+10 см).

В середине декабря в среднем, толщина льда составляла 22–33 см. На г/п Березники, Усть-Пожва, Добрянка, Камская ГЭС, Троица и толщина льда была меньше (22–26 см), чем на г/п Ильинский, Висим, Майкор и Усть-Кемоль (28–33 см). Это можно объяснить тем, что в мелководных заливах толщина льда нарастает дольше, так как устанавливается ледостав раньше. *В конце декабря* наименьшие величины толщины льда изменяются в пределах 31–36 см, на тех же г/п, что и в середине декабря. Наибольшие же значения (37–45 см) так же наблюдаются на таких г/п как Висим, Майкор и Усть-Кемоль. В среднем за половину

месяца, толщина льда нарастает на 8–15 см. Лед, в это время нарастает с большей интенсивностью. Наибольшее увеличение толщины льда наблюдается на г/п Усть-Кемоль и составляет +15 см.

Таблица

Среднемноголетние (1956–2023 гг.) величины толщины льда ($h_л$, см) на разные даты на г/п Камского водохранилища

Пост	15. ноя	30. ноя	15. дек	31. дек	15. янв	31. янв	15. фев	29. фев	15. мар	31. мар	15. апр
Березники	15	21	26	34	38	45	51	51	56	53	54
Висим	18	26	33	43	50	60	61	68	69	72	59
Добрянка	9	19	26	37	46	50	56	61	63	62	53
Камская ГЭС	9	17	22	32	35	41	42	46	42	42	37
Усть-Пожва	15	19	24	31	35	39	44	43	48	42	35
Майкор	15	25	32	42	48	56	62	65	69	71	68
Ильинский	15	21	28	39	45	55	58	67	67	73	67
Троица	10	18	25	36	43	50	55	59	60	62	55
Усть-Кемоль	14	26	30	45	52	62	65	71	69	70	51

В середине января средняя толщина льда составляла 35–52 см (см. табл.). Наименьшие значения толщины льда наблюдались на г/п Березники, Камская ГЭС и Усть-Пожва (35–38 см). Более высокие значения приходятся г/п с малыми глубинами Висим, Добрянка и Усть-Кемоль, где толщина льда изменяется от 46 до 52 см. Небольшая толщина льда на г/п Березники, обусловлена близостью промышленных предприятий, которые сбрасывают сточные воды с температурой выше температуры окружающей среды, тем самым замедляется нарастание льда. *В конце января* наименьшая средняя толщина льда составила 39–45 см, на г/п Березники, Усть-Пожва, Камская ГЭС. Наибольшая толщина наблюдалась в мелководных заливах (56–62 см), где лед нарастал с большей интенсивностью (г/п Висим, Усть-Кемоль, Майкор). За 15 дней максимальная интенсивность нарастания толщины по всем постам (+8…+10 см), наблюдалась на постах с наименьшими глубинами (г/п Висим, Усть-Кемоль, Ильинский, Майкор). Наименьшее нарастание толщины льда наблюдалось на г/п Добрянка и Усть-Пожва и составляло +4 см.

В середине февраля наиболее высокие значения наблюдались на г/п Усть-Кемоль, Майкор и Висим (61–65 см). Наименьшее значение нарастания толщины льда изменялись от 44 до 51 см на г/п Березники, Камская-ГЭС и Усть-Пожва. Причины этого описывались несколько выше. *В конце февраля* средняя толщина льда на водохранилище составила 43–71 см. В среднем максимальные значения толщины льда достигали значений от 67 до 71 см, на таких г/п как Усть-Кемоль, Висим и Ильинский. В среднем за 15 дней интенсивность нарастания толщины льда на некоторых г/п начинала уменьшаться, например, на г/п Усть-Пожва и Березники нарастание толщины льда не происходило вообще. На других г/п как Висим, Ильинский и Усть-Кемоль, лед продолжал нарастать на +6 до +9 см.

В середине марта толщина льда почти не отличалась от значений в конце февраля, что связано с тем, что в это время лед почти не нарастал, а на некоторых г/п даже отмечалось уменьшение толщины льда (г/п КамскаяГЭС). *В конце марта* на таких г/п как Висим, Майкор и Ильинский, толщина льда продолжала нарастать (71–73 см). При этом на г/п Березники, Добрянка и Усть-Пожва толщина льда стала уменьшаться и интенсивность нарастания толщины льда приняла отрицательные значения (рис. 2). Рассматривая период с 1956 по 2023 г. (табл. 1) наибольшая из средних толщин льда по всем постам была в конце марта. Самая большая толщина льда наблюдалась на г/п Ильинский и составляла 73 см.

Выводы

В результате выполненной работы можно сделать следующие выводы:

1. Интенсивность нарастания толщины льда на разных г/п различна. В основном, наибольшая интенсивность нарастания толщины льда на всех постах, наблюдалась в период с ноября по февраль. С ноября по начало января толщина льда нарастает более интенсивно 0,40–0,65 см/сут), так как в начале зимы обычно небольшая толщина ледяного покрова, способствующая более интенсивному нарастанию. С февраля по март интенсивность нарастания снижается (до 0,10–0,30 см/сут). С середины марта по апрель наблюдается уменьшение толщины ледяного покрова.

2. В мелководных заливах, где ледостав устанавливался раньше, нарастание толщины льда в ранние месяцы зимы с ноября по середину декабрь, происходит с большей интенсивностью на таких г/п как Висим (+15 см), Майкор (+17 см), Усть-Кемоль (+16 см). В этот же период, меньшая интенсивность наблюдалась на глубоководных участках как г/п КамскаяГЭС (+13 см), Березники (+11 см).

3. Минимальные значения толщины льда наблюдаются в начале зимы – с середины ноября по середину декабря (9–33 см), наблюдаясь в основном на центральных и южных г/п. Наибольшая из средних значений толщины льда наблюдаются с середины февраля по конец марта и составляет 42–73 см, приходясь на северные и мелководные г/п.

Список литературы

1. Современное изменение ледового режима рек бассейна Волги / С. А. Агафонова [и др.]. // Природообустройство. 2014. № 3. С. 60–62.

2. *Горбунова Я. М.* Анализ особенностей ледообразования на Камском водохранилище // Вопросы гидрологии, геоэкологии и охраны водных объектов : материалы межрегион. науч.-практ. конф. студентов, магистров и аспирантов, 11 нояб. 2020 г. Пермь, 2020. С. 9–14.

3. *Донченко Р. В.* Ледовый режим рек СССР. Л. : Гидрометеоиздат, 1987. 242 с.

4. *Калинин В. Г.* Зимний режим водохранилищ и его определяющие факторы // Географический вестник. 2012. № 1 (20). С. 52–55.

5. *Калинин В. Г.* Особенности формирования зимнего режима равнинных водохранилищ //Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2015. № 2. С. 38–48.

6. Калинин В. Г., Микова К. Д. О зависимостях сроков наступления ледовых явлений и критериях их оценки (на примере камских водохранилищ) // Метеорология и гидрология. 2006. № 12. С. 96–100.

7. Калинин В. Г., Микова К. Д., Чичагов В. В. Влияние современных климатических изменений на сроки ледообразования на Камском водохранилище // Тр. VIII Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Пермь : Перм. гос. науч.-исслед. ун-т, 2021. С. 94–99

8. Кирвель П. И. Особенности ледового режима озер Республики Беларусь // Весці БДПУ. Серыя 3. Фізіка. Матэматыка. Інфарматыка. Біялогія. Геаграфія. 2007. № 3. С. 59–65.

9. *Лобанов В. А., Наурозбаева Ж. К.* Влияние изменения климата на ледовый режим Северного Каспия. СПб. : РГГМУ. 2021.

10.Гидрологический режим нижней Оби в современных гидроклиматических условиях и под влиянием крупномасштабной водохозяйственной деятельности / Д. В. Магрицкий [и др.] // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. 2019. № 1. С. 106–115.

11.Пространственная изменчивость характеристик ледяного покрова Рыбинского водохранилища зимой 2022 года / О. В. Овчинникова [и др.] // Исследования молодых географов. 2022. С. 56–70.

УДК 556.542

Распределение стока по основным рукавам дельты р. Селенги по эмпирическим данным за 2023–2024 годы наблюдений

Ю. И. Шкимелис (jcraet@mail.ru)[1], Е. А. Ильичёва (lenail3663@mail.ru)[1,2], М. В. Павлов (maksimpavlov_v@mail.ru)[2], С. Х. Габриелян (imperator.gs24@mail.ru)[1], А. А. Ушкалов (lolitamen@mail.ru)[2]

[1]*Иркутский государственный университет, г. Иркутск*
[2]*Институт географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, г. Иркутск*

Аннотация. Исследования распределения стока воды и наносов по главным направлениям стока дельты р. Селенги представляют в основном фундаментальный характер по выявлению особенностей взаимодействия текучих вод с подстилающей поверхностью в особых устьевых условиях и решают балансовые задачи с учетом динамичных входных гидроклиматических параметров стока при зарегулированном уровне приемного водоема. В прикладном значении результаты исследований могут стать важным элементом планирования землепользования и территориального развития Селенгинского побережья Кабанского района Республики Бурятии. Проводится сравнительный анализ данных гидрометрических, русловых и геоморфологических измерений за последние два полевых сезона и показана трансформация озерного края дельты по материалам космической мультиспектральной съемки. Особое внимание уделено стоку взвешенных наносов, увеличивающегося в последние многоводные годы.

Ключевые слова: дельта Селенги, сток воды, взвешенные наносы, озерный край дельты, полевые данные, ДЗЗ.

Методы и материалы исследования

Полевой метод заключался в проведении гидрометрических измерений на семи основных протоках и в вершине дельты на мониторинговых гидрометрических станциях, установленных с 2003 г. Станции забетонированы и имеют точные географические координаты и высотную привязку, что позволяет проводить сравнительный анализ получаемых рядов данных. Лабораторный метод заключался в обработке проб речных вод на определения мутности и расчета взвешен-

ных наносов, и донных отложений проток и пойм для гранулометрического анализа русловых отложений ситовым методом. Также использовался картографический метод для построений схемы морфодинамики береговой линии дельты реки Селенги и оценки степени её выдвижения. Береговая линия дельты строилась полуавтоматическим методом обработки мультиспектральных космических снимков (Landsat level 2) для получения монохромных растров «вода – суша», для чего подбирался соответствующий коэффициент. Картографические работы проведены в цифровом картографическом пакете ArcMap, с использованием материалов с интернет-портала (EROS) EarthExplorer [4].

Результаты и обсуждение исследований

Схема положения береговой линии построена по космическим снимкам на период полевых наблюдений в 2023 и 2024 гг. и позволяет сравнить динамику развития озерного края дельты (рис.). Анализ динамики озерного края дельты к 2024 г. показал общее выдвижение в акваторию, продолжающееся с 2011 г. Отмечается определённая направленность выдвижения: максимальное в центральном секторе по протокам Среднеустье, Колпинная и молодой протоке Казанова, перехватывающей сток из Лобановского сектора; равномерное медленное выдвижение по краям Селенгинского и Лобановского секторов. Выдвижение дельты происходит при противодействии двух факторов: поступлении стока наносов в устьях проток и колебания уровня Байкала с переносом наносов вдольбереговыми течениями. Увеличение водности в бассейне отмечается с 2019 г. (расход в вершине дельты (ВД) 1600 м^3/с), с наибольшим стоком в 2021, 2023–2024 гг., что выражено в расходах воды в ВД, превышающих 2500–3000 м^3/с. К паводкам 2021 и 2023 гг. приурочены выходы вод на высокую 3 метровую надпойменную террасу и значительным затоплением всей территории субаэральной дельты и подтоплением участков Кабанской поймы с населенными пунктами Байкало-Кудара, Корсаково, Малое Колесово и др., располагающихся на абсолютных отметках 460–462 м (Балтийская система высот).

Сток наносов нелинейно связан с расходами речных вод, и может скачкообразно увеличиваться на отдельных участках русловых мезоформ, т. е. имеет локальные или точечные источники поступления берегового или руслового материала. Так, в маловодные годы при расходах воды в ВД до 1600 м^3/с расходы взвешенной части наносов варьировала от 60 до 120 кг/с, в многоводье последних годов – 180 кг/с и более (табл. 1). Анализ данных по стоку наносов показывает, что между главным узлом бифуркации дельты и узлами распределения стока второго-третьего уровня, где установлены мониторинговые створы наблюдений, аккумулируется от 10 до 40 % наносов, а 60–90 % расходуется на строительство и выдвижение озерного края дельты и на склон авандельты.

Средняя мутность речных вод рассматриваемого периода 0,6–0,7 г/дм^3, существенно различаясь в наиболее водном 2023 г., от 0,01–0,04 г/дм^3 в протоках Среднеустьевского сектора, до 0,1 г/дм^3 в протоках Лобановского, с более стабильной мутностью в Селенгинском секторе. Сток наносов несколько выше в

2024 г., несмотря на меньшие расходы воды (см. табл. 1). Считаем важным обратить внимание на значительные параметры стока воды и наносов в протоке Казанова, увеличение которых указывают на активизацию перестройки русловой сети и следовательно перераспределение направленности стока и развития и выдвижения озерного края дельты (см. рис.).

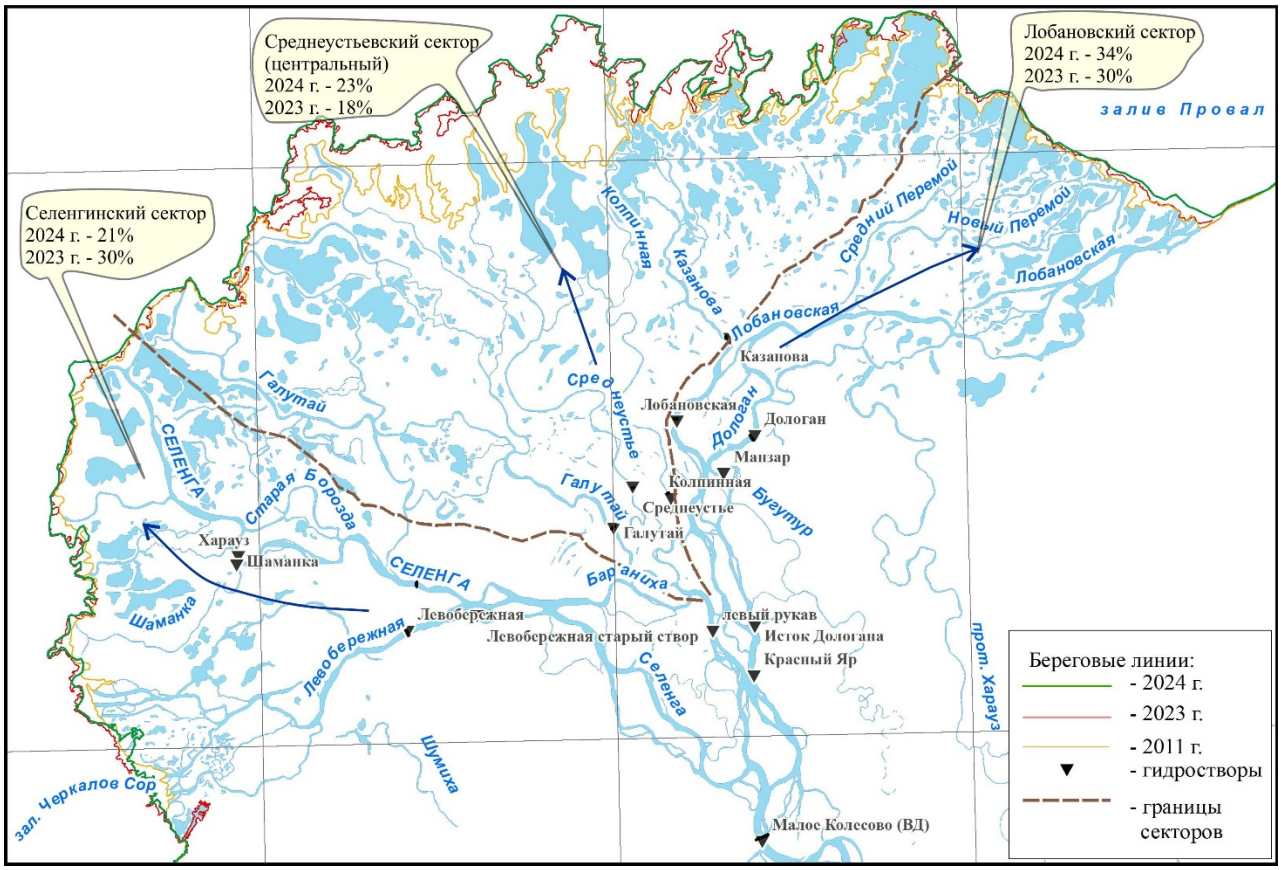


Рис. Схема расположения гидроморфостворов; динамика береговой линии и распределения стока по секторам дельты в 2023–24 гг.

Исследования структуры русловой сети и распределения стока по магистральным рукавам, объединенным в сектора дельты р. Селенги, продолжаются с 2003 г. по настоящее время [2; 3] и учитывают результаты предшествующих исследователей и параллельно приводящиеся работы. Анализ накопленных актуальных данных к 2017 г. позволил построить полуэмпирическую модель распределения стока по основным рукавам и секторам дельты в зависимости от уровня Байкала, как приемного водоема и базиса эрозии, и входящих расходов воды в вершине дельты [1]. Измеренные данные за 2023–2024 гг. в полной мере укладываются в указанную модель, где расходы в вершине дельты свыше 2000–3000 м^3/с предполагают относительно равномерное распределение стока по Селенгинскому и Лобановскому секторам и в меньшей части дренируются через Среднеустьевский (центральный) сектор.

Таблица 1

Основные морфометрические параметры русла в морфостворах и распределение стока воды и наносов за 2 года

Морфоствор	V, м/с	B, м	H, м	ω, м^2	Q, м^3/с	ρ, г/дм^3	R, кг/с	Распределение водного стока по секторам дельты		
								Q, м^3/с	%	сектор
2024 год										
Вершина Дельты (ВД)	1,58	373	4	1453	2296	0,08	183,7	2296	100	сектор
Харауз	1,34	74	2	177	237	0,09	21,3	480	20,9	Селенгинский
Левобережная	1,07	120	2	227	243	0,07	17,0			
Галутай	1,12	160	3	239	268	0,06	16,1	520	22,7	Среднеустьевский (центральный)
Среднеустье	1,05	83	2	131	137	0,07	9,6			
Колпинная	0,97	132	1	119	115	0,05	5,8			
Казанова	1,34	80	2	160	214	0,06	58,6	783	34,1	Лобановский
Лобановская	1,03	74	2	156	161	0,08	12,9			
Дологан	1,32	124	3	309	408	0,06	24,5			
Невязка, м^3/с					513				22,3	
2023 год										
Морфоствор	V, м/с	B, м	H, м	ω, м^2	Q, м^3/с	ρ, г/дм^3	R, кг/с	Распределение водного стока по секторам дельты		
								Q, м^3/с	%	сектор
Вершина Дельты (ВД)	2,1	407	4	1723	3618	0,05	180,9	3618	100	сектор
Харауз	0,9	158	3	525	458	0,06	27,48	1066	29,5	Селенгинский
Левобережная	1	224	3	586	609	0,08	48,72			
Галутай	1,5	140	3	357	523	0,04	20,92	666	18,4	Среднеустьевский (центральный)
Среднеустье	0,9	60	2	89	79	0,01	0,79			
Колпинная	0,9	55	1	70	64	0,03	1,92			
Казанова	1,1	66	3	198	218	0,1	21,8	1101	30,4	Лобановский
Лобановская	1,1	126	3	316	364	0,1	36,4			
Дологан	1,3	184	2	414	519	0,04	20,76			
Невязка, м^3/с					784				22,0	

Выводы

В рамках данной публикации, в полной мере не представляется возможным охватить проблему недоучета невязки стока (см. табл. 1). Причины данного феномена невязки баланса стока пока скрываются в сложном механизме формирования устьевой области Селенги. Наша гипотеза основана на процессах берегового регулирования, т. е. при аккумуляции или разгрузки вод пойменных комплексов в русловую сеть при изменении уровня воды в них на подъеме и спаде паводка. Для аргументации такого предположения требуется проведение более продолжительного и детального эксперимента на ключевых участках, расположенных в разноуровенных пойменно-русловых комплексах различного сложения и возраста. Таким образом, в 2023–2024 гг. кардинально не поменялось рас-

пределение стока по рукавам и секторам дельты: в Лобановский сектор направилось более 34 % стока, причем в залив Провал поступило 25 % и больший объем стока изливался в акватории соров центральной периферии дельты.

Исследования выполнялись в рамках гранта РНФ (№ 25-27-00229 «Роль пойменно-террасовых комплексов в распределении и аккумуляции стока дельты р. Селенги») по материалам полевых работ, входящих в исследования ИГ СО РАН (№ государственной регистрации № АААА-А21-121012190059-5).

Список литературы

1. *Ильичева Е. А.* Внутридельтовое распределение стока реки Селенги // Вестник Бурятского государственного университета. Биология, география. 2017. № 4. С. 64–73. EDN XYKDEL.

3. *Ильичева Е. А.* Динамика структуры речной сети Селенги и ее дельты // География и природные ресурсы. 2008. № 4. С. 57–63. EDN KTWCVP.

2. *Ильичева Е. А., Корытный Л. М., Павлов М. В.* Русловая сеть дельты р. Селенги на современном этапе // Вестник Томского государственного университета. 2014. № 380. С. 190–194.EDN SAURKJ.

4. EarthExplorer : офиц сай.т. URL: http://earthexplorer.usgs.gov (дата обращения: 08.09.2024).

Секция

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ АТМОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ

УДК 551.510.42(571.1)

Особенности формирования особых явлений погоды конвективного происхождения опасных для авиации над территорией Западной Сибири

А. А. Котова (anna_kotova_1995@list.ru)

Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, г. Саратов

Аннотация. Представлены результаты по региональному исследованию факторов и синоптических условий, влияющих на развитие конвективных процессов. Исследование охватывает обширную территорию Западной Сибири, но внимание автора акцентируется на связанных с конвекцией явлений погоды, опасных для авиации, так как материалом для работы послужил синоптический архив авиаметеорологического центра г. Ханты-Мансийска за период с 2017 по 2023 г. Конвективные явления погоды одни из самых трудно прогнозируемых, сведения о которых представляют актуальность как в научном плане, так и для решения ряда прикладных задач, в частности для авиационного прогноза. В рамках исследования выделена типизация синоптических условий по характеру приземного и высотного барических полей по степени благоприятности для развития интенсивной грозовой активности над значительной территорией Западной Сибири, в том числе и для формирования снежных гроз.

Ключевые слова: конвективные процессы, Западная Сибирь, синоптическое прогнозирование, метеорологическое обслуживание авиации, снежная гроза.

Географическая характеристика территории Западной Сибири

Западная Сибирь – это природный регион, который находится между Уральскими горами на западе и долиной р. Енисей на востоке, его площадь составляет около 2,8 млн км^2. Почти 80 % площади Западной Сибири занимает Западно-Сибирская равнина. С севера на юг территория региона протянулась почти на 2500 км: от Северного Ледовитого океана до возвышенностей Казахского мелкосопочника, и на 1900 км с запада на восток: от Уральских гор до Среднесибирского плоскогорья.

Западная Сибирь как отдельный физико-географический район включает Западно-Сибирскую низменность с северными склонами Казахского мелкосопочника и часть Алтая с его северными отрогами Кузнецким Алатау и Салаирским кряжем, между которыми расположена Кузнецкая котловина. На западе граница района проходит по восточным предгорьям Урала, а на востоке – по западному уступу Средне-Сибирского плоскогорья. Таким образом, территория Западной Сибири в соотношении 90 % на 10 % делится на равнинную и горную части соответственно.

К основным физико-географическим характеристикам территории Западной Сибири, влияющих на формирование опасных конвективных явлений погоды и усилению конвективной неустойчивости атмосфера над исследуемой территорией относятся:

1. Равнинность рельефа с разветвленной речной сетью и при близком залегании грунтовых вод в совокупности с климатическими характеристиками региона способствуют высокой заболоченности территории. Болотные массивы, вследствие большой площади, а также сконцентрированных в них огромных объемах торфа и метана, оказывают значительное влияние на формирование местных циклонов. Роль термического фактора, тепло- и влагообмена с подстилающей поверхностью в процессе местного циклогенеза очень велика. При перемещении воздушной массы на более теплую подстилающую сильно заболоченную поверхность, она насыщается теплом и влагой, что приводит к образованию облачности с выделением скрытого тепла и к развитию глубокой конвекции, а следовательно, к образованию интенсивного мезоциклона [1].

2. Особенности физико-географических характеристик территории Западной Сибири вносят дополнительные факторы к усилению конвекции над данным регионом. Район междуречья Обь-Иртыш – равнинное сильно заболоченное пространство с обширными лесными массивами и многочисленными озерами. Небольшие по площади озера, которые в отличие от крупных водоемов быстро прогреваются, способствуют дополнительной конвекции. Также благоприятными условиями для развития неустойчивости атмосферы вносит турбулентность, формирующиеся над лесным массивом.

3. Географические особенности исследуемой территории: её открытость с севера обеспечивает проникновение холодной арктической воздушной массы со стороны северного Ледовитого океана на континент в течение всего года, а не защищенность со стороны степей Казахстана, обеспечивает вынос теплой умеренной или тропической воздушной массе с юга на север. Таким образом, открытость территории с севера и юга способствует свободному воздухообмену, что создает условия для обострения барических градиентов и приводит к усилению конвективной неустойчивости атмосферы.

Влияние Уральских гор выражается в общем уменьшении количества осадков, выпадающих в северной и центральной частях Западной Сибири вследствие осаждения влаги на западных склонах хребта. Однако в южной части горная система Алтая оказывает противоположный эффект, являясь «конденсатором влаги», значительная доля которой выпадает на западных склонах и в предгорьях, способствуя усиленному увлажнению юго-восточной части Западной Сибири.

Синоптические условия формирования опасных для авиации конвективных явлений погоды над территории Западной Сибири

Опасные явления погоды конвективного происхождения относятся к мезомасштабным метеорологическим явлениям, которые формируются при взаимодействии синоптических процессов общей циркуляции и подстилающей поверхности. Грозы, ливневые осадки и шквалы носят локальный и непродолжительный характер, так как горизонтальные размеры конвективных зон во много раз меньше расстояния между климатическими станциями, на которых они наблю-

даются. Все это определяет трудности в регистрации, изучении и прогнозировании явлений погоды, связанных с зонами активной конвекции, в том числе в рамках численных моделей атмосферы.

Таким образом, исследования условий возникновения опасных явлений погоды конвективного происхождения необходимо проводить на региональном уровне с учетом местных особенностей для повышения качества и заблаговременности прогноза.

Протяженность исследуемой территории в меридиональном направлении обусловливает разницу в климатическом режиме и проявлению синоптических процессов над различными районами Западной Сибири. Синоптические условия формирования грозовой деятельности над регионом анализировались для трёх частей Западной Сибири: северной, центральной и южной.

Исследовались случаи гроз с выпадение ливневых осадков, которые наблюдались одновременно не менее чем на трех аэродромах или посадочных площадках, а также климатических станциях на исследуемой территории по данным приземных карт погоды. Всего за период с 2017 по 2023 г. было исследовано 495 случаев грозовой активности с выпадением ливневых осадков над значительной территорией.

Анализ синоптического материала за период с 2017–2023 гг. показал, что грозовая активность над значительной территорией носила преимущественно фронтальный характер, в более 70 % случаев.

Необходимо отметить, что повторяемость внутримассовых гроз резко растет с севера на юг: с 25 % в северной части территории до 30 % в южной.

Увеличение процентной составляющей внутримассового типа гроз на юг территории связана, очевидно, с термической составляющей, большим прогревом подстилающей поверхности в течение дня, а также с орографическим эффектом. В предгорьях Горного Алтая в сравнении с равнинными областями Западной Сибири создаются условия для усиления термической конвекции в послеполуденные часы по причине вынужденного подъема воздуха в горной местности.

Внутримассовые грозы над значительной территорией отмечались при классических для этого типа гроз синоптических ситуациях – в малоградиетных полях при термическом гребне на АТ-850 во второй половине дня при максимальном прогреве подстилающей поверхности.

Повторяемость типов синоптических процессов развития грозовой деятельности над значительной территории Западной Сибири отдельно для каждого из районов приведена в таблице.

Таблица 1

Повторяемость типов синоптических процессов развития грозовой деятельности над значительной территории Западной Сибири

Район	Всего случаев	Тип	
		Фронтальный, %	Внутримассовый, %
Северный	166	75,30	24,70
Центральный	150	71,33	28,67
Южный	179	70,39	29,61
Всего	495	72,32	27,68

Проанализировав синоптический материал, можно сделать вывод, что интенсивная грозовая деятельность над Западной Сибирью развивается практически в половине рассмотренных случаев при прохождении холодных фронтов волнами, при том наиболее интенсивные, с выпадением сильных осадков шквалистым усилением ветра до 15 м/с и более, при быстро смещающихся холодных фронтах во второй половине дня. Грозы с выпадением осадков так же отмечались при прохождении динамически значимых фронтов окклюзии с контрастами температур более или равно 8 °С/1000 км, в более чем 15 % случаев. Такая же повторяемость и для фронтальных гроз при прохождении тёплых фронтов в ночные и утренние часы.

Реже всего грозы отмечались при прохождении вторичных холодных фронтов. При прохождении вторичных холодных фронтов грозовая деятельность формировалась как в первой, так и во второй половине дня при температурах воздуха от +10 °С при неустойчивой воздушной массе в барической ложбине в тылу циклона за основным холодным фронтом. При этом над пунктом прогнозирования отмечался заток холода на уровне АТ-850 гПа и проходила ось барической ложбины на АТ-500 гПа, что способствовало восходящим движениям и образованию мощной конвективной облачности. Таким образом, после кратковременного прояснения, наступающего вслед за прохождением основного холодного фронта, формировались гряды кучево-дождевых облаков с ливневыми осадками, грозами и шквалистым усилением ветра. Но осадки и грозы в тылу циклона могут быть не только фронтальными, но и внутримассовыми, так как в тыловой части воздушная масса неустойчива.

В результате исследования выделено 6 типов синоптических процессов образования гроз с выпадением ливневых осадков над значительной площадью Западной Сибири. Установлено, что более 40 % гроз с выпадением ливневых осадков формируется при синоптическом типе «ложбина». В одной четверти рассмотренных случаев при втором типе – прохождении циклона, при этом в большинстве случаев при полярных вторжениях воздушных масс и при южном выносе. С «малоградиентным барическим полем» связано около 15 % случаев. В «тылу циклона» отмечалось 3,6 %, на «восточной периферии антициклона» – 2,2 %.

Синоптические условия, благоприятные для формирования снежных гроз над территорией Западной Сибири

Опасные явления погоды конвективного происхождения в зимний период являются малоизученными и сложно прогнозируемыми, особенно в условиях редкой сети климатических станций. Снежные грозы имеют мезомасштабный характер, большая роль в их возникновении принадлежит местным факторам, поэтому в целях повышения оправдываемости и заблаговременности прогноза необходимо проводить региональные исследования синоптических условий их формирования.

Снежная гроза наблюдалась в районе аэродрома Ханты-Мансийск 20 марта 2016 г. в 09.04, 13 марта 2017 г. – в 17.21, 7 марта 2019 г. – около 19.00. Длительность снежных гроз составила от 5 до 18 мин, они сопровождались шквалистым ветром с максимальным порывом ветра 23 м/с и сильным снегопадом с ухудшением видимости до 200 м.

При изучении аэросиноптического материала был выявлен ряд условий, которые прослеживались во всех трёх случаях грозы зимой [2]:

1. Грозы наблюдались при прохождении динамически значимых атмосферных фронтов: отмечался большой контраст не только в поле температуры, но и в поле влажности. В 2016 и 2019 гг. снежные грозы наблюдались при прохождении фронта окклюзии по типу холодного фронта, а в 2017 г. под влиянием вершины фронтальной волны;

2. В 2016 г. в слое от земли до высоты 1500 м с юга, юго-востока поступала влажная воздушная масса и одновременно в слое 1500–3000 м с юго-запада, запада и северо-запада поступала сухая воздушная масса. В 2017 и 2019 гг. перед фронтом в теплом секторе была влажная воздушная масса, а за фронтом – сухая;

3. Стратификация атмосферы была влажнонеустойчивой;

4. Район прогнозирования находился под влиянием струйного течения, на оси которого скорость ветра юго-западного и западного направлений достигала 30 м/с.

Необходимо отметить, что задерживающий слой – инверсия температуры отмечалась только в случае 2016 г. на высотах 1000–1500 м. При наличии задерживающего слоя выше пограничного образование мощных кучево-дождевых облаков и гроз происходит наиболее активно по типу «взрывной конвекции» [3].

Обязательным условием для возникновения грозового облака в любой период года является наличие условий для развития конвекции или иного механизма, создающего восходящие потоки, запасы влаги, достаточного для образования осадков, и наличие структуры, в котором часть облачных частиц будет находиться в жидком состоянии, а часть в ледяном. Такое возможно, если нижняя часть облака формировалась при температуре воздуха выше 0 ºС. В верхней части облака при попадании частиц воды в зону отрицательных температур постепенно формируются кристаллы льда. Смешанный состав облака приводит к укрупнению облачных элементов и формированию грозовой облачности.

Необходимо отметить, что в марте средняя многолетняя температура воздуха для аэродрома Ханты-Мансийск составляет –9,1 °С. В рассматриваемых случаях при прохождении фронта температура воздуха была близка +0 °С, т. е. отмечалась аномально теплая погода для начала весеннего периода в Западной Сибири. Можно сказать, что в условиях аномально прогретого воздуха в пограничном слое часть облака формировалась при положительных температурах и состояла из капель.

В рассматриваемых случаях конвекция, благодаря которой развилось грозовое облако, возникла при подъёме теплого воздуха вдоль линии фронта при адвекции арктического воздуха. Фронтальная конвекция развивалась одновременно со слоисто-дождевыми облаками и обложными осадками, что маскировало кучево-дождевую облачность.

Кроме конвективной неустойчивости воздуха, необходимым условием для развития грозового облака является ветер переменного направления. Осадки, образующиеся в восходящем потоке, переносятся по верхнему уровню облака в

зону нисходящего потока. Таким образом, зоны восходящего и нисходящего потоков оказываются разделёнными в пространстве, что обеспечивает развитие грозового облака.

Во всех трёх случаях в средней и верхней тропосфере преобладали сильные ветры с большим вертикальным сдвигом юго-западного и западного направлений, также район прогнозирования находился под влиянием мощного струйного течения вблизи тропопаузы. Наличие значительных сдвигов ветра по высотам и струйного течения явилось дополнительным фактором усиления активности атмосферного фронта и развитию конвективных движений по типу термически прямой циркуляции [4].

В рамках исследования аэросиноптического материала было выявлено, что для формирования интенсивной зимней конвекции необходимо наличие двух факторов: динамический подъем воздуха и большая конвективная неустойчивость атмосферы.

Динамический фактор обеспечивает подъём вверх тёплого влажного воздуха из нижней тропосферы. В рассматриваемых случаях данный фактор был обусловлен близким расположением центра циклона к району прогнозирования, его циклогенезом, обострением фронтов и их сближением. Это происходило при атмосферных фронтах с контрастами температур от 10 ºС и выше, разделяющих воздушные массы с различной влажностью: при прохождении фронта окклюзии и вблизи вершины фронтальной волны. Таким образом, динамический подъём усиливал конвективную неустойчивость воздушной массы.

Подводя итог, можно выделить следующие синоптические условия, совокупность которых приводит к образованию снежных гроз на территории Западной Сибири:

а) динамический подъем теплой влажной воздушной массы холодным воздухом при прохождении через район прогнозирования активного углубляющегося циклона, вершины фронтальной волны, динамически значимого холодного фронта или фронта окклюзии по типу холодного. При этом воздушная масса перед этими фронтами должна быть аномально теплой для пункта прогнозирования;

б) наличие мощного струйного течения, вертикальных сдвигов ветров юго-западных и западных направлений в средней и верхней тропосфере.

Необходимо обратить внимание, что наиболее информативными для прогноза снежной грозы является индексы неустойчивости атмосферы TOTAL и SWEAT. В дни со снежной грозой согласно индексу TOTAL прогнозировалась сильная неустойчивость (>49,2 °С), согласно индексу SWEAT прогнозировалась слабая неустойчивость.

Все вышеперечисленные условия формируют интенсивную зимнюю конвекцию, приводящую к редкому для территории Западной Сибири метеорологическому явлению – снежной грозе. Таким образом, настоящая работа объединяет широкий круг задач, решение которых ориентировано на региональные аспекты исследования конвективных процессов и улучшение качества их прогнозирования на территории Западной Сибири.

Список литературы

1. Изменения циклогенеза над Западной Сибирью в 1976–2017 гг. / В. П. Горбатенко, Е. Л. Тунаев, К. Н. Пустовалов, [и др.] // Фундаментальная и прикладная климатология. 2020. № 8. С. 35–57.

2. *Пряхина С. И., Котова А. А*. Синоптические условия формирования снежных гроз на территории Западной Сибири // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Науки о Земле. 2021. Т. 21, вып. 3. С. 160–168.

3. *Андреева Е. С.* Вероятностно-географический метод прогнозирования рисков возникновения сильных ветров для равнин юга России // Естественные и технические науки. 2008. Т. 4. С. 217–221.

4. Аномальные погодные явления в г. Иркутске в 2013/2014 гг. / И. В. Латышева, К. А. Лощенко, Е. В. Шахаева [и др.] // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земли. 2014. Т. 7. С. 84–99.

Секция

ОПАСНЫЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ И ПРОЦЕССЫ

УДК 504.422:504.062.2

Обеспечение гидрометеорологической безопасности на морских объектах добычи нефти и газа

Ю. В. Вашестюк (vashestyuk_yv@istu.edu)
Иркутский государственный университет, г. Иркутск
Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск

Аннотация. Статья посвящена вопросам обеспечения гидрометеорологической безопасности освоения и разработки месторождений нефти и газа, от которого в конечном счете зависит успешное бурение скважин и освоение месторождения в целом. В статье освещаются вопросы сбора и обобщения гидрометеорологической информации для обоснования инвестиций и проектирования сооружений, осуществляемых путем проведения инженерных гидрометеорологических изысканий. Дается информация о специализированном гидрометеорологическом обеспечении работы морских сооружений, включая транспортные операции. Обсуждается надежное определение параметров окружающей среды, которое является основой проектных решений, минимизирующих природные риски и во многих случаях, сводящих их практически к нулю. Акцентируется внимание на использовании данных, полученных на стационарной сети полярных станций, спутниковыми средствами наблюдений, автоматическими буйковых станциями, для обеспечения гидрометеорологической безопасности. Рассматривается изменения климата как фактор, требующий учета при проектировании и эксплуатации долговременных, сложных морских объектов.

Ключевые слова: гидрометеорологическая безопасность, морские объекты, добыча нефти и газа, опасные явления, изменения климата.

С увеличением объемов добычи нефти и газа с морских платформ, вопросы гидрометеорологической безопасности выходят на передний план. Морская среда обладает специфическими условиями, которые могут оказывать значительное влияние на безопасность как производственных процессов, так и экологическую ситуацию в регионе. Анализ обеспечения гидрометеорологической безопасности на морских объектах добычи нефти и газа является основной целью.

Гидрометеорологическая безопасность подразумевает защиту жизни и здоровья людей, а также сохранение окружающей среды и материальных ценностей от негативного воздействия атмосферных и гидрологических явлений [1]. Ключевыми факторами, определяющими гидрометеорологическую безопасность на морских объектах, являются:

– атмосферные явления: штормы, ураганы, туманы, осадки;

– гидрологические явления: приливы и отливы, волны, течения;

– совокупное влияние этих факторов на технологические процессы.

На морских объектах добычи нефти и газа гидрометеорологические условия могут создавать серьезные риски:

– штормовые условия: сильный ветер и высокие волны могут затруднить или сделать невозможным выполнение работ, повышая риск аварий;

– туманы и низкая видимость: это может затруднять навигацию, что ведет к возможным авариям и столкновениям;

приливы и отливы: резкие изменения уровня моря могут негативно сказаться на устойчивости платформ и их обслуживании;

ледовые явления. Сжатия льдов и их интенсивный дрейф, вторжение тяжёлых льдов в район добычи, раннее ледообразование, опасные ледовые образования (айсберги, торосы, стамухи, гигантские ледяные поля). Также к опасным явлениям относят обледенение сооружений, экзарацию дна ледовыми образованиями, навалы льда на берега и сооружения, отрывы припая.

Обеспечение гидрометеорологической безопасности на морских объектах подразумевает комплексный подход, включающий следующие меры:

Мониторинг и прогнозирование погодных условий. Для обеспечения гидрометеорологической безопасности используют стационарную сеть полярных станций, спутниковые средства наблюдений, автоматические буйковые станции. Установка современных метеорологических станций и систем мониторинга позволяет отслеживать актуальные изменения погодных условий и предсказывать потенциальные риски. В районах развития многолетнемерзлых грунтов процессы техногенного характера, связанные с деятельностью подземных вод, могут проявляться в разнообразных формах и процессах [2]. Опираясь на данные о ветре, волнах, тумане и других параметрах, можно заранее принимать меры для предотвращения аварий.

Разработка инструкций и регламентов. На основании анализа рисков разрабатываются инструкции по безопасности для работников морских объектов. Эти документы должны распространять знания о том, как действовать в условиях неблагоприятной погоды.

Обучение персонала. Работники морских объектов должны проходить регулярные тренинги по действиям в экстремальных гидрометеорологических условиях. Это включает в себя как теоретическую подготовку, так и практические занятия.

Использование технологий. Инновационные технологии, такие как дроны для мониторинга состояния морской среды и автономные метеорологические станции, значительно повышают уровень безопасности.

Координация с государственными органами. Эффективная работа по обеспечению гидрометеорологической безопасности невозможна без взаимодействия с государственными структурами, занимающимися метеорологическим прогнозированием и контролем за природными явлениями.

Обеспечение гидрометеорологической безопасности освоения и разработки месторождений включает два основных этапа. Первое – это сбор и обобщение гидрометеорологической информации, необходимой для обоснования инвестиций и проектирования сооружений путем проведения инженерных гидрометеорологических изысканий. Второе – это специализированное гидрометеорологическое обеспечение работы морских сооружений (платформ, терминалов и т. п.), включая транспортные операции [3].

Инженерные ледовые изыскания

Надежное определение параметров окружающей среды является основой проектных решений, которые минимизируют природные риски и во многих случаях сводят их практически к нулю. Подготовка необходимых данных включает обобщение и анализ исторических архивов наблюдений, производство инженерно-изыскательских работ, физическое, гидродинамическое и вероятностное моделирование процессов, разработку и создание нормативных документов для проектирования, основной из которых – Временные локальные технические условия (ВЛТУ) по природному блоку.

Для проведения зимних инженерных гидрометеорологических изысканий использовались различные морские (атомные и дизельные ледоколы, научно-экспедиционные и транспортные суда) и воздушные (самолеты, вертолеты) суда. Изыскания направлены, прежде всего, на определение прочностных параметров ледовых образований, их размеров и массы и скорости движения.

Традиционным способом определения прочностных свойств льда является испытание малых образцов льда, отобранных из ледяного покрова.

По мнению отечественных и зарубежных специалистов, одним из наиболее перспективных типов натурных экспериментов является измерение глобальных нагрузок на судно и последующий пересчет полученных результатов на сооружение.

Торосистые нагромождения образуются в дрейфующих льдах и припае. Размер килей гряд торосов на дрейфующих льдах шельфа российских замерзающих морей находится в диапазоне от 3 до 25 м. Геометрия надводной части отдельного тороса или стамухи определяется с помощью простых теодолитных съемок, с использованием аэрофотосъемки и лазерного профилирования. Последние два метода позволяют получить пространственно распределенные данные, необходимые для расчета статистик и таких характеристик, как торосистость, протяженность гряд торосов и т. п.

Нижняя часть торосов, их осадка, килевая часть измеряются с помощью обратных доплеровских сонаров, которые устанавливаются на дне на продолжительный период (год и более), а также с помощью подводных видеосъемок.

Для получения информации о внутреннем строении ледяных образований обычно используется тепловое бурение, при котором для эффективного и быстрого получения глубоких скважин используется горячая вода.

Для получения данных о скорости движения льдов применяются дрейфующие буи, которые устанавливаются на ледяных поля и айсбергах. Используются различные навигационные системы, такие как ARGOS. Количество буёв определяется особенностями ледовых условий и составляет от нескольких единиц до нескольких десятков.

Специализированное гидрометеорологическое обеспечение

В случаях, когда невозможно спроектировать сооружения, способные выдержать максимальные ледовые нагрузки и угрозы, необходима система организационно-технических мероприятий, направленных на предотвращение аварий-

ных ситуаций – управление ледовой обстановкой (УЛО). Такая ситуация характерна для района Штокмановского ГКМ, где возможны айсберги массой более 4 млн т.

УЛО включает в себя обнаружение и отслеживание айсбергов и других опасных ледяных образований, прогнозирование траекторий их движения, определение степени риска для сооружения, принятие решения по физическому воздействию на опасный объект с целью предотвращения его проникновения в зону возможного контакта с сооружением.

Обнаружение айсбергов, мониторинг их динамики, прогноз траекторий движения является частью системы специализированного гидрометеорологического обеспечения (СГМО) района добычи и транспортировки углеводородов. Структура и виды информации в СГМО имеют свою специфику в зависимости от района и видов деятельности. Как правило, это обеспечение работы собственно платформы или терминала, операций по отгрузке углеводородов и морская транспортировка.

В настоящее время гидрометеорологическое обеспечение морской деятельности представляет собой сложную информационную систему, которая базируется на современных системах наблюдений, передачи и обработки информации, анализа и прогнозирования гидрометеорологических условий. Стационарная сеть полярных станций является основным источником гидрометеорологической информации, и за последние годы выполнен большой комплекс работ по их модернизации и обновлению.

Спутниковые средства наблюдений являются основным, а в подавляющем большинстве случаев, единственным источником информации о состоянии арктического ледяного покрова. В настоящее время в России для ледово-информационного обеспечения морской деятельности используются спутниковые данные зарубежных космических аппаратов (КА) NOAA, Terra, Aqua, RADARSAT, Envisat и лишь одного отечественного КА Метеор-М. Россия на 98 % находится в зависимости от зарубежных источников спутниковой информации.

Поручением Совета Безопасности Российской Федерации от 17 марта 2010 г. планируется создание российской, первой в мире высокоэллиптической гидрометеорологической многоцелевой космической системы (МКС) «Арктика» для мониторинга обстановки в северных полярных районах в интересах обеспечения безопасности трансарктических перелетов, навигации на СМП, хозяйственной деятельности на арктическом шельфе, а также для изучения климата [5].

КА **«Арктика-М»** – высокоэллиптическая гидрометеорологическая космическая система, разработанная в АО «НПО им. С. А. Лавочкина» (Госкорпорация «Роскосмос») при участии специалистов Московского опытно-конструкторского бюро «Марс» (входит в Госкорпорацию «Росатом»).

Цель системы – круглосуточное информационное обеспечение задач оперативной гидрометеорологии, экологии, информационного обеспечения хозяйственной деятельности и мониторинга окружающей среды на всей территории Арктики, включая акватории Северного ледовитого океана и прибрежные регионы.

Задачи системы: мониторинг поверхности и облачности Земли и морей в Арктическом регионе и на прилегающих территориях, а также постоянный и надёжный обмен метеорологической информацией. Аппаратура спутников используется для определения местоположения судов, самолётов и других подвижных объектов, терпящих бедствие, в рамках международной спутниковой системы поиска и спасания «КОСПАС-САРСАТ».

В мае 2023 г. Госкорпорация «Роскосмос» и НПО Лавочкина заключили государственный контракт на модернизацию системы «Арктика-М» для увеличения её орбитальной группировки до четырёх космических аппаратов. Создание и запуск спутников «Арктика-М» № 3, 4, 5 и 6 намечаются до 2031 г. Это позволит вдвое сократить периодичность съемки полярной области и производить наблюдения требуемого района с разных ракурсов, а также детализировать сверхкраткосрочные прогнозы погоды, повысить оперативность обнаружения и мониторинга опасных природных явлений и чрезвычайных ситуаций и увеличить точность выделения облаков над снежным и ледовым покровами и определения их характеристик в арктическом регионе и на прилегающих территориях.

«Арктика-М» построен на базе платформы «Навигатор». Его масса составляет 2100 кг. Аппаратура, размещённая на спутнике, практически совпадает с аппаратами серии «Электро-Л». Полезная нагрузка состоит из:

- многозонального сканирующего устройства гидрометеорологического обеспечения (МСУ-ГС) – обеспечивает получение изображений облачного слоя и поверхности Земли. Работает в инфракрасном и видимых диапазонах;
- гелиогеофизического аппаратурного комплекса (ГГАК-ВЭ);
- аппаратуры передачи данных между наземными метеорологическими станциями;
- аппаратуры системы «Коспас-Сарсат» для ретрансляции сигналов от аварийных буев.

Ежегодно выпускается более 12 тысяч метеорологических и гидрологических краткосрочных прогнозов общего пользования по различным акваториям арктических морей и около 400 краткосрочных прогнозов по акваториям портов со средней оправдываемостью 95–97 %, что соответствует уровню прогнозирования ведущих зарубежных центров [4].

В течение последних 5 лет все наблюдаемые опасные гидрометеорологические явления для морской деятельности были спрогнозированы и штормовые предупреждения своевременно переданы заинтересованным организациям, что позволило сократить потери и ущербы по погодным условиям.

Для обеспечения ледового плавания необходимой гидрометеорологической информацией в ААНИИ был разработан адаптируемый комплекс мониторинга и прогнозирования состояния атмосферы и гидросферы (АКМОН), позволяющий адаптировать технологический процесс мониторинга природной среды к региональным физико-географическим условиям и специфическим запросам потребителя, необходимым для повышения безопасности и эффективности морской деятельности в арктических морях России. Комплекс состоит из базового

модуля, размещенного в информационном центре, и удаленных модулей. Базовый модуль обеспечивает сбор, обработку и анализ данных, разработку информационной продукции и, ее доведение до конечного потребителя. Удаленные модули, размещаемые на судах, ледоколах, платформах и терминалах, обеспечивают визуализацию метеорологической, ледовой и океанологической информации и ее совмещение с электронными навигационными картами.

АКМОН – это ледовый навигатор, который включает, наряду с ледовой, и другую информацию (ветер, волнение, приливы, течения и др.). В настоящее время комплекс АКМОН успешно эксплуатируется для обеспечения морских транспортных систем ГМК «Норильский никель» в Карском море, Варандейского терминала в Печорском море, Сахалин-1 в Татарском проливе.

Обеспечение гидрометеорологической безопасности на морских объектах добычи нефти и газа представляет собой важную задачу, которая требует комплексного подхода. Необходимость постоянного мониторинга, анализа рисков и эффективного обучения персонала определяет ключевые элементы в системе безопасности. Применение современных технологий и уделение должного внимания подготовке специалистов способны минимизировать риски и обеспечить не только безопасность работников, но и защиту окружающей среды. В современных условиях, когда морская добыча углеводородов затрагивает экосистемы и здоровье людей, это становится особенно актуальным.

Список литературы

1. *Абузяров З. К., Думанская И. О., Нестеров Е. С.* Оперативное океанографическое обслуживание. М. : Обнинск : ИГ-СОЦИН, 2009. 288 с.

2. *Вашестюк Ю. В.* Перспективные направления снижения техногенного влияния горного производства на подземную гидросферу // Подземная гидросфера : материалы Всерос. совещания по подземным водам Востока России (XXIV совещание по подземным водам востока Сибири и Дальнего Востока с междунар. участием). Екатеринбург, 21–28 июня 2024 г. Екатеринбург, 2024. С. 481–486.

3. *Комчатов В. Ф., Ктиторова Е. Н. Лукьянов Ю. С.* Основные направления и перспективы гидрометеорологического обеспечения морской деятельности // Труды ГОИН. 2008. Вып. 211. С. 31–42

4. *Нестеров Е. С.* Оперативное гидрометеорологическое обеспечение деятельности на морях России // Труды ГОИН. 2013. Вып. 214. С. 305–316.

5. *Фролов А. В.* О развитии гидрометеорологического обеспечения морской деятельности России // Теория и практика морской деятельности. Вып. 7. М. : СОПС, 2006. С. 25–35.

УДК 556.535

Оценка влияния рек Санги Южной и Ингоды на мостовой переход в с. Хадакта

И. П. Груздев (ilish.01@mail.ru)
Иркутский государственный университет, г. Иркутск

Аннотация. Объектом исследования является р. Санга Южная и ее левый приток – р. Ингода, которая способна оказывать влияние на мостовой переход, находящийся в с. Хадакта во время прохождения дождевых паводков в летне-осенний период и образования наледи в зимне-весенний период. Отдельного внимания при оценке влияния гидрологических объектов требуют две некапитальные плотины, расположенные на р. Санге Южной выше данного мостового перехода и находящиеся в неудовлетворительном состоянии. Река Ингода расположена в 1,7 км южного направления относительно исследуемого мостового перехода. Во время дождевых паводков уровень воды р. Ингоды поднимается и затапливает населенные пункты, расположенные в ее пойме. Цель исследования – анализ режима рек Санги Южной и Ингоды. В результате работы необходимо оценить влияние этих рек на исследуемый мостовой переход.

Ключевые слова: р. Санга Южная, р. Ингода, мостовой переход

Гидрологический режим района исследования

В административном отношении исследуемый мостовой переход расположен в Улетовском районе Забайкальского края России. Мост находится у с. Хадакта, в северо-восточной части района на расстоянии 6,5 км (по прямой) на северо-восток от с. Улёты.

Водотоки района исследований относятся к Ингодинскому лесостепному подрайону Ингодино-Ага-Борзинского гидрологического района. Для рек рассматриваемого района характерны чередования резких подъемов и спадов уровней в теплую часть года (паводочный режим), низкая в летне-осенний период и устойчивая в холодное полугодие межень. Водотоки данного района принадлежат к типу рек с преобладанием дождевых максимумов [3].

Описание ближайших водотоков исследуемого участка

Река Санга Южная

Река Санга Южная – левый приток первого порядка р. Ингоды. Берет свое начало на высоте 1160 м БС. Площадь водосбора 115 км^2, длина реки 32,5 км, уклон реки 14,5 ‰. Площадь водосбора до створа исследуемого моста 114 км^2, длина реки 30,6 км, уклон 14,7 ‰. Долина реки трапецеидальная. Левый склон долины холмистый, правый пологий. Пойма пологая, местами достигает 0,15 км в ширину. Ниже проектируемого мостового перехода техногенно нарушена. По всей пойме произрастает луговая и редкая кустарниковая растительность. Русло реки извилистое. В среднем имеет ширину 3 м, в створе исследуемого мостового перехода ширина русла 27 м. Глубина на плесах достигает 0,6–0,7 м. Дно сложено илом, местами галечником. По дну частично произрастают водоросли. Береговые очертания прослеживаемые, сложены глинистыми и суглинистыми

грунтами. Высота берегов может достигать до 2,0 м от дна реки. На р. Санге Южной, выше мостового перехода в 11,6 км и в 13,2 км, расположены два водохранилища, созданные для орошения сельскохозяйственных угодий. В зимний период в районе мостового перехода река перемерзает до дна, в связи с чем образуются ежегодные наледи мощностью до 1,84 м. Наледь образуется под мостом и распространяется ниже по течению до устья Санги Южной. В течение года на реке наблюдается сток. На рис. 1 представлена р. Санга Южная и исследуемый мостовой переход.

Рис. 1. Исследуемый мостовой переход через р. Санга Южная (вид вниз по течению)

Река Ингода

Река Ингода – левый приток первого порядка р. Шилки. Берет свое начало в хребте Хэнтэй. Площадь водосбора реки равна 37 200 км^2, длина – 708 км. В районе устья р. Санги Южной долина р. Ингоды трапецеидальная. Склоны долины представлены хребтами, изрезаны горными реками и ручьями. На левой пойме Ингоды расположена д. Хадакта. Левая пойма достигает 1 км в ширину. Правая пойма частично закочкована, имеет ширину до 6 км. Растительность по всей пойме представлена травянистой (местами увлаженной) и кустарниковой растительностью. Русло реки извилистое. На данном водном объекте наблюдается пойменная многорукавность, имеется множество проток различной ширины и глубины. Основное русло в период паводков достигает в ширину 100 м. Глубина на момент исследований на плесах достигала 4 м. Дно частично сложено илом и песком, местами галечником. Береговые очертания хорошо прослеживаются. На излучинах наблюдаются побочни и подмывы берегов. На рис. 2 представлено основное русло р. Ингоды в районе участка исследований.

Рис. 2. Основное русло р. Ингода в районе участка исследований (вид вниз по течению)

Плотины на р. Санга Южная

Выше исследуемого мостового перехода на р. Санге Южной расположены две некапитальные плотины. Первая плотина расположена в 13,2 км выше по течению оси проектируемого мостового перехода, вторая – на расстоянии 11,6 км от оси трассы. Земляные плотины построены в 1960–1970 гг. Плотины водохранилищ отсыпаны из суглинистого грунта. В правой части плотины № 2 имеются участки обрушения от подмыва тела плотины волновыми процессами, которые намного снижают ее устойчивость. В правой части плотины № 2 имеется промоина. На основании данных обследования сделано заключение о возможности прорыва обеих плотин. На рис. 3 представлена промоина в правой части нижней плотины.

Рис. 3. Размыв плотины № 2 (вид вниз по течению)

Русловой процесс

Наблюдения за русловыми деформациями на участке исследования никогда не проводились. Русловые очертания р. Санги Южной прослеживаются на протяжении всей реки. На данном водотоке наблюдается меандрирование. В районе исследуемого мостового перехода меандрирование выражено слабее. Береговые очертания выражены явно.

Русловой процесс на р. Ингоде представлен пойменной многорукавностью. Береговые очертания реки выражены явно. Русловые процессы не способны негативно повлиять на объект изысканий, поскольку левый берег и левая пойма Ингоды на участке изысканий застроена (с. Хадакта).

Методы расчета гидрологических характеристик

Гидрометеорологические работы выполнены в соответствии с наставлениями, руководящими документами и методическими указаниями Росгидромета, регламентирующими методы производства данных видов работ.

Расчет стоковых характеристик

Весеннее половодье

Расчетный максимальный расход воды весеннего половодья $Q_{P\,\%}$ заданный ежегодной вероятностью превышения Р % для водных объектов на участке исследований определялся согласно СП 33-101-2003 [5] и «Пособия по определению расчетных гидрологических характеристик» [1] по редукционной формуле:

$$Q_{P\,\%} = K_0 h_{p\,\%} \mu\delta\ \delta_1\delta_2 A/(A+A_1)^n \quad (1)$$

Дождевые паводки

Расчеты максимальных расходов воды дождевого паводка для р. Санга Южная производились по формуле предельной интенсивности стока:

$$Q_{p\,\%} = q_{1\,\%}\varphi H_{1\,\%}\delta\lambda_{p\,\%}A \quad (2)$$

Максимальный расход воды дождевых паводков р. Ингода рассчитывался согласно СП 33-101-2003 по расчетной формуле типа I (редукционной) с использованием стоковых характеристик реки-аналога (гидрологический пост р. Ингода – с. Улеты).

$$Q_{p\,\%}=q_{aP\,\%}(\delta\delta_2/\delta_a\delta_{2a})(A_a/A)^n A \quad (3)$$

Расчет параметров наледи

Расчет максимальной толщины наледи заданной вероятностью превышения Р % осуществляется в соответствии с пунктом 3. 9 «Руководства по проектированию, строительству и эксплуатации искусственных сооружений автомобильных дорог на водотоках с наледями» [4] по формуле:

$$Z_{max\,P} = \gamma_n Z_{max\,u} k_x k_f k_n \quad (4)$$

Расчет прорыва плотины

Расчет максимальных расходов при прорыве плотины производился согласно ПМП-91 по формуле [2].

$$Q_{nM}=((\Sigma^{n}{}_{1}W_0+W_{p\,\%})Q_{\Pi n})/((\Sigma^{n}{}_{1}W_0+W_{p\,\%})^{0,14}+\varphi Q_{\Pi n}l_H \quad (5)$$

Расчет уровенных характеристик

После получения максимальных расходов воды были получены максимальные уровни соответствующих обеспеченностей. Для расчета максимальных уровней воды было использовано ПО Кредо «Морфоствор». Расчетные максимальные уровни воды определялись по кривым $Q=f(H)$ через расходы воды $Q_{1\,\%}$.

Построение кривых расходов осуществлялось с помощью формулы:

$$Q = \omega/n*h^{2/3}I^{1/2} \quad (6)$$

На рис. 4 представлена карта-схема расположения проток и морфостворов.

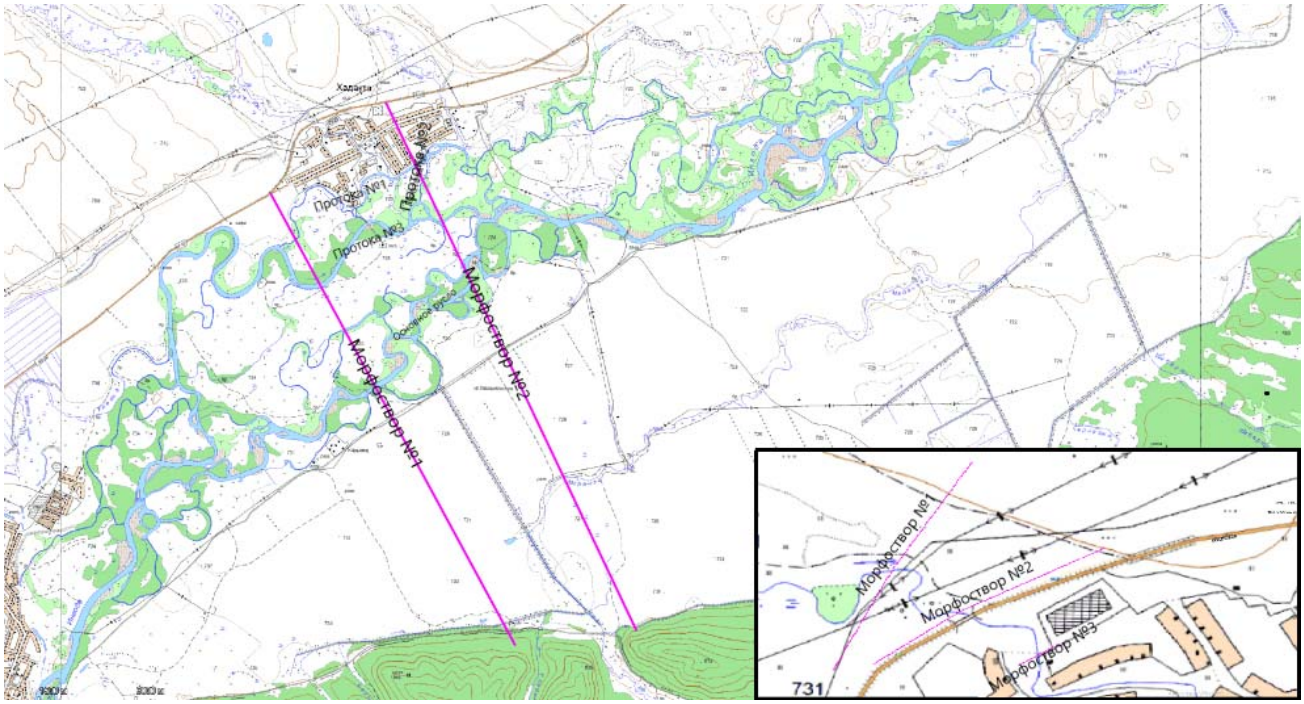


Рис. 4. Карта-схема расположения проток и морфостворов

Расчет эрозии берегов

На р. Санга Южная русловой процесс представлен свободным меандрированием, в районе исследуемого мостового перехода оно более ограничено. Берега реки частично сложены суглинистыми отложениями и местами достигают в высоту до 2,0 м от дна реки. В связи с этим берега данного водотока подвержены размыву водным потоком. Для определения скорости размыва берегов был произведен анализ 6 космоснимков, взятых в ПО Google Earth за разные годы (2003, 2004, 2016, 2017, 2019, 2021). Данные космоснимки были совмещены в ПО AutoCad. Сравнение производилось только для космоснимков, снятых в летний период, поскольку во время дождевых паводков данный водоток не выходит на пойму. Средняя скорость размыва получена путем деления площади размыва берега на длину фронта размыва и период расчета.

Результаты расчета гидрологических характеристик рек Санги Южной и Ингоды

В ходе комплекса выполненных гидрологических работ были получены: максимальные расходы и уровни воды различных обеспеченностей, наледь 1 % и 2 % обеспеченности. Отметки мостового перехода, его конструктивов, дорожного полотна, а также ближайшей территории были получены путем геодезической съемки GNSS приемниками. Также на космический снимок Google нанесена зона затопления р. Санги Южной в створе исследуемого мостового перехода. Были совмещены космоснимки за разные годы с оцифрованным руслом и проанализирован процесс переработки берегов.

В табл. 1–3 представлены результаты расчетов.

Таблица 1

Обеспеченные максимальные расходы воды рек Санги Южной и Ингоды

Характеристика и название водотока	Площадь водосбора A, км^2	Максимальные расходы воды Q, м^3/с												
		Дождевые паводки					Весеннее половодье					Прорыв плотины		
		Обеспеченность P, %					Обеспеченность P, %					Обеспеченность P, %		
		1	2	3	5	10	1	2	3	5	10	1	2	10
Санга Южная (створ мостового перехода)	114	70,8	61,6	56,6	49,6	39,6	5,5	4,8	4,3	3,8	3,1	410	370	268
Ингода (створ устья р. Санги Южной)	13209	1944	1717	1593	1427	1179	1204	1106	1041	944	846	–	–	–

На реках Санге Южной и Ингоде преобладает дождевой паводок над весенним половодьем. Согласно произведенным расчетам максимальными расходами воды являются расходы при прорыве плотины.

Таблица 2

Рассчитанная максимальная толщина наледи на р. Санге Южной

Название водотока	Толщина наледи, м	
	Обеспеченность Р, %	
	1	2
р. Санга Южная (створ мостового перехода)	3,23	2,92

Максимальная толщина наледи обеспеченностью 1 % в створе мостового перехода равняется 3,23 м. Расстояния от дна до перекрытия мостового перехода (нижняя отметка балки) равняется 3,50 м.

Максимальными являются уровни воды во время прохождения весеннего половодья по наледи. Следующими по высоте являются уровни прорыва плотины, а далее дождевого паводка.

Таблица 3

Рассчитанные обеспеченные уровни воды р. Санги Южной и р. Ингоды

Характеристика и название водотока	Площадь водосбора А, км^2	Максимальные уровни воды Q, м^3/с								
		Дождевые паводки			Весеннее половодье по наледи			Прорыв плотины		
		Обеспеченность Р, %								
		1	2	10	1	2	10	1	2	10
р. Санга Южная – МС1 (выше мостового перехода в 0,42 км)	114	732,02	731,96	731,75	733,59	733,59	733,57	733,16	733,07	732,82
р. Санга Южная – МС2 (выше мостового перехода в 0,06 км)	114	731,01	730,95	730,75	732,23	732,23	732,22	731,95	731,88	731,67
р. Санга Южная – МС3 (ниже мостового перехода в 0,26 км)	114	729,81	729,73	729,53	731,51	731,51	731,49	731,22	731,10	730,77
р. Ингода – МС1 (выше устья р. Санги Южной в (3,09 км)	13209	729,04	728,93	728,61	–	–	–	–	–	–
р. Ингода – МС1 (ниже устья р. Санги Южной в (0,24 км)	13209	726,38	726,27	725,98	–	–	–	–	–	–

Для р. Ингоды расчет максимальных уровней воды производился только для дождевых паводков, поскольку данная фаза является лимитирующей на данном водотоке. Разность высот между перекрытия створа мостового перехода и максимальным уровнем воды дождевого паводка 1 % обеспеченности на р. Ингоде в данном створе равна более 5 м, что исключает возможность затопления мостового перехода данных водотоком.

Нанесенные зоны затопления от р. Санги Южной, представленные на рис. 5–6, были отображены для створа мостового перехода и в 50 м выше и ниже по течению от данного моста. Для р. Ингоды зоны затопления представлены на рис. 7–8.

Таким образом, р. Санга Южная не способна затапливать мостовой переход. Максимальный уровень воды весеннего половодья по наледи ниже перекрытия данного моста на 10 см. Прорывные и паводковые расходы также не способны затапливать мостовой переход. Разница отметок между максимальным уровнем воды р. Ингода обеспеченностью 1 % во время прохождения дождевых паводков и низшей отметкой перекрытия мостового перехода более 5 м.

Рис. 5. Зона затопления от р. Санги Южной при прохождении дождевого паводка 1 % обеспеченности в районе мостового перехода

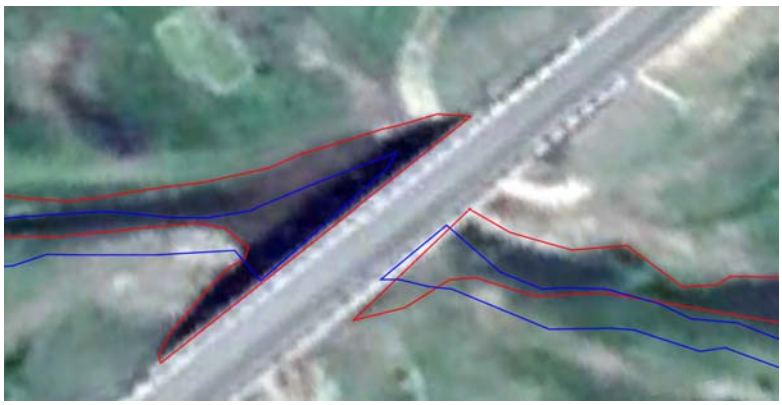
Рис. 6. Зона затопления от р. Санги Южной при прохождении весеннего половодья по наледи 1 % обеспеченности в районе мостового перехода

Рис. 7. Зона затопления от р. Санги Южной при прохождении прорыве плотины 1 % обеспеченности в районе мостового перехода

На рис. 9 представлен результат анализа космических снимков с расчетом эрозии берегов. В качестве подложки был использован космоснимок за 03.08.2017.

В табл. 4 представлен результаты расчета размыва берегов р. Санги Южной.

Рис. 8. Зона затопления от р. Ингоды при прохождении дождевых паводков 1 % обеспеченности в районе с. Хадакта



– *Русло р. Санга Южная в 2004 г.*
– *Русло р. Санга Южная в 2017 г.*

Рис. 9. Результат оцифровки русла р. Санги Южной на совмещенных космоснимках

Таблица 4

Результаты расчета размыва берегов р. Санги Южной

Берег	Размыв, м/год	
	Максимальный	Средний
Левый	1,3	0,16
Правый	1,2	0,16

Максимальный размыв левого берега равен 1,3 м в год, размыв правого берега 1,2 м в год. Средняя скорость размыва берегов равняется 0,16 м/год.

Список литературы

1. Пособие по определению расчетных гидрологических характеристик / сост. А. В. Рождественский. Л. : Гидрометеорол. изд-во, 1984. 247 с.

2. ПМП-91. Пособие к СНИП 2.05.03–84 «Мосты и трубы» по изысканиям и проектированию железнодорожных и автодорожных мостовых переходов через водотоки : в дополнение и развитие СНиП 2.05.03–84 «Мосты и трубы» : дата введения 1992-01-01. М. : Трансстрой, 1992. 425 с.

3. Ресурсы поверхностных вод / сост. А. П. Муранов. Л. : Гидрометеорол. изд-во, 1966. Т. 18, вып. 1. 745 с.

4. Руководство по проектированию, строительству и эксплуатации искусственных сооружений автомобильных дорог на водотоках с наледями: дата введения 1988-06-03. М. : Транспорт, 1978. 61 с.

5. СП 33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик : приказ Госстроя России № 218 от 26 дек. 2003 г : взамен СНиП 2.01.14-83: дата введения 2004-01-01. М. : Госстрой России, 2004. 73 с.

УДК 551.509.32(004.9)

Оценка риска формирования интенсивных конвективных процессов и сопутствующих им опасных явлений на европейской территории России: концепция построения автоматизированной технологии

О. В. Калмыкова (kov@feerc.ru), А. А. Спрыгин (sprygin@rpatyphoon.ru), С. В. Козлов (kozlov-sv@rpatyphoon.ru), А. Е. Вязилов (vyazilov@rpatyphoon.ru), Л. Х. Ингель (lev.ingel@gmail.com), Л. К. Кулижникова (kulizhnikova@rpatyphoon.ru)

Научно-производственное объединение «Тайфун», г. Обнинск

Аннотация. Отмечаемый в настоящее время рост частоты и интенсивности проявления опасных природных процессов и явлений обусловливает потребность в разработке новых решений по заблаговременному оповещению об опасности их возникновения с высокой степенью детализации во времени и в пространстве. Рассматривается общая концепция построения автоматизированной технологии мониторинга и предупреждения о возможных угрозах, связанных с системами глубокой конвекции и порождаемыми ими опасными конвективными явлениями для европейской территории России в теплый период года. Дается описание предлагаемого к использованию подхода к распознаванию специальных паттернов (сигнатур) интенсивных конвективных процессов, проявляющихся в данных дистанционных наблюдений, а также схемы построения базы данных состояний систем глубокой конвекции, оцениваемых по всему комплексу доступных данных метеонаблюдений и численного моделирования для накопления историй их развития. Приводится информация о работе реализованного прототипа технологии в теплый период 2024 г.

Ключевые слова: интенсивные конвективные процессы в атмосфере, опасные конвективные явления, прогноз, технология, сигнатуры, специализированная база данных, данные дистанционных наблюдений, численное моделирование, прототип.

Введение

На европейской территории России (ЕТР) наивысшая активность конвекции с регистрацией опасных конвективных явлений (ОКЯ), как правило, приходится на период с мая по сентябрь, иногда вплоть и до октября. С каждым годом число ОКЯ постепенно увеличивается. По информации из европейской базы данных ESWD, куда заносятся сведения очевидцев, в 2024 г. на ЕТР отмечалось около 2900 случаев ОКЯ [7]. Чаще всего регистрировался крупный град диаметром более 2 см (56 %), сильный ветер или шквал (37 %), примерно в равной степени смерчи и опасные удары молний (по 4 %). По официальным данным с метеостанций в указанный период было зафиксировано около 1400 ОКЯ, из них преимущественно сильные ливни (90 %), значительно реже крупный град (5 %), шквалы (3 %), сильные грозы (2 %) и смерчи (0,2 %) [1].

Для снижения возможного негативного ущерба от прохождения ОКЯ необходимо заблаговременно оповещать о возможных рисках, связанных с их формированием. В структуре Росгидромета эту задачу решают специализированные

территориальные управления (УГМС), которые выдают штормовые предупреждения. Как правило, подобные предупреждения имеют достаточно большой разброс по времени с указанием периодов, охватывающих целые сутки и более, и относятся к достаточно большим территориям масштаба субъектов РФ. При этом интенсивные конвективные процессы, порождающие системы глубокой конвекции с ОКЯ, достаточно локализированы в пространстве и во времени, в некоторых случаях они возникают взрывным образом, а нередко могут быть и быстротечными. По этой причине возникает потребность в разработке новых решений, которые позволили бы уточнять штормовые предупреждения, как во времени, так и по пространству.

Решение данной задачи видится в использовании объектно-ориентированного подхода к рассмотрению конвективных систем. Каждая система может быть представлена в виде сложного объекта, описываемого набором состояний на основе доступных данных метеонаблюдений и численного моделирования. Для прогноза угроз возникновения ОКЯ необходимо в первую очередь выделить те объекты, которые связаны с системами глубокой конвекции. Анализ динамики их развития позволит оценить ожидаемые периоды формирования ОКЯ. Предполагается, что в таком режиме предельная заблаговременность оповещения о возможных угрозах, связанных с конкретной системой, сможет доходить до 2 ч, а охват зон возможного воздействия ОКЯ будет определяться прогнозируемым положением систем по мере их перемещения. Таким образом, за счет объектно-ориентированного подхода представляется возможным существенно детализировать предупреждения об ОКЯ.

Сигнатуры интенсивных конвективных процессов

Интенсивные конвективные процессы могут быть выявлены по характерным диагностическим признакам – паттернам (сигнатурам), проявляющимся в структуре данных дистанционных наблюдений, прежде всего радиолокационных, спутниковых и грозопеленгационных наблюдений. Природа некоторых сигнатур до сих пор не изучена, а возможности их распознавания в большей степени определяются используемым разрешением исходных данных. Тем не менее, идентификация сигнатур в границах конвективных систем может служить очевидным признаком их отнесения к классу систем глубокой конвекции. Важно отметить, что по результатам некоторых зарубежных исследований, установлена статистическая связь наблюдаемых сигнатур с регистрацией ОКЯ, по этой причине во многих странах, прежде всего в США и в Европе они используются в оперативной практике [4]. В России использование сигнатур для прогноза ОКЯ пока находится в стадии проработки, и в этом подходе авторы видят большие перспективы. Далее предлагается рассмотреть наиболее широко известные сигнатуры, сгруппированные по типу данных. В таблице даны краткие сведения по наиболее известным сигнатурам, а на рис. 1–3 примеры их проявлений на ЕТР.

Таблица 1

Сигнатуры интенсивных конвективных процессов

Название	Описание	Тип системы и возможные ОКЯ
Радарные сигнатуры		
Hook Echo	Крючкообразный изгиб радиоэха на нижнем уровне	Суперячейка: шквал, смерч, крупный град, сильный ливень
Bounded Weak Echo Region (BWER)	Ограниченная область слабой отражаемости в слое, связанная с мезоциклоном	
Mesocyclone	Область сочетания приходящего/уходящего по отношению к локатору потока на нижнем и среднем уровнях	
Forward Flank Notch	V-образная форма радиоэха на среднем уровне	
Anomalous Storm Propagation	Перемещение системы в направлении, отличном от направления ведущего потока	
Weak Echo Region (WER)	Наклонная область радиоэха с резкими границами высоких и низких значений отражаемости в некотором слое	Система с явно выраженным восходящим потоком: сильные ветра, крупный град
Convergence	Конвергенция воздуха в приземном слое	
Divergence	Дивергенция воздуха вблизи вершины шторма	
Bow Echo	Дугообразный изгиб радиоэха	Квазилинейная система большого масштаба: усиление ветра, шквал, иногда смерч
Three Body Scatter Spike (TBSS)	«Шип» низких значений отражаемости, преимущественно для локаторов S-диапазона	Градовый шторм: в первую очередь крупный град
50 dBZ Echo Top	Максимальная высота уровня 50 dBZ и более	
Tight Reflectivity Gradient	Область резких градиентов отражаемости на нижнем уровне	
Спутниковые сигнатуры		
Overshooting Top (OT)	Куполообразная вершина облака, пробивающая тропопаузу	Система с явно выраженным восходящим потоком: весь комплекс ОКЯ
Cold-U/V/Ring	U/V/кольцо-образная холодная область	
Warm Area	Более теплая область, окружающая OT	
Internal Gravity Wave (IGW)	Внутренние гравитационные волны различной формы	
Above Anvil Cirrus Plumes (AACP)	Перьеобразные выбросы над наковальней	
Radial Cirrus (RC)	Радиально распространяемые перистые выбросы наковальни в виде лучей	
Сигнатуры молниевой активности		
Lightning Jump (LJ)	Резкий рост числа регистрируемых разрядов	Система с явно выраженным восходящим потоком: весь комплекс ОКЯ
Lightning Dive (LD)	Резкое снижение числа регистрируемых разрядов	Суперячейка: в первую очередь смерч

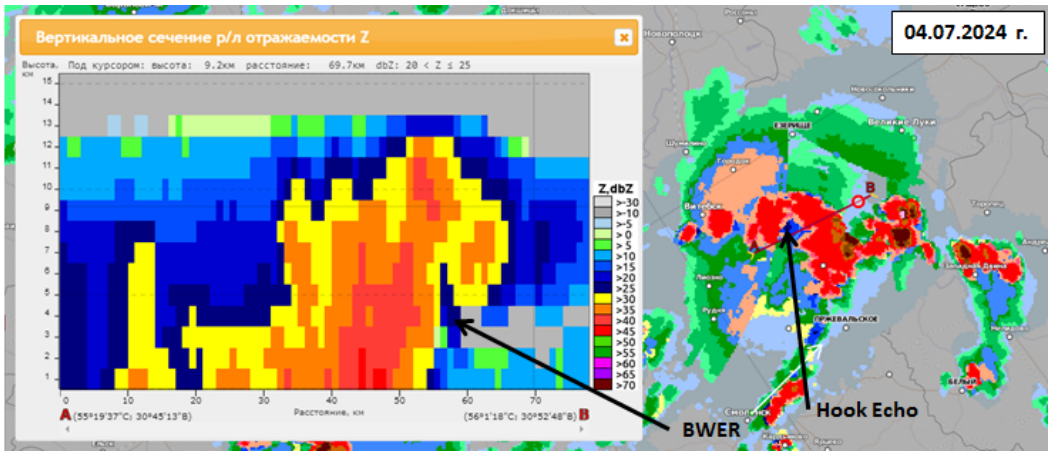


Рис. 1. Радарные сигнатуры суперячейки, прошедшей по территории северо-западного федерального округа 4 июля 2024 г. (веб-ГИС «Метеорад»)

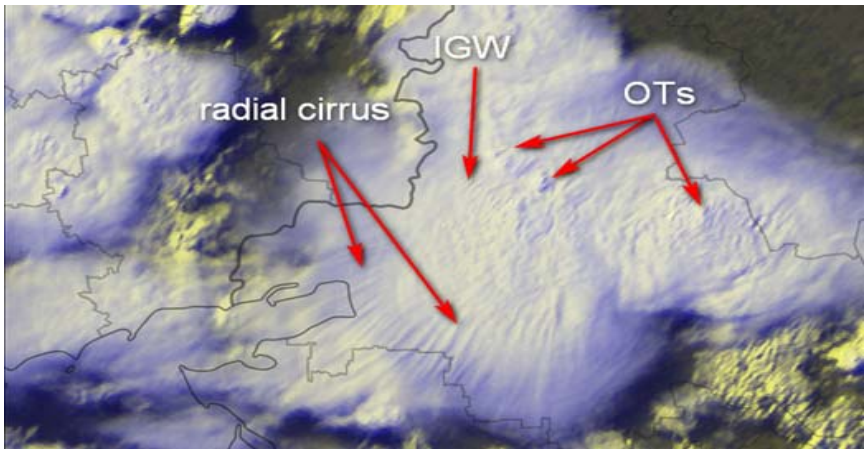


Рис. 2. Спутниковые сигнатуры градового шторма в Ростовской области 14.06.2020. (Meteosat, видимый диапазон)

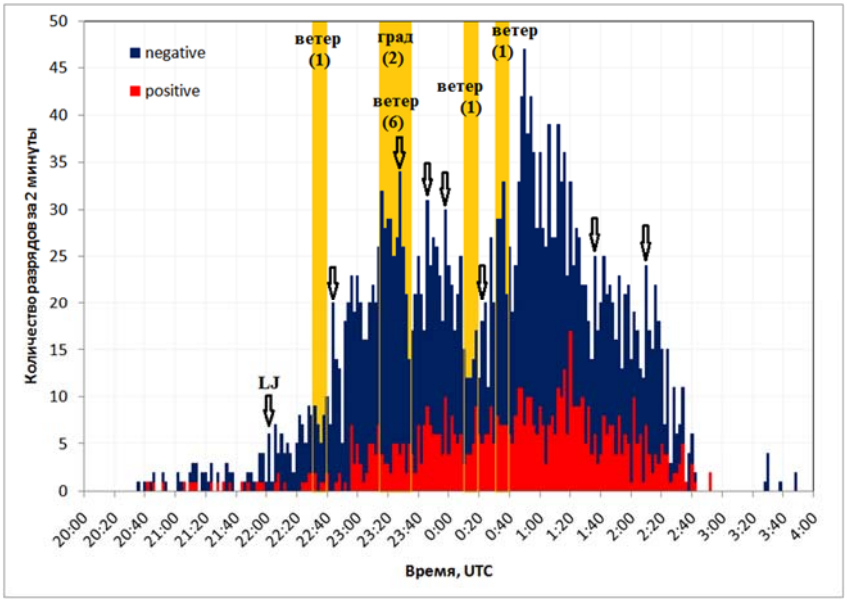


Рис. 3. Динамика во времени количества молниевых разрядов для мощного шторма, прошедшего по западу ЕТР 18–19.05.2021 г. с указанием случаев выявления сигнатуры LJ и моментов регистрации различных ОКЯ

Радарные сигнатуры обусловливаются особенностями пространственно-временного распределения гидрометеоров, регистрируемыми радиолокатором в мощных конвективных системах. Данные сигнатуры проявляются на изображениях распределения горизонтальной отражаемости и радиальной скорости [12]. Спутниковые сигнатуры определяются особенностями, наблюдаемыми на верхней границе систем глубокой конвекции. Они являются результатом проявления множества различных физических процессов [11]. Выявляются они на изображениях в видимом и инфракрасном диапазонах спектра. Сигнатуры молниевой активности связаны с пульсациями воздушных потоков, при которых происходит перераспределение объемов заряженных частиц внутри облака [13].

Специализированная база данных состояний систем глубокой конвекции

Как уже было упомянуто выше, предлагается выделять и рассматривать конвективную систему как сложный, постоянно видоизменяющийся объект. У этого объекта должны быть определены пространственные характеристики, в первую очередь контур объекта, а также координаты его центра масс. Кроме них объект должен обладать набором атрибутивной информации, которая в данном случае будет описывать его состояние (рис. 4). Поскольку в работе ставится задача предупреждения об угрозах возникновения ОКЯ, то круг интересуемых объектов должен быть сужен до тех, которые представляют системы глубокой конвекции. С учетом всего вышесказанного возникает ряд задач, которые необходимо решить:

– идентификация объектов;
– выбор наиболее значимых атрибутов объекта;
– прослеживание объектов во времени;
– отнесение объектов к классу систем глубокой конвекции;
– оценка стадии развития объекта и прогноз периодов формирования ОКЯ;
– прогноз траектории перемещения объекта.

В процессе решения поставленных задач предлагается сформировать специализированную базу данных, фактически представляющую собой базу знаний о системах глубокой конвекции в рассматриваемом регионе, включающую детализированное описание их состояний в различные моменты времени их жизненного цикла. Для построения подобной базы будет использован весь доступный набор данных как дистанционных наблюдений, описывающих текущие параметры системы, так и данных численного моделирования для характеристики тех условий, в которых она развивается, что для ЕТР, по нашим данным, будет сделано впервые. Такой комплекс позволит получить наиболее полное представление о динамике системы, в том числе о том, по каким вариациям ее параметров можно будет судить о предстоящем формировании ОКЯ, что, в свою очередь, позволит разработать новые методы их прогноза. Создание рассматриваемой базы данных откроет широкие возможности для ее использования и в моделях машинного обучения.

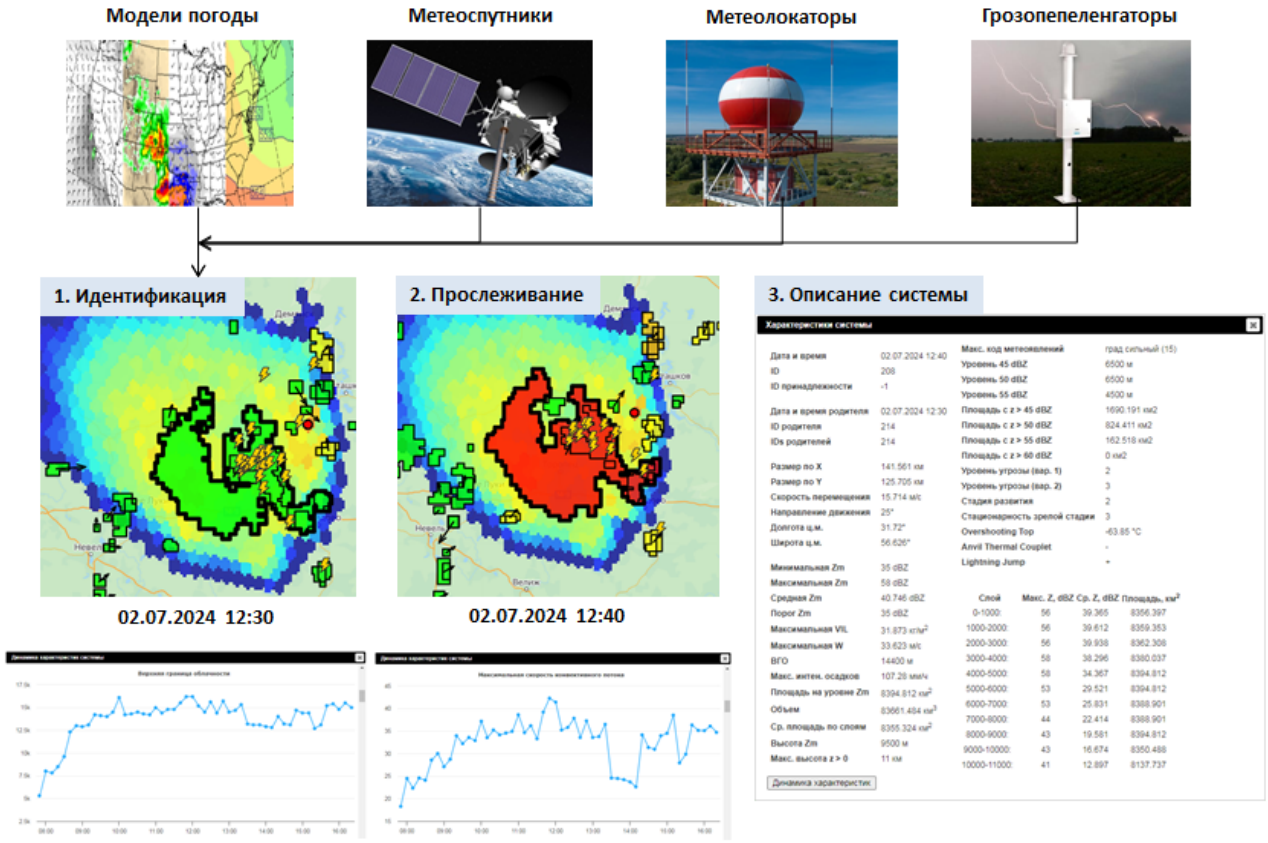


Рис. 4. Система глубокой конвекции с ОКЯ как сложный объект

От выбранного подхода к решению первой из вышеупомянутых задач во многом будет зависеть детализация разрабатываемой базы данных и ее наполнение. На рис. 4 показан пример реализованного варианта выделения двумерного контура системы по полю максимальной радиолокационной отражаемости. Данный контур фактически отражает область с гидрометеорами, имеющими размеры более некоторых пороговых величин, связанными с исследуемой системой. Подобная практика идентификации объектов по радарным данным широко используется в различных системах наукастинга [6]. Однако она не является исчерпывающей, объекты, кроме того, могут быть идентифицированы и по полю спутниковой радиояркостной температуры (по области верхней границы системы), и по кластерам молниевых разрядов [10, 14]. В данной работе предлагается разработать методику сопряжения всех трех упомянутых типов данных для выработки алгоритма формирования единого релевантного представления (контура) объекта конвективной системы.

В рамках реализованной на текущий момент схемы идентификации объектов только по радарным данным был протестирован вариант их прослеживания на основе анализа зон перекрытия объектов на последовательных сроках и кросс-корреляционной зависимости, позаимствованный из работы [3]. Было установлено, что на данных сети ДМРЛ-С Росгидромета, поступающих каждые 10 минут, предложенный вариант позволяет достаточно точно устанавливать связи родитель-потомок и сопровождать долгоживущие системы (вплоть до суток).

Спецификация разрабатываемой технологии и работа ее прототипа

Конечной целью работы является создание оперативной технологии, которая будет позволять в режиме реального времени проводить мониторинг конвективных систем и выдавать предупреждения о том, с какими из них могут быть связаны ОКЯ. Предупреждения будут уточняться по мере оперативного получения текущих данных наблюдений. Предусматривается, что технология будет представлять собой автономное решение, обеспечивающее как комплексное представление различных типов данных на карте посредством веб-ГИС, в том числе объектов конвективных систем, так и сигнализацию и сопровождение систем с потенциально возможными ОКЯ. В этом отношении технология может быть полезна как в работе специалистов – синоптиков-прогнозистов, которые будут рассматривать продукцию технологии как дополнительный источник информации для принятия решений о выдаче предупреждений об ОКЯ, так и для иных категорий потребителей (не специалистов) в целях выработки решений по проведению предупредительных и/или защитных мер от возможного негативного ущерба от прохождения ОКЯ. За основу при разработке технологии будет взят опыт работы зарубежных систем наукастинга, таких как NowCastMIX (Германия), COALITION (Швейцария), AutoNowcast (США) и др. [5; 8; 9].

На данный момент реализован прототип технологии и получены предварительные результаты его работы в теплый период 2024 г. (рис. 5). В ходе тестирования прототипа оценивалось качество краткосрочного (с заблаговременностью до 48 ч) прогноза зон возможного формирования ОКЯ с использованием выходных данных модели WRF (шаг сетки 6 км), а также качество прогноза ОКЯ на основе сигнатур интенсивных конвективных процессов и комплекса специального разработанных критериев, учитывающих динамику значений максимальной отражаемости и вертикально-интегрированной водности системы. Установлено, что специально разработанный региональный индекс прогноза мощных долгоживущих штормов SSI [2] показывает наилучшие результаты с точки зрения соотношения предупрежденности ОКЯ и доли ложных прогнозов. Подтверждена эффективность разработанных критериев и некоторых проанализированных сигнатур интенсивных конвективных процессов. Установлено, что с их использованием на основе архивных данных за 2024 г. можно было с заблаговременностью до 45 мин выявлять опасность возникновения большинства зарегистрированных в этот период ОКЯ. Предупрежденность града по критериям для специально выделенной зоны вокруг Москвы с высокой плотностью населения доходила до 100 %.

Заключение

Рассмотрена общая концепция построения автоматизированной технологии мониторинга и предупреждения об угрозах возникновения ОКЯ. Подчеркивается, что широко используемый за рубежом подход к распознаванию интенсивных конвективных процессов на основе специальных паттернов (сигнатур) может быть адаптирован для территории России и может значительно повысить эффективность прогнозов ОКЯ. Кроме того, подчеркивается, что для построения

качественного прогноза важно учитывать и региональные особенности жизненного цикла систем глубокой конвекции, для этого предлагается построить специализированную базу данных их состояний на основе всего доступного набора данных дистанционных наблюдений и численного моделирования. Такое решение к использованию всего комплекса данных для ЕТР будет реализовано впервые. Предварительные результаты построенного прототипа технологии показали положительный эффект его использования.

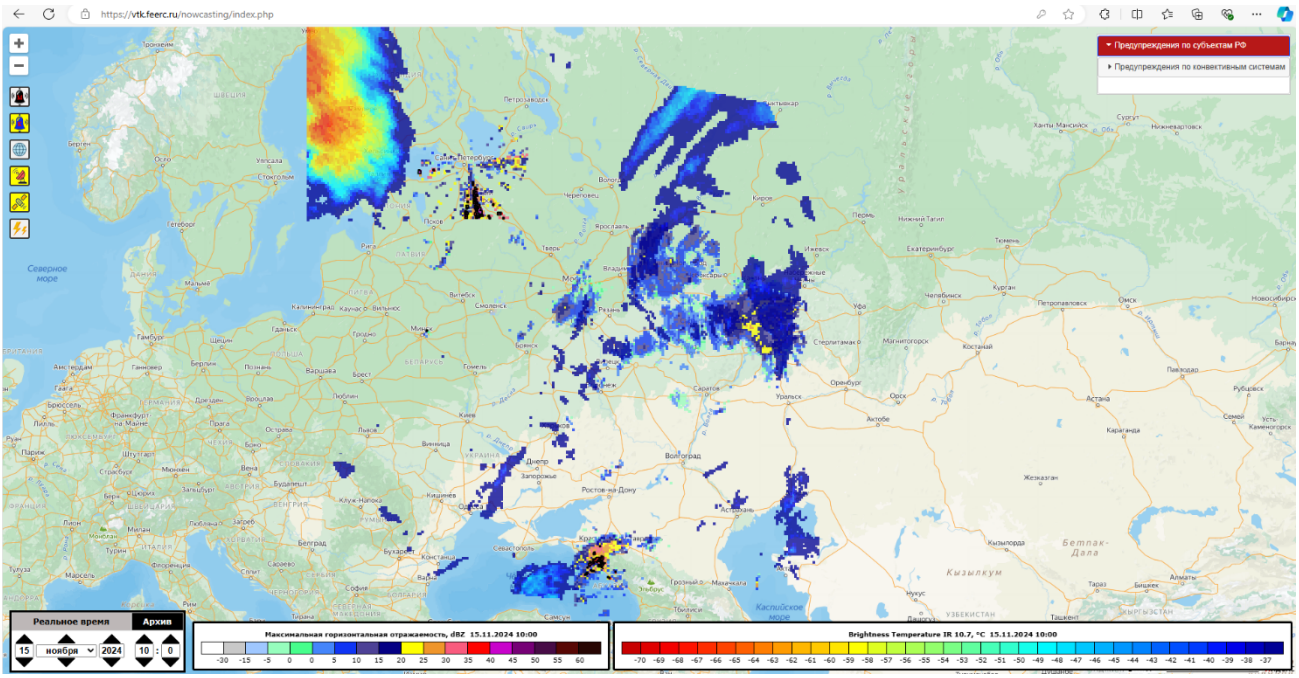


Рис. 5. Веб-ГИС прототипа технологии

Список литературы

1. Атмосферные явления (срочные данные) // Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных. URL: http://meteo.ru/data/atmospheric-phenomena/ (дата обращения 21.02.2025).

2. Разработка технологии мониторинга и предупреждения об угрозах возникновения быстроразвивающихся опасных конвективных явлений / О. В. Калмыкова, А. А. Спрыгин, С. В. Козлов [и др.] // Доклады Всероссийской открытой конференции по исследованиям атмосферных и склоновых стихийных явлений в условиях современного изменения климата, посвященной 190-летию создания Гидрометеорологической службы России и 90-летию Эльбрусской высокогорной комплексной экспедиции АН СССР, 7–11 октября 2024 г. С. 180–185.

3. Algorithm Theoretical Basis Document for the Convection Product Processors of the NWC/GEO. URL: https://www.nwcsaf. org/aemetRest/downloadAttachment/7232 (дата обращения 21.02.2025).

4. *Bedka K.* Overshooting cloud top detection using MSG SEVIRI Infrared brightness temperatures and their relationship to severe weather over Europe // Atmospheric Research. 2011. Vol. 99. P. 175–189.

5. COALITION-4: Thunderstorm forecasting with artificial intelligence. URL: https://www.meteoswiss.admin.ch/about-us/research-and-cooperation/projects/2020/coalition-4-thunderstorm-forecasting-with-artificial-intelligence.html (дата обращения 21.02.2025).

6. *Dixon M., Wiener G.* TITAN: Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis, and Nowcasting – a radar-based methodology // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 1993. Vol.10.P. 785–797.

7. European Severe Weather Data Base (ESWD). URL: https://eswd.eu/ (дата обращения 21.02.2025).

8. Evaluation of NCAR's AutoNowCaster for Operational Application within the National Weather Service / M. Ba, L. Xin, J. Crockett [и др.] // Weather and Forecasting. 2017. Vol. 32. P. 1477–1490.

9. *James P. M., Reichert B. K., Heizenreder D.* NowCastMIX: Automatic Integrated Warnings for Severe Convection on Nowcasting Time Scales at the German Weather Service // Weather and Forecasting. 2018. Vol. 33. P. 1413–1433.

10. *Murphy M.* Preliminary results from the inclusion of lightning type and polarity in the identification of severe storms // *Eighth Conf. on the Meteorological Application of Lightning Data* – Seattle, WA, American Meteorological Society. 2017. P. 22–26.

11. Objective Satellite-Based Detection of Overshooting Tops Using Infrared Window Channel Brightness Temperature Gradients / K. Bedka, J. Brunner, R. Dworak [и др.] // Journal of Applied Meteorology and Climatology. 2010. Vol. 49. P. 181–202.

12. Radar Signatures for Severe Convective Weather. URL: https://www.meted.ucar.edu/radar/severe_signatures/index.htm (дата обращения 21.02.2025).

13. *Schultz C. J., Petersen W. A., Carey L. D.* Preliminary development and evaluation of lightning jump algorithms for the real-time detection of severe weather // J. Appl. Meteor. 2009. Vol. 48. P. 2543–2563.

14. *Zinner T., Mannstein H., Tafferner A.* Cb-TRAM: Tracking and monitoring severe convection from onset over rapid development to mature phase using multi-channel Meteosat-8 SEVIRI data // Meteorology and Atmospheric Physics. 2008. Vol. 101, P. 191–210.

УДК 551.501.7

Физическая природа и экологические последствия загрязнения атмосферы Арктики

Д. Д. Ковригин, И. А. Потапова (dankov2003@mail.ru)
Российский государственный гидрометеорологический университет», г. Санкт-Петербург

Аннотация. Статья посвящена проблеме загрязнения воздушного бассейна Арктического региона черным углеродом, рассмотрены физические процессы и методы исследования данной проблемы, а также возможные пути ее решения. Кроме того, акцентируется внимание на важности контроля над промышленным развитием региона и соблюдения международных норм по охране окружающей среды. Подчеркивает необходимость комплексного подхода к изучению атмосферных процессов в Арктике для разработки эффективных мер по снижению антропогенного воздействия, подчеркивается необходимость обеспечения экологической безопасности региона, что требует совместных усилий и соблюдения стандартов охраны окружающей среды.

Ключевые слова: черный углерод, воздушные массы, аэрозольные станции, сила Кориолиса.

Актуальность

Арктика играет важнейшую роль в глобальной климатической системе благодаря своим уникальным природным особенностям. Любые нарушения природного баланса могут привести к значительным последствиям не только для самой Арктики, но и для всей планеты. Контроль над качеством воздуха и оценка потенциальных рисков необходимы для минимизации негативных последствий хозяйственной деятельности. Экологическая безопасность и устойчивое развитие Арктики требуют внимательного изучения взаимосвязей между физическими процессами в атмосфере и экосистемами. Исследования физических процессов и последствий загрязнения помогают создавать научно обоснованные решения для управления природопользованием и снижения антропогенной нагрузки.

Практическая значимость

1. Понимание источников и механизмов распространения загрязнений позволяет создавать стратегии по уменьшению антропогенного воздействия на регион.

2. Исследование влияния загрязнений на климат помогает моделировать последствия глобального потепления и разрабатывать меры адаптации.

3. Анализ экологических последствий позволяет разработать программы сохранения уникальных арктических экосистем и защиты исчезающих видов.

4. Результаты исследований помогают оценить риски для здоровья местных жителей и предложить пути минимизации негативного воздействия загрязнений.

5. Научные данные способствуют укреплению международного сотрудничества в области охраны окружающей среды и устойчивого развития северных регионов.

Выводы и рекомендации:

– Необходимо усилить мониторинг состояния атмосферы Арктики для своевременного выявления новых источников загрязнений.

– Разработать международные соглашения и стандарты по контролю над выбросами загрязняющих веществ в Арктическом регионе.

– Проводить образовательные кампании среди местного населения и промышленных предприятий для повышения осведомленности о последствиях загрязнения атмосферы.

Эти меры помогут снизить негативное воздействие на уникальный природный комплекс Арктики и обеспечить устойчивое развитие региона.

Загрязнение атмосферы в Арктическом регионе

Исследование и контроль за загрязнением арктической атмосферы имеют первостепенное значение, так как этот регион оказывает существенное влияние на глобальные климатические процессы. Черный углерод, попадающий в атмосферу, значительно воздействует на климат и окружающую среду. Сокращение выбросов черного углерода в данном регионе может привести к понижению температуры поверхности и улучшению экологической ситуации. Необходимо продолжать научные изыскания и предпринимать шаги по уменьшению выбросов черного углерода в Арктике ради сохранения уникальных экосистем региона [4].

Образование и воздействие черного углерода на природу

Основной источник появления черного углерода – неполное сгорание топлива в таких объектах, как дизельные двигатели, печи и при лесных пожарах. Оседание сажи на снег и лед снижает их способность отражать солнечный свет, что ускоряет процесс таяния. Это может ускорить изменение климата в регионе и негативно сказаться на экосистемах и здоровье населения [4]. Исследования влияния верховых и низовых лесных пожаров на содержание черного углерода помогают глубже понять механизмы его формирования и перемещения в атмо-

сфере. Эти данные важны для создания стратегий предотвращения лесных пожаров и сокращения выбросов черного углерода, что позволит уменьшить его вредное воздействие на климат и окружающую среду.

Перемещение воздушных загрязнений

Воздушные потоки способны перемещать черный углерод и прочие загрязнители на значительные расстояния от мест возникновения пожаров. Например, при лесных пожарах в Западной Сибири, Европейской части России, степных зонах Восточно-Европейской равнины, Южном Урале и Казахстане, черный углерод может достигать Арктики благодаря движению воздушных масс. Этот процесс переноса загрязнений на большие расстояния известен как атмосферный транспорт. Он способствует глобальному распространению загрязнений, включая черный углерод, оказывая неблагоприятное воздействие на климат, окружающую среду и здоровье людей не только в районах возгорания, но и в удаленных регионах, где они могут оказаться [2].

В арктических областях возникает дымка, вызванная сочетанием дальнего переноса антропогенных выбросов и температурной инверсии, что становится особенно острой проблемой в зимний и весенний периоды. Важную роль в этом процессе играет черный углерод. Поглощая солнечную энергию, он способствует более быстрому таянию арктического снега. Это может привести к изменениям в водном цикле и климатических условиях Арктики [6].

Кроме того, черный углерод влияет на облачные системы, воздействуя на климат. Он способен менять устойчивость облаков, объем осадков и их отражательную способность, что в итоге может изменить климатические условия не только в Арктике, но и в других регионах.

Полярная станция аэрозольных исследований Московского государственного университета на о. Белый

Аэрозольные станции, подобные станции МГУ «Остров Белый», выполняют значимую функцию в отслеживании уровня загрязнения атмосферы и выявлении его источников. Измеряя концентрации черного углерода, специалисты определяют ключевые источники этого загрязнителя и оценивают их вклад в общий уровень загрязнения воздуха. Такие исследования способствуют не только пониманию механизмов образования аэрозолей, но и разработке методов снижения их воздействия для охраны природы и здоровья людей.

Постоянные измерения на станции МГУ «Остров Белый» предоставляют ученым важные данные о составе атмосферы данного региона, что необходимо для анализа процессов, протекающих в арктической атмосфере, и их влияния на изменения климата [3].

Ученые установили, что основной причиной зимнего загрязнения является использование ископаемых видов топлива, тогда как летом преобладает сжигание биомассы, включая лесные пожары и другие факторы. Сжигание биомассы ответственно примерно за половину всех годовых выбросов черного углерода в атмосферу.

Причина перемещение воздушных масс к Северному полюсу

Почему воздушные массы, содержащие черный углерод, направляются в сторону Арктики? Какое физическое явление объясняет их перемещение на север?

Ветер представляет собой одну из ключевых сил природы и является важной частью атмосферной циркуляции. Его возникновение связано с силой барического градиента, когда воздух перемещается из зон высокого давления в области с низким давлением. Интенсивность ветра зависит от разницы в давлении: чем она выше, тем сильнее воздушный поток. Еще одним значительным фактором является наклон оси Земли, приводящий к возникновению силы Кориолиса. Эта сила обусловлена вращением Земли вокруг своей оси. Под ее воздействием прямолинейное направление движения воздушных масс постепенно изменяется: в северном полушарии оно смещается вправо, а в южном – влево, переходя в движение по дугообразной траектории до тех пор, пока силы не уравновесятся. После этого ветер направляется вдоль изобар. Такой тип ветра называют геострофическим. Главным проявлением силы Кориолиса в природе является формирование атмосферных вихрей – циклонов и антициклонов (рис.). Именно из-за этой силы они закручиваются в противоположные стороны в северном и южном полушариях [1].

Рис. Движение воздушных масс под действием силы Кориолиса

Силу Кориолиса невозможно ощутить непосредственно, она существенно влияет на движение воздушных масс, океанических течений и даже маршруты полетов самолетов.

Циклоны и антициклоны, представляющие собой крупные вихревые структуры воздуха, образуются и перемещаются под воздействием этой силы. В северном полушарии циклоны движутся против часовой стрелки, а антициклоны – по часовой. В южном полушарии все наоборот. Это явление обусловлено двумя причинами: вращением Земли с запада на восток и зависимостью тангенциальной скорости точек на поверхности Земли от географической широты (эта скорость минимальна у полюсов и максимальна на экваторе) [3].

Возможно, вы замечали, что птицы и самолеты зачастую летают по извилистым маршрутам, а не прямо с севера на юг или с востока на запад. Это также связано с эффектом Кориолиса. Пилоты и навигационные системы принимают эту силу во внимание при расчете маршрутов, чтобы минимизировать расход топлива и сократить время полета.

Сила Кориолиса – это возникающая инерционная сила, действующая перпендикулярно направлению движения тел относительно вращающейся поверхности. Она проявляется, когда объекты движутся либо к центру, либо от него [8]. Кориолисово смещение есть результат движения объекта, вращения Земли и географической широты. По этой причине в ответе должны присутствовать удвоенный синус широты φ, скорость тела V и угловая скорость вращения Земли Ω. Точная формула довольно проста: $\vec{F}_C = 2m\left[\vec{\Omega}\times\vec{V}\right]$ – результат векторного произведения частоты вращения Земли и скорости движения тела (вектор частоты вращения Земли направлен на полярную звезду).

Сила Кориолиса играет важную роль в таких науках, как метеорология, геофизика и океанография, поскольку любое тело, движущееся вблизи поверхности Земли, испытывает её воздействие. Например, эта сила оказывает значительное влияние на атмосферные процессы, определяя направление и интенсивность основных ветровых потоков, а также направление вращения циклонов. В гидросфере она определяет траекторию морских течений [5].

Атмосферная циркуляция также стимулируется солнечной энергией. Гравитация, архимедова сила и сила Кориолиса, обусловленная вращением Земли, вместе с разницей температур между экватором и полюсами приводят к круговороту воздуха вокруг планеты. Нагреваемый солнечными лучами воздух в тропических зонах становится легче и поднимается к вершине тропосферы. Одновременно с этим возникают пассаты, которые движутся к экватору с севера и юга, создавая восточные экваториальные течения. На верхней границе тропосферы воздух отклоняется к востоку, формируя субтропические струйные течения (со скоростью менее 100 км/ч) в каждом полушарии. Между полюсами и параллелями ±60 ° температурные контрасты вызывают циркуляцию, а приземные ветры направлены от полюсов к умеренным широтам. Доминирующие наземные ветровые потоки устремлены в сторону ближайшего полюса [8].

Последствия загрязнения арктической поверхности черной сажей

- Таяние ледников приводит к увеличению уровня моря.

По мере таяния ледников в мировой океан поступает больше воды в результате чего поднимается глобальный уровень моря.

- Негативное воздействие на флору и фауну.

Изменения в морском льде и ледниках повлияли на условия существования множества живых организмов. Это касается мелких планктонных существ, которые живут вблизи ледяных краев, обеспечивающих им подходящие условия для выживания и размножения. Популяции белых медведей оказались под угрозой, лишившись значительной части своих привычных территорий. Прогнозируется, что в будущем деревья начнут продвигаться дальше на север, вытесняя значительную часть тундровой растительности.

- Влияние на людей и общество.

Территории, населенные людьми, могут подвергаться затоплениям и оползням. Климатические изменения ведут к снижению объемов рыбного промысла в арктических водах, что уменьшает экономический вклад в региональную экономику [7].

Межгосударственное взаимодействие в Арктическом регионе

- Вопрос загрязнения атмосферы черным углеродом обсуждается на международной арене. Одним из первых объединений, работающих над этой проблемой, стал Арктический совет, который объединяет усилия Канады, Дании, Финляндии, Исландии, Норвегии, России, Швеции и США на государственном уровне. Кроме того, в работе форума участвуют представители коренного населения и наблюдатели от различных организаций.
- Первоначально разработанная совместная программа направлена на сокращение выбросов черного углерода на 25–33 % к 2025 г. относительно показателей 2013 г. В ближайшие два года планируется пересмотреть эти показатели для дальнейшего снижения допустимых уровней загрязнения сажевыми частицами.

Основные направления сотрудничества включают:

1. Экологическая безопасность: Совместные меры по защите уникальной природы Арктики, борьбе с загрязнением, включая проблему чёрного углерода.
2. Научные исследования: Проведение совместных научных экспедиций и исследований климата, флоры и фауны, ледникового покрова.
3. Экономическое развитие: Разработка природных ресурсов, создание транспортной инфраструктуры, таких как Северный морской путь.
4. Социальное благополучие: Поддержка коренных народов, улучшение их качества жизни, сохранение культурного наследия.
5. Международная дипломатия: Обсуждение вопросов безопасности и мирного разрешения споров через международные форумы, такие как Арктический совет.

Такое взаимодействие способствует устойчивому развитию региона, сохранению его экосистем и улучшению условий жизни всех заинтересованных сторон.

Решение проблемы выбросов углеродной сажи

Загрязнение окружающей среды и его влияние на климат подчеркивают важность систематических исследований в Российской Арктике, которая является одним из самых уязвимых регионов к экологическим изменениям, вызванным хозяйственной деятельностью.

Для сокращения влияния черного углерода на Арктику можно предпринять следующие шаги:

- перевод энергетики на альтернативные источники энергии;
- применение видов топлива, при сгорании которых не образуется сажа (например, газ);
- внедрение современных технологий очистки газовых выбросов, включая каталитические нейтрализаторы;
- ужесточение государственного контроля и повышение ответственности за несоблюдение экологических стандартов.

Каталитические нейтрализаторы представляют собой эффективное средство борьбы с выбросами сажи. Например, российская компания «ЭКОЭНЕРГОТЕХ», специализирующаяся на разработке и производстве систем очистки вредных выбросов, создала инновационное оборудование – каталитические нейтрализаторы с интегрированным сажевым фильтром. Это оборудование предназначено для минимизации количества сажи, попадающей в атмосферу, особенно актуально для предприятий, действующих в арктической зоне и обязанных соблюдать требования государственной программы развития Арктики.

Принцип работы данного оборудования основан на способности катализатора преобразовывать токсичные компоненты выхлопных газов в безвредные вещества. Отработанные газы проходят через систему, где сажа оседает на каталитически активном сажевом фильтре и затем сжигается в потоке газов, превращаясь в углекислый газ.

Масштабное внедрение подобных решений может существенно снизить неконтролируемые выбросы сажи при эксплуатации котельных, двигателей внутреннего сгорания и других энергетических установок, тем самым способствуя решению проблемы загрязнения воздуха в Арктике [7].

Решение проблемы загрязнения воздуха черным углеродом, возникающего вследствие лесных пожаров, требует комплексного подхода. Оно включает не только усиление контроля за лесными массивами в период высокой пожарной опасности, но и разработку новых физических методов для управления этим процессом. Один из возможных подходов заключается в учете влияния силы Кориолиса на атмосферные явления, что позволит лучше контролировать выбросы черного углерода.

Например, при планировании мер по сокращению выбросов можно принимать во внимание направление и скорость ветровых потоков, которые влияют на распространение загрязнений в атмосфере. Понимание динамики воздушных масс и их взаимодействия с силой Кориолиса поможет оптимизировать стратегии по борьбе с загрязнением и уменьшить его воздействие на окружающую

среду. Хотя сила Кориолиса часто недооценивается из-за своего сравнительно небольшого значения, она все же играет важную роль в различных процессах, включая циркуляцию атмосферы. Исследование эффекта «кориолисова смещения» воздушных масс представляет собой перспективное направление для дальнейших научных изысканий.

Список литературы

1. Большой информационный архив. Силы, действующие в атмосфере, и их влияние на ветер: URL: http://big-archive.ru/geography/earth_atmosphere/27.php (дата обращения: 29. 12. 2024)

2. Ковригин Д. Д., Потапова И. А. Физические механизмы и экологические проблемы загрязнения воздуха в Арктике / Сборник трудов Международной научно-практической конференции». Санкт-Петербург, 2024. С. 123–129.

3. Ковригин Д. Д., Потапова И. А. Физические механизмы и экологические проблемы загрязнения воздуха // Инновационные методы математики и физики в экологических и гидрометеорологических исследованиях : сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф. СПб., 2024. С. 123–129.

4. Смородинский Я. Сила Кориолиса // Научно-популярный физико-математический журнал «Квант». URL: https://kvant.mccme.ru/1975/04/sila_koriolisa.htm (дата обращения: 25.12.2024).

5. Следы на снегу. Эмиссия чёрного углерода меняет климат Арктики // Российский фонд фундаментальных исследований, 1992–2024. URL: https://www.rfbr.ru/press-center/science_news/3379/ (дата обращения: 10.01.2025)

6. Атмосферная циркуляция: ее организация // Агро METEO. URL*:* https://agrometeo.online/articles/circulation.html (дата обращения: 09.01.2025)

7. Вклад в спасение Арктики – минимизация выбросов сажи (черного углерода // Экоэнерготех. URL: https://eet-msk.ru/posts/8 (дата обращения: 09.01.2025)

8. Эффект Кориолиса // Элементы. URL: https://elementy.ru/trefil/21119/Effekt_Koriolisa (дата обращения: 10.01.2025)

Секция

Влияние климатических изменений на трансформацию природных и социально-экономических условий

УДК 551.4.01(571.1/.5)

Воздействие климатических изменений на трансформацию таежных геосистем

Т. И. Коновалова (tkonov@mail.ru)
Иркутский государственный университет, г. Иркутск
Институт географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, г. Иркутск

Аннотация. Закономерности развития тайги рассматриваются для периода позднего кайнозоя. Установлено, что климатические преобразования проходили в условиях активизации тектонических движений земной коры. Их системное проявление отразилось на специфике тайги региона, определяемой также развитием в единой динамической системе с другими типами геосистем. Изучаются основные этапы эволюционных преобразований тайги и характеристики природной среды в эти периоды. Материалы исследований представлены в форме информационного синтеза данных и знаний о территории, основанного на теории геосистем В. Б. Сочавы, результатах стационарных, наземных маршрутных исследований, картографической информации, дешифрирования космических снимков. Результаты работы направлены на решение фундаментальной проблемы, связанной с мониторингом состояния природной среды регионов и прогнозом ее изменения.

Ключевые слова: тайга, поздний кайнозой, этапы трансформации, климат**.**

Введение

Выявление характера преобразования геосистем занимает особое место в географических исследованиях, соответствующее современному этапу развития научного знания. Его нельзя свести к простому сбору сведений о смене одного природного комплекса другим, новым, за тот или иной геологический отрезок времени. Необходимо изучение смены состояний геосистем, зависящих от многообразного воздействия морфотектонических, климатических, почвенно-растительных факторов. Смена одного типа геосистем новым происходит не просто в связи с изменением климата, но во многом благодаря трансформации нескольких или всех компонентов геосистем и силы их воздействия. Однако, несомненно, что всякая новая геосистема имеет «память», наследует черты исходной. Выявить этапы преобразования геосистем, значит понять, какие изменения могут произойти с геосистемой при тех или иных вариантах внешнего воздействия, включая антропогенное. Все это позволил приблизиться к решению проблемы о перспективах освоения таежных геосистем Сибири.

В настоящее время вопрос об особенностях развития таежных геосистем, их происхождения и эволюции является дискуссионным. В этой связи основная цель исследований – выявление направления трансформации таежных геосистем Сибири в условиях климатических изменений. Результаты работы направлены на решение фундаментальной проблемы, связанной мониторингом состояния природной среды северных регионов, прогнозом ее изменения, планированием природопользования в их пределах.

Объект исследования – таежные геосистемы юго-западной части Средней Сибири.

Цель – выявление характера преобразования таежных геосистем под влиянием изменений природных факторов. Работа базируется на результатах многолетних полевых исследований, картографической информации, дешифрировании космических снимков. Реконструкция модификаций таежных геосистем юга Средней Сибири проведена на основе синтеза сведений, полученных из научных публикаций по палинологии, палеоклимату, тектонике, а также оценке ландшафтов-аналогов.

Под геосистемами понимаются все размерности земного пространства, где отдельные компоненты природы находятся в системной связи друг с другом и как определенная целостность взаимодействуют с человеческим обществом. Трансформация геосистем рассмотрена за период позднего кайнозоя, когда началось формирование современного облика геосистем. Начиная с этого периода кайнозойской эры геосистемы района исследований претерпели многоэтапное развитие.

Представления о причинах глобальных и региональных изменений природной среды

Рассматриваются различные причины глобальных изменений природной среды: воздействие тектонических процессов, изменчивость орбиты Земли и инсоляции, воздействие океанических течений и проч. Констатируются преобразования климата, обусловленные изменением температуры, солености и апвелинга в поверхностных и глубинных водах океанов в сочетании с изменением характера и силы ветров [8; 9]. Утверждается, что преобразования солнечной инсоляции, вызванные орбитальными причинами в периоды Миланковича (100 000, 41 000 и 23 000 л. н.), определили значительную часть изменений в объёме ледников в позднем плейстоцене, которые были выявлены при изучении морских и ледниковых кернов Гренландии, Антарктиды и центральной части Атлантики [6; 7]. На основе этого были сделаны выводы о том, что массовые реорганизации системы океан-атмосфера, достигшие наибольшей величины в ледниковый период (~ 14 500 лет назад), были вызваны положительной обратной связью больших ледяных щитов северного полушария с климатом.

Согласно другим представлениям, крупные преобразования на Земле связаны с воздействием эндогенных процессов. Так, в начале эоплейстоцена – 2,6 млн лет назад – глобальная трансформация природной среды на Земле, которая длилась порядка 15 тыс. лет, была вызвана геомагнитной сменой полярности Гаусса – Матуяма, что привело к четырехкратному ослаблению магнитного поля планеты, по сравнению с современным [5]. Этот рубеж объединено начало ледникового периода. Снижение эндогенной активности 750–600 млн лет назад (магнитная инверсия Брюнес – Матуяма) в среднем плейстоцене определило очередное похолодание климата. С рубежом Гаусс – Матуяма связано оледенение гор вокруг Байкала. Эпоха обратной полярности (Брюнес – Матуяма) ознаменовалась уменьшением атмосферного увлажнения в регионе [4].

Обсуждение результатов исследования

Проведенные исследования показали, что истоки формирования таежных геосистем Сибири относятся к неогеновому периоду, когда возникли условия, способствующие развитию тайги. Триггером ее формирования послужило первое похолодание, которое прогрессивно распространилось от полюса на юг. К концу миоцена (~6 млн лет назад) в Сибири происходит развитие умеренно-теплого климата со средними летними температурами на 7 ° ниже, чем в начале этой эпохи (~24 млн лет назад) и четкой сезонной дифференциацией. Его новые значения характеризовались средними температурами воздуха зимой от 0 до +3 °С, летом около +20 °С; суммой осадков – 1000 мм/год [1; 3]. Недостаточная влажность воздуха в период вегетации и низкие зимние температуры определили преобразования широколиственных лесов. На севере Сибири увеличились ареалы хвойных лесов (тсуга, пихта, ель), на юге – сосновых боров и березняков, приспособленных к возросшей сухости воздуха и зимним заморозкам. Трансформация лесов в таежные происходила прежде всего на равнинах вследствие инверсий температуры воздуха.

Следующий этап связан с плиоценом (начался 5,3 млн л. н. и закончился 2,6 млн л. н.). Эта эпоха охарактеризовался интенсивным похолоданием и усилением континентальности климата. Подъем хребтов на юге и востоке Сибири привел к возникновению орографических преград, которые оказали влияние на циркуляцию атмосферы. Значительную роль стал играть Сибирский антициклон, который к концу плиоцена превратился в мощный циркуляционный фактор и повлиял на трансформацию геосистем. Средние температуры зимой понизились до отрицательных значений –5…–10 °С; в июле составляли +15…+20 °С; сумма осадков уменьшилась до 600–800 мм/год. В системе атмосферной циркуляции усилился западный перенос воздушных масс. Плиоцен стал узловым этапом дифференциации таежных типов геосистем района исследований.

Очередной этап был сопряжен с плейстоценовой эпохой четвертичного периода (протяженность от 2,59 млн л. н. до 11,7 тыс. л. н.). Преобразования тайги были вызваны существенным похолоданием и обострением континентальности климата, появлением и длительным сохранением снежного покрова. Зимние температуры воздуха понизились до –25 °С; летние – до +15 °С; сумма осадков – 400–600 мм/год. В ряде публикаций утверждается, что таежный тип геосистем на большей части своего современного ареала является следствием ледникового периода. Одним из гипотетических центров возникновения тайги считается Южно-Сибирский, к которому относятся таежные геосистемы района исследований. Он не испытал оледенения, в связи с чем тайга с момента своего появления существовала здесь постоянно. Поэтому геосистемы имеют более типичные таежные черты и могут служить своеобразной «точкой отсчета» для сравнения с другими частями Сибири.

Здесь таежные, перигляциальные степные, а также таежные и тундровые фации сочетались в единой динамической системе, что сказалось на многих особенностях современных таежных геосистем региона. За время сартанской ледниковой эпохи произошло повсеместное развитие многолетней мерзлоты, а также

формирование ерниковых, кедрово-стланиковых светлохвойно-таежных геосистем на северо-востоке региона. В последовавший за ним межледниковый период усложнилась морфологическая структура геосистем, унаследовавшая реликты предыдущих эпох: ледяные прослои, линзы и клинья льда, карбонатные отложения и покровные толщи лессовидных суглинков. Изменение климата происходило в сторону потепления, но сухость осталась.

Завершающий этап связан с последней эпохой геологической истории планеты. Голоцен – время становления современных геосистем. Эта эпоха ознаменовалась активизацией тектонических процессов и формированием альпинотипного рельефа гор на юге и востоке Сибири. Значительные амплитуды неотектонических поднятий способствовали неоднократной трансформации таежных геосистем, обеднению флоры. В раннем голоцене началась экспансия светлохвойно-таежных геосистем. В ксеротермический период голоцена произошла очередная активизация процесса ксерофитизации, которая была вызвана как климатическими изменениями, так и формированием крупных речных долин, характеризующихся более высокими температурами воздуха в годовом цикле, по сравнению с другими частями рельефа. Это ознаменовало современный этап развития процессов ксерофитизации.

Современные преобразования таежных геосистем

В настоящее время высокая континентальность климата усугубляется современными тенденциями его потепления, проявляющейся с 70-х гг. XX в. По оценкам зарубежных экспертов в районах Сибири фиксируется один из самых высоких трендов потепления климата на Земле (до + 3,5 °С за 100 лет). Однако на северной границе ареала потепление климата не столь существенно – около 1 °С, а на границе арктической тундры порядка 0,5–0,3 °С. В настоящее время для районов Сибири характерен деградирующий тип многолетней мерзлоты, что определяет экспансию тайги в направлении прежних северных рубежей, изменению на северных рубежах структуры динамической системы тайга-тундра, формированию устойчивых типов тайги. Практически для всей территории юга Сибири характерна интенсивная и разнообразная антропогенная деятельность, которая становится заметным фактором, способствующим трансформации тайги. В частности, на региональном уровне происходит изменение теплового режима геосистем. Это наблюдается как в вековом изменении термических условий в районах активного, освоения территории, так и в частных колебаниях в пределах отдельных районов [2]. Под влиянием ксерофитизации климата в восточной и юго-восточной частях территории происходит расширение площадей лиственнично-таежных геосистем и оттеснение темнохвойных на более высокие уровни. Одновременно темнохвойные леса с пихтой сменяются кедровыми либо кедровыми с примесью светлохвойных пород. При достаточно частой повторяемости пожаров (не реже чем раз за 100–150 лет) существование темнохвойно-таежных геосистем становится проблематичным даже в наиболее благоприятных для них природных условиях.

Эти закономерности характерны также и для светлохвойных типов геосистем. В этом случае лесообразующими становятся мелколиственные породы либо кустарниковые и травянистые формации. Вместе с тем в связи с парниковым эффектом на планете ожидается дальнейшее повышение средней температуры воздуха. Последствия такого резкого потепления могут быть катастрофичны для геосистем бореальной зоны. Антропогенная деятельность также изменила и направление процессов почвообразования в регионе, под ее влиянием общей тенденцией изменения почв таежных геосистем, находящихся в переходной полосе со степными, является их остепнение, выражающееся в приближении к поверхности карбонатного горизонта, снижении кислотности, появлении солонцеватости, уплотнении, образовании столбчатой структуры.

Заключение

За период позднего кайнозоя (миоцен – голоцен) произошло изменение таежных геосистем региона, которое выражается в вытеснении широколиственных лесов хвойными и дальнейшем усилении процессов остепнения. Формирование и преобразование тайги было связано с активизацией тектонических процессов и вызванных ими неоднократным изменением климатических условий, сопряженных с усилением континентальности климата и развитием процессов аридизации.

Список литературы

1. *Волкова В. С., Баранова Ю. П.* Плиоцен-раннеплейстоценовые изменения климата в Северной Азии // Геология и геофизика. 1980. № 7. С. 43–52.

2. Коновалова Т. И. Трансформация геосистем Байкальской природной территории // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2023. Т. 43. С. 46–61.

3. Синицын В. М. Древние климаты Евразии. Л. : Изд-во ЛГУ, 1965. Ч. 1. 168 с.

4. Ярмолюк В. В., Кузьмин М. И. Корреляция эндогенных событий и вариаций климата в позднем кайнозое Центральной Азии // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2006. Т. 14, № 2. С. 3–25.

5. *Channell J. E. T., Lehman B.* The last two geomagnetic polarity reversals recorded in high-deposition-rate sediment drifts // Nature, 1997. N 389. P. 712–715.

6. Correlations between climate records from North Atlantic sediments and Greenland ice / G. Bond [et al.] // Nature. 1993. Vol. 360. P. 245–250.

7. Global Environmental Change: Research Pathways for the Next Decade. Washington, DC: The National Academies Press. https://doi.org/10.17226/5992

8. Ocean & climate change: new challenges. Focus on 5 key themes of the IPCC. Special Report on the Ocean and Cryosphere. 2019. URL: http://oatceanclime. org (дата обращения: 25.03.2025)

9. The Impacts of the Oceans on Climate Change / E. Lewis-Brown [et al.] // 2nd Electronics System-Integration Technology Conference, Greenwich, UK. 2008. P. 29–32.

УДК 911.3(571.53)

Влияние климатических изменений на социально-экологические системы Севера

Н. Е. Красноштанова (knesun@mail.ru)
Институт географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, г. Иркутск
Иркутский государственный университет, г. Иркутск

Аннотация. Изучаются последствия климатических изменений, с которыми сталкиваются жители севера Иркутской области в настоящее время, а также рассматриваются адаптационные практики местного населения, позволяющие минимизировать негативные социально-экономические последствия от этих изменений. Применяются общенаучные методы анализа и синтеза, при проведении полевых исследований были использованы методы социальных наук, такие как интервьюирование, опросы и наблюдения. Исследования проведены на примере районов Крайнего Севера и приравненных к нему территорий, в частности, сбор полевых материалов проводился в поселениях разного уровня Катангского, Киренского и Усть-Кутского районов. Изучение влияния климатических изменений на население и экономику страны, отдельных регионов и их районов, а также вопросы адаптации к этим изменениям являются сегодня одним из актуальных научных направлений, что отмечается в Стратегии научно-технологического развития РФ и Климатической доктрине РФ. Прикладная роль таких работ важна для формирования программ и стратегий развития территорий, что определяется в Стратегии пространственного развития Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом до 2036 года.

Ключевые слова: социально-экологические системы, Север, изменение климата, локальный уровень.

Проблемы, связанные с климатическими изменениями, особенно актуальны для социально-экологических систем Севера и Арктики, так как происходящее потепление в высоких широтах происходит значительно быстрее, чем на планете в целом [10]. В результате социально-экологические системы этих регионов испытывают непропорционально сильное воздействие последствий изменения климата [11]. Высокие темпы изменения климата наблюдаются и в Иркутской области, превышая среднероссийские показатели [5; 6].

Жизнедеятельность населения северных территорий во многом определяется природно-климатическими условиями и чутко реагирует на все изменения, в том числе в таких сферах как транспортное сообщение, жилищно-коммунальное хозяйство, продовольственное обеспечение и др. Особое значение фиксирующиеся изменения климата имеют для территорий традиционного природопользования, где проживают коренные народы Севера и приравненное к ним население, занимающиеся традиционными видами деятельности, такими как охота, оленеводство, рыболовство, собирательство. Повседневная жизнь и хозяйственная практика этих народов тесно взаимосвязаны с окружающей природной средой, поэтому уже сегодня они применяют разнообразные практики адаптации к происходящим изменениям. Изучение последствий климатических изменений и систематизация существующих механизмов адаптации населения севера Иркутской области имеет важное значение для разработки программ территориального

развития и поддержания устойчивости социально-экологических систем Севера в изменяющихся условиях.

Сбор полевых материалов собирался в течении 2022–2023 гг. во время социально-географических исследований на территории Катангского, Киренского и Усть-Кутского районов Иркутской области. Основными методами сбора качественных материалов были интервьюирование и опросы местного населения, представителей разных сфер профессиональной деятельности, а также старожилов и членов общин коренных народов. Всего в исследовании приняли участие 118 респондентов.

Катангский район единственный в регионе относится к территориям Крайнего Севера, на юге он граничит с тремя муниципалитетами, в числе которых Киренский и Усть-Кутский районы, относящиеся к территориям, приравненным к Крайнему Северу. Социально-экономические условия развития этих северных районов Иркутской области по разным сферам жизнедеятельности имеют высокую зависимость от погодных и климатических условий. Практически все поселения Катангского района не имеют круглогодичного наземного сообщения, завоз основных грузов в район осуществляется в холодное время года по зимникам. Ряд поселений Киренского и Усть-Кутского района также не имеют регулярного наземного сообщения с районными центрами. Важное значение для социально-экономического развития Усть-Кутского и Киренского районов имеет судоходство по р. Лене, а эта транспортная отрасль, на которой также значительно сказываются климатические изменения и изменения гидрологического режима. Процессы ледостава и ледохода влияют на транспортную связность городов и поселков по берегам рек исследуемой территории, особенно по берегам реки Лены в Киренском районе, так как там отсутствуют мостовые переправы.

Также в этих районах развита промысловая охотничье-рыболовная деятельность. В Катангском районе зарегистрировано более десяти общин коренных малочисленных народов, занимающихся традиционным природопользованием (охотой, рыболовством, собирательством, на севере района несколько семей занимаются оленеводством). Для многих жителей севера Иркутской области, особенно сельских поселений, промысловая и рыболовная деятельность является основным источником получения доходов и продуктового обеспечения. Происходящие климатические изменения сказываются на традиционной деятельности как прямо, так и опосредовано через изменение природных условий.

Обзор научной литературы выявил ряд особенностей происходящих климатических изменений в Иркутской области, в том числе на севере региона. Фиксируемые учеными климатические изменения были сопоставлены с результатами полевых социологических исследований в северных районах области. В целом наблюдается соответствие основных форм климатических изменений и их последствий. Вместе с тем полевые исследования позволили получить более детальные сведения о влиянии изменения климата на социально-экологические системы Севера, выявить и предпринять попытку систематизации имеющихся практик адаптации местного населения к этим изменениям (табл.).

Таблица

ные климатические изменения на севере Иркутской области и их последствия

ствия, которые тся жителями се-ых районов	Проблемы для местного населения	Выявленные механизмы адаптации
осень; зима	• Сокращение сроков функционирования зимников; • Сдвигание сроков начала промысловой охоты; • Изменения сроков миграции птиц и животных; • Позднее «созревание» шкурок соболя.	• Использование новых технологических дорог; • Ведение охоты с учетом изменения сроков миграции птиц и животных; • Использование понтонных мостов на время ледостава.
чение количе-дых осадков; шение количе-дких осадков, о во второй по-ета	• Ухудшение условий функционирования зимних дорог, повышение расходов на содержание зимников; • Накопление снеговой массы повышает риски высоких наводнений; • Возрастание пожароопасности в тайге и рост количества лесных пожаров; • Возрастание проблем безопасности населения в связи с лесными пожарами; • Потеря ценных угодий и уничтожение охотничьей инфраструктуры, в результате лесных пожаров (зимовья, дороги)	• Увеличение затрат на чистку и поддержание зимних дорог; • Строгий контроль посещаемости леса в летний период; • Создание и поддержание минерализованных полос; • Заблаговременная подготовка населения к наводнениям, специальные пристройки, для снижения ущербов
нения; ение рек	• Возрастание частоты повторяемости высоких наводнений; • Ухудшение условий для заезда на охотничье-рыболовные участки; • Удорожание доставки грузов речным	• Заблаговременная подготовка населения к наводнениям, сооружения специальных пристроек, для снижения ущербов; • Использование облегченных вариан-

Требует дополнительного исследования такое явление как сухие грозы. В последние годы этот природный фактор стал доминирующей причиной возникновения лесных пожаров в труднодоступных районах на севере области согласно официальной статистике. Также некоторые исследователи отмечают, что на территории Сибири это явление участилось в последние годы [9]. Но при этом есть обоснованные сомнения действительно ли сухие грозы являются причиной возрастания количества лесных пожаров на севере Иркутской области или это скрытый антропогенный фактор [2].

Возникновение различных опасных гидрометеорологических явлений на севере региона, которые регистрируются все чаще, например, гроза со шквалом в Киренске 23.07.2022, требует более детального изучения проблемы климатических изменений и их возможных последствий.

Таким образом, наблюдаемые последствия климатических изменений уже сегодня оказывают значительное влияние на социально-экологические системы изучаемых районов, как прямо, так и опосредовано, через изменение природных условий, а так как местные сообщества тесно связаны с природной средой, то это значительно сказывается на всех аспектах жизнедеятельности, включая разные сферы экономики и обеспечения безопасности населения.

Требуются проведение более детальных исследований изменения климата на территории севера Иркутской области для изучения локальных особенностей и последующего прогнозирования ситуации для разработки соответствующих сценариев адаптации социально-экологических систем Севера к климатическим изменениям.

Список литературы

1. *Антипина А. А., Латышева И. В.* Статистический и циркуляционный анализ температурных аномалий зимних и летних месяцев на территории Иркутской области // Климатические риски и космическая погода: материалы Междунар. конф., посвящ. памяти Нины Константиновны Кононовой, Иркутск, 14–17 июня 2021 г. Иркутск : Иркутский государственный университет, 2021. С. 91–98.

2. Интерфакс. Россия. Сибирь. URL: https://www.interfax-russia.ru/siberia/exclusives/glava-gumchs-po-irkutskoy-oblasti-b-v-nelyubov-b-prichina-80-lesnyh-pozharov-chelovecheskiy-faktor-poetomu-osnovnye-usiliya-my-napravim-na-rabotu-s-naseleniem (дата обращения 10.03.2025)

3. *Кичигина Н. В., Воропай Н. Н.* Современные гидроклиматические изменения в Байкальском регионе // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2021. Т. 3, вып. 4. С. 373–390.

4. Климатические и синоптические особенности территории Иркутской области / К. А. Лощенко, Н. В. Астафьева, С. А. Гаращук, Т. А. Сверкунова // Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России : материалы II Всерос. науч.-практ. конф., приуроч. к 55-летию кафедры гидрологии и природопользования ИГУ, Иркутск, 05–07 июля 2019 г. Иркутск : Изд-во ИГУ, 2019. С. 592–600.

5. *Кочугова Е. А., Осипова О. П., Труханов А. Э.* Циркуляционные механизмы формирования температурных аномалий на территории Азиатской России // География и природные ресурсы. 2020. Т. 162, № 3. С. 34.

6. *Мустаева П. А., Латышева И. В.* Климатические особенности температурного режима Иркутской области // Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике. 2022. С. 246–247.

7. Пространственно-временные и геоэкологические особенности температурного режима в Иркутской области в современный климатический период / С. Ж. Вологжина, А. В. Гекова, И. В. Латышева, К. А. Лощенко // Успехи современного естествознания. 2024. № 11. С. 22–29.

8. *Слеппева Е. В., Парыгина Е. А., Кичигина Н. В.* Генезис наводнений в Иркутской области // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2020. Т. 34. С. 96112.

9. *Холопцев А. В., Седов Д. В.* Климатические нормы повторяемости гроз над городами Сибири для месяцев пожароопасного сезона при современном потеплении климата // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2024. № 1 (32). С. 169–182.

10. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). Arctic Climate Change Update 2021: Key Trends and Impacts. Summary for Policy-makers. Tromsø, Norway. 2021. 16 p.

11. Indigenous Peoples, Lands, and Resources / T. M. Bennett, N. G. Maynard, P. Cochran, R. Gough [et al.] // Climate Change Impacts in the United States: The Third National Climate Assessment, ed. Jerry M. Melillo, Terese C. Richmond, and Gary W. Yohe, Washington, DC: US Global Change Research Program. 2014. P. 297–314.

УДК 556.555.3

Оценка многолетнего изменения квартального притока воды в Камское водохранилище

В. Н. Ромашова (vikt.romashova@yandex.ru), К. Д. Микова

Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Россия

Аннотация. В исследовании выполнена оценка многолетнего изменения притока воды в Камское водохранилище по кварталам. Исходными данными послужили величины среднесуточного притока воды к водохранилищу Камской ГЭС за период 1954–2022 гг. Полученные результаты показали, что во все кварталы наблюдается увеличение притока воды в водохранилище. При этом проверка на статистическую значимость показала, что выявленные тенденции статистически не значимы. Наибольшую изменчивость имеет приток воды в III и IV кварталах (C_v =0,36–0,38), наименьшая изменчивость притока во II и I кварталах (C_v =0,18–0,22). В целом за III и IV кварталы в водохранилище поступает 16–18 % притока. Во II квартале в водохранилище поступает 60 % притока.

Ключевые слова: приток воды в водохранилище, изменчивость притока, Камское водохранилище.

Введение

Приток воды в водохранилище считается одной из основных характеристик, которые влияют на режим работы гидроэлектростанции. Для того чтобы ГЭС эффективно работала необходимо знать, сколько воды притечет к водохранилищу, а также планировать сколько удастся выработать электроэнергии. Если неправильно спрогнозировать количество воды, поступившей в водохранилище, оно не наполнится до проектной отметки. В таком случае оно сможет наполниться в следующий раз только через год, что приведет к дефициту воды. Прогнозы притока воды к водохранилищу Камской ГЭС необходимы для надежной и эффективной эксплуатации водохранилища, а также для минимизации риска возникновения аварийных ситуаций.

Работ, посвященных притоку воды в водохранилище немного, несмотря на актуальность темы [1–3; 5; 6]. Для Камского водохранилища вопросы притока воды к водохранилищу недостаточно изучены. В условиях, когда происходят современные климатические изменения [7], а также изменения зимнего стока по

сезонам [4], вопросы прогноза притока воды к водохранилищу остаются актуальными. Поэтому целью исследования являлся анализ квартального притока воды к Камскому водохранилищу за многолетний период.

Характеристика исследуемой территории

Камское водохранилище создано в 1954 г. на р. Каме, в результате строительства Камской ГЭС. Территория водосбора Камского водохранилища, общей площадью 1910 км², охватывает бассейн Верхней и Средней Камы, а также расположена на северо-востоке европейской части России. Простирается водохранилище на 250 км с севера на юг. Правобережная часть водосбора располагается на Русской равнине, левобережная – в предгорьях и на западном склоне Уральских гор. Водохранилище имеет вытянутую форму с изрезанными берегами и крупные заливы. Приток в Камское водохранилище формирует сток рек: Камы, Вишеры, Чусовой, Сылва, Яйвы, Иньва, Косьва и Обвы.

Исходные данные и методы исследования

В работе использованы материалы расчетов Пермского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (ПЦГМС) по среднесуточному притоку воды к водохранилищу Камской ГЭС за период 1954–2022 гг. Исследуемая характеристика притока рассчитана ПЦГМС по фактическим значениям расхода воды в замыкающих створах рек, втекающих в водохранилище и боковой приточности с неучтенных территорий.

Оценка значимости трендов выполнена по величине $p < 0{,}05$. Для этого была проверена нулевая гипотеза об отсутствии тренда. Если уровень значимости $p < 0{,}05$, то нулевая гипотеза отвергается, что означает, что существует статистически значимый тренд. В случае если $p > 0{,}05$, нулевая гипотеза принимается, что указывает на отсутствие статистически значимого тренда.

Результаты и обсуждение

Анализ многолетнего изменения притока воды в Камское водохранилище показал, что во все кварталы наблюдается рост притока воды (рис. 1, 2). Изменение притока воды к водохранилищу во II квартале, в течение которого на реках происходит основная волна весеннего половодья, имеет небольшую тенденцию к росту.

Проверка статистической значимости выявленных тенденций показала, что тренд является статистически незначимым ($p > 0{,}05$). Это свидетельствует о несущественном повышении притока воды в данном квартале. Наибольший приток наблюдался в 1990 г., когда количество поступающей воды составило 50,3 км³, что более чем в 2 раза превысило наименьшее значение притока, зафиксированное в 1954 г. (20,1 км³). Средняя за многолетний период величина притока воды во II квартале составила 34,5 км³.

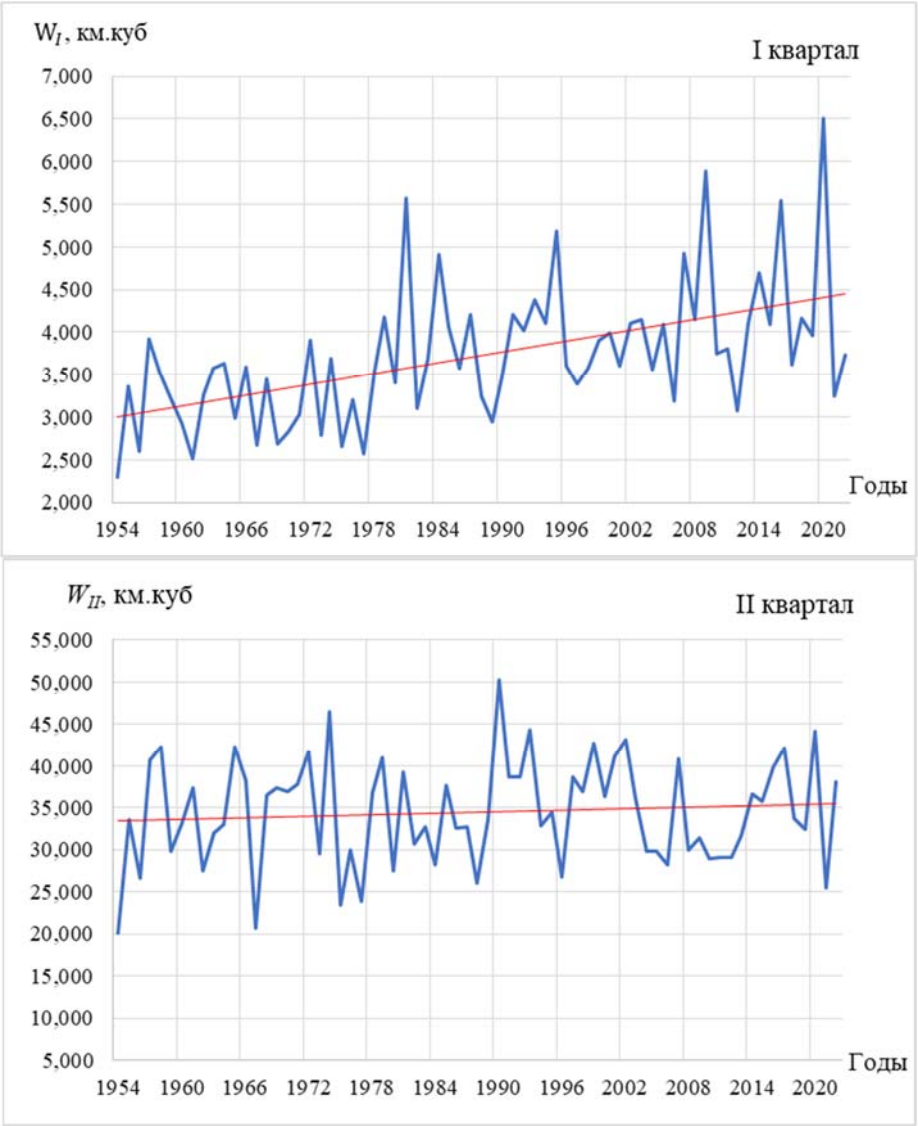


Рис. 1. Многолетнее (1954–2022 гг.) изменение притока воды к Камскому водохранилищу за I–II квартал

Изменение притока воды в III квартале характеризуется тенденцией к росту притока воды за рассматриваемый период. Анализ многолетнего изменения притока не выявил статистически значимых изменений ($p > 0{,}05$). Наибольший приток воды наблюдался в 2019 г. – 22,7 км³, а наименьший приток наблюдался в 1960 г. и составил 5,34 км³. Среднее значение притока за рассматриваемый период составило 10,118 км³. В некоторые годы приток был значительно выше среднего значения (например, в 1956, 1959, 1962, 1965, 1969, 1971, 1978–1980, 1984–1987, 1991–1994, 1996, 2007–2009, 2012, 2015, 2017–2019 гг.), а в другие – значительно ниже (например, в 1954–1955, 1957–1958, 1960–1961, 1963–1964, 1966–1968, 1970, 1972–1977, 1981–1983, 1989–1990, 1995, 1997–2006, 2010–2011, 2013–2014, 2016, 2020–2022).

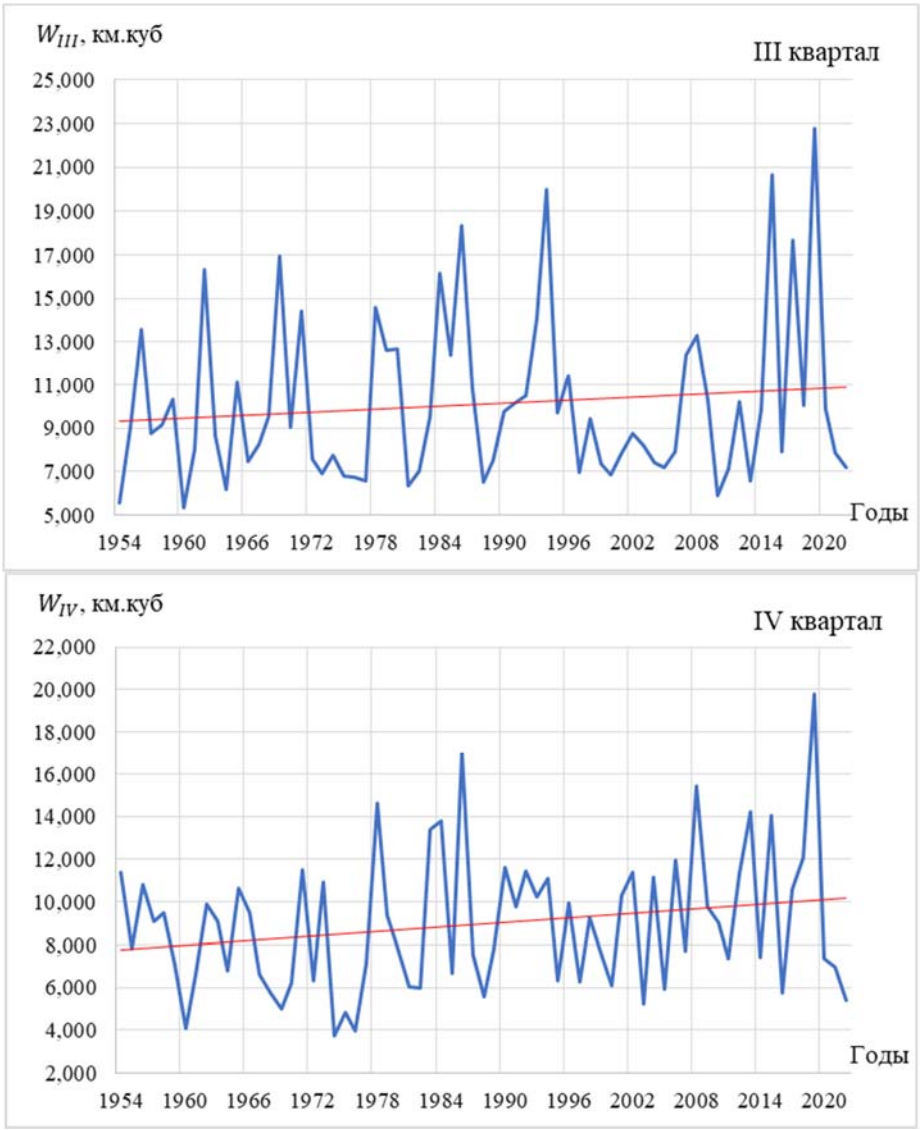


Рис. 2. Многолетнее (1954–2022 гг.) изменение притока воды к Камскому водохранилищу за III-IV квартал

В IV квартале наблюдается рост притока воды к водохранилищу за период 1954–2022 гг. Наибольшая величина притока наблюдалась в 2019 г., когда объем поступающей воды составил 19,8 км³. Это в пять раз превысило наименьшее значение притока, зафиксированное в 1974 г. (3,75 км³). Средняя величина притока воды за данный квартал составила 8,98 км³. В данном квартале в водохранилище поступает в среднем 16 % общего притока воды.

Изменчивость притока так же, как в III квартале остается высокой C_v =0,36 (табл. 1) из-за большой неопределенности выпадения жидких осадков. Данный период характеризуется переходом от осенних условий в октябре (поверхностное и подземное питание рек) к зимним условиям в ноябре-декабре (только грунтовое питание). Поэтому изменчивость притока чуть меньше, чем в III квартале. В IV квартале изменение притока воды к водохранилищу также имеет тенденцию к росту. Проведенный анализ значимости тренда показал, что данное изменение за период 1956–2022 гг. статистически не значимо ($p > 0,05$).

Таблица 1

Величины годового (км. куб/год) и квартального притока воды (км. куб/квартал) к Камскому водохранилищу

Показатель	Кварталы				Годовой приток
	первый	второй	третий	четвертый	
Средний приток	3,73	34,5	10,1	8,98	57,3
Величина притока в долях от годового, %	6	60	18	16	100
Наибольший приток (год)	6,51 (2020)	50,3 (1990)	22,7 (2019)	19,8 (2019)	78,9 (2019)
Наименьший приток (год)	2,30 (1954)	20,1 (1954)	5,34 (1960)	3,75 (1974)	37,7 (1975)
C_v	0,22	0,18	0,38	0,36	0,16

В I квартале средняя величина притока воды составила 3,73 км³. Приток воды в водохранилище в данный период наименьший (6 % от годового притока). В 2020 г. отмечена наибольшая величина притока, когда количество поступающей воды составило 6,51 км³. Это в три раза превысило наименьшее значение притока, зафиксированное в 1954 г. и составляющее 2,30 км³. (табл. 1). Межгодовая изменчивость притока небольшая C_v=0,22. В первом квартале, на который приходится зимняя межень, какой-либо тенденции изменения притока воды к водохранилищу не наблюдается. Оценка значимости тренда показала, что тренд статистически незначимым ($p > 0,05$). В 2020 г. отмечена наибольшая величина притока, когда количество поступающей воды составило 6,507 км³. Это в два раза превышает наименьшее значение притока, зафиксированное в 2012 г. и составляющее 3,087 км³ Средняя величина притока воды за II квартал составила 4,116 км³.

Выводы

На основе анализа квартального притока воды в Камское водохранилище можно сделать вывод о значительной изменчивости притока за рассматриваемый период (1954–2022 гг.).

В целом самая большая изменчивость притока воды к Камскому водохранилищу наблюдается в III и IV квартале, где коэффициент вариации составил 0,38 и 0,36 соответственно. Это связано с тем, что сток в этот период формируется за счет жидких осадков, которые могут выпадать с разной вероятностью. Самая наименьшая изменчивость наблюдается во II квартале, где коэффициент вариации равен 0,18. В этот период сток формируется преимущественно за счет таяния снега на водосборе. Основной приток воды происходит во втором квартале, в весенний период, составляя 60 % от годового притока.

Все четыре сезона (зима, весна, лето, осень) характеризуются различными тенденциями изменения притока воды. При этом статистические проверки показали, что имеющиеся тренды являются статистически незначимыми.

Список литературы

1. *Борщ С. В., Бураков Д. А., Симонов Ю. А.* Методика оперативного расчета и прогноза суточного притока воды в водохранилище Зейской ГЭС // Труды Гидрометцентра России. 2016. № 359. С. 106–127.

2. 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 [и др.] // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2017. № 366. С. 68–86.

3. Прогнозирование притока воды в Цимлянское водохранилище / С. В. Борщ, Ю. А. Симонов, А. В. Христофоров, Н. М. Юмина // Исследования и прогнозы. 2022. № 4. С. 47–63.

4. *Гайдукова Е. В., Викторова Н. В., Девятов В. С.* Методика стохастического прогноза притока воды к водохранилищам ГЭС//Современные проблемы водохранилищ и их водосборов. 2019. С. 19–22.

5. *Калашникова О. Ю.* К разработке методов долгосрочного прогноза стока горных рек и притока воды в водохранилища на примере реки Нарын // Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана. 2015. № 5. С. 100–103.

6. *Литвинов А. С., Кучай Л. А., Соколова Е. Н.* Анализ динамики годового притока в Рыбинское водохранилище и его моделирование // Научное обеспечение реализации Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 года : сб. науч. тр. Петрозаводск, 2015. С. 174–180.

7. *Соколов О. В., Ушаков М. В.* Учет климатических изменений при прогнозировании притока воды в Колымское водохранилище на май // Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. 2012. № 566. С. 289–297.

Секция

СОВРЕМЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ

УДК 528.88(282.256.341)

Моделирование и разработка программного обеспечения для автоматизированного анализа спутниковых снимков: оценка и мониторинг площади о. Ярки

Ф. М. Андреев (fm.inbox@yandex.ru)
Иркутский государственный университет, г. Иркутск

Аннотация. Статья посвящена разработке программного обеспечения для автоматизированного анализа спутниковых снимков с целью оценки и мониторинга изменения площади о. Ярки, расположенного на северной оконечности оз. Байкал. Для оценки параметров использованы данные Landsat за период открытой акватории в 1995–2024 гг. Дается информация об основных этапах работы алгоритма для расчета площади объекта в зависимости по значениям спектрального водного индекса (WRI) и приводится информация о структуре отчет, составляемом по результатам работы алгоритма. В ходе исследования рассчитаны площади о. Ярки за более чем 150 дней съемки, но ввиду не сразу выявленных дефектов снимков, в работу взяты только 144 дня. За все 144 дня съемки получены данные о площадях о. Ярки и сопоставлены с информацией об уровенном режиме оз. Байкал за период исследования.

Ключевые слова: спектральный водный индекс, о. Ярки, алгоритм обработки, Landsat.

Работа была посвящена автоматизации расчета значения площади о. Ярки, расположенного на северной оконечности оз. Байкал, по значениям спектрального водного индекса (WRI) [1; 2] и обучению алгоритма для моделирования площадей о. Ярки в зависимости от уровенного режима оз. Байкал.

Для оценки морфометрических параметров острова были использованы данные Landsat за период открытой акватории в 1995–2024 гг. Суммарно было обработано более 150 дней съемки, но в работе оказались только 144. Так же использованы данные об уровенном режиме оз. Байкал.

Разработанный алгоритм открывает главную директорию, содержащую в себе папки вида «ДД.ММ.ГГГГ», каждая папка, в свою очередь, содержит файлы архива спектральной съемки за выбранную дату. Скрипт в зависимости от определённого источника понимает, какие каналы надо взять для расчета WRI (табл. 1).

Таблица 1

Структура алгоритма для расчета площади объекта в зависимости по WRI

№	Операция
1	Определение источника данных (LT05, LC08, LC09).
2	Поиск необходимых каналов в директории по критериям.
3	Расчет WRI.
4	Обрезка растра по векторной маске.
5	Реклассификация по принципу «суша-вода».
6	Преобразование растрового слоя в векторный.
7	Расчет площади объекта.
8	Запись данных (площади) в атрибуты векторного слоя.
9	Сохранение векторного слоя.
10	Сохранение данных за расчетный период в файл . xlsx.

Так как файлы спутниковой съемки содержат в названии сведения об источнике данных (LT05) и номере канала, было принято решение алгоритм строить на идентификации этих данных.

Разработаны две основные функции: 1 – Функция определения типа спутника по содержанию наименования отдельных файлов. 2 – Функция определения каналов спутника по содержанию наименования отдельных файлов (рис. 1).

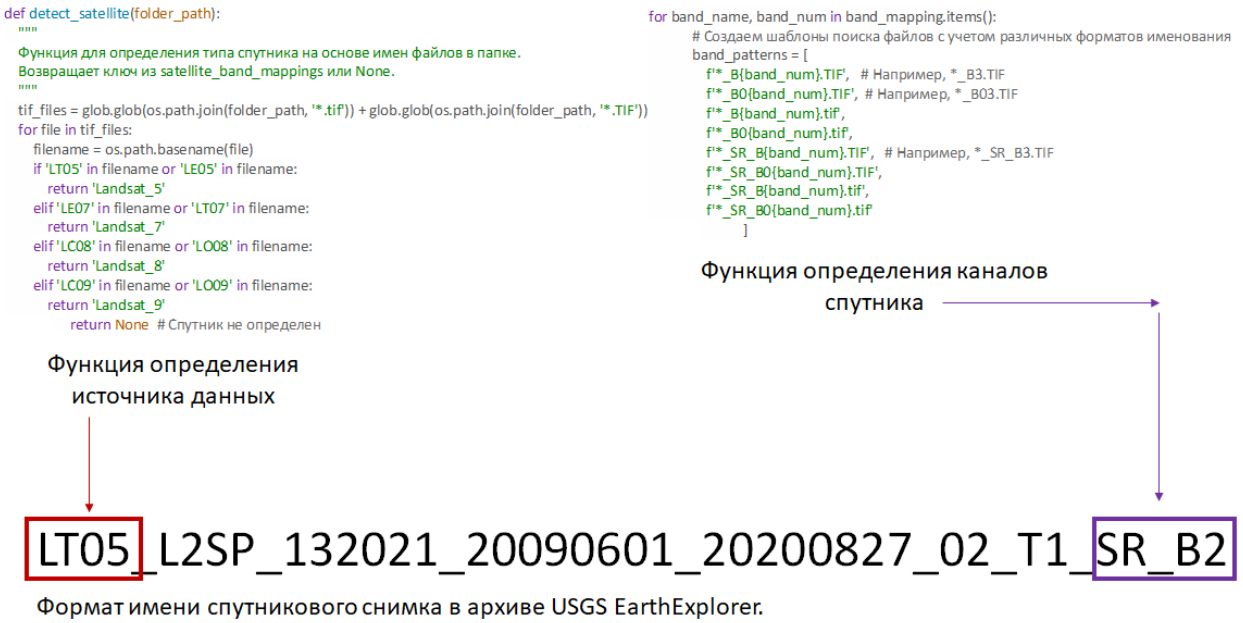


Рис. 1. Функции идентификации исходных данных

Для определения каналов спутника также составлен словарь в зависимости от источника данных. Здесь представлен краткий вывод работы алгоритма после обработки каждой папки. Работа программы сведена к циклической, работа программы завершается после обработки всех подпапок главной директории. Краткий вывод после обработки каждой подпапки представлен на рис. 2.

```
Обработка папки: 01.06.2009
  Определен спутник: Landsat_5
  Найден файл для канала Green (Band 2): LT05_L2SP_132021_20090601_20200827_02_T1_SR_B2.TIF
C:\Users\theringismine\AppData\Local\Temp\ipykernel_10824\769709405.py:73: DeprecationWarning: The 'unary_union' attribute is deprecated, use the 'union_all()' method instead.
  mask_geometry = [mapping(mask_gdf.unary_union)]
  Найден файл для канала Red (Band 3): LT05_L2SP_132021_20090601_20200827_02_T1_SR_B3.TIF
  Найден файл для канала NIR (Band 4): LT05_L2SP_132021_20090601_20200827_02_T1_SR_B4.TIF
  Найден файл для канала SWIR (Band 5): LT05_L2SP_132021_20090601_20200827_02_T1_SR_B5.TIF
  Все необходимые каналы найдены. Выполняется расчет WRI.
  WRI слой сохранен по пути: W:/Self/Postgraduate/Projects QGIS/DISS_PRJS/data_2\01.06.2009\01.06.2009_WRI.tif
  Применение маски к WRI слою.
  Реклассифицированное WRI изображение сохранено по пути: W:/Self/Postgraduate/Projects QGIS/DISS_PRJS/data_2\01.06.2009\output\01.06.2009_WRI_reclassified.tif
  Конвертация растра в вектор для получения контура острова.
  Площадь острова: 3.013 кв.км
  Векторный слой острова сохранен по пути: W:/Self/Postgraduate/Projects QGIS/DISS_PRJS/data_2\01.06.2009\output\01.06.2009_island.shp
```

Рис. 2. Отчет алгоритма после обработки каждой подпапки

Были рассчитаны площади о. Ярки за более чем 150 дней съемки, но ввиду не сразу выявленных дефектов снимков, в работу взяты на данный момент только 144 дня. За все 144 дня съемки получены данные о площадях о. Ярки. Данные об уровенном режиме оз. Байкал были в наличии только за период с 2008 по 2019 г. (49/144 дней съемки) – АИС ГМВО. Коэффициент корреляции рядов за данный период –0,95. Это свидетельствует о высокой обратной зависимости (рис. 3).

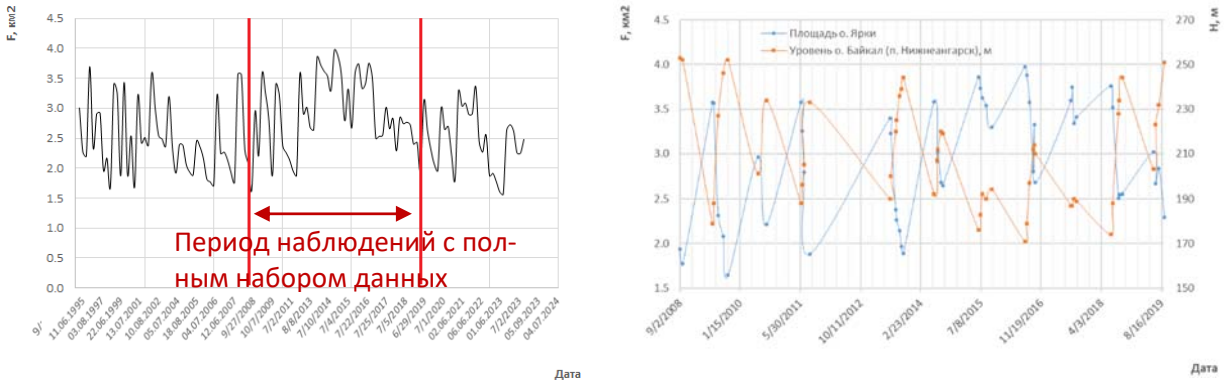


Рис. 3. Результат работы алгоритма – рассчитанные площади о. Ярки (слева) и График изменения площади о. Ярки и уровней оз. Байкал (справа)

С целью увеличения данных для обучения будущего алгоритма моделирования площадей о. Ярки, были рассчитаны теоретические данные об уровенном режиме оз. Байкал за периоды с 1995 по 2008 и с 2020 по 2024 г. Для этого был написан алгоритм, в который подгружается таблица с двумя рядами наблюдений, один из которых включает пропуски данных. Программа разделяет данные на известные и отсутствующие, на основании линейной регрессии определяет погрешность данных и заполняет отсутствующие (рис. 4). Данные: 1. Информация об уровенном режиме оз. Байкал по данным АИС ГМВО и расчетные площади о. Ярки (2008–2019 годы, 49 дней съемки). 2. Расчетные площади о. Ярки с 1995 по 2024 г. (144 дня съемки) и 3. Отсутствующие данные об уровенном режиме оз. Байкал с 1995 по 2008 и с 2020 по 2024 г. Коэффициент корреляции площади о. Ярки с расчетными (включая фактические) данные об уровенном режиме оз. Байкал составляет –0,91.

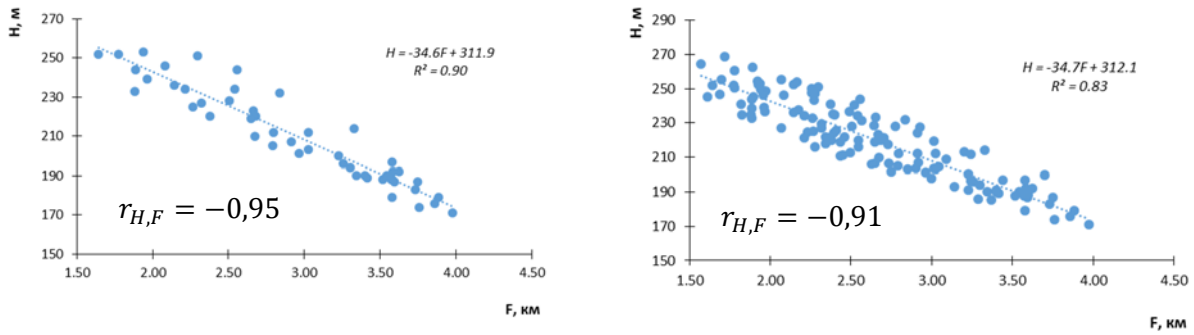


Рис. 4. График связи площади о. Ярки и фактических уровней оз. Байкал (слева) и График связи площади о. Ярки и расчетных уровней оз. Байкал (справа)

Смоделированы отсутствующие данные об уровенном режиме оз. Байкал за период с 1995 по 2007 и с 2020 по 2024 г. На основании результата работа модели, разработан алгоритм (табл. 2) для моделирования морфометрических изменений объекта (о. Ярки).

Таблица 2

Структура алгоритма для моделирования и визуализации морфометрических изменений

№	Операция
1	Загрузка векторных контуров
2	Привязка уровня воды озера к атрибутам площади векторных слоев оз. Байкал
3	Обучение модели: построение зависимости между уровнем воды и площадью
4	Задается уровень оз. Байкал, для которого выполняется моделирование
5	Генерация морфометрических изменений о. Ярки

Программа позволяет моделировать и визуализировать (рис. 5) морфометрические изменения береговой линии объекта, основываясь на зависимости модели. Все расчеты алгоритм проводит в EPSG: 32649 WGS 84 UTM zone 49N.

Рис. 5. Рассчитанные алгоритмом векторные слои о. Ярки

Список литературы

1 *Морозова В. А.* Расчет индексов для выявления и анализа характеристик водных объектов с помощью данных дистанционного зондирования // Современные проблемы территориального развития. 2019. № 2. ID 85. С. 1–11.

2 *Манилюк Т. А., Маслова А. В.* Исследование водных поверхностей озер путем использования водных индексов по данным дистанционного зондирования // Вестник Забайкальского государственного университета. 2017. Т. 23, № 3. С. 4–11.

УДК 551.5(571.53)

Статистический анализ данных об атмосферных осадках на метеорологических станциях и станциях мониторинга химического состава осадков в Иркутском УГМС

Д. А. Галушин (galushin2012@yandex.ru)[1,2], С. А. Громов (gromov@igras.ru)[1,3], С. М. Авдеев (avdeevbio@yandex.ru)[4]

[1]*Институт глобального климата и экологии им. акад. Ю. А. Израэля, г. Москва*
Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К. А. Тимирязева, г. Москва
[3]*Институт географии Российской академии наук, г. Москва*
[4]*Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной биотехнологии, г. Москва*

Аннотация. Исследование посвящено анализу временных рядов атмосферных осадков, собранных на станциях метеорологической сети и станциях наблюдения за химическим составом осадков (ХСО) в Иркутской области. Использовались данные наблюдений за период с 2010 по 2020 г. Основной целью было оценить возможность объединения данных этих сетей для решения научных задач воздействию атмосферного загрязнения на природные экосистемы, в том числе, с использованием средств интерполяции в геоинформационных системах (ГИС). В работе анализировались данные станций Иркутского УГМС Росгидромета, из которых на 24 ведутся только метеорологические наблюдения, а на 10 организован мониторинг химического состава осадков. Были использованы современные методы статистического анализа, включая стандартные параметры, которые позволяют оценить однородность данных при сравнении результатов для станций указанных сетей. Получено, что коэффициент вариации сумм осадков на станциях ХСО варьирует от 10 до 24 %, тогда как на метеорологических станциях он составляет от 9 до 28 %. Это указывает на возможность совместного использования данных обеих сетей для расширения информации в ГИС. Практическая значимость исследования заключается в возможности использования объединенных данных для изучения, моделирования и анализа осадков в ГИС, что способствует получению более точных и детальных оценок влажных атмосферных выпадений веществ в Иркутской области.

Ключевые слова: атмосферные осадки, коэффициент вариации, Иркутская область, метеорология, сеть химического состава осадков.

Введение

Метеорология, как наука, изучает атмосферные процессы и их роль в формировании на климатические режимы территорий регионов. В последние десятилетия статистические методы стали неотъемлемой частью метеорологических исследований, открывая новые горизонты в понимании и прогнозировании климатических особенностей районов исследований и возможных проявлений изменений климата. Эти методы позволяют не только определять средние значения метеорологических элементов, но и выявлять их вариативность, что является ключевым для анализа и интерпретации данных [2].

Количество атмосферных осадков – один из наиболее важных метеорологических элементов, которые подвержены значительной изменчивости и колебаниям во времени и пространстве. Анализ их статистических характеристик, та-

ких как средние значения, дисперсия, коэффициент вариации и асимметрии, позволяет выявлять закономерности, которые не всегда очевидны при использовании только средних сумм осадков. Это особенно важно для оценки влияния атмосферных процессов на географическую среду и выявления возможных климатических изменений.

Однако, несмотря на значительные достижения в области статистического анализа метеорологических данных, существует ряд ограничений его использования. Существующие методы часто не позволяют учитывать особенности распределения результатов наблюдений во времени и пространстве, что затрудняет выявление скрытых закономерностей и механизмов формирования климатического режима. В связи с этим возникает необходимость в разработке и внедрении новых подходов, которые могли бы более точно и полно описывать метеорологические процессы [3; 4].

Особое внимание уделяется исследованию атмосферных осадков и их химического состава. Осадки играют ключевую роль в переносе загрязняющих веществ и их распределении на региональном уровне. В России функционирует сеть мониторинга химического состава осадков (ХСО), однако современное количество ее станций недостаточно для полного охвата территории страны. В связи с этим наряду с расширением сети станций актуальной задачей является разработка новых методов анализа и обработки дополнительных данных, получаемых на государственной наблюдательной сети (ГНС). Перспективным направлением является интеграция данных, получаемых со станций ХСО, с информацией от сети Росгидромета, что позволит повысить точность и достоверность получаемых пространственных результатов и оценок. Однако для эффективного использования объединенных данных необходимо провести оценку их сопоставимости и достоверности.

В данной работе проводится анализ применения статистических методов для оценки пространственных вариаций характеристик атмосферных осадков на территории Иркутской области. В исследовании использованы данные, полученных со станций наблюдений за ХСО и метеорологических станций. Целью работы является оценка возможности применения данных единой сети для интерполяции информации об загрязнении атмосферных выпадений для территории с использованием геоинформационных систем (ГИС).

Для достижения этой цели были решены следующие задачи:

1) сбор и систематизация данных об атмосферных осадках с метеорологических станций Иркутской области и станций мониторинга химического состава осадков региона;

2) анализ статистических характеристик осадков;

3) оценка точности и надежности данных, полученных со станций ХСО и метеорологических станций, для дальнейшего использования в интерполяционных моделях.

Методы и материалы

Для проведения статистического анализа годовых сумм атмосферных осадков использовались данные, полученные из Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мировой центр данных (далее – метеорологические данные), а также данные, собранные из ежегодников результатов наблюдений за химическим составом осадков (далее – станции ХСО) [1; 6], публикуемые Главной геофизической обсерваторией (ГГО) Росгидромета (рис. 1).

Для проведения статистического анализа были использованы современные стандартные методы обработки и анализа данных, включая методы описательной статистики, такие как вычисление значений средних, медиан, стандартных отклонений и коэффициентов вариации.

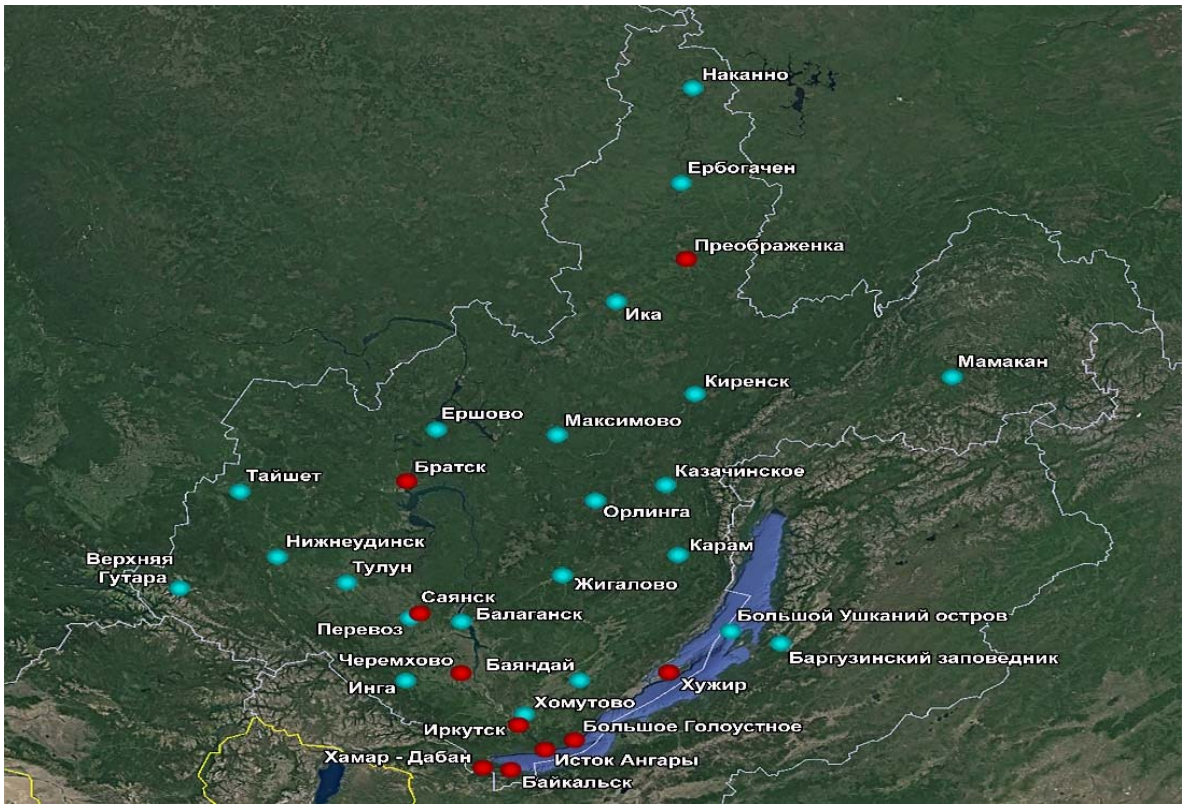


Рис. 1. Расположение станций химического состава осадков (красные точки) и метеорологических станций и постов (синие точки) в Иркутской области

Результаты и их обсуждения

В рамках данного исследования был проведен анализ параметров описательной статистики для количества выпавших осадков в Иркутской области, основываясь на данных наблюдений за период с 2010 по 2020 г. Особое внимание уделялось оценке возможности использования данных сети УГМС для интерполяции данных о химическом составе осадков ХСО и моделирования процессов выпадения загрязняющих веществ в масштабах региона. Для этого был рассчитан коэффициент вариации суммы осадков, который является важным показате-

лем однородности данных. Согласно литературным источникам, значение коэффициента вариации, превышающее 33 %, свидетельствует о неоднородности данных и делает их непригодными для дальнейшего анализа.

В составе сети Иркутского УГМС Росгидромета на территории области функционируют 24 станции, на которых ведутся только метеорологические наблюдения, и 10 станций, в программу которых включены также отборы проб на химический состав осадков. Учитывая, что наблюдения за ХСО на трех станциях (Большое Голоустное, Исток Ангары и Байкальск) были начаты в 2010 г., статистический анализ проводился за период с 2010 по 2020 гг., данные за период с 2003 по 2010 г. не были включены [5].

Среднегодовое количество осадков в регионе пространственно варьирует от 168 мм на островной станции Хужир до 1338 мм на горной станции Хамар-Дабан, что свидетельствует о значительной неоднородности географических и климатообразующих условий. Медианное значение суммы осадков также демонстрирует значительные различия: от 160 мм на ст. Хужир до 1301 мм на ст. Хамар-Дабан (рис. 2).

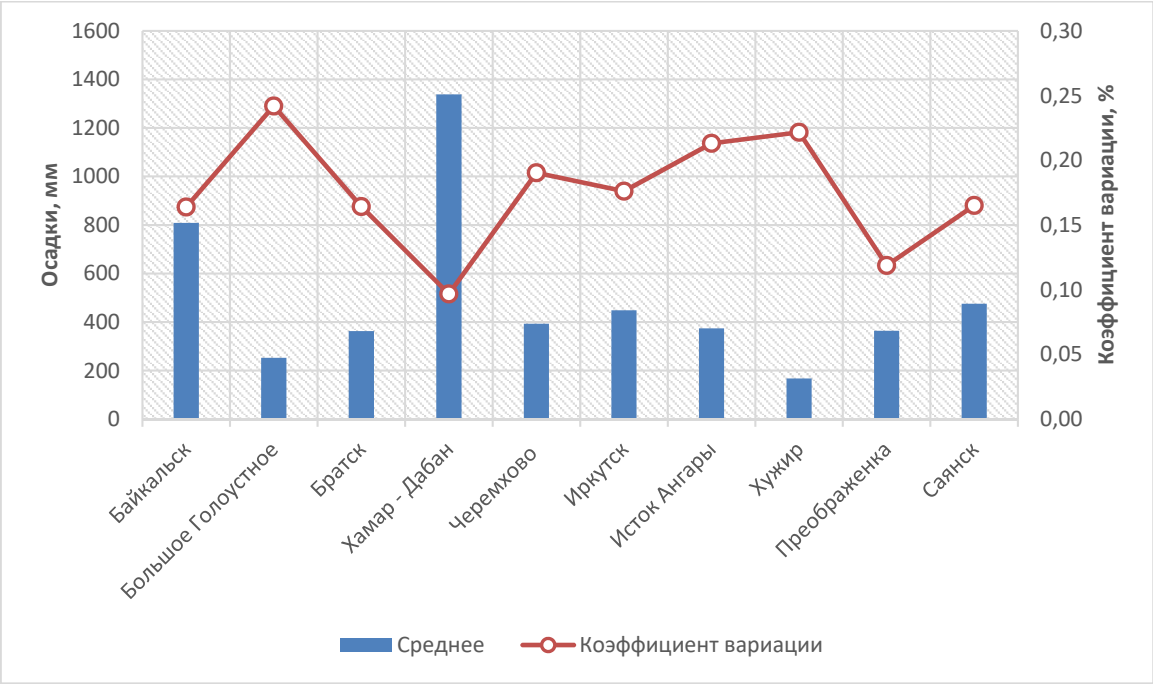


Рис. 2. Среднемноголетняя годовая сумма осадков и коэффициент вариации данных станций ХСО Иркутской области за период с 2010 по 2020 г.

Дисперсия рядов данных о количестве осадков для станций ХСО Иркутской области демонстрирует значительные различия: от 1379 на ст. Хужир до 17 552 на ст. Байкальск. Это указывает на высокий разброс данных по годам, особенно для станций, расположенных в горных районах. Минимальные значения дисперсии наблюдаются для станций Хужир и Преображенка, что может свидетельствовать о более стабильных климатических условиях в этих районах.

Стандартное отклонение, являющееся важной характеристикой распределения данных, в данном исследовании для сумм годовых осадков на станциях в горной местности варьировало в пределах от 129 до 131. Для станций Хужир и Преображенка его значения составили 37 и 43 соответственно, что указывает на более узкий интервал изменений наиболее вероятных значений по сравнению с другими станциями.

Анализ асимметрии распределения данных выявил наиболее выраженную левостороннюю асимметрию распределения для станции Братск с коэффициентом асимметрии –1,21. В то же время, на станции Байкальск наблюдается «правосторонняя» асимметрия со значением в 1,26. Эксцесс распределения данных на станции Байкальск составляет 2,02, что указывает на остроконечную форму графика и более выраженные пики по сравнению с нормальным распределением.

Коэффициент вариации среднемноголетних годовых сумм осадков для всех наблюдательных станций химического состава осадков в Иркутской области изменяется от 10 до 24 %. Это свидетельствует о достаточно высокой однородности данных годовых сумм осадков. Такие значения коэффициента вариации указывают на стабильность и согласованность данных, что является важным для дальнейшего анализа и интерпретации результатов.

Применение правила трех сигм (показывающих границы с вероятностью 97 %) позволяет определить доверительные интервалы для средних значений. Для станции Байкальск интервал составляет от 411 до 1205 мм осадков, а для станции Хужир – от 56 до 278 мм. Эти интервалы показывают диапазон значений, в котором с высокой вероятностью будут находиться средние многолетние годовые суммы осадков на данных станциях (рис. 3).

Рис. 3. Доверительные интервалы для среднемноголетних годовых сумм атмосферных осадков для станций ХСО в Иркутской области

В ходе анализа климатических данных для метеорологических станций, расположенных в регионе, выявлено значительное разнообразие для средних сумм выпадающего за год количества осадков. На ст. Большой Ушканий остров зафиксировано минимальное количество осадков (для рассматриваемых метеорологических станций региона) – 224 мм, в то время как на станции Верхняя Гутара наблюдается максимальное значение – 579 мм. Медиана сумм осадков также демонстрирует широкий диапазон: от 213 мм на станции Большой Ушканий остров до 559 мм на станции Верхняя Гутара (рис. 4).

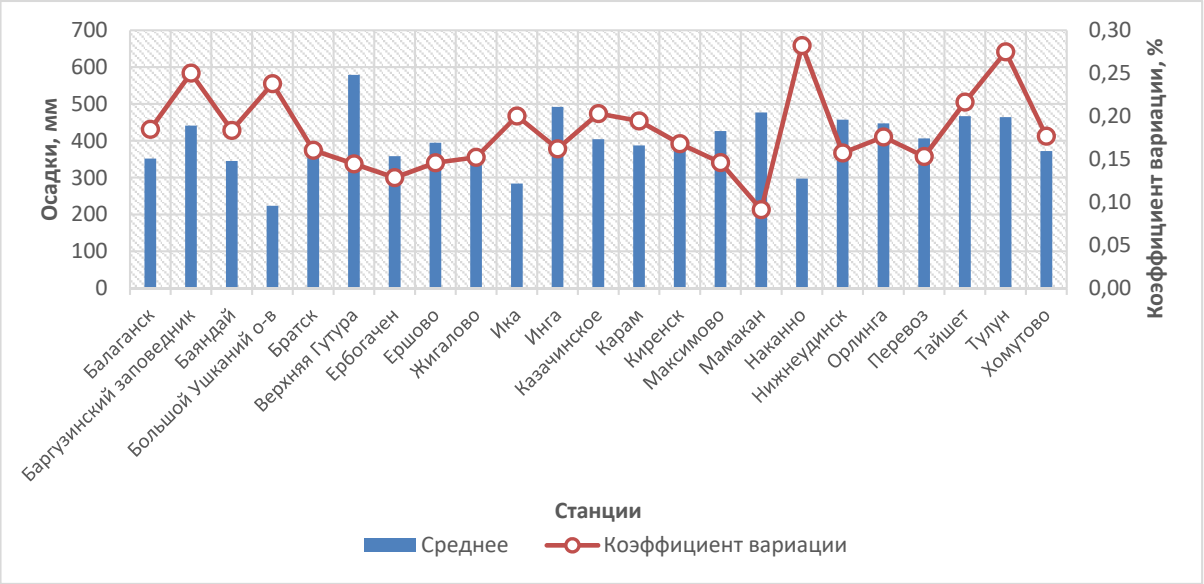


Рис. 4. Среднемноголетняя годовая сумма осадков и коэффициент вариации данных станций УГМС Иркутской области

Наибольший разброс годовых данных относительно среднего значения отмечен на станции Тулун, где дисперсия составляет 16301. Это указывает на значительную вариативность количества осадков в данном регионе. Напротив, наименьший разброс зафиксирован для станции Мамакан с дисперсией 1903, что свидетельствует о незначительных межгодовых изменениях в выпадении атмосферных осадков. Соответствующие стандартные отклонения составляют 128 для станции Большой Ушканий остров и 44 для станции Мамакан.

Распределение данных на исследуемых станциях имеет асимметричный характер. Коэффициент асимметрии на станции Казачинское составляет 1,53, что указывает на смещение распределения в сторону более высоких значений. На станции Тайшет наблюдается обратная картина – коэффициент асимметрии – 0,76. Эксцесс также различается: на станции Казачинское распределение имеет остроконечную форму (коэффициент эксцесса 3,92), что указывает на наличие «толстых хвостов» и вероятность редких экстремальных значений. На станции Тулун распределение характеризуется плосковершинной формой (коэффициент эксцесса –1,48), что говорит о большей вероятности отклонений от среднего.

Можно утверждать, что с вероятностью 97 % (правило трех сигм) значения осадков для станции Тулун будут попадать в доверительный интервал от 81 до

847 мм, что указывает на значительный разброс значений ряда данных. Для станции Большой Ушканий остров интервал составляет от 64 до 383 мм, что также свидетельствует о значительном разбросе значений (рис. 5).

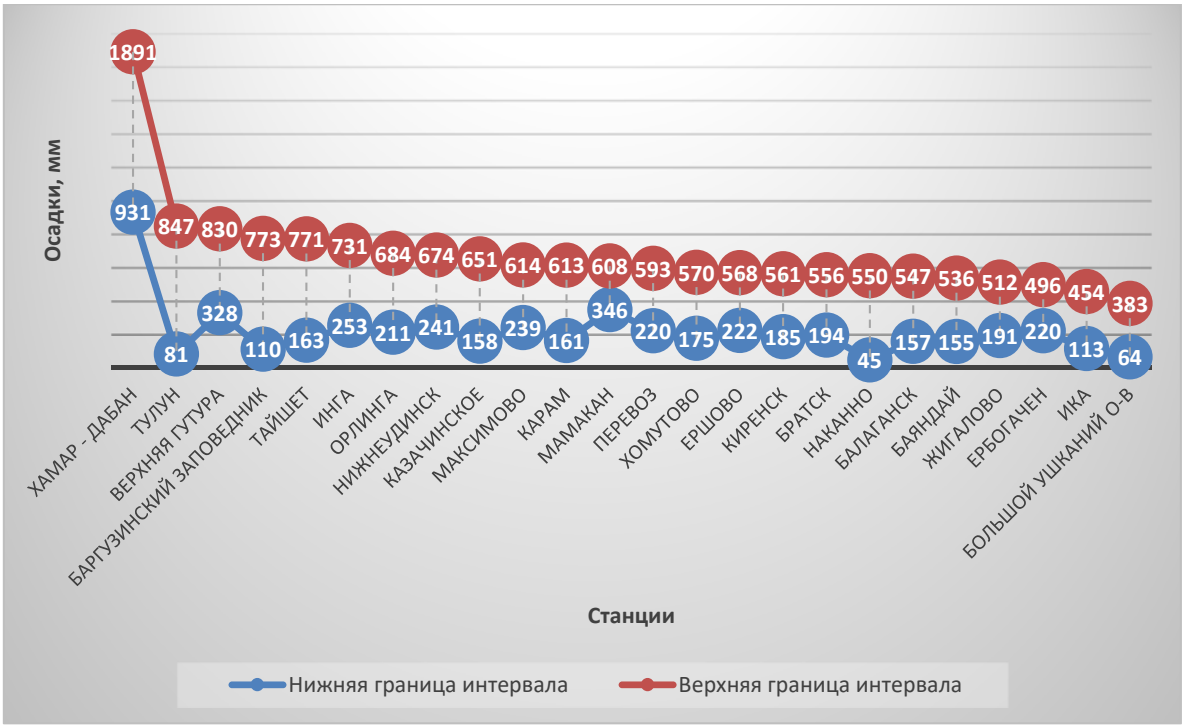


Рис. 5. Доверительные интервалы для среднемноголетних годовых сумм атмосферных осадков на станциях Иркутского УГМС в 2010–2020 гг.

Коэффициент вариации данных по осадкам на всех метеорологических станциях региона составляет менее 33 %, что указывает на их однородность. Сравнение коэффициентов вариации для метеорологических станций и станций сети ХСО подтверждает однородность данных в двух различных сетях наблюдений. Это позволяет считать обоснованной экстраполяцию данных о содержании сульфатов и нитратов со станций ХСО на районы, где проводятся только метеорологические наблюдения, что расширяет возможности анализа пространственных характеристик изменений влажных выпадений кислотообразующих веществ в регионе.

Заключение

Анализ данных наблюдений за осадками на сети УГМС Росгидромета в Иркутской области выявил изменчивость среднемноголетние сумм осадков для метеорологических станций в разных частях региона. Эти различия обусловлены как географическими факторами, так и местными климатообразующими условиями, включая особенности рельефа, близость к крупным водоемам и их влияние, а иногда влияние антропогенных факторов. Высокая межгодовая изменчивость осадков на некоторых станциях подчеркивает необходимость проведения дальнейших исследований с использованием более длинных рядов наблюдений для получения уточненных оценок современных характеристик, а также возможных

проявлений климатических изменений, для их использования в исследованиях воздействия загрязнения атмосферы на экосистемы региона.

Сравнение коэффициентов вариации и доверительных интервалов показало, что данные метеорологических станций и станций ХСО в Иркутской области характеризуются высокой степенью однородности статистических параметров. Это подтверждает возможность использования этих данных совместно для экстраполяции и проведения анализа в геоинформационных системах, а также для проведения комплексных исследований в области экологии и метеорологии.

Исследование выполнено в рамках темы НИОКТР АААА-А20-120013190049-4 «Развитие методов и технологий мониторинга загрязнения природной среды вследствие трансграничного переноса загрязняющих веществ (ЕЭК ООН: ЕМЕП, МСП КМ) и кислотных выпадений в Восточной Азии (ЕАНЕТ)».

Список литературы

1. Данные – Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных. URL: http://meteo.ru/data-access/?ysclid=m7n9sioqmt480250968 (дата обращения: 03.02.2025).

2. *Исаев А. А.* Статистика в метеорологии и климатологии. М. : Изд-во МГУ, 1988. 248 с.

3. Кочугова, Е. А. Сезонные изменения атмосферных осадков на территории Иркутской области / Е. А. Кочугова, А. Е. Шутова // Динамика и взаимодействие геосфер земли : материалы Всерос. конф. с междунар. участием, посвящ. 100-летию подготовки в Том. гос. ун-те специалистов в области наук о Земле. Томск, 8–12 ноября 2021 г. В 3 т. Т. 2. Томск : Том. центр науч.-техн. информ., 2021. С. 145–148.

4. Современные изменения климата на территории Иркутской области / И. В. Латышева [и др.] //Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле. 2010. Т. 2. С. 110–125.

5. Методическое письмо. Обзор состояния работ по наблюдению за химическим составом и кислотностью атмосферных осадков в 2022 г. СПБ, 2023. 60 с.

6. Ежегодные данные по химическому составу и кислотности атмосферных осадков за 2016–2020 гг. : монография / Н. А. Першина, А. И. Полищук, М. Т. Павлова, Е. А. Семенец. СПб. : Амирит, 2021. 114 с.

УДК 551.510.42(571.1)

Миграция БД из СУБД Oracle в СУБД PostgreSQL в рамках импортозамещения

А. А. Доценко (doc17aleks@gmail.com)

Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных, г. Обнинск

Аннотация. Статья посвящена поиску и применению методов для миграции базы данных из системы управления базами данных Oracle в систему управления базами данных PostgreSQL в рамках процесса по импортозамещению программных средств.

Ключевые слова: система управления базой данных, структура базы данных, миграция базы данных, Oracle, PostgreSQL, Ora2Pg.

Постановка задачи

В настоящее время в практике Центра океанографических данных (ЦОД) и государственной системе информации об обстановке в Мировом океане (ЕСИМО) применяется СУБД Oracle, как основное хранилище данных и основной инструмент содержательной переработки данных.

В основу программных средств накопления, хранения и преобразования данных в ЦОД положена идея использования СУБД высокого уровня, которое может обеспечить накопление большого объема исходных (наблюденных) данных (порядка 20 Тбайт), содержательную обработку исходных данных и получение производных данных также большого объема, СУБД Oracle.

Такая СУБД была закуплена, сотрудники прошли обучение по работе с этой СУБД и использовали ее в течение последних 20 лет.

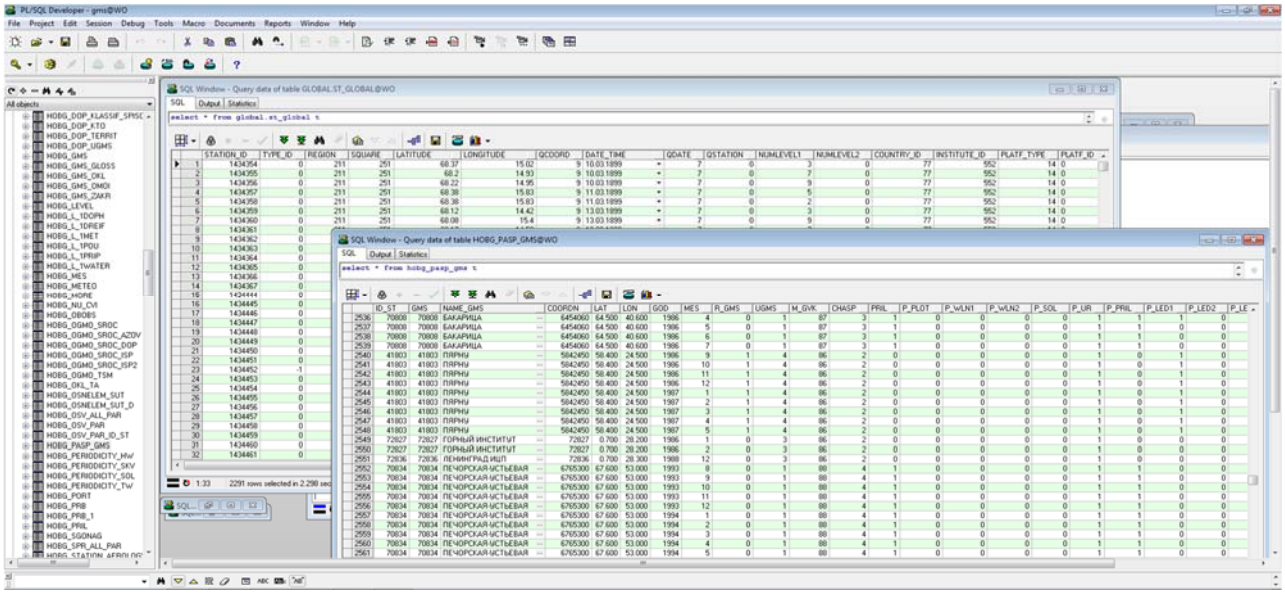


Рис. 1. Пример хранимых данных в базе данных в Oracle

Согласно решениям Правительства РФ, такого рода программные средства должны быть заменены на российский аналог или свободно распространяемые программные средства.

В качестве замены СУБД Oracle принято решение использовать объектно-реляционную систему управления базами данных PostgreSQL.

Основной задачей является поиск и применения алгоритма замены Oracle на PostgreSQL.

Поиск метода для осуществления миграции базы данных

Множество Российских организаций столкнулось с подобной проблемой миграции СУБД Oracle на СУБД PostgreSQL.

Применялись различные методы для осуществления переноса БД, такие как ручной перенос, создание специализированных конвертеров или использование уже готовых.

Существует множество различных конвертеров СУБД Oracle в PostgreSQL, таких как:

– Ispirer Toolkit,
– CYBERTEC MIGRATOR,
– Full Convert,
– и мн. др.

Но многие из них платные или имеют какие-либо ограничения, поэтому далее будет рассмотрен бесплатный конвертер Ora2Pg.

Ora2Pg – это бесплатный инструмент, используемый для миграции базы данных Oracle в PostgreSQL. Он подключается к базе данных Oracle, автоматически сканирует ее и извлекает ее структуру или данные, а затем генерирует SQL-скрипты, которые вы можете загрузить в базу данных PostgreSQL.

Ora2Pg можно использовать для любых целей – от реинжиниринга базы данных Oracle до миграции огромной корпоративной базы данных или простой репликации некоторых данных Oracle в базу данных PostgreSQL. Она очень проста в использовании и не требует никаких знаний о базе данных Oracle, кроме указания параметров, необходимых для подключения к базе данных Oracle.

Установка и настройка конвертера

У программы Ora2pg нет графического интерфейса и взаимодействие с ней происходит через командную строку. Перенос БД можно производить как на операционных системах Unix, так и на ОС Windows. Однако Ora2Pg состоит из Perl-скрипта (ora2pg) и Perl-модуля (Ora2Pg. pm), поэтому для ее установки и установки необходимых модулей DBD::Oracle и DBD::Pg на ОС Windows в документации Ora2pg предлагается использовать Strawberry Perl.

Strawberry Perl – это среда perl для MS Windows, содержащая все необходимое для запуска и разработки приложений на языке perl. После ее установки и запуска достаточно ввести следующие команды для установки модулей Perl необходимых для работы Ora2pg (Oracle и PostgreSQL уже должны быть установлены):

cpanm DBD::Oracle
cpanm DBD::Pg

Далее необходимо скачать и разархивировать архив ora2pg-24.3.zip. После введения следующих команд установка Ora2pg будет завершена:

cd “Путь до содержимого архива ora2pg-24.3.zip” perl Makefile.PL
gmake && gmake install

Подготовка и настройка проекта миграции

Для настройки работы Ora2pg необходимо сначала создать проект переноса используя команды:

cd “Путь директории установленной Ora2Pg” ora2pg --init_project “Название проекта”

После создания проекта создастся директория проекта, в которой будет файл конфи-гурации переноса. Он и содержит параметры работы Ora2pg. Перечислим основные, которые необходимо изменить:

− Путь до директории Oracle;

ORACLE_HOME “Путь до директории Oracle”

− Адрес БД Oracle и роль, через которую Ora2pg будет экспортировать данные;

ORACLE_DSN “Адрес БД”
ORACLE_USER “Пользователь, который имеет доступ к БД в Oracle”
ORACLE_PWD “Пароль пользователя Oracle”

− Режим экспорта схемы;

EXPORT_SCHEMA 1

− Указание схемы Oracle (оставить без названия схемы при необходимости экспорта всех доступных схем);

SCHEMA “Oracle схема/пользователь на экспорт”

− Адрес БД PostgreSQL и роль, через которую Ora2Pg будет импортировать данные (в PostgreSQL необходимо заранее завести соответствующую БД).

PG_DSN “Адрес БД с указанием ее названия”
PG_USER “Пользователь PostgreSQL”
PG_PWD “Пароль пользователя PostgreSQL”

Это лишь основные параметры работы Ora2pg, но при необходимости можно воспользоваться множеством дополнительных опций, включающих в себя настройку кодировки данных БД, настройку работы с различными объектами БД, настройку конвертации типов данных и многое другое. В зависимости от комплексности, переносимой БД миграция может завершиться неудачей, но для решения различных возможных проблем в файле конфигурации есть возможность включить режим отладки, а также настроить вышеупомянутые параметры переноса.

Например, при переносе базы данных в ЦОД были применены следующие дополнительные настройки проекта:

− Подробный вывод в консоль всех выполняемых программой действий;

DEBUG 1

− Тип транзакций для обращения к Oracle;

TRANSACTION readonly

− Остановка выполнения команд при обнаружении ошибки (отключена, так как по причине объема БД было принято решение не останавливать перенос из-за каждой возникающей ошибки, а фиксировать сразу все для их дальнейшего устранения);

STOP_ON_ERROR 0

− Определение применяемого типа данных в PostgreSQL для данных типа numeric() в Oracle;

DEFAULT_NUMERIC numeric

− Указание, что пользователь, обращающийся к Oracle, имеет доступ к информации о доступах других пользователей.

USER_GRANTS 0

Экспорт структуры БД

После установки и настройки Ora2Pg можно приступать к переносу БД. Первым этапом переноса является экспорт структуры базы данных в sql файлы, которые дальше можно будет импортировать в PostgreSQL.

На этом этапе Ora2Pg обращается к БД в Oracle, извлекает необходимую структуру БД, подготавливает PL/pgSQL код и сохраняет его в sql файле. Чтобы определить тип экспортируемой структуры необходимо использовать ключевое слово TYPE в файле с настройками проекта миграции, либо указывать тип в команде для запуска Ora2Pg. TYPE принимает следующие значения:

− TABLE: извлекать все таблицы с индексами, первичными ключами, ограничениями уникальности, внешними ключами и ограничениями-проверками.

− VIEW: извлекать только представления.

− GRANT: извлекать роли, преобразуемые в группы PostgreSQL, пользователей и пра-ва для всех объектов.

− SEQUENCE: извлекать все последовательности и их текущие значения.

− TABLESPACE: извлекать пространства для таблиц и индексов.

− TRIGGER: извлекать событийные триггеры. − FUNCTION: извлекать функции.

− PROCEDURE: извлекать процедуры.

− PACKAGE: извлекать пакеты и тела пакетов.

− INSERT: извлекать данные через оператор INSERT. − COPY: извлекать данные через оператор COPY.

− PARTITION: извлекать секции по диапазонам и спискам с подсекциями.

− TYPE: извлекать пользовательские типы Oracle.

− FDW: извлекать таблицы Oracle как сторонние таблицы для oracle_fdw.

− MVIEW: экспортировать материализованные представления.

− QUERY: автоматически преобразовывать SQL-запросы Oracle.

− DBLINK: создать сервер обёртки сторонних данных Oracle, чтобы использовать его как dblink.

− SYNONYM: экспортировать синонимы Oracle как представления на базе других объектов схемы.

− DIRECTORY: экспортировать каталоги Oracle как объекты расширения external_file.

− LOAD: отправлять набор запросов с использованием нескольких соединений с

Postgres Pro.

− TEST: выполнить сравнение БД Oracle и Postgres Pro.

− TEST_COUNT: выполнить сравнение количества строк в таблицах Oracle и Postgres Pro.

− TEST_VIEW: подсчитать число строк, возвращаемых представлениями на обеих сторонах.

− TEST_DATA: выполнить проверку корректности строк на обеих сторонах.

− SEQUENCE_VALUES: экспорт DDL, чтобы установить последние значения последовательностей.

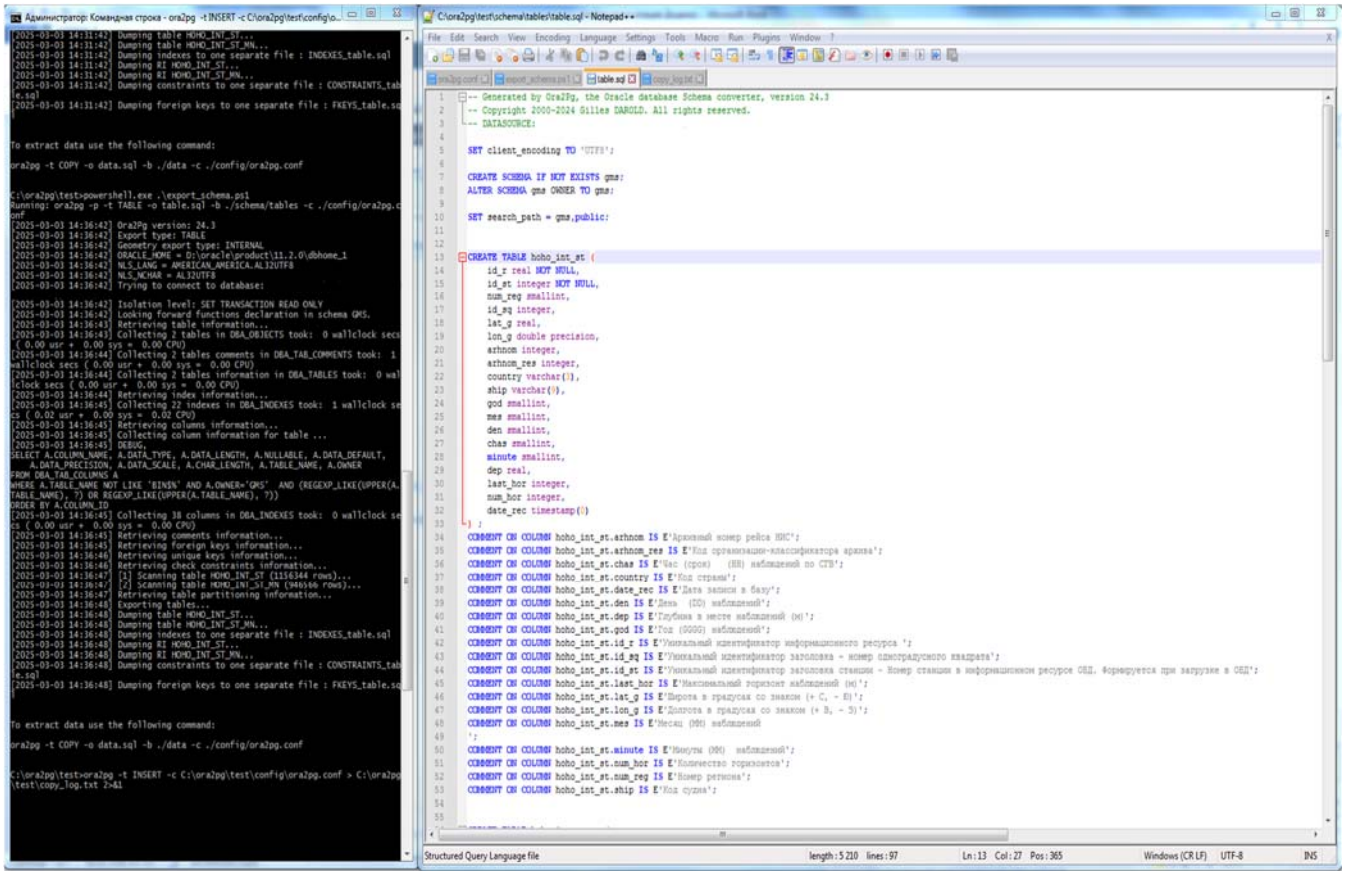


Рис. 2. Пример экспорта таблиц в SQL файл с помощью Ora2Pg

Чтобы каждый раз для смены типа экспорта не менять конфигурационный файл или команду Ora2Pg, можно использовать автоматически генерируемый при создании проекта миграции скрипт export_schema. psl, который при запуске будет поочередно выполнять экспорт основных типов структуры БД, которые в нем указаны. По окончанию его работы все созданные sql файлы будут хранится в директории schema в каталогах с соответствующими названиями, так что при необходимости их можно посмотреть или редактировать.

Импорт структуры БД

Следующим этапом миграции является импорт ранее вынесенной в файлы с разрешением . sql структуры БД, здесь необходимо использовать psql команду для импорта файлов:

cd “Директория проекта миграции”

psql --port=”Порт БД в PostgreSQL” --username=“Имя пользователя PostgreSQL”

“Название БД” < “Директория проекта”\schema\”Тип данных”s\”Тип данных”. sql

“Пароль пользователя PostgreSQL”

Данную команду необходимо применить для каждого типа структуры БД. При необходимости можно создать скрипт аналогичный export_schema.psl, но для импорта структуры БД. Однако, так как многие типы структур ссылаются на другие типы, следует учитывать порядок импорта, иначе возможна ситуация, когда импортируемый объект может ссылаться на еще не импортированные структуры.

Также для удобного отображения вывода Ora2Pg рекомендуется перенаправлять поток вывода с консоли в файл, так как это может помочь для обнаружения и анализа ошибок импорта. Это можно сделать добавлением следующей строки перед вводом пароля пользователя:

> “Директория проекта”\schema\”Тип данных”s\log.txt 2>&1

Перенос данных БД

Последний этап миграции заключается в переносе самих данных из Oracle в подготовленную структуру БД в PostgreSQL. Если в конфигурационном файле проекта Ora2Pg уже заданы все необходимые параметры, такие как адрес БД в Oracle и PostgreSQL и данные пользователей для подключения к БД, то остается ввести команду с типом INSERT или COPY:

ora2pg -t “INSERT или COPY” -c “Путь до конфиг файла”

Стоит отметить, что в конфигурационном файле можно настроить конкретные схемы или таблицы для переноса с помощью параметров:

− SCHEMA;

− ALLOW.

Как раз за счет параметра ALLOW можно настраивать таблицы, которые будут задействованы при следующем выполнении команды Ora2Pg. Причем этот параметр будет учитываться не только при переносе данных, но и при экспорте структуры БД из Oracle, что можно использовать для работы с локальными участками схемы. Этот параметр так же может помочь при переное данных, так как при обнаружении ошибки Ora2Pg в любом случае прекратит работу с данными и оставшиеся таблицы в PostgreSQL не будут заполнены. Также по этой же причине на этапе переноса данных, как и на этапе импорта структуры, рекомендуется перенаправлять поток вывода с консоли в файл.

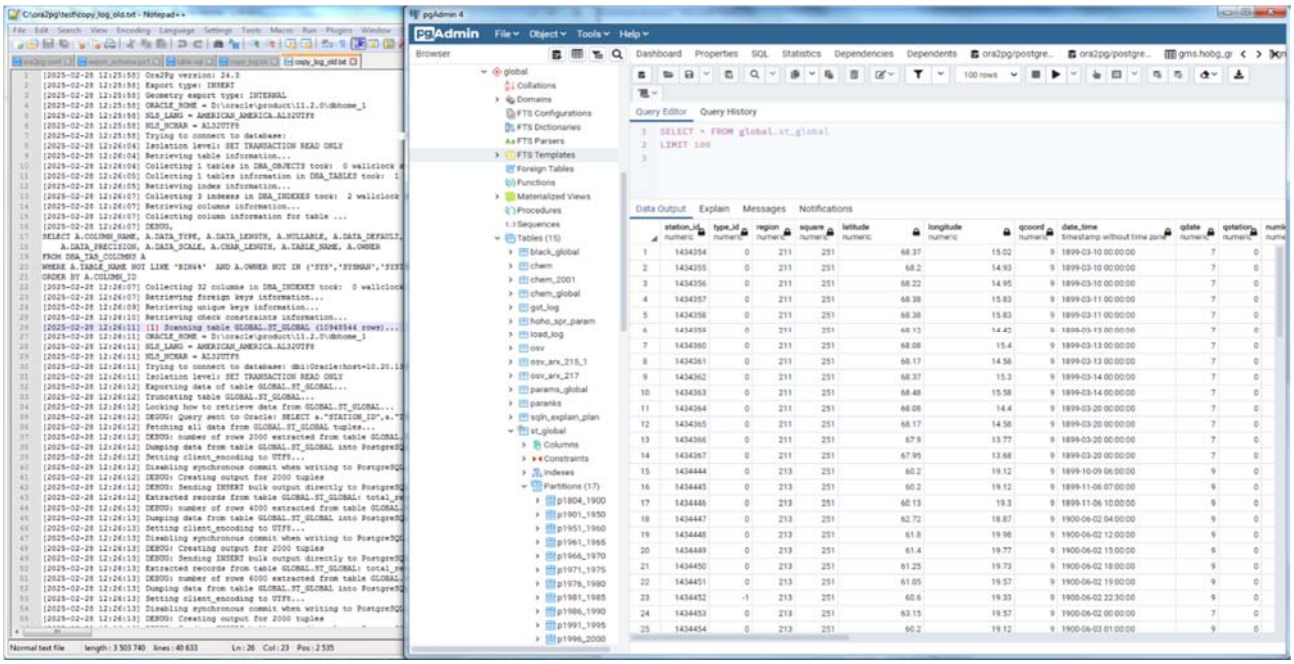


Рис. 3. Пример перенесенных данных в PostgreSQL

Частые проблемы

После выполнения этого этапа миграция будет завершена. Но в большинстве случаев, если переносимая БД имеет хотя бы среднюю комплексность, то могут возникнуть различные проблемы на любом этапе миграции. При осуществлении миграции БД в ЦОД были выявлены следующие проблемы:

− Низкая приспособленность Ora2Pg к работе на операционных системах Windows: Ora2Pg легче устанавливать и использовать на ОС Unix. Например, автоматически генерируемый скрипт export_schema.psl пришлось исправлять для его корректной работы, а скрипт для импорта структуры БД реализован только для Unix систем.

− Проблемы с кодировками UTF-8 и WIN1251: в Oracle переносимая БД была заполнена данными в кодировке WIN1251, но в PostgreSQL данные было принято хранить в кодировке UTF-8. В Ora2Pg есть функционал для перекодирования данных, но для этого требуется корректно настроить его работу в конфигурационном файле, а именно параметры NLS_LANG, NLS_NCHAR, CLIENT_ENCODING и FORCE_PLSQL_ENCODING. Без настройки этих параметров могут возникнуть проблемы с отображением кириллицы в Post-greSQL и psql.

− Разница в синтаксисе PL/SQL и PL/pgSQL: структуры объектов в Oracle описываются на процедурном расширении языка SQL PL/SQL, а в PostgreSQL − PL/pgSQL. Это очень важный фактор, влияющий на миграцию БД, и в Ora2Pg есть функционал для решения множества проблем, связанных с этим. Однако Ora2Pg не может полностью перенести весь код с языка PL/SQL на PL/pgSQL, особенно у сложных структур БД. По этой причине в большинстве случаев требуется вручную переписывать код сложных структур на PL/pgSQL.

− И множество других небольших проблем, которые оказались достаточно затратными по времени из-за малого количества информации об их устранении в интернете.

Заключение

В итоге работы по поиску методов для миграции базы данных из системы управления базами данных Oracle в систему управления базами данных PostgreSQL в рамках процесса по импортозамещению программных средств было принято решение использовать open-source-приложение Ora2Pg. В ходе применения данной утилиты для миграции БД в Центре океанографических данных был проанализирован процесс работы конвертера. Несмотря на то, что с использованием конвертера возникали различные проблемы, большая часть исходной БД была перенесена без необходимости в ручном переносе.

Список литературы

1. Статьи о миграции с Oracle на PostgreSQL от разработчиков СУБД Postgres Pro. URL: https://postgrespro.ru/blog/pgsql/5969645?ysclid=m1qe0eq0tt87196886 (дата обращения: 04.03.2025).

2. Документация конвертера Ora2Pg. URL: https://ora2pg.darold.net/documentation.html (дата обращения: 04.03.2025).

3. Документация процедурного расширения языка SQL PL/SQL. URL: https://docs.oracle.com/en/database/oracle/oracle-database/19/lnpls/index.html (дата обращения: 04.03.2025).

УДК 551.465

Современные методы обработки и публикации океанографических данных

П. О. Иванов (pavlik.ivanov2020@mail.ru)
ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», Обнинск

Аннотация. Рассмотрен метод обработки и публикации океанографических данных на картографической основе на примере существующего механизма обработки и публикации во ВНИИГМИ МЦД.

Ключевые слова: океанографические данные, обработка данных, ГИС, публикация данных.

На данный момент существует потребность в оперативной и в достаточной степени точной пространственной информации в разных сферах и, в частности, в океанографии. Поэтому в настоящее время весьма актуально совершенствование программного обеспечения для обработки данных, а также развитие сервисов по улучшению пользовательского опыта работы с данными.

Рассмотрим на примере существующей информационной системы ЕСИМО [2] как проходит путь данных от получения до публикации на картографической основе с помощью ГИС [1].

Сначала данные в систему поступают через программу-поставщик от организаций, которые эти данные собирают или получают. Далее данные загружаются в базу интегрированных данных на сервер, где происходит их обработка, после чего публикуются в открытый доступ.

Углубимся в детали обработки данных.

Данные хранятся с помощью СУБД с открытым исходным кодом PostreSQL с расширением PostGIS [3] для хранения географических данных. Для обработки данных используются библиотеки GRASSGIS и GDAL.

GRASSGIS [4] содержит функции для работы с растровыми и векторными геоданными, а GDAL служит для чтения и записи данных.

В основном данные представляют набор точек с их координатами и значениями исследуемых характеристик в них, которые описывают нормальное распределение метеорологических и океанографических явлений, что не подходит для чтения и понимания карт человеческим глазом.

В качестве решение этой проблемы данные нужно привести к интуитивно понятному потребителю этой информации виду: для этого используется интерполяция и затем построение изолиний.

Впоследствии каждому созданному слою назначаются стили для лучшей читаемости и визуализации данных.

Подробнее о процессе интерполяции точечных данных на 2D-растр: существует несколько методов интерполяции, у каждого есть свои особенности.

В настоящее время применяются наиболее распространенные и часто применяемые методы:

интерполяция методом обратно взвешенных расстояний (ОВР);

кригинг;

триангуляция (рис. 1–3).

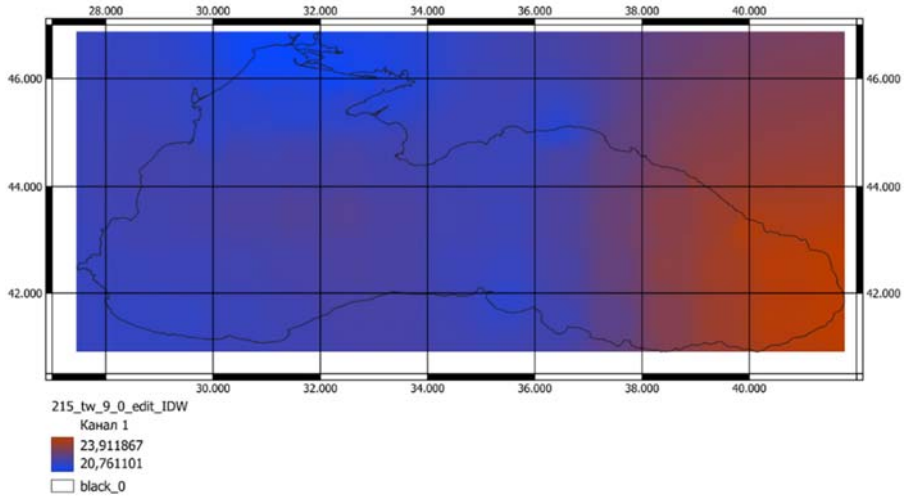


Рис. 1. Интерполяция: ОВР

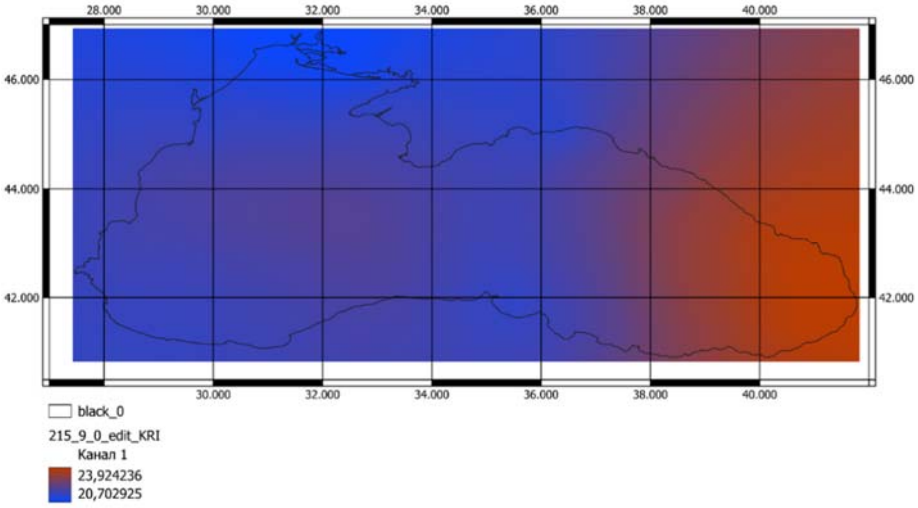


Рис. 2. Интерполяция: кригинг

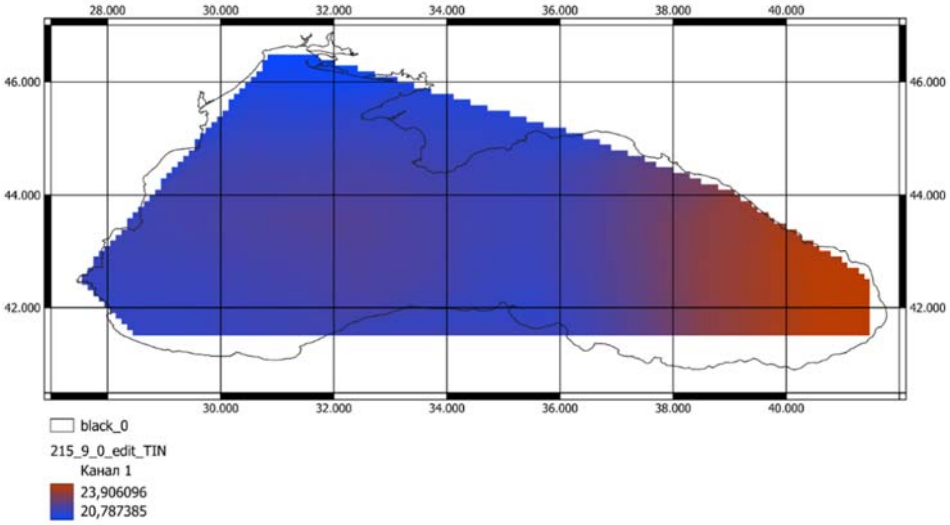


Рис. 3. Интерполяция: триангуляция

Триангуляция не подходит по логике построения растрового изображения, так что остаётся ОВР и кригинг.

Метод кригинга наиболее правдоподобно строит интерполяцию, это связанно с его реализацией, но взамен этот способ наиболее времязатратным.

В свою очередь интерполяция методом ОВР является не самым точным методом, который может представлять в достаточной мере информацию только рядом с точками измерений, так же этот метод имеет выраженные «колодцы» и «ямы» на растровом изображении, что выглядит неестественным. Но в противовес этому существенному минусу идёт очень высокая скорость построения растра.

Далее нам необходимо построить по полученному растровому изображению изолинии.

Для кригинга не обязательно проводить дополнительные манипуляции с построением изолиний, они получатся правдоподобными и так.

Для ОВР после построения изолиний возникает необходимость в сглаживании изолиний специальными функциями, после чего результат получается лучше.

Сравнивая эти два метода обработки большого объёма данных, предпочтительным оказывается не самый точный, но быстрый метод ОВР, к которому требуется подбирать наиболее подходящие функции сглаживания изолиний.

Обработанные данные публикуются на веб-сервисе GeoServer, где пользователь может выбирать интересующие его карты и интерактивно с ними ознакомиться, а также при необходимости выгрузить необходимые карты со слоями.

На данный момент приходится выбирать инструменты из отечественного программного обеспечения или из программ с открытым исходным кодом, что немного ограничивает возможности по улучшению качества работ.

В будущем для увеличения точности можно будет использовать искусственный интеллект [5], а также более усовершенствованные версии уже существующего программного обеспечения или новые технологии, которые будут быстрее и точнее обрабатывать данные.

Список литературы

1. *Воронцов А. А., Баталкина С. А.* Использование ГИС-технологий в государственной информационной системе ЕСИМО для обеспечения морской деятельности // Моря России: методы, средства и результаты исследований : материалы Всерос. науч. конф. Севастополь 24–28.09.2018. Севастополь : ФГБУН МГИ, 2018. С. 222–225.

2. Единая государственная система информации об обстановке в Мировом океане и ее применение для информационной поддержки морской деятельности Российской Федерации / Н. Н. Михайлов [и др.] // Труды ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2014. Вып. 177. С. 95–118.

3. *Регина Обе, Лео Хсу*. PostGIS в действии. ДМК пресс, 2023. 738 с.

4. Tangible Modeling with Open Source GIS / A. Petrasova, B. Harmon, V. Petras, H. Mitasova. Springer International Publishing, 2015.

5. *Субботин А. Г., Линкина А. В.* Особенности использования искусственного интеллекта при работе с пространственными данными // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2022. URL: https://vestnikvivt.ru/ru/journal/pdf?id=16

УДК 551.501.7

Моделирование параметров рассеяния излучения крупнодисперсными аэрозольными частицами в атмосфере

Е. Ю. Михтеева (mikhteeva.elena@mail.ru)[1], В. Р. Потапова (veronikap05@yandex.ru)[2], И. А. Потапова (potapovaira@yandex.ru)[1], А. Л. Скобликова (kafedra_phys@rshu.ru)[1], Т. Ю. Яковлева (yakovtat@yandex.ru)[1]

[1]Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург
[2]Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург

Аннотация. Представлен анализ исследования, посвященного разработке моделей для оценки параметров рассеянного излучения, вызванного аэрозольными частицами в атмосфере. Выполнено моделирование свойств рассеяния этих частиц, что дало возможность более точно описать процесс рассеяния с применением модели неоднородной частицы. Тем не менее использование данной модели может привести к значительным ошибкам при оптическом определении размеров частиц. Для достижения более точных результатов и уменьшения вероятности ошибок требуется провести дополнительные исследования, направленные на улучшение моделирования и анализ собранных данных. Это позволит повысить надежность получаемых результатов и улучшить понимание процессов, связанных с рассеянием излучения в атмосфере.

Ключевые слова: аэрозоль, микроструктура, оптико-локационное уравнение, оптические методы, оптические свойства, трансмиссометрические измерения, фотоэлектрический счетчик частиц

Создание методов лидарного зондирования атмосферы, которое имеет значение для экологического мониторинга как в арктических, так и в более южных регионах, требует решения ряда научных задач, включая интерпретацию данных, полученных с помощью лидара. Оптические методы зондирования позволяют оценить концентрацию и структуру загрязняющих веществ в атмосфере. В настоящее время в арктическом регионе наблюдается рост уровня загрязняющих веществ, вызванный различными источниками, такими как лесные пожары, вулканические извержения и антропогенные факторы крупных промышленных городов.

Для оценки воздействия атмосферного загрязнения на климат необходимо идентифицировать типы загрязняющих веществ, включая парниковые газы и черный углерод. Для этого целесообразно применять оптические методы зондирования [1–3]. Важно разработать подходы для определения типов веществ по их оптическим свойствам с использованием оптико-локационного уравнения. Однако неопределенность этого уравнения и математическая сложность обратной задачи затрудняют интерпретацию данных и могут привести к ошибочным выводам.

Для повышения точности определения оптических характеристик атмосферного аэрозоля применяются интегральные методы многопозиционного зондирования [4–6]. При проведении лидарного зондирования в атмосфере с низким

уровнем рассеяния на значительных расстояниях от приемопередатчика увеличивается риск возникновения случайных и систематических ошибок в измерениях, в том числе неточностей, вызванных фоновым освещением [7].

Анализ полученных результатов исследования параметров обратного рассеяния атмосферы

Необходимость определения характеристик микроструктуры аэрозоля, включая коэффициент ослабления частиц, требует параметризации их оптико-микроструктурных свойств. Это усложняется из-за разнообразия оптических особенностей аэрозольных фракций [8; 9].

Среди других факторов, которые усложняют задачу, можно выделить значительное изменение рассеивающих характеристик частиц, которые не соответствуют теории рассеяния света однородной частицей. Моделирование рассеивающих свойств атмосферного аэрозоля с учетом данных эксперимента помогает установить корреляцию между коэффициентом ослабления и концентрацией частиц. В связи с этим проводится моделирование оптических свойств атмосферного аэрозоля с учетом данных эксперимента. При совместных лидарных, фотоэлектрических и трансмиссометрических измерениях было установлено, что есть связь между концентрацией частиц и коэффициентом ослабления. Особенно важно, что связь между коэффициентом ослабления и общей концентрацией частиц оказалась стабильной в серии экспериментов. Эта связь может быть использована для определения содержания аэрозоля в атмосфере.

Для объяснения результатов экспериментов рассматривается модель оптических свойств частиц, которая основана на данных из проведенных экспериментов и распределении размеров частиц, определяющих коэффициент ослабления аэрозоля. При этом учитываются результаты фильтровых измерений полученных ФУ, проведенных одновременно с фотоэлектрическими измерениями. В атмосфере наблюдаются частицы, состоящие из ядра и оболочки с различными оптическими свойствами, например, обводненные частицы аэрозоля. Рассматривается зависимость отношений размеров частиц, найденных оптическим счетчиком D(ОС) и фильтровым устройством D(ФУ), от коэффициента ослабления (рис. 1).

Представленные результаты указывают на то, что размеры частиц, полученные с помощью оптического счетчика, меньше, чем те, что были измерены фильтровым устройством. Это свидетельствует о том, что индикатриса рассеяния под углом 90°, пропорциональная квадрату размера частицы, для естественных частиц оказывается меньше, чем для частиц, использованных в градуировке. Разница в размерах может быть значительной, особенно для крупных частиц, размеры которых превышают 1 мкм.

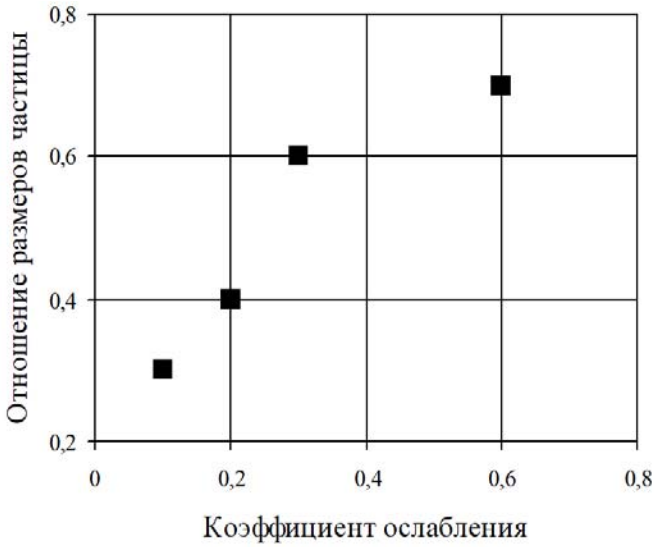


Рис. 1. Результаты сравнительного анализа размеров частиц, измеренных ОС, ФУ

Анализ результатов моделирования характеристик рассеяния излучения для частицы

Для более детального анализа данных полевых измерений используется модель неоднородной частицы, в которой показатель преломления оболочки изменяется радиально, в то время как ядро остается однородным. Далее представлены результаты расчетов для частицы с ядром из сажи, имеющей показатель преломления 1,82–0,64i (рис. 2).

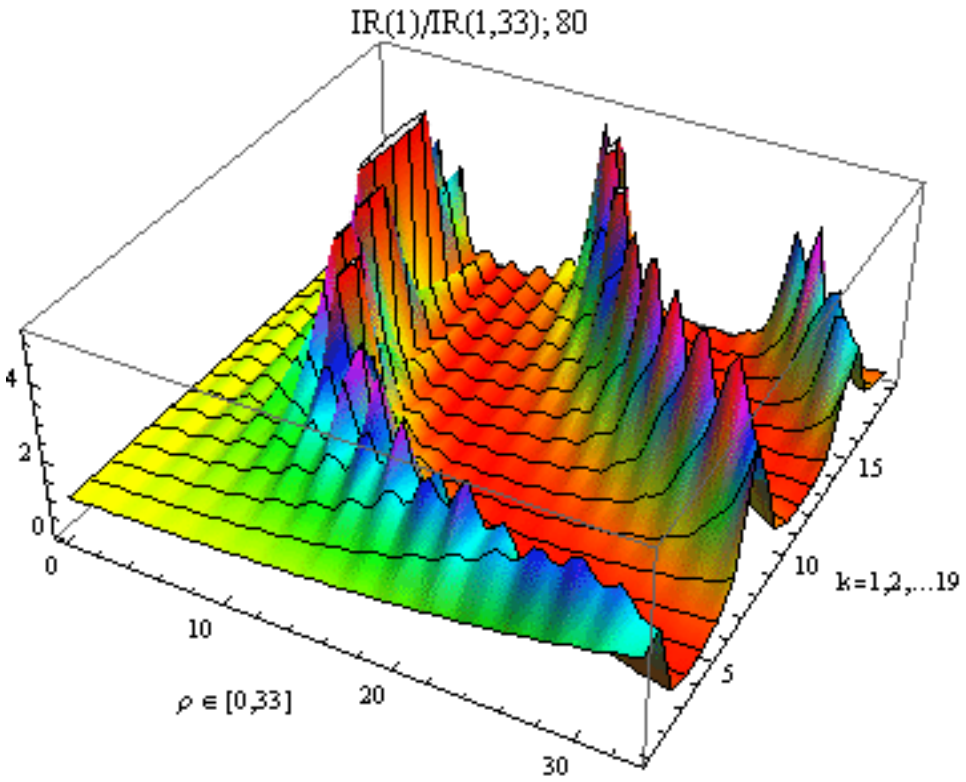


Рис. 2. Зависимость относительной индикатрисы рассеяния от структуры и размера частицы

Здесь IR(1)/I(1,33) – относительная индикатриса рассеяния. Вертикальный угол рассеяния использован для моделирования процесса рассеяния в фотоэлектрическом счетчике частиц, IR = $I(L)$ / $I(0)$, $L = \rho_1 - \rho_0$ – безразмерная толщина оболочки частицы,

$$\text{IR(1,33):} \quad m = (0{,}98 - 1{,}28i) / (1 + d) + 0{,}84 + 0{,}64i, \qquad (1)$$

$$\text{IR(1):} \quad m = (1{,}64 - 1{,}28i) / (1 + d) + 0{,}18 + 0{,}64i, \qquad (2)$$

где

$$d = (\rho - \rho_0)/(\rho_1 - \rho_0), \ \rho = \rho_0 (1+0{,}01k).$$

Величина $(1+0{,}01k)$ представляет собой соотношение между размером частицы с покрытием и размером ее ядра. Формула (1) описывает неоднородное покрытие из сажи с добавлением воды, в то время как формула (2) моделирует неоднородное покрытие из сажи без воды. На рис. 2 показаны зависимости между величинами IR(1)/IR(1,33) и ρ_0, k, где можно наблюдать области минимумов для отношений IR(1)/IR(1,33). Рисунок 3 иллюстрирует значение G величины k, которое соответствует минимуму относительной индикатрисы рассеяния при наличии увлажненной оболочки ядра. На рисунке 4 демонстрируется, что минимальное значение относительной индикатрисы рассеяния варьируется для частиц различных размеров, что негативно сказывается на точности оптических измерений характеристик аэрозоля.

Полученные результаты подтверждают данные экспериментов, которые демонстрируют значительное снижение индикатрисы рассеяния в результате структурирования частицы. Расчеты показывают, что эффект уменьшения индикатрисы рассеяния из-за структурированности менее выражен при углах рассеяния менее 30 градусов.

Таким образом, была создана модель неоднородной рассеивающей частицы, состоящей из однородного ядра и оболочки с переменным показателем преломления, что позволило адекватно интерпретировать экспериментальные данные.

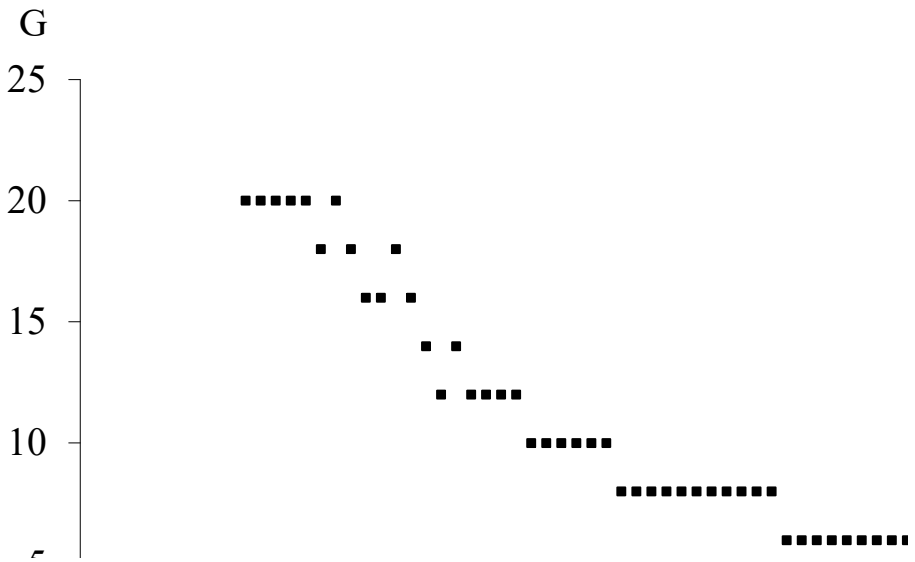


Рис. 3. Значение величины k, соответствующее минимуму индикатрисы

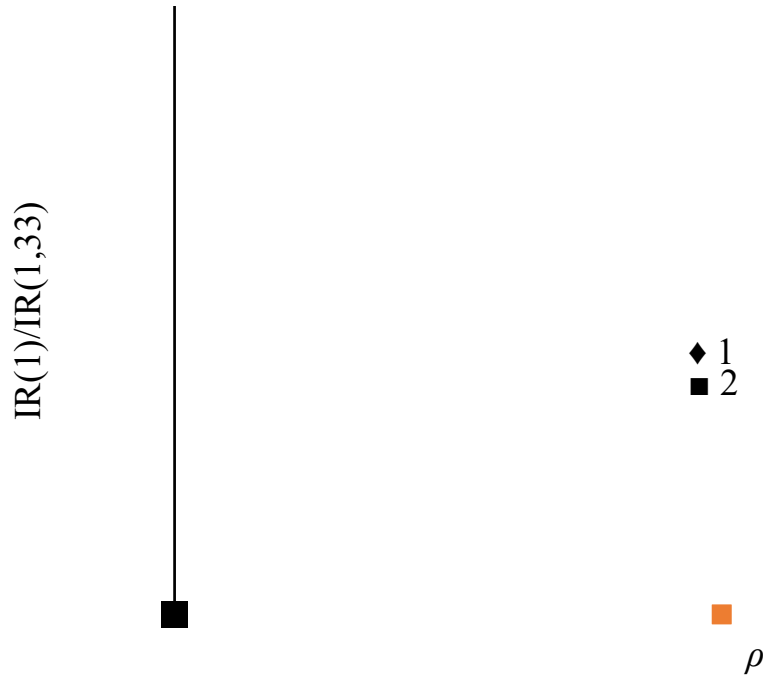


Рис. 4. Минимум относительной индикатрисы рассеяния при наличии увлажненного покрытия. Результаты измерений (1) и расчетов (2)

Заключение

Для выявления микроструктурных особенностей с помощью оптических измерений была разработана модель неоднородной рассеивающей частицы, состоящей из однородного центра и оболочки с радиально изменяющимся показателем преломления. Эта модель учитывает различные соотношения между оболочкой и центром и хорошо согласуется с экспериментальными данными. Было установлено, что структурирование мелких частиц слабо влияет на их рассеяние, что способствует повышению точности оптических измерений микроструктурных характеристик.

Список литературы

1. *Егоров А. Д., Егорова И. А.* Способ определения коэффициента ослабления в центре участка неоднородной атмосферы. Патент на изобретение RU 2041475 C1, 09.08.1995. Заявка № 5064269/10 от 08.10.1992.

2. *Егоров А. Д., Егорова И. А.* Способ определения концентраций газовых компонентов слоя атмосферы // Патент на изобретение RU 2017139 C1, 30.07.1994. Заявка № 4918909/25 от 27.03.1991.

3. Определение оптических и микроструктурных характеристик атмосферного аэрозоля / А. Д. Егоров, И. А. Потапова, Ю. Б. Ржонсницкая, Н. А. Саноцкая // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2009. № 11. С. 71–78.

4. *Егорова И. А.* Лазерное многолучевое определение метеорологической дальности видимости в неоднородной атмосфере // Труды конференции молодых ученых национальных гидромедслужб стран СНГ. Москва. ВНИИГМИ. 1999. С. 51–52.

5. *Егоров А. Д., Егорова И. А., Оразцов С. П.* Inuniform particle sizing by optical counter // PARTEC 98 7th European Symposium Particle Characterization. Nürnberg: Nürnberg Messe CmbH. 1998. P. 863–866.

6. *Егоров А. Д., Егорова И. А.* Comparative analysis of multipositional remote sensing techniques // Image processing, and synthetic Aperture Radar for Remote sensing, proc. of SPIE. 1997. Vol. 3217. P. 398–403.

7. Определение характеристик атмосферного аэрозоля по данным оптических измерений / А. Д. Егоров, Ю. Б. Ржонсницкая, И. А. Потапова, Н. А. Саноцкая // Естественные и технические науки. 2010. № 1 (45). С. 215–222.

8. *Егоров А. Д., Егорова И. А.* Вопросы повышения эффективности интерпретации лидарной информации // Альтернативные направления интерпретации лидарной информации. ГГО. СПб., 1993. С. 69–79.

9. *Егоров А. Д., Потапова И. А.* Определение характеристик аэрозоля лидарными системами // Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. 2003. № 552. С. 14–18.

УДК 551.50

Опыт применения автоматизированной технологии прогноза зарождения и перемещения полярных мезоциклонов для Арктического региона РФ

С. А. Петриченко (psa@rpatyphoon.ru), О. В. Калмыкова (kov@feerc.ru), С. В. Козлов (kozlov-sv@rpatyphoon.ru), Л. К. Кулижникова (kulizhnikova@rpatyphoon.ru)

Научно-производственное объединение «Тайфун» Росгидромета, г. Обнинск

Аннотация. Приведены результаты независимых испытаний автоматизированной технологии прогноза полярных мезоциклонов в Арктическом регионе России, которые были проведены в 2024 г. Показано, что средняя оправдываемость прогнозов составляет 76 %. Проанализированы неспрогнозированные случаи ПМЦ и представлены варианты объяснения возникновения таких ситуаций.

Ключевые слова: полярные мезоциклоны, индексы конвективной неустойчивости, автоматизированный программный комплекс, зарождение, перемещение, траектория, прогноз, модель Polar WRF.

Введение

В 1994 г. Рабочей группой по полярным депрессиям Европейского геофизического общества (*European Geophysical Society's Polar Lows Working Group*) для наименования облачных вихрей α и β мезомасштаба (от 20 до 2000 км), возникающих над морями к полюсу от полярного фронта, рекомендовано пользоваться термином «полярный мезоциклон» (*polar mesocyclone*) [11]. Термин же «полярная депрессия» (*polar low*) служит для наименования наиболее интенсивных полярных мезоциклонов со скоростью ветра, превышающей 15 м/с.

Под это определение попадает очень широкий спектр циклонических образований. От орографических вихрей до небольших фронтальных циклонов на арктическом фронте.

В Северном полушарии областью наиболее активного мезомасштабного циклогенеза является акватория Северо-Европейского бассейна.

Над северными морями России, лежащими к востоку от Новой Земли (Карское море, море Лаптевых и Восточно-Сибирское море), ПМЦ возникают гораздо реже, вследствие меньшей, чем в Северо-Европейском бассейне, площади

свободной от льда морской поверхности. В этих областях наблюдается летний максимум в годовом ходе количества ПМЦ в отличие от зимнего максимума в морях западнее Новой Земли.

ПМЦ чаще всего обнаруживаются и исследуются на основе реанализа и по данным спутниковых наблюдений [5; 9; 10]. Запуск в 2021 и 2023 гг. российской высокоэллиптической метеорологической группы спутников «Арктика-М» № 1 и № 2 расширил эти возможности.

Для идентификации ПМЦ актуальными стали и методы численного моделирования с использованием региональных моделей. Например, в работах [1; 2] разрабатываются критерии, позволяющие идентифицировать и исследовать генезис ПМЦ.

Прогноз зарождения и перемещения ПМЦ до настоящего времени остается актуальной проблемой, с которой связаны многочисленные исследования. И сложности могут быть обусловлены, по нашему мнению, существованием различных механизмов их образования. Основные, по современной классификации, это бароклинные и конвективные типы мезоциклонов [4; 6].

Нами было предложено использовать для прогноза ПМЦ индексы конвективной неустойчивости, расчет которых ведется по выходным данным численного моделирования атмосферы [7; 8]. Поля разных конвективных индексов могут иметь особенности в областях мезоциклонов, возникающих при различных синоптических ситуациях, поскольку связаны как с термическими, так и с динамическими характеристиками атмосферных процессов. Был сформирован набор потенциальных предикторов полярного циклогенеза из числа рассчитываемых индексов, имевших особенности в районах развития ПМЦ. Для каждого индекса были определены региональные пороговые значения с учетом их направленности на распознавание угроз возникновения ПМЦ. Суперпозиции полей отобранных индексов, по нашему мнению, дают возможность вероятностного прогнозирования зарождения и формирования прогностической траектории перемещения рассматриваемого ПМЦ. Был разработан программный комплекс, позволяющий в автоматическом режиме формировать прогностические карты, отражающие области вероятности возникновения и перемещения ПМЦ.

Технологическая линия

Технологическая линия построения прогнозов полярных мезоциклонов в Арктическом регионе РФ включает в себя:

а) пакет программ запуска расчетов по расписанию;

б) численную модель PolarWRF-ARW 4.1.5 (PWRF) с выбранными настройками и параметризациями подсеточных процессов;

в) программный модуль для расчета полей индексов конвективной неустойчивости;

г) программный модуль для расчета полей вероятности образования ПМЦ на основе отобранной конфигурации индексов, для каждого из которых определено свое региональное пороговое значение;

д) программный модуль для построения карт областей риска образования ПМЦ;

е) программный модуль для расчета центров областей с заданной вероятностью риска обнаружения ПМЦ;

ж) программный модуль для построения траекторий перемещения центров областей с заданной вероятностью риска обнаружения ПМЦ.

В процессе расчета по модели PWRF формируются выходные файлы, содержащие прогностические данные по стандартным метеоэлементам (температура, давление, влажность, скорость ветра и геопотенциал) в узлах расчетной сетки с шагом 12 км на 50 вертикальных уровнях с часовым шагом по времени. Эти данные используются для последующего расчета полей индексов конвективной неустойчивости атмосферы.

Выбор схем параметризации подсеточных процессов в модели PWRF при расчете стандартных метеоэлементов был произведен исходя из известного опыта работ других авторов, связанных с моделированием условий возникновения ПМЦ [2; 3; 6].

Использовавшиеся в работе схемы параметризации PWRF, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметризация подсеточных процессов в модели PWRF

Параметр	Используемое значение
Микрофизика (mp_physics)	Goddard scheme
Длинноволновая радиация (ra_lw_physics)	CAM Shortwave and Longwave schemes
Коротковолновая радиация (ra_sw_physics)	
Поверхность (sf_surface_physics)	Unified Noah Land Surface Model
Приземный слой (sf_sfclay_physics)	Monin-Obukhov (Janjic Eta) scheme
Пограничный слой (bl_pbl_physics)	Mellor-Yamada-Janjic (MYJ) scheme
Кучевая облачность (cu_physics)	Kain-Fritschs scheme

В настоящее время рабочая конфигурация группы конвективных индексов, отобранных в качестве предикторов, состоит из восьми динамических индексов, связанных с завихренностью, спиральностью и сдвигом ветра. Они приведены в табл. 2.

В представленном комплекте используются четыре кореллирующие между собой индекса, связанных с завихренностью (Vorticity) и три индекса, связанные со сдвигом ветра (Vertical Shear). Фактически это означает придание соответствующих весовых коэффициентов упомянутым характеристикам.

При расчете вероятности формирования ПМЦ используется, как уже отмечалось ранее [7], предположение о том, что чем больше индексов идентифицировали закритическую область, тем больше вероятность того, что в этой области может быть обнаружен ПМЦ.

На заключительном этапе работы технологической линии осуществляется построение карт прогностических траекторий перемещения центров областей, с заданной вероятностью обнаружения ПМЦ. Эти траектории, по нашему мнению, в определенной степени отражают возможную картину перемещения реальных мезоциклонов.

Таблица 2

Индексы, используемые для прогноза ПМЦ

Группа индексов	Название индекса	Описание индекса	Исполь-зуемый порог
Завихренность	Vorticity	Завихренность на уровне 10 м	>0,00009
	Mean Surface-1km Vorticity	Усредненная завихренность в слое 0–1 км	>0,0001
	Mean Surface-2km Vorticity	Усредненная завихренность в слое 0–2 км	>0,0001
	Mean Surface-3km Vorticity	Усредненная завихренность в слое 0–3 км	>0,0001
Спиральность	3km Storm Relative Helicity	Относительная спиральность в слое 0–3 км	<50
Сдвиг ветра	Bulk Richardson Number Shear	Сдвиг ветра по Ричардсону (ветер на уровне 500 м и средневзвешенный ветер в слое 0–6 км)	<25
	Surface-1km Wind Speed Difference	Модуль разности скоростей ветра на уровне 10 м и 1 км	<5
	Surface-1km Vertical Shear	Сдвиг ветра в слое 0–1 км	<5

Прогноз выдается один раз в сутки, заблаговременность прогноза – до 48 часов. Расчетная область представляет собой выделенную акваторию, выбранную в качестве испытательного полигона, которая включает в себя практически всю акваторию Баренцева и Карского морей, а также западную часть моря Лаптевых.

Результаты практического использования разработанной технологии

Тестовые расчеты с использованием разработанной технологии на регулярной основе проводились с 2022 г. По результатам этих расчетов производилась коррекция программного комплекса. В 2024 г. были проведены независимые испытания разработанной технологической линии. Испытания проходили в ФБГУ «ААНИИ» Росгидромета в три этапа: с 01.04.2024 по 15.05.2024, с 01.07.2024 по 15.08.2024 и с 01.10.2024 по 15.11.2024. Для проведения независимых испытаний НПО «Тайфун» предоставляло ежедневные прогностические расчеты на 48 часов возможного зарождения и перемещения полярных мезомасштабных циклонов в пределах выделенной акватории, выбранной в качестве испытательного полигона. Расчеты включали в себя карты траекторий движения полярных мезомасштабных циклонов. Результаты прогностических расчетов передавались в ААНИИ на ежедневной основе через FTP-сервер НПО «Тайфун».

Верификация прогнозов производилась в ААНИИ на базе обработанных спутниковых изображений с сайта Метео-Сибирь (https://geosib.rcpod.ru/MeteoSiber/index.html), полученных с использованием спутников Арктика-М № 1 и № 2.

В табл. 3 приведены результаты верификации прогнозов, полученные в ААНИИ.

Таблица 3

Результаты верификации прогнозов

Этап	Количество дней	Оправд. без ПМЦ	Оправд. с ПМЦ	Пропуск ПМЦ	Ложный прогноз	Неопред. прогноз
I	45	11	20	9	3	2
II	46	13	15	16	2	0
III	46	3	40	1	2	0
Всего	137	27	75	26	7	2

Приведенные в табл. 3 результаты позволяют оценить качество прогнозов.

Общая оправдываемость прогнозов (прогнозов без и при наличии ПМЦ) за все три периода по данным ААНИИ составляет 76 %. Предупрежденность ПМЦ, т. е. отношение количества правильно спрогнозированных ПМЦ к суммарному их количеству – 74 %.

Из представленных в таблице данных видно, что качество прогнозов предоставляемых в настоящий момент существенно различается по сезонам. Общая оправдываемость в весенний период определена в 72 %, в летний – 61 % (когда количество пропусков ПМЦ превысило количество успешно спрогнозированных случаев), а в зимний – 93 %.

Такие ситуации возможны, по нашему мнению, вследствие следующих факторов.

1) Прогностические данные глобальной модели GFS, используемые в качестве начальных и граничных условий при проведении расчетов недостаточно качественно отражают ситуацию для небольших по масштабам и слабых циклонов особенно на широтах порядка 80° с. ш. и севернее.

2) Используемый при расчетах шаг сетки 12 км слишком велик и разрешение модели недостаточно для выделения возмущений с горизонтальными масштабами менее 150 – 200 км.

3) В наблюдаемых в поле облачности на спутниковых изображениях вихревых образованиях, идентифицируемых при верификации как ПМЦ, приземная скорость ветра в окрестностях центра может быть менее 10 м/с, что заведомо не позволяет отнести эти образования к ПМЦ. А это заложено в разработанной методике прогноза (для данных случаев траектории перемещения ПМЦ не формируются). Но в отсутствии данных о скоростях ветра в процессе верификации прогнозов только по спутниковым снимкам наблюдаемые вихри, тем не менее, обозначаются как ПМЦ.

Необходимо отметить, что именно в весенне-летний период наблюдается максимальное количество ПМЦ с горизонтальными масштабами менее 200 км. В осенне-зимний период масштабы наблюдаемых ПМЦ возрастают.

На рис. 1–3 приведены примеры таких ситуаций. На каждом из них показаны карты области расчетов (рис. 1, *а*, 2, *а* и 3, *а*), на которых при наличии прогностических ПМЦ должны быть отображены их траектории (по факту их нет).

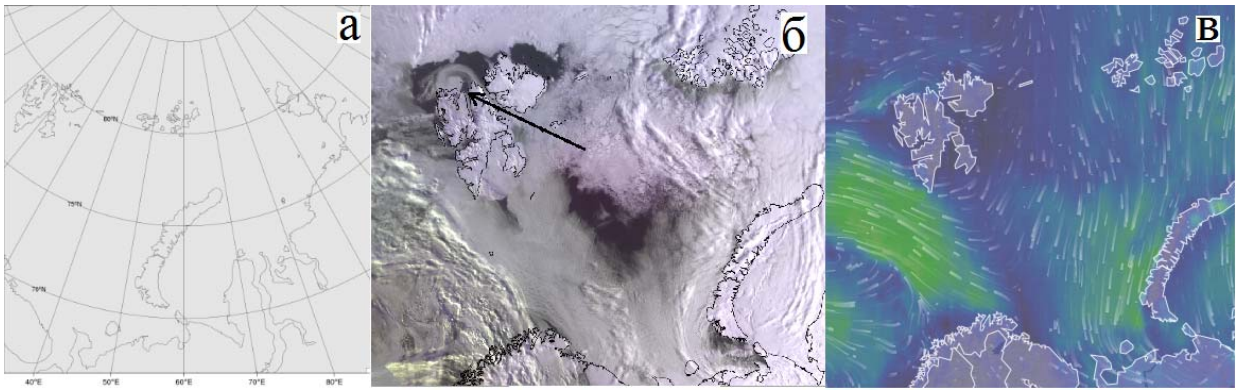


Рис. 1. Прогностическая карта испытательного полигона от 0 часов UTC 3 мая 2024 г. (*а*), спутниковое изображение той же области с сайта Метео-Сибирь от 3:00 UTC 3 мая 2024 г. с распределением облачности в виде завихрения с координатами центра 80° с. ш. 13° в. д. (*б*) и поле приземного ветра на 3:00 UTC 3 мая 2024 года, рассчитанное по модели GFS с сайта https://www.ventusky.com (в)

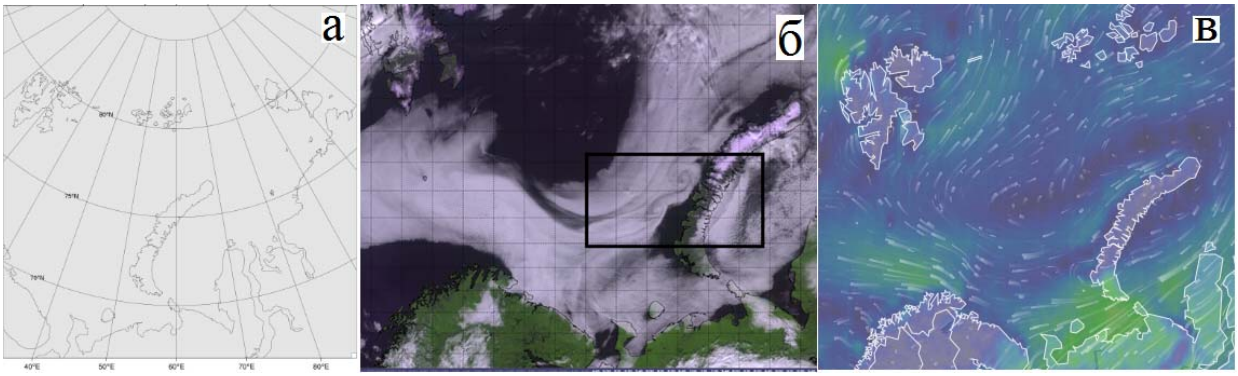


Рис. 2. Прогностическая карта испытательного полигона от 0 часов UTC 4 августа 2024 г. (*а*), спутниковое изображение той же области с сайта Метео-Сибирь от 7:45 UTC 4 августа 2024 г. с распределением облачности в виде завихрения с координатами центра 74°с. ш. 52°в. д. (*б*) и поле приземного ветра на 6:00 UTC 4 августа 2024 г., рассчитанное по модели GFS с сайта https://www.ventusky.com (*в*)

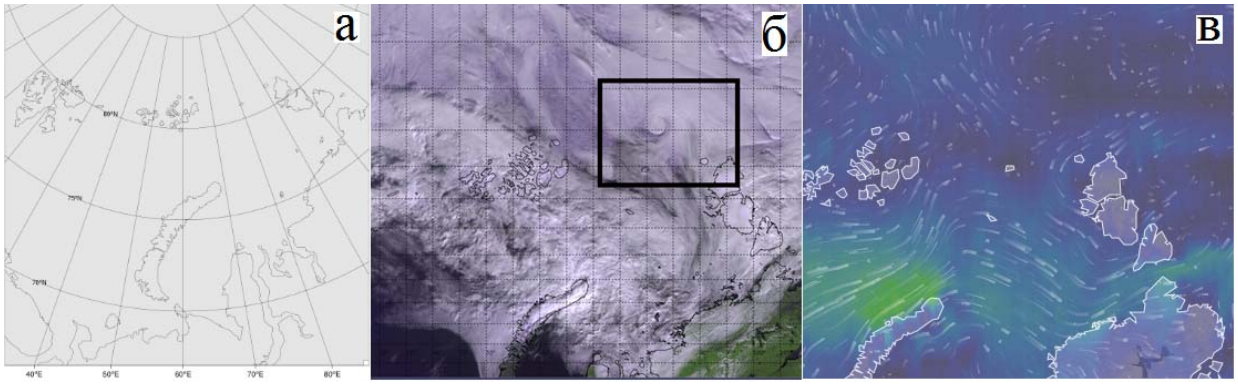


Рис. 3. Прогностическая карта испытательного полигона от 0 часов UTC 8 августа 2024 г. (*а*), спутниковое изображение той же области с сайта Метео-Сибирь от 5:30 UTC 8 августа 2024 г. с распределением облачности в виде завихрения с координатами центра 82°с. ш. 82°в. д. (*б*) и поле приземного ветра на 6:00 UTC 8 августа 2024 г., рассчитанное по модели GFS с сайта https://www.ventusky.com (*в*)

Представленные на рисунках изображения наглядно подтверждают сделанные предположения. Во всех трех случаях модель GFS не воспроизводит признаков циклонической циркуляции в районах с наблюдавшимися вихрями, возможными ПМЦ. Модельная скорость приземного ветра меньше 10 м/с. Горизонтальные масштабы неспрогнозированных циклонов меньше 200 км.

В зимнее время таких ситуаций существенно меньше. Как видно из табл. 3 на третьем этапе зафиксирован всего один случай пропуска ПМЦ. Причина этого пропуска нам пока не ясна, поскольку это был циклон синоптического масштаба, наблюдавшийся в Баренцевом море, который прослеживался как на спутниковых изображениях, так и в модельном поле приземного ветра.

Предупрежденность ПМЦ для третьего этапа по данным ААНИИ – 98 %.

После окончания независимых испытаний разработанная технологическая линия продолжает работать в тестовом режиме с целью накопления данных для дальнейшего ее совершенствования.

Ниже представлен для примера случай формирования долгоживущего ПМЦ в конце ноября 2024 г. На рис. 4 показана серия спутниковых снимков с ПМЦ, полученных с помощью ГИС Метео-Сибирь. ПМЦ возник в Норвежском море, двигался на северо-восток вдоль Скандинавского полуострова и к началу суток 29 ноября 2024 г. вошел в область видимости технологии. После вхождения в Баренцево море ПМЦ продолжил движение к архипелагу Новая Земля. На рис. 5 представлена траектория этого ПМЦ на 29 и 30 ноября 2024 г. На рис. 6 показаны поля приземного ветра, рассчитанные по модели GFS с сайта https://www.ventusky.com за те же сроки, что и спутниковые изображения на рис. 4.

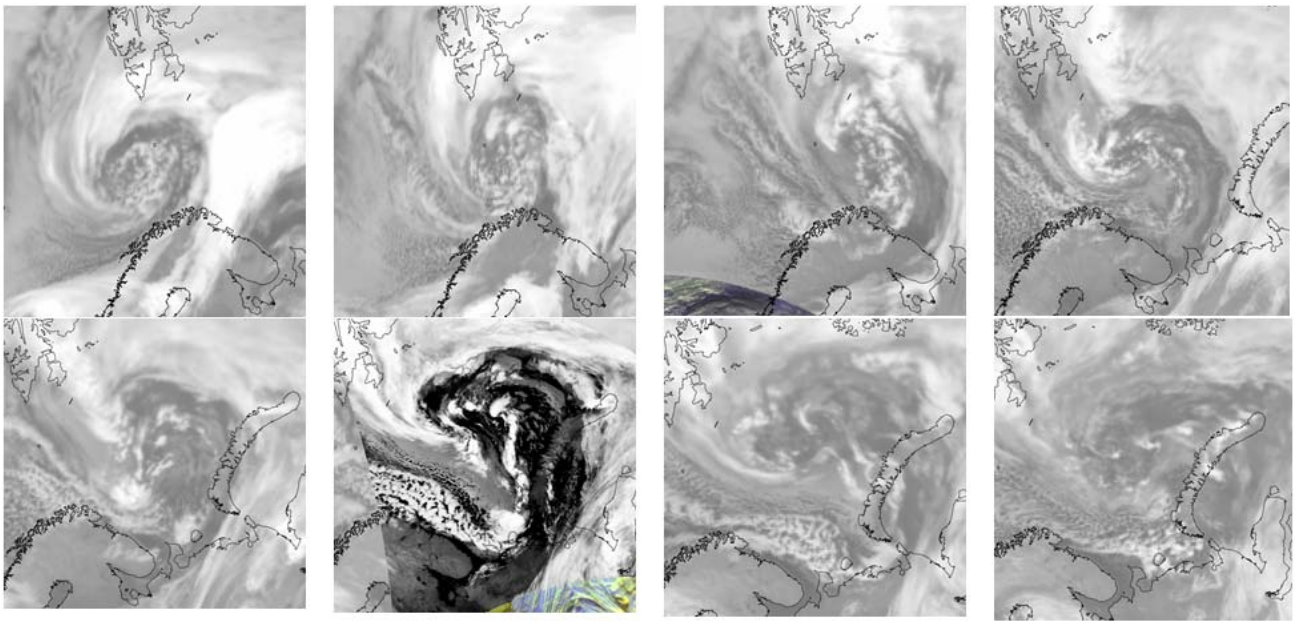


Рис. 4. Спутниковые изображения с ПМЦ (Арктика-М № 1 и № 2, NOAA-18 и 19) за период с 0 ч UTC 29.11.2024 г. по 18 ч UTC 30.11.2024 г. с шагом 6 ч

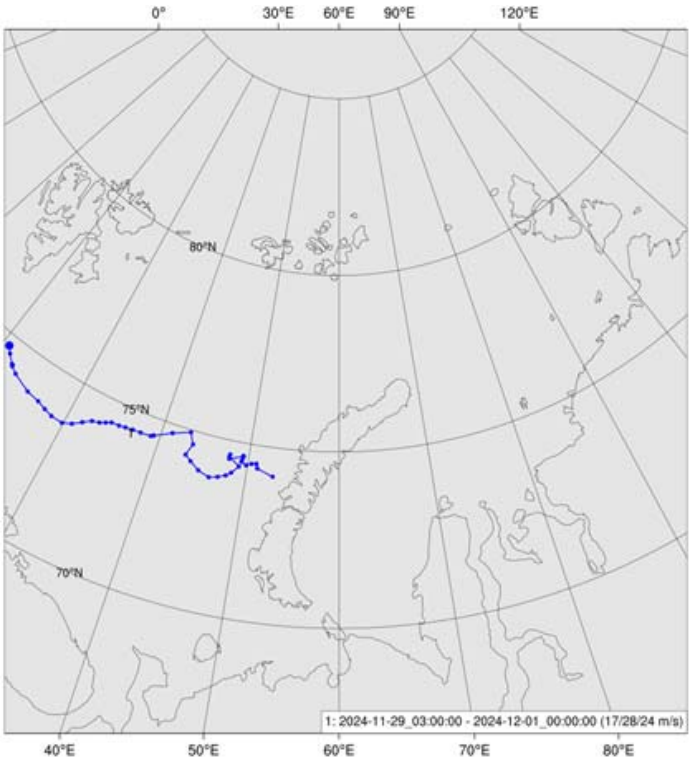


Рис. 5. Карта траекторий прогнозируемых ПМЦ на 29–30 ноября 2024 г. (прогноз от 0 ч ВСВ 29.11.2024 г.)

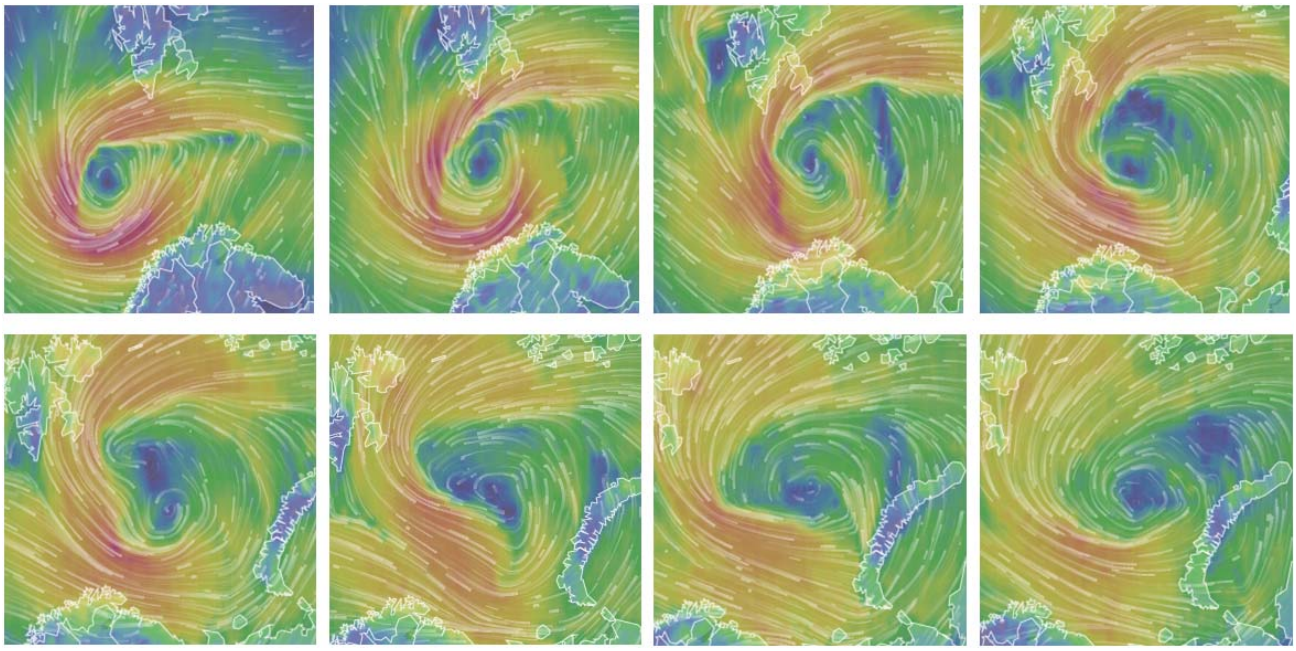


Рис. 6. Поля приземного ветра, рассчитанные по модели GFS с сайта https://www.ventusky.com за период с 0 ч UTC 29.11.2024 по 18 ч UTC 30.11.2024 с шагом 6 ч

Из представленных рисунков видно, что общие черты пути рассматриваемого долгоживущего ПМЦ в технологии были достаточно хорошо воспроизведены, но имели место некоторые погрешности локализации центра циклона, как по времени, так и по пространству.

Резюме

Создана технологическая линия построения в автоматическом режиме прогноза возникновения и перемещения полярных мезоциклонов. Проведенные независимые испытания и ее последующее использование показали, что выбранные подходы по построению прогнозов зарождения и перемещения ПМЦ дают положительный эффект, технология работоспособна и может быть востребована в оперативной практике. В дальнейшем планируются работы по усовершенствованию программного комплекса, как за счет усвоения спутниковой информации и доработки методики прогноза, так и за счет выбора новой конфигурации модели WRF с учетом доступных нам вычислительных ресурсов, в частности за счет расширения прогностической области и уменьшения шага расчетной сетки.

Список литературы

1. *Вазаева Н. В., Чхетиани О. Г.* О вихревых критериях прогнозирования полярных мезоциклонов // Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России : материалы IV Всерос. науч.-практ. конф. Иркутск, 24–26 нояб. 2021 г. Иркутск : Изд-во ИГУ, 2021. С. 266–274.

2. *Вазаева Н. В., Чхетиани О. Г., Дурнева Е. А.* О критериях идентификации полярных мезоциклонов // Метеорология и гидрология. 2022. № 4. С. 20–33.

3. *Вереземская П. С., Степаненко В. М.* Численное моделирование структуры и эволюции полярного мезоциклона в Карском море. Ч. 1. Проверка модели и оценки механизмов неустойчивости / Метеорология и Гидрология. 2016. № 6. С. 69–81.

4. Классификация Арктических мезовихрей / Р. И. Гончаров, Д. М. Караваев, Б. Г. Колесов, А. Б. Лебедев // Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды : материалы VI Всерос. науч. конф. Санкт-Петербург. 16–18 сент. 2020 г. Изд. ВКА им. А. Ф. Можайского, 2020. С. 159–164.

5. *Гурвич И. А., Заболотских Е. В.* Мезомасштабные полярные циклоны над восточным сектором Арктики по данным мультисенсорного спутникового зондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12, № 3. С. 101–112

6. *Ефимов В. В., Яровая Д. А., Комаровская О. И.* Мезомасштабный полярный циклон по спутниковым данным и результатам численного моделирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17, № 1. С. 223–233.

7. Использование композиции индексов конвективной неустойчивости для прогноза зарождения полярных мезоциклонов в Арктическом регионе России / С. А. Петриченко, О. В. Калмыкова, С. В. Козлов, Л. К. Кулижникова // Российская Арктика. 2023. Т. 5, № 2. С. 54–64. https://doi.org/10.24412/2658-4255-2023-2-54-64

8. Использование композиции индексов конвективной неустойчивости для прогноза перемещения полярных мезоциклонов в Арктическом регионе России / С. А. Петриченко, О. В. Калмыкова, С. В. Козлов, Л. К. Кулижникова // Российская Арктика. 2024. Т. 6, № 4. С. 60–71. https://doi.org/10/24412/2658-4255-2024-4-61-72

9. *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.

10. *Яровая Д. А., Ефимов В. В.* Климатологические особенности полярных мезомасштабных циклонов над восточным сектором евразийской Арктики по данным реанализа ASR // Метеорология и Гидрология. 2022. № 4. С. 5–19.

11. *Rasmussen E., Turner J.* Polar Lows. Mesoscale Weather Systems in the Polar Regions. Cambridge University Press, 2003. 612 p.

УДК 551.510.42(571.1)

Процессы снеготаяния на южных реках Пермского края в 2019 г.

М. А. Тастайбекова (wisecause777@gmail.com), Д. А. Пастухова (pastukhova_dasha261403@mail.ru), А. А. Шайдулина (Adelinash89@mail.ru)
Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь

Аннотация. Снеготаяние играет важную роль в водном режиме рек, особенно в регионах с умеренным и холодным климатом, где значительная часть годовых осадков выпадает в виде снега. Понимание влияния процессов снеготаяния на весеннее половодье необходимо для эффективного управления водными ресурсами и безопасности населения, проживающего на прибрежных территориях. Выполнены расчеты снеготаяния по методу температурных коэффициентов на водосборах рек Сылва и Чусовая, относящихся к южным районам Пермского края. С использованием геоинформационного моделирования построена серия карт поступления слоев талого стока на водосборы, выполнен анализ стаивания снежного покрова и изменения снегозапасов в весенний период 2019 г. Так, максимальные слои поступали на водосбор р. Сылвы и р. Чусовой 10–15 апреля, их величина составляла 20–25 мм/сут. Заметную роль на стаивание снежного покрова оказывает широтная зональность и высотная поясность, проявление которой замедляет стаивание снега на водосборе р. Чусовой.

Ключевые слова: снеготаяние; ГИС-технологии, весеннее половодье.

Снеготаяние – это процесс превращения снега и льда, заключенного в снежном покрове, в воду [4]. Снеготаяние является причиной сильных наводнений на реках в весенний период, и косвенно может вызывать размыв берегов, их переформирование, что влечет угрозу жизни людей и нормальному функционированию объектов инфраструктуры. Это обусловливает высокую актуальность проведения подобных исследований, так как талые воды определяют объем стока, максимальные расходы и уровни во время половодий на реках. Это особенно важно для Пермского края, где на талый сток приходится более 60 % годового стока.

Целью данной работы является расчет снеготаяния на водосборах южных рек Пермского края – Сылве и Чусовой. Данные реки берут начало на западном склоне Уральских гор, постепенно меняя характер течения на равнинный при приближении к устью. Сылва впадает в Чусовую, и вместе они формируют Сылвенско-Чусовской плес Камского водохранилища. Совокупная длинна рек составляет 1044 км, площадь водосбора – 40 890 км^2. Средняя высота водосборов – 310 м БС, залесенность – 79 % [3; 5].

Для выполнения расчетов снеготаяния используются данные о среднесуточной температуре воздуха, максимальных снегозапасах и сумме осадков с 11 метеостанций, расположенных на исследуемых водосборах. Расчет производится в специальной программе SnowMelt, в его основе лежит метод температурных коэффициентов В. Д. Комарова и адаптированный Н. Д. Лебедевой для условий водосбора Камского водохранилища. Метод был усовершенствован с применением

ГИС-технологий В. Г. Калининым и др. При расчете использовались водные эквиваленты для снега – в поле 5 мм, в лесу – 2 мм. Подробнее о модели снеготаяния указано в [1; 5].

В среде ГИС построены цифровые модели рельефа водосборов р. Чусовая и р. Сылва до г/п Лямино и Подкаменное соответственно (рис. 1).

С использованием программного пакета ArcGIS была построена серия карт поступления слоев талого стока на водосборы, выполнен анализ стаивания снежного покрова и изменения снегозапасов в весенний период 2019 г. Выбор года обусловлен тем, что на водосборах рек Сылва и Чусовая в этот год метеорологические характеристики, (температура воздуха, осадки и максимальный снегозапас) превышали среднемноголетние значения.

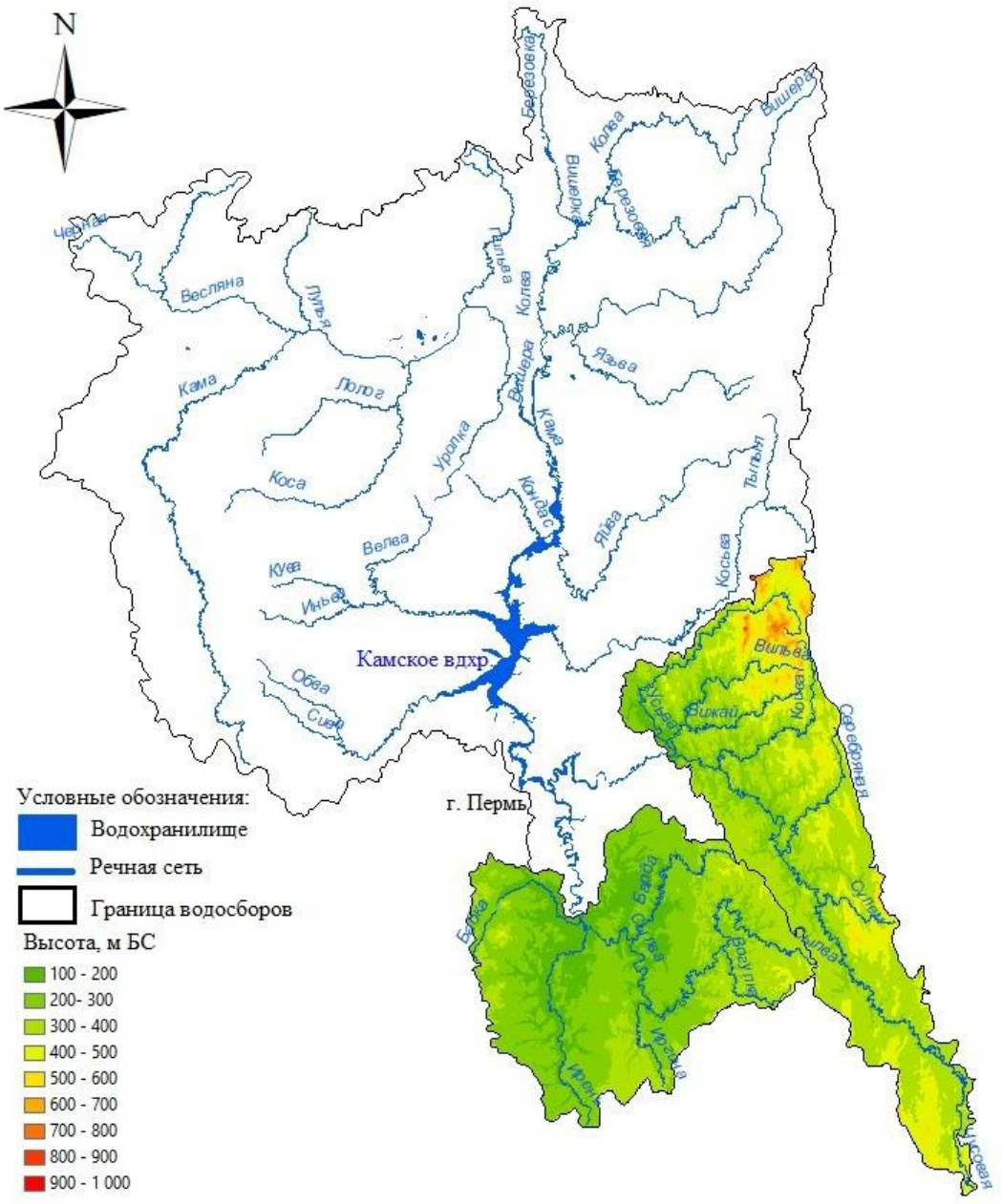


Рис. 1. Положение водосборов рек Сылва и Чусовая в пределах территории бассейна Камского водохранилища

Анализ метеорологических условий 2019 г. показал, что во второй половине зимы количество осадков было значительно больше, чем в первой. Последний раз подобное распределение было в 2001–2002 гг. Декабрь был очень сухим (в основном выпало меньше половины нормы осадков), январь – умеренно снежным. В феврале количество осадков превысило две месячные нормы в Перми и по другим центральным районам [2]. Максимальный снегозапас в 2019 г. пришелся на 10 и 31 марта. На водосборе р. Чусовая значения снегозапаса в поле и лесу было больше, чем на р. Сылва на 50–100 мм. Основной процесс снеготаяния на реках Сылва и Чусовая приходился на конец марта – начало апреля.

В марте температура воздуха на водосборе р. Сылвы была выше, а на р. Чусовой – ниже нормы. В апреле она составляла 2,7 ºС. Для Чусовой это норма, для Сылвы – ниже нормы. В мае температура воздуха составила 12,3–13,3 ºС, эти показатели являются нормой для Сылвы и превышают норму для Чусовой.

Сумма осадков в марте составляла 38,9–61,3 мм (выше нормы), в апреле 16,9–21,6 мм (ниже нормы), в мае норма осадков превышала значения на водосборе р. Сылвы – 48,5 мм, а для территории Чусовой значения входят в допустимые – 70,5 мм.

Выполнены расчеты изменения площади водосборов, занятой снежным покровом весной 2019 г. (рис. 2).

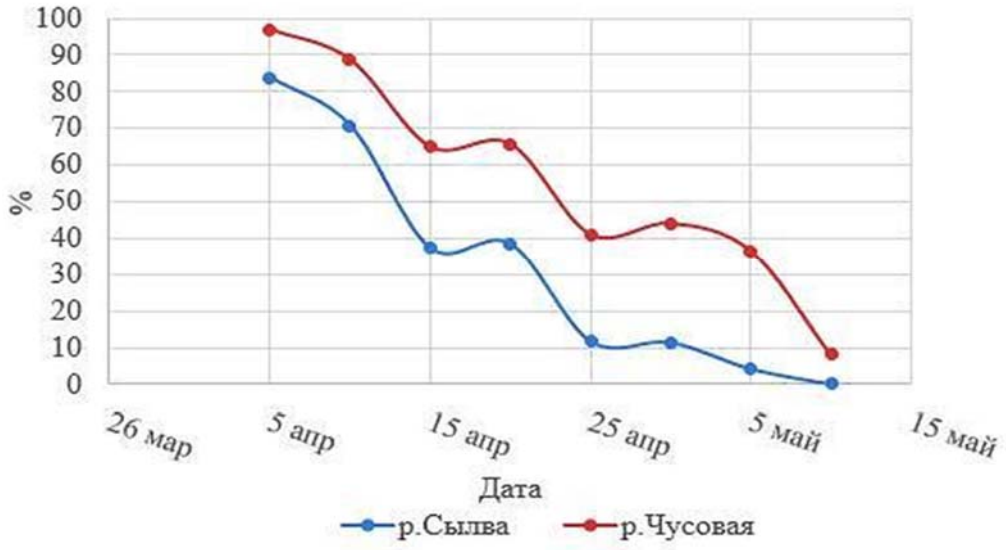


Рис. 2. Изменение площади водосборов, покрытой снегом, в весенний период 2019 г.

Анализ рис. 2 показал, что динамика освобождения исследуемой территории от снежного покрова имеет схожий характер. При этом снеготаяние на водосборе р. Сылвы, который находится южнее и имеет более равнинный характер местности, происходит раньше, чем на вытянутом и имеющим большие высоты водосборе р. Чусовой. Так, к концу первой декады апреля снежным покровом занято 70 и 90 % территории бассейнов рек Сылвы и Чусовой соответственно. К концу второй декады уже 38 и 65 % соответственно. В конце периода снеготаяния наблюдаются максимальные расхождения в динамике стаивания снежного

покрова исследуемых территорий. Так, к 25 апреля снег на водосборе р. Сылва почти полностью стаял, а на водосборе р. Чусовой снегом было покрыто порядка 40 % площади. Водосбор р. Чусовой полностью освободился от снежного покрова к середине мая (рис. 2).

Применение геоинформационной модели снеготаяния [1] позволило выполнить моделирование слоев стаявшего снега, поступающих на территорию исследуемых водосборов в апреле 2019 г. (рис. 3). Так, максимальные слои поступали на водосбор р. Сылвы и р. Чусовой – 10–15 апреля (рис. 3, *б*). Заметно влияние широтной зональности и высотной поясности на процессы снеготаяния. Широтная поясность особенно ярко проявляется на водосборе р. Сылвы, а высотная – на водосборе р. Чусовой, что замедлило стаивание снега (рис. 3, *г*).

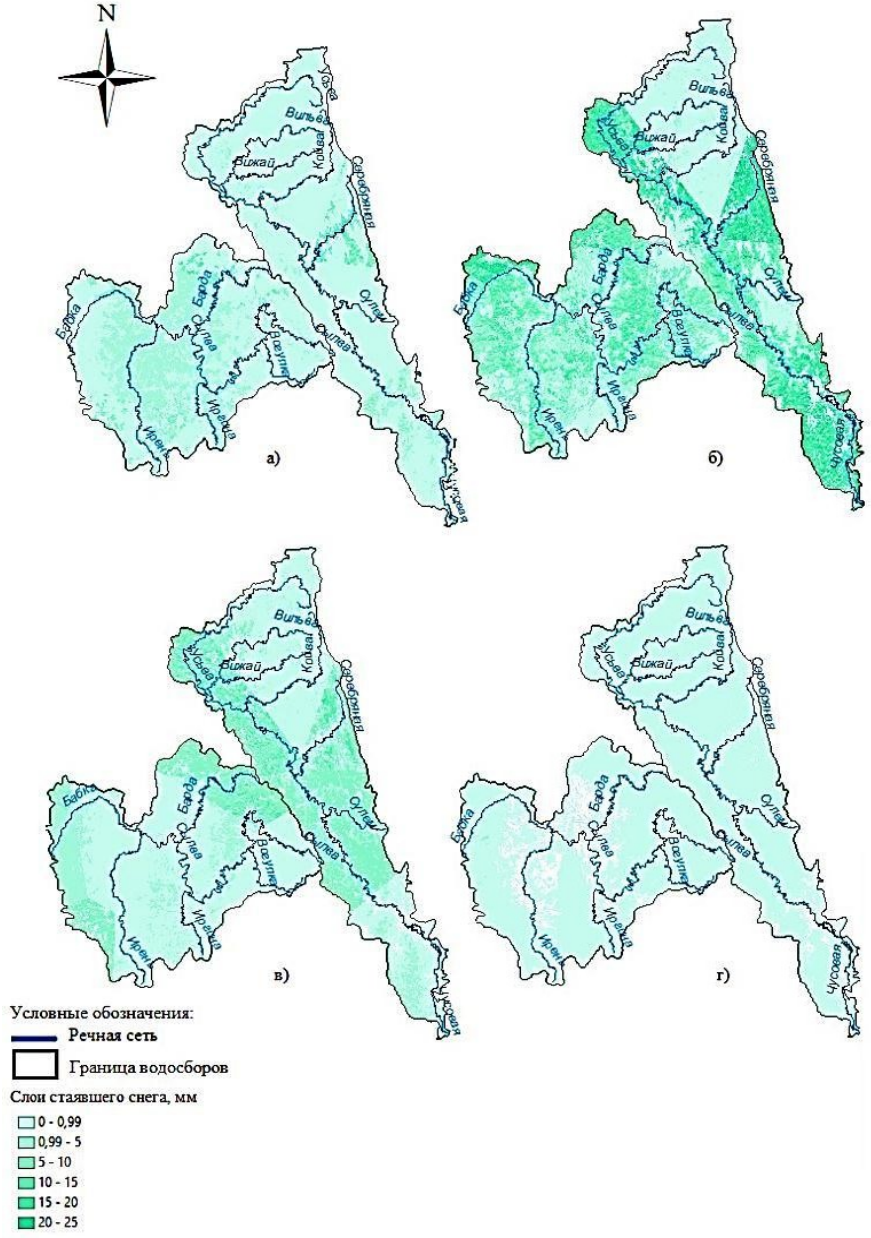


Рис. 3. Слои стаявшего снега, поступающие на территорию исследуемых водосборов в апреле 2019 г. (а – 05.04; б – 10.04; в – 20.04; г – 30.04)

Таким образом, выполнен анализ процессов снеготаяния на южных реках Пермского края (Сылве и Чусовой) в 2019 г. В этот год метеорологические характеристики, (температура воздуха, осадки и максимальный снегозапас) превышали среднемноголетние значения. Основной процесс снеготаяния приходился апрель месяц. Так, к 25 апреля снег на водосборе р. Сылва почти полностью стаял. Водосбор р. Чусовой полностью освободился от снежного покрова к середине мая, что обусловлено проявлением высотной поясности.

Список литературы

1. Математико-геоинформационное моделирование процесса снеготаяния на речных водосборах Прикамья / В. Г. Калинин, А. А. Шайдулина, В. С. Русаков, М. А. Фасахов // Лёд и снег. 2022. Т. 62 (1). С. 63–74.

2. Опасные природные явления Пермского края. URL: http://accident. perm.ru/index. php/novosti/1261-itogi-vesennego-polovodya-na-rekakh-permskogo-kraya-v-2019-g (дата обращения: 26.02.2025).

3. Ресурсы поверхностных вод СССР. Кама. Л. : Гидрометеоиздат, 1973. Т. 11. Вып. 1. 420 с.

4. *Чеботарев А. И.* Гидрологический словарь. М. : Гидрометиздат, 1964.

5. *Шайдулина А. А.* Пространственно-временные закономерности снеготаяния на водосборе Камского водохранилища : дис. … канд. геогр. наук. Пермь, 2023. 178 с.

Секция

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

УДК 520.8

Современные методы поиска экзопланет

Д. С. Хабитуев (khabituev@iszf. irk.ru), А. С. Латышев (loshchenko@bk.ru)
Иркутский государственный университет, г. Иркутск
Институт солнечно-земной физики, г. Иркутск

Аннотация. Выполнен сравнительный анализ современных методов и подходов к поиску экзопланет, которые существуют за пределами Солнечной системы и представляют интерес для развития теории образования планетарного вещества и возможного существования жизни. Особое внимание уделялось описанию методов доплеровской спектроскопии, транзитной фотометрии, радионаблюдениями пульсаров, прямого фотографирования, астрометрическому методу и методу гравитационного линзирования. Рассмотрены результаты, полученные космическими телескопами «Кеплер», «Хаббл», «Джеймс Уэбб» и TESS, которые сегодня являются основными инструментами обнаружения экзопланет. Рассмотрены особенности экзопланетной системы TRAPPIST-1. Проанализированы тенденции распределения экзопланет в зоне обитаемости (habitable zone), где в диапазоне расстояний от звезды температура на поверхности планеты составляет от 0 до 100 ºС.

Ключевые слова: экзопланеты, доплеровская спектроскопия, транзитный метод, пульсары, астрометрический метод, гравитационное линзирование, телескоп, спутник

Введение

Планеты, принадлежащие не нашей Солнечной системе, а иным планетным системам у других звёзд, называются экзопланетами или внесолнечными планетами. Кроме того, существуют и планеты, не связанные силой притяжения с конкретной звездой, а которые свободно перемещаются в межзвёздном пространстве (планеты-сироты). Экзопланеты получают свое название по имени звезды, вокруг которой они обращаются, с добавлением латинской буквы по алфавиту, начиная с буквы *b*, так как первая буква *a* присваивается звезде.

Принято считать, что о множественности обитаемых миров первыми задумались греческие атомисты в V в. до н. э., однако только после создания гелиоцентрической системы мира Коперником в XVI веке появились физически обоснованные предположения об иных планетных системах. Одним из первых изложил основные положения современной космологии Джордано Бруно, утверждавший, что «существуют бесчисленные земли, которые кружатся вокруг своих солнц, подобно тому, как наши семь планет кружатся вокруг нашего Солнца» [5].

Косвенные признаки формирования и наличия планет у звёзд разного типа (обнаружение в спектре звезды тяжелых элементов, зеркальная асимметрия планетарных туманностей, наличие газово-пылевых протопланетных дисков у формирующихся звездных объектов) обнаруживались ещё до открытия самих экзопланет. По состоянию на середину января 2025 г. достоверно подтверждено существование 7397 экзопланет в 5078 планетных системах. В галактике Млечный Путь количество экзопланет оценивается не менее чем в 100 миллиардов, из ко-

торых от 5 до 20 миллиардов могут находиться в зоне обитаемости. Зона обитаемости – комплекс критериев, которому должна соответствовать планета, чтобы на ней могла возникнуть жизнь земного типа. В первом приближении можно рассматривать ее, как диапазон расстояний от звезды, внутри которого температура на планете позволяет воде существовать в жидком состоянии.

Определение характеристик и классификация этих объектов является фундаментальной задачей, направленной на понимание разнообразия планетных систем во Вселенной. В этой связи обнаружение и изучение экзопланет представляет огромный научный и практический интерес.

Методы поиска экзопланет

Первая методически обоснованная попытка поиска экзопланеты у одной из ближайших звезд (Летящая звезда Барнарда) была предпринята в 1980-х гг. благодаря успехам в развитии астрофизики и появлению новых мощных радиотелескопов. Данный метод основан на том, что планета, вращаясь вокруг своей звезды, «раскачивает» ее. Поэтому, если измерить доплеровское смещение спектра звезды, вызванное ее попеременным ускорением, то можно обнаружить экзопланету, установить ее приблизительные массу и орбиту. Однако значительное доплеровское смещение спектра вызывают только очень массивные планеты, поэтому с помощью спектрометрического измерения можно обнаружить землеподобные планеты больше Земли в несколько раз. Первая надежно установленная экзопланета была обнаружена в 1995 г. астрономами Женевской обсерватории (Швейцария) Мишелем Майором и Дидье Кёло, построившими спектрометр, способный с высокой точностью измерять смещение линий в спектре звезды (до 13 м/с). Достигнутая сейчас точность регистрации лучевой скорости звёзд в 1 м/с позволяет обнаружить наличие планет в несколько раз массивнее Земли (суперземли) вблизи звёзд в несколько раз менее массивных, чем Солнце. Впервые спектры планет в инфракрасном диапазоне, где контраст со звёздным светом минимален, удалось получить с помощью «Спитцера» в 2007 г. для горячих юпитеров HD 209458 b (Озириса) и HD 189733 b [2].

Кроме доплеровской спектроскопии, которая наиболее подходит для обнаружения планет гигантов, разработаны другие методы обнаружения планет. Транзитный метод или метод транзитной фотометрии, фиксируя уменьшение яркости звезды в момент прохождения планеты на фоне звезды, позволяет определить такие характеристики экзопланеты, как масса, температура поверхности, альбедо, радиус, а также установить состав атмосферы. Эта область исследований в астрономии появилась в 2004 г. с обнаружением первой транзитной экзопланеты HD 209458b. Сравнительно недавно, благодаря выявлению колебаний транзитных моментов (моментов середины транзита), колебаний продолжительности транзитов и угла наклона орбиты планеты со временем, появилась возможность искать «невидимые» (недетектируемые какими-либо другими методами) внесолнечные планеты [11].

Эффективность транзитного метода во многом определяется, присутствует ли необходимая линия «наблюдатель-плоскость орбиты» экзопланеты и удачно ли выбрано время прохождения на фоне звезды, так как циклы могут повторяться раз в десятки лет. Также необходимо учитывать, что для яркости небольших землеподобных планет характерны очень слабые изменения. Например, прохождение на фоне Солнца Юпитера, который в 10 раз меньше Солнца, ослабило бы блеск нашего светила лишь на 1 %, а Земля всего на 0,008 %. Поэтому транзитным методом больше всего открыто гигантских планет, вращающихся близко к своим звездам, которые называют горячими Юпитерами [6].

В 1990 г. польско-американский астроном Александр Вольщан воспользовался временно свободным после ремонта радиотелескопом Аресибо, чтобы заняться поиском пульсаров. Эти нейтронные звёзды представляют собой компактные остатки сверхновых, которые испускают вдоль оси своего магнитного поля мощное электромагнитное излучение. Магнитная ось может не совпадать с осью вращения, и если конус излучения задевает Землю, то мы видим периодические импульсы, в том числе в радиодиапазоне. Радиоволновое излучение пульсаров объясняется переходами электронов между уровнями энергии, возникающими из-за отталкивания заряженных частиц от двойного электрического слоя и гравитационного притяжения звезды. Радионаблюдение пульсаров основано на том, что если есть планета, обращающаяся вокруг пульсара, то принимаемый от него сигнал будет иметь осциллирующую составляющую.

2008 г. стал прорывным для нового, хотя и самого очевидного из методов поиска экзопланет – прямого наблюдения или прямого фотографирования (imaging), который позволяет обнаружить горячие и достаточно удаленные от своих звезд планеты на расстоянии от 10 до 100 астрономических единиц. Недавно сформировавшиеся небесные тела возрастом в несколько миллионов лет нагреты достаточно, чтобы можно было зарегистрировать их тепловое излучение в инфракрасном диапазоне. Наземным телескопам с адаптивной оптикой и звёздным коронографам в исключительных случаях удаётся получать изображения очень массивных и молодых планет на расстоянии около 0,1″ от предельно маломассивной звезды или коричневого карлика.

Суть метода заключается в том, что свет звезды искусственно «закрывается» специальным экраном, так называемым коронографом, чтобы он не мешал наблюдению находящейся рядом планеты. Более перспективным способом экранирования является интерферометрия. В простейшем варианте два зеркальных телескопа принимают свет от одной и той же звезды, который затем подводится к общему приёмнику с задержкой по фазе, так, чтобы свет звезды полностью гасился волновой интерференцией, в то время как тусклый свет планеты оставался нетронутым (либо даже мог быть усилен). Фактически это замена одного большого зеркала телескопа множеством маленьких. Благодаря взаимодействию световых волн можно убрать засветку от ярких звезд и усилить яркость лучей, указывающих на наличие планеты. При этом интерферометр позволяет получать точные данные по местоположению экзопланеты. Таким методом удалось даже

сфотографировать протопланетные диски, находящиеся на расстоянии почти 500 световых лет от Земли.

Астрометрический метод позволяет обнаружить экзопланету, если есть звезда, обладающая несветящимся компаньоном, чья орбитальная плоскость не параллельна (а лучше всего – перпендикулярна) линии, соединяющей эту звезду и Землю. Поскольку оба тела обращаются вокруг общего центра тяжести, звезда будет чуть-чуть покачиваться на земном небосводе. Эти качания можно обнаружить с помощью угломерных инструментов, т. е. астрометрическими методами. В основном, этим методом уточняют массу и размер экзопланет.

Метод гравитационного линзирования (нанолизирование) нацелен на поиск планет-одиночек, не связанных с какой-либо звездой. Этот метод позволяет заметить далёкие от звезды маломассивные экзопланеты и спутники планет. Он основан на общей теории относительности Эйнтштейна, согласно которой свет далекой звезды, проходя вблизи звезды (или планеты), находящейся ближе к наблюдателю, будет искривляться. Другими словами, гравитация, словно линза, собирает свет, поэтому наблюдательный эффект заключается в кратковременном возрастании видимого блеска звезды, не связанном с изменениями самой звезды (пульсациями, вспышками и т. п.). Таким методом ученые обнаруживают экзопланеты размером с Землю. Гравитационное микролинзирование получит развитие в 2026–2027 гг. с запуском обсерватории Нэнси Грейс Роман (RST, Roman Space Telescope).

Первую попытку обнаружения экзопланет из космоса предпринял крупнейший космический телескоп Хаббл (NASA/ESA) с объективом диаметром 2,4 м. В 2006 г. на нём реализовали программу SWEEPS (Sagittarius Window Eclipsing Extrasolar Planet Search). Сквозь сравнительно прозрачную область Млечного Пути «окно» Стрельца в течение недели в поле размером несколько угловых минут он наблюдал 180 тыс. звёзд, где обнаружилось 16 кандидатов в экзопланеты с орбитальными периодами от 0,4 до 4 сут., из которых пока подтвердились только две самые яркие системы.

Космический телескоп «Кеплер» (NASA) с объективом диаметром 0,95 м за 9 лет службы (7 марта 2009 г. – 15 ноября 2018 г.) на гелиоцентрической орбите с большой полуосью a=1,0133 а. е. и периодом 372,5 сут, наведенной на одну и ту же область (на стыке созвездий Лебедя, Лиры и Дракона) открыл более двух тысяч экзопланет. Еще около двух тысяч кандидатов в экзопланеты ждут своего подтверждения другими научными группами [3].

Если рассматривать в качестве обитаемых все планеты с инсоляцией от 0,25 до 2,2 земной, то таких в выборке оказывается 361. Если же принять за обитаемую зону интервал от 0,32 до 1,78, то количество подходящих планет равно 288. Благодаря Кеплеру удалось обнаружить следующую закономерность, что с уменьшением радиусов количество кандидатов нарастало, и самыми многочисленными были кандидаты размером меньше Нептуна. Причём экстраполяция указывала на то, что и в этом диапазоне с уменьшением размера число планет быстро растёт. Также в распределении планет по радиусам был выявлен глубо-

кий «провал» в диапазоне от 1,5 до 2 Re (радиусов Земли). Он был назван долиной радиусов (radius valley) или зазором Фултона (Fulton gap). Планеты с радиусами ≥ 1,7–1,8 Re, по-видимому, обладают протяжёнными водородно-гелиевыми атмосферами и представляют мини-Нептуны, в то время как у планет меньшего размера водородных атмосфер нет. Спутники экзопланет начали искать ещё в первых релизах данных Кеплера, а в октябре 2018 г. NASA указали на первое свидетельство возможной Луны за пределами нашей Солнечной системы.

В 2018 г. на орбиту с периодом 13,7 сут был запущен спутник TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite). Его 4 широкоугольные камеры с объективами диаметром 10 см и полем зрения 24º×24º у каждой одновременно покрывают более 5 % небесной сферы, изучая только яркие звёзды до 12^m в диапазоне длин волн от 600 до 1000 нм. Запущенный в конце 2019 г. европейский спутник CHEOPS (CHaracterising ExOPlanets Satellite) с телескопом диаметром 30 см на солнечно-синхронную орбиту с высотой 700 км проводит исследование суперземель. На 2028 г. намечен запуск спутника ARIEL (Atmospheric Remotesensing Infrared Exoplanet Large-survey, ESA) с телескопом видимого и ближнего инфракрасного диапазонов для изучения атмосферы более 1 000 экзопланет [7].

В настоящее время среди многочисленных обнаруженных экзопланетных систем особый интерес представляет система TRAPPIST-1, зарегистрированная в 2016 г., которая, возможно, состоит минимум из семи подобных Земле планет, некоторые из которых могут быть потенциально обитаемы. TRAPPIST-1 (2MASS J23062928-0502285) – одиночная звезда карлик класса M8 V в созвездии Водолея, находящаяся на расстоянии примерно 12,1 пк (39,5 св. года) от Солнца. Средняя планета (e) является кандидатом в обитаемые океанические миры в системе TRAPPIST-1. Планета e может поддерживать, по крайней мере, некоторую пригодную для жизни площадь поверхности при давлении CO_2 в пределах 0–2 бар, в зависимости от фонового содержания N_2 [8].

В 2019 г. впервые обнаружен теплый газовый гигант с экстремально низкой плотностью ~0. 1 г/$см^3$. Это указывает на то, что вскоре будет обнаружено большое количество экзопланет, находящихся на стадии интенсивного испарения, вещество которых заполняет всю систему [9]. В специальной астрофизической обсерватории (САО РАН) с 2020 г. введен в работу первый оптический роботизированный 50-см телескоп, предназначенный для исследования экзопланет методом транзитной фотометрии. В результате анализа кривых блеска звезд в исследуемом поле найдено восемь звезд, у которых наблюдаются периодические падения яркости, характерные для транзитных событий [10].

Первый в истории снимок экзопланеты был сделан 1 сентября 2022 г. с помощью новейшего телескопа «Джеймс Уэбб» – орбитальной инфракрасной обсерватории, запущенной на орбиту Земли в декабре 2021 г. «Джеймс Уэбб» – самый крупный космический телескоп с самым большим сегментированным зеркалом диаметром 6,5 м. Телескоп дал возможность фотографировать газовый гигант HIP 65426 b[en], который в 12 раз тяжелее Юпитера и находится в 385 световых годах от Земли. Температура ее атмосферы составляет примерно 1300 ºС. Известно, что в атмосфере планеты есть красноватые облака силикатной пыли.

Эрик Петигура (Erik Petigura), аспирант Джеффри Марси, одним из первых в ноябре 2013 г. попытался экстраполировать тенденции в распределении планет до зоны обитаемости (habitable zone), где в диапазоне расстояний от звезды температура на поверхности планеты составляет от 0 до 100 ºС [4]. При нормальном давлении атмосферы это открывает возможность для существования жидкой воды, а значит жизни в её нынешнем понимании. В зависимости от определения зоны жизни он получил частоту встречаемости землеразмерных (1–2 Re) планет в ней в 5,8 %, 8,6 % и даже 26 % (последнее значение соответствует слишком оптимистичной ширине зоны обитаемости). Если исходить из понятия «землеподобные» планеты, то их может насчитываться в галактике Млечный Путь от 5 до 20 млрд, обитаемых – около 300 миллионов, а тех, которые могут сравниваться с Землёй – 216. Проект HabEx (Habitable Exoplanet Imaging Mission, NASA), предлагаемый для запуска в 2035 г., будет включать телескоп ультрафиолетового, инфракрасного и видимого диапазонов длин волн от 91 до 1 000 нм, который нацелен изучить атмосферы землеподобных экзопланет в зоне жизни [1].

Таким образом, в первые годы обнаружения экзопланет основным астрофизическим методом был метод радиальных скоростей, основанный на поиске изменений радиальной скорости звезды, вызванной воздействием массивного объекта в ее окрестностях, которые выражаются в периодическом смещении спектральных линий. В настоящее время наибольшее распространение получил транзитный метод, где путем построения кривой изменения звездного блеска звезды во время прохождения по ее диску планеты, можно установить не только диаметр экзопланеты, период вращения, наличие колец и собственных спутников планеты, а также химический состав атмосферы планеты, строение и наличие облачного покрова. Порядка 134 подтвержденных экзопланет обнаружены методом гравитационного микролицензирования, который в отличие от других методов позволяет обнаруживать экзопланеты на огромных расстояниях от Земли, а также экзопланеты-одиночки.

Будущее в исследованиях экзопланет это поиск экзопланет земного типа в зонах обитаемости, где при благоприятных атмосферных условиях на ее поверхности могла сохраняться в жидком виде вода. Для этой цели перспективно дальнейшее развитие космических и наземных телескопов, статистических методов для верификации моделей планетообразования и получения количественных оценок экзопланет разных типов.

Заключение

Среди существующих методов наиболее перспективными являются методы транзитной и доперовской фотометрии, но, они плохо подходят для обнаружения мультипланетных систем. Более детально изучать атмосферу экзопланет позволяет метод гравитационного линзирования, но, он имеет некоторые ограничения по обнаружению экзопланет земной группы. Атмосферы экзопланет можно изучать двумя способами: трансмиссионной, или просвечивающей, и эмиссионной, или отражательной, спектроскопией. В первом случае анализируется зависимость глубины транзита планеты от длины волны, на которой ведутся

наблюдения, во втором – отражённый планетой звёздный свет. Кроме того, одну из ключевых ролей для успешного поиска экзопланет играет правильный выбор объекта наблюдений.

В настоящий момент приблизительно 10 % всех обнаруженных экзопланет являются горячими юпитерами или теплыми нептунами, с массой от 0,05 до 5 масс Юпитера и имеют радиус орбиты <0,2 а. е. Анализ распределения экзопланет на диаграмме «масса – орбитальный период» обнаруживает провал между популяциями каменистых суперземель и газовых мининептунов. При этом чёткой границы по радиусу между каменистыми и газовыми планетами не существует, а переходной зоной между двумя типами планет по размерам является интервал 1,6–1,9 радиуса Земли. Поэтому исследуется гипотеза о том, что промежуточные планеты с относительно малой массой и обширной первичной атмосферой не являются долго живущими объектами по причине того, что водородная оболочка, захваченная такой протопланетой, достаточно быстро теряется.

За четверть века исследований экзопланет найдено огромное количество экзопланет, которое указывает на то, что планетные системы – не исключительный, а вполне обычный продукт протозвёздной эволюции. При этом особый интерес обращён к экзопланетам земного типа с условиями на поверхности, близкими к земным. Для образования на планетах земного типа потенциально пригодных для жизни условий важным является процесс сброса первичной газовой оболочки вокруг каменистого ядра за первые сотни миллионов лет эволюции, когда планета находится в режиме интенсивного газодинамического истечения атмосферы.

Список литературы

1. Распределение экзопланет по массам в зависимости от спектрального класса родительских звезд / В. И. Ананьева, А. Е. Иванова, А. А. Векстерн [и др.] // Астрономический вестник. 2020. Т. 54. № 3. С. 195–207.

2. *Анисимова В. В., Козырева В. Н.* Экзопланеты // Юный ученый. 2015. № 3. С. 123–125.

3. *Бикмурзин Р. В., Федченко Д. П.* Метод построения классификатора звезд из каталога GAIA DR2 на наличие экзопланет // Пространство, время и фундаментальные взаимодействия. 2020. № 4 (33). С. 4–9.

4. *Емец Н. П., Беличенко А. К.* Экзопланеты земного типа // Научные горизонты. 2018. № 5. С. 170– 174.

5. *Семенова Д. С.* Методы обнаружения экзопланет // Материалы МСНК «Студенческий научный форум». 2020. № 1. С. 77–78.

6. Сидоров А. А. Методы поиска экзопланет / // COLLOQUIUM-JOURNAL. 2019. № 20. С. 85–87.

7. Таскер Э. Фабрика планет: Экзопланеты и поиски второй Земли. М. : Альпина нон-фикшн, 2019. 486 с.

8. Теплицкая В. С. О некоторых особенностях экзопланетной системы TRAPPIST-1 / В. С. Теплицкая // Климат и природа. 2021. № 3 (40). С. 41–51.

9. *Шайхисламов И. Ф.*, *Ходаченко М. Л.* Горячие экзопланеты, новый класс планет, наблюдательные проявления и методы исследования // Земля и Вселенная. 2020. № 3. С. 20–29.

10. Восемь кандидатов в экзопланеты в обзоре на телескопах САО / О. Я. Яковлев, А. Ф. Валеев, Г. Г. Валявин и др. // Астрофизический бюллетень. 2023. Т. 78, № 1. С. 85–100.

11. *Perryman M.* The Exoplanet Handbook. Cambridge : Cambridge University Press, 2018. 972 p.

Секция

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПОДГОТОВКИ КАДРОВ В СФЕРЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ

УДК 349.6:551.579

Роль природоохранного законодательства в формировании профессиональных компетенций гидрометеорологов

Ю. В. Вашестюк (vashestyuk_yv@istu.edu)[1,2], С. Ж. Вологжина (svologzhina@gmail.com)[2], С. А. Салатин (salatin. s@yandex.ru)[1,3]

[1]*Иркутский государственный университет, г. Иркутск*
[2]*Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск*
[3]*Институт географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, г. Иркутск*

Аннотация. Актуальность статьи обусловлена тем, что в условиях глобальных экологических вызовов, таких как изменение климата и утрата биоразнообразия, важность природоохранного законодательства для подготовки высококвалифицированных гидрометеорологов становится неоспоримой: гидрометеорологи, обладая знаниями о законодательных нормах и навыками их применения, способны не только эффективно работать в своей профессиональной области, но и вносить вклад в защиту окружающей среды. В статье обсуждается взаимодействие образовательных учреждений и законодательства в сфере экологии, которое представляет собой необходимое условие формирования высококвалифицированных специалистов, способных справляться с современными вызовами в области гидрометеорологии. Дается представление о ключевой роли экологического образования в подготовке современного специалиста, которая тесно связана с реализацией долгосрочных планов социально-экономического развития государства, что возможно только при непосредственном их участии, строящих свою работу на принципах устойчивого развития. Обсуждается то, что в современном мире планирование социально-экономического развития государства невозможно без ориентации на концепцию устойчивого развития, причем более детальной проработкой данной концепции и ее реализацией в различных отраслях народного хозяйства должны заняться будущие специалисты.

Ключевые слова: природоохранное законодательство, компетенции гидрометеорологов, устойчивое развитие.

Рост производства материальных благ приводит к сокращению не подвергшихся загрязнению атмосферы, воды, почвы. В свою очередь, дефицит перечисленных природных ресурсов, необходимых для нормальной жизнедеятельности, является причиной ухудшения здоровья людей и, помимо этого, приводит к возникновению дополнительных затрат, связанных с устранением последствий причиненного ущерба. В условиях необходимости принятия мер по улучшению состояния природных ресурсов важным становится привлечение внимания к роли природоохранного законодательства в формировании профессиональных компетенций специалистов, работающих с природными ресурсами, в том числе и гидрометеорологов, для повышения социально-экономических показателей страны на долгосрочную перспективу.

Гидрометеорология – это наука, изучающая атмосферные и гидрологические процессы, а также их влияние на окружающую среду и человека. В условиях современного мира, где экологические проблемы становятся все более актуальными, важность качественного образования и подготовки специалистов в обла-

сти гидрометеорологии возрастает. Определение профессиональных компетенций гидрометеоролога осуществляется образовательной организацией на основе профессиональных стандартов [3]. Учитывая необходимость знания требований нормативно-правовых актов по охране окружающей среды для выполнения трудовых функций гидрометеоролога [4], одним из ключевых аспектов формирования профессиональных компетенций гидрометеорологов является знание природоохранного законодательства, которое устанавливает правила взаимодействия человека с природной средой и направлено на ее защиту.

Природоохранное законодательство включает в себя совокупность юридических норм и актов, регулирующих отношения, возникающие в процессе использования и охраны природных ресурсов. Это законодательство охватывает различные области, такие как охрана атмосферного воздуха, водных ресурсов, земель, биологического разнообразия и др. Основной целью природоохранного законодательства является обеспечение устойчивого развития, защита окружающей среды и здоровья населения. Для этого необходимо.

1. Знание законодательства и его норм. Одной из основополагающих компетенций гидрометеоролога является знание действующего природоохранного законодательства. Это включает в себя не только осведомленность о законах и нормативных актах, но и умение применять их на практике. Гидрометеорологи должны уметь оценивать влияние различных факторов на состояние атмосферы и водных объектов и принимать решения, основываясь на правовых нормах.

2. Экологическая экспертиза и мониторинг. Гидрометеорологи часто участвуют в процессах экологической экспертизы и мониторинга состояния атмосферы и водных объектов. Важно, чтобы специалисты могли грамотно интерпретировать данные, полученные в результате замеров и исследований, и давать рекомендации по минимизации негативного воздействия на компоненты окружающей среды. Природоохранное законодательство задает рамки для таких экспертиз, устанавливая, какие параметры должны быть изучены, и какие методы анализа являются приемлемыми.

3. Участие в разработке и реализации экологических программ. Гидрометеорологи играют ключевую роль в разработке и реализации программ по охране атмосферы и водных объектов. Знания о правовых и экологических нормах, внесенных в законодательство, позволяют им вносить предложения по улучшению существующих практик, ориентируясь на более эффективное управление природными ресурсами.

4. Промоция устойчивого развития. Одной из целей природоохранного законодательства является содействие устойчивому развитию. Гидрометеорологи, обладая необходимыми знаниями, могут активно участвовать в образовательных программах, направленных на повышение метеорологической и гидрологической осведомленности, как среди населения, так и среди специалистов из других областей. Это подчеркивает их роль как связующего звена между наукой, практикой и законодательством.

Образ современного специалиста, в том числе и гидрометеоролога, требует более широкого образования – образования для устойчивого развития. В первую очередь данное требование обусловлено новыми федеральными государственными образовательными стандартами. Компетентностный подход, являющийся основой данных стандартов, нацелен подготовить для рынка труда квалифицированных специалистов, способных самостоятельно решать проблемы в различных сферах и видах деятельности. Однако в современных условиях любое управленческое решение должно приниматься с учетом требований устойчивого развития, направленного на обеспечение удовлетворения экономических, экологических и социальных потребностей в долгосрочной перспективе.

Одним из основных условий достижения целей устойчивого развития является рациональное природопользование. Оно обеспечивает нормальные условия жизнедеятельности человека, предотвращает возможные вредные воздействия на окружающую среду, разумно регулирует освоение природных ресурсов. В рамках рационального природопользования принцип комплексности занимает главенствующее положение. Необходимость соблюдения данного принципа обусловлена прежде всего тем, что все ландшафты являются сложными территориальными пространственно-временными, открытыми системами и представляют собой части единой географической оболочки [1]. Целостность географической оболочки не может быть нарушена, любое воздействие на отдельно взятый компонент окружающей среды, в том числе атмосферный воздух и водные объекты, влечет за собой цепь изменений не только в окружающей среде, но и в жизнедеятельности населения. Поэтому важной задачей специалистов-гидрометеорологов является умение комплексно оценивать исследуемый объект.

Природоохранное законодательство играет важную роль в формировании профессиональных компетенций гидрометеорологов. Повышение эффективности природоохранных мероприятий приводит к развитию и совершенствованию методов борьбы с загрязнением, что является необходимым при воздействии на атмосферу и водные объекты [2]. Это обусловлено несколькими ключевыми факторами:

1. Нормативно-правовая база определяет сферу деятельности гидрометеорологов:

– Регулирование в области гидрометеорологии и смежных областях.

– Государственный мониторинг радиационной обстановки.

– Экологический надзор.

2. Профессиональные компетенции гидрометеорологов должны включать знание:

– Нормативов допустимого воздействия на атмосферный воздух и водные объекты.

– Правил ведения наблюдений за состоянием атмосферного воздуха и водных объектов.

– Требований к качеству атмосферного воздуха и водных объектов.

3. Практическое применение законодательства в работе:

– Обеспечение экологической безопасности.

– Реализация конституционного права граждан на благоприятную окружающую среду.

– Ведение государственного экологического мониторинга.

4. Экономические аспекты:

– Понимание системы платежей за воздействие на окружающую среду.

– Знание механизмов компенсации экологического ущерба.

– Участие в формировании инвестиционных рейтингов территорий.

5. Координационная деятельность:

– Взаимодействие с Федеральной службой по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды.

– Сотрудничество с другими профильными ведомствами.

– Участие в предотвращении стихийных бедствий и ликвидации их последствий.

Природоохранное законодательство является неотъемлемой частью профессиональной подготовки гидрометеорологов, формируя их компетенции в области экологического мониторинга, прогнозирования природных явлений и обеспечения экологической безопасности.

Список литературы

1. *Беручашвили Н. Л.* Геофизика ландшафтов. Москва: Высшая школа, 1990. 287 с.

2. *Вашестюк Ю. В.* Перспективные направления снижения техногенного влияния горного производства на подземную гидросферу // Подземная гидросфера : материалы Всерос. совещания по подземным водам Востока России (XXIV Совещание по подземным водам востока Сибири и Дальнего Востока с международным участием). Екатеринбург, 21–28 июня 2024 г. Екатеринбург, 2024. С. 481–486.

3. Об утверждении федерального государственного образовательного стандарта высшего образования – бакалавриат по направлению подготовки 05.03.04 Гидрометеорология : приказ М-ва науки и высш. образования РФ от 7 авг. 2020 г. № 892 (ред. от 27.02.2023). URL: https://base.garant.ru/74547951/ (дата обращения: 10.03.2025).

4. Профессиональный стандарт «Специалист в области инженерно-гидрометеорологических изысканий для градостроительной деятельности» : утв. приказом М-ва труда и соц. защиты РФ от 04 окт. 2022 № 614н, рег. № 1583. М., 2022. 22 с.

УДК 378.1

Организация работы кураторов студенческих групп на кафедре гидрологии и природопользования географического факультета ИГУ

О. А. Иванова (oksaliv@yandex.ru)[1], Л. А. Тихонова (larati2018@mail.ru)[1], С. А. Салатин (salatin.s@yandex.ru)[1,2]

[1]*Иркутский государственный университет, г. Иркутск*
[2]*Институт географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, г. Иркутск*

Аннотация. Представлено описание организационно-воспитательной, контролирующей и методической функции куратора в образовательном процессе учащихся (на примере работы кураторов студенческих групп географического факультета Иркутского государственного Университета сформулированы актуальные задачи в работе куратора в образовательном процессе (например, при адаптации студентов младших курсов к новому формату обучения, ликвидации академических задолженностей, решении различных организационных вопросов и пр.). Методологической основой исследования послужили анализ научных статей по соответствующей тематике и метод наблюдения. По мнению авторов, особая роль куратора заключается в эффективном взаимодействии со студентами, умении найти подход к студенческой группе и каждому студенту отдельно, а также в проявлении творческих качеств.

Ключевые слова: куратор, воспитательная работа, учебная работа, студенческая группа, образовательный процесс.

Кураторство является одной из форм учебно-воспитательной работы со студентами высшего профессионального образования. Работа куратора студенческой группы носит целенаправленный систематический характер [1]. В процессе руководства и сотрудничества между куратором и студентами возникает множество вопросов не только учебного, но и воспитательного характера. Кураторство является важной частью учебно-воспитательного процесса, поскольку куратор формирует посредничество между студентами и сложной структурой жизнедеятельности университета. Благодаря кураторству повышается уровень коммуникабельности, улучшается социально-психологический климат в коллективе, увеличивается показатель включённости и мотивации студентов к процессу обучения. Есть мнение, что куратор необходим только на ранних курсах с целью помощи в адаптации первокурсников к обучению, однако в связи с необходимостью усиления воспитательной работы со студентами роль куратора повышается, и круг его задач расширяется [5].

На географическом факультете ИГУ первая встреча студентов с кураторами и профессорско-преподавательским составом традиционно проходит на Дне знаний [3]. Этот день имеет для факультета особое значение, поэтому он всегда наполняется атмосферой торжественности. Важным моментом является вручение куратором студенческих билетов студентам, а также запечатление общей фотографии на память (рис.). Такой символичный жест, на наш взгляд, способствует формированию благоприятной атмосферы на факультете. Кураторами проводятся первые индивидуальные встречи со студенческими группами, в ходе

которых обсуждаются предстоящие планы на учебный год. Кураторы также отвечают на вопросы студентов и рассказывают о ресурсах и возможностях, доступных на факультете. Большое значение имеет методическая функция куратора, позволяющая решить задачи становления личности студента. Куратор помогает студентам в изучении личностных особенностей, собирая необходимые сведения, помогающие куратору в эффективной деятельности (например, приоритетные досуговые интересы учащегося с целью раскрыть его творческий потенциал) [2]. Таким образом, это прививает первичные нормы взаимоотношения кураторов со студентами.

Рис. Общая фотография студентов 1-го курса направления «Гидрометеорология» с куратором Тихоновой Л. А. на Дне знаний 02.09.2022 (авт. фото: Черемисин И. О.)

В ходе дальнейшего, более близкого знакомства учащихся со студенческой жизнью, проводится ежегодное мероприятие «Посвящение в специальности». Для ребят это возможность заявить о себе посредством видеовизитки и творческого номера, благодаря которым факультет может ближе познакомиться со студентами. Групповая работа повышает чувство причастности и вовлечённости, что производит большое эмоциональное впечатление. Особое задание получает куратор студенческой группы, задачей которого является «представление своей студенческой группы факультету в творческом формате». Нельзя не отметить, что данный формат очень необычный для кураторов студенческих групп высшего учебного заведения. Периодическое посещение куратором различных внеучебных мероприятий студентов желательно, чтобы пробудить в них интерес к творческой, спортивной или общественной деятельности. Кроме того, организация совместных поездок или экскурсий формирует тесные взаимоотношения

студентов с куратором, поскольку это даёт возможность узнать друг друга лучше. Таким образом, раскрывается организационно-воспитательная функция куратора, которая предполагает приобщение студентов к системе культурных ценностей факультета, активизацию творческого потенциала каждого студента и группы в целом [4].

Непосредственно в ходе учебной деятельности куратор выполняет контролирующую функцию, фиксируя посещаемость и успеваемость студентов. Чрезмерное участие студентов во внеучебной деятельности иногда мешает освоению образовательной программы и негативно влияет на успеваемость. Особенно это характерно для студентов 1 курса, поскольку в условиях недостаточной адаптации к новому для себя формату обучения студенты начинают уделять большее внимание внеучебным мероприятиям, тем самым, отвлекаясь от приоритетов. Это вызывает конфликт интересов, так как активное участие во внеучебной деятельности чаще всего идёт в разрез с требованиями образовательной программы. В данном случае роль куратора заключается в том, чтобы скорректировать участие студента во внеучебной деятельности посредством индивидуальной консультации или помощи в планировании деятельности учащегося с приоритетным учётом учебной нагрузки.

Студенты первого курса могут иметь слабое представление об особенностях освоения дисциплин по сравнению с общеобразовательной или программой среднего специального образования и, таким образом, нерационально распределить время для подготовки к занятиям. Первый год обучения, как правило, включает в себя освоение преимущественно общеобразовательных дисциплин («История России», «Общая химия», «Биология», «Иностранный язык», «Физическая культура и спорт» и пр.). Это нередко приводит к тому, что студенты теряют интерес к обучению, поскольку у них возникает вопрос о необходимости освоения ряда общеобразовательных дисциплин, которые на первый взгляд не имеют прямого отношения к выбранной специальности. Это особенно проявляется, если в процессе первой промежуточной аттестации студенты столкнулись с задолженностью. В этом случае куратору необходимо объяснить студентам о необходимости изучения общеобразовательных дисциплин на первом курсе, поскольку это обязательная часть освоения образовательной программы, позволяющаяся закрепить базовые навыки студента.

В условиях выездных учебных практик на базах факультета в п. Большие Коты и п. Аршан студенты адаптируются в условиях, где необходимо самостоятельно распределить обязанности: например, организовать быт на полевой базе, провести измерения или обработать данные. Куратор играет важную роль в подготовке студенческой группы к полевой практике, обеспечивая моральную поддержку посредством обсуждения возможных трудностей, связанных с пребыванием вдали от дома, длительными поездками или иными стрессовыми ситуациями. Несмотря на потенциальные трудности, студенты географического факультета ИГУ проходят учебные практики с большим интересом. Такой опыт дает возможность поработать в новых местах, иногда даже в других регионах страны.

Кроме того, полевая практика в большей степени не предполагает рутинной работы, что значительно повышает интерес студентов.

На старших курсах наблюдается умеренное снижение посещаемости занятий в связи со снижением уровня мотивации студентов к учебному процессу, например, из-за потребности в трудоустройстве или наличия академических задолженностей. Потребность в трудоустройстве возникает, как правило, из-за нехватки стипендиальных средств или их полного отсутствия. Студенты старших курсов сталкиваются со значительными трудностями при ликвидации большого количества академических задолженностей, поскольку параллельно им необходимо качественно освоить текущую программу, требующую от студентов значительной отдачи. С учётом повышенной сложности профильных дисциплин и поэтапном увеличении учебной нагрузки, студенты могут не справиться с такой задачей и оказаться под угрозой отчисления. Некоторые учащиеся отчисляются по собственному желанию. На примере группы гидрометеорологов 3 курса (6321-ДБ, 6322-ДБ), в основном, это студенты, поступившие на базе СПО. В последствии молодые люди призываются на военную службу, а девушки устраиваются на работу. Для сглаживания указанных последствий создается среда сотрудничества куратора и группы. Мотивация студентов усиливается, их достижения признаются, вовлеченность студента в учебно-воспитательный процесс становится видимым.

Освоение части образовательных дисциплин осуществляется студентами с затруднениями. Например, дисциплины, при изучении которых требуется освоение программного обеспечения, проведения сложных математических расчётов или изучения экологического нормативно-правового законодательства. Традиционно большую сложность вызывает изучение иностранного языка или написание курсовых работ, требующее от студента значительной самостоятельности. В этот момент роль куратора группы становится особенно значимой. Куратор должен провести беседу со студентом, выяснить причину возникновения проблемы и повлиять на обучающегося так, чтобы он стремился повысить успеваемость, осознавая значимость и необходимость получаемых знаний. Кроме того, куратору необходимо постоянно поддерживать связь со студентами, в том числе по вопросам ликвидации задолженностей.

В заключение стоит отметить важность реализации рассмотренных функций куратора, позволяющие эффективно реализовать данную деятельность. На наш взгляд, куратору очень важно подходить к делу с максимальной отдачей, порой проявляя и творческие качества. При этом необходимо принять во внимание то, что каждый студент уникален, ключ к его мотивации может быть спрятан в индивидуальном подходе, поддержке и внимании.

Список литературы

1. *Быстрова Н. В., Хижная А. В., Меркульев Е. И.* Роль куратора студенческой группы в современной системе высшего образования // Проблемы современного педагогического образования. 2020. № 66–2. С. 67–70.

2. В помощь куратору академической группы : метод. пособие / сост.: А. С. Родиков, Г. А. Петрова, Е. В. Лернер, Х. Н. Ниязова ; отв. ред.: И. М. Ибрагимов. Нижневартовск : Изд-во Нижневарт. гос. гуманитар. ун-та, 2009. 86 с.

3. День знаний 2024 // Географический факультет Иркутского государственного университета : сайт. URL: http://geogr.isu.ru/ru/students/event_24_25_/Getting-to-know-the-teaching-staff.html (дата обращения: 10.03.2024).

4. *Прусакова Л. В., Федоренко И. А.* Роль куратора в современных условиях среднего профессионального образования : метод. рекомендации для кураторов групп. Омск : Ом. колледж отрасл. технологий строительства и транспорта, 2019. 17 с.

5. *Саросек В. Г.* Работа куратора группы в процессе формирования коллектива обучающихся вуза // Актуальные проблемы медицины : материалы ежегод. итог. науч.-практ. конф. Гродно, 25 янв. 2019 г. С. 490–493.