

УЧРЕДИТЕЛЬ И ИЗДАТЕЛЬ – АЛТАЙСКОЕ КРАЕВОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ВСЕРОССИЙСКАЯ ОБЩЕСТВЕННАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ
"РУССКОЕ ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО"

**ИЗВЕСТИЯ АЛТАЙСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РУССКОГО ГЕОГРАФИЧЕСКОГО ОБЩЕСТВА**
(ИЗВЕСТИЯ АО РГО)

Журнал
Декабрь 2025
Основан в 1961 году

ISSN 2410-1192
№ 4 (79)
Выходит 4 раза в год

НАУЧНО-РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР – Пузанов А.В., д.б.н., проф., г. Барнаул

ЗАМЕСТИТЕЛИ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА:

Безматерных Д.М., д.б.н., доц., г. Барнаул Папина Т.С., д.х.н., доц., г. Барнаул

ЗАВЕДУЮЩИЙ РЕДАКЦИЕЙ – Архипова И.В., к.г.н., г. Барнаул

ЧЛЕНЫ СОВЕТА:

Андроханов В.А., д.б.н., г. Новосибирск
Богуславский А.Е., д.г.-м.н., г. Новосибирск
Веснина Л.В., д.б.н., проф., г. Барнаул
Винокуров Ю.И., д.г.н., проф., г. Барнаул
Гармаев Е.Ж., д.г.н., проф., акад. РАН, г. Улан-Удэ
Гусев А.И., д.г.-м.н., проф., г. Бийск
Гутак Я.М., д.г.-м.н., проф., г. Новокузнецк
Двинских С.А., д.г.н., проф., г. Пермь
Дунец А.Н., д.г.н., доц., г. Барнаул
Ельчиной О.А., д.с.-х.н., доц., г. Горно-Алтайск
Ермолаева Н.И., д.б.н., г. Новосибирск
Зиновьев А.Т., д.т.н., доц., г. Барнаул
Золотов Д.В., к.б.н., г. Барнаул
Инишева Л.И., д.с.-х.н., проф., чл.-корр., г. Томск
Комарова Л.А., д.б.н., проф., г. Бийск

Кочуров Б.И., д.г.н., проф., г. Москва
Куrolап С.А., д.г.н., проф., г. Воронеж
Мазуров М.П., д.г.-м.н., проф., г. Новосибирск
Платонова С.Г., к.г.-м.н., доц., г. Барнаул
Рудский В.В., д.г.н., проф., Московская обл.
Рыбкина И.Д., д.г.н., доц., г. Барнаул
Савичев О.Г., д.г.н., проф., г. Томск
Севастьянов В.В., д.г.н., проф., г. Томск
Сенников Н.В., д.г.-м.н., проф., г. Новосибирск
Сухова М.Г., д.г.н., доц., г. Горно-Алтайск
Сысо А.И., д.б.н., г. Новосибирск
Чернышов А.И., д.г.-м.н., проф., г. Томск
Чибилев А.А., д.г.н., проф., акад. РАН, г. Оренбург
Ядренкина Е.Н., д.б.н., г. Новосибирск
Яныгина Л.В., д.б.н., доц., г. Барнаул

Технический редактор – Вдовина О.Н., к.б.н.

Адрес издателя и редакции: 656038 Алтайский край, Барнаул, ул. Молодежная, 1, офис 526.
Тел: (385-2) 364091, (385-2) 666507, факс (385-2) 240396, bulletin@rgo-altay.ru,
<http://rgo-journal.ru>, <http://vk.com/rgojournal>, <http://t.me/rgojournal>
Регистрационный номер СМИ ПИ № ТУ22-00790 от 31.08.2021.

Подписной индекс в каталоге Роспечати 95004

© Известия Алтайского отделения Русского географического общества, 2025
г. Барнаул – 2025

FOUNDER AND PUBLISHER – ALTAY REGIONAL BRANCH
RUSSIAN GEOGRAPHICAL SOCIETY

**BULLETIN OF THE ALTAY BRANCH
OF THE RUSSIAN GEOGRAPHICAL SOCIETY**
(BULLETIN AB RGS)

[IZVESTIÂ ALTAJSKOGO OTDELENIÂ RUSSKOGO GEOGRAFIČESKOGO OBŠESTVA
(IZVESTIÂ AO RGO)]

Journal
December, 2025
Founded in 1961

ISSN 2410-1192
No 4 (79)
4 issues per year

EDITORIAL BOARD

EDITORS-IN-CHIEF– DrSc, Prof. Alexandr V. Puzanov (Barnaul, Russia)

DEPUTY CHIEF EDITORS:

DrSc, Assoc. Prof. Dmitry M. Bezmaternyh (Barnaul, Russia)

DrSc, Assoc. Prof. Tat'yana S. Papina (Barnaul, Russia)

MANAGING EDITOR – PhD Irina V. Arkhipova (Barnaul, Russia)

THE MEMBERS OF THE EDITORIAL BOARD

DrSc V.A. Androkhanov (Novosibirsk, Russia)

DrSc A.E. Boguslavsky (Novosibirsk, Russia)

DrSc, Prof. A.I. Chernyshov (Tomsk, Russia)

Acad. RAS, DrSc, Prof. A.A. Chibilyov (Orenburg, Russia)

DrSc, Assoc. Prof. A.N. Dunets (Barnaul, Russia)

DrSc, Prof. S.A. Dvinskikh (Perm, Russia)

DrSc, Assoc. Prof. O.A. Elchinina (Gorno-Altaysk, Russia)

DrSc N.I. Ermolaeva (Novosibirsk, Russia)

Acad. RAS, DrSc, Prof. E.Zh. Garmaev (Ulan-Ude, Russia)

DrSc, Prof. A.I. Gusev (Biysk, Russia)

DrSc, Prof. Ya.M. Gutak (Novokuznetsk, Russia)

C.M. RAS, DrSc, Prof. L.I. Inisheva (Tomsk, Russia)

DrSc, Prof. L.A. Komarova (Biysk, Russia)

DrSc, Prof. B.I. Kochurov (Moscow, Russia)

DrSc, Prof. M.P. Mazurov (Novosibirsk, Russia)

DrSc, Prof. S.A. Kurolap (Voronezh, Russia)

PhD, Assoc. Prof. S.G. Platonova (Barnaul, Russia)

DrSc, Prof. V.V. Rudsky (Moscow region, Russia)

DrSc, Assoc. Prof. I.D. Rybkina (Barnaul, Russia)

DrSc, Prof. O.G. Savichev (Tomsk, Russia)

DrSc, Prof. N.V. Sennikov (Novosibirsk, Russia)

DrSc, Prof. V.V. Sevastyanov (Tomsk, Russia)

DrSc, Assoc. Prof. M.G. Sukhova (Gorno-Altaysk, Russia)

DrSc A.I. Syso (Novosibirsk, Russia)

DrSc, Prof. L.V. Vesnina (Barnaul, Russia)

DrSc, Prof. Yu.I. Vinokurov (Barnaul, Russia)

DrSc E.N. Yadrenkina (Novosibirsk, Russia)

DrSc, Assoc. Prof. L.V. Yanygina (Barnaul, Russia)

DrSc, Assoc. Prof. A.T. Zinoviev (Barnaul, Russia)

PhD D.V. Zolotov (Barnaul, Russia)

Technical editor – PhD Olga N. Vdovina

Address for correspondence: 1, Molodezhnaya st., Barnaul, 656038, Altai region, Russia

Tel: +7(385-2) 364091, 666507, Fax: +7(385-2) 240396, bulletin@rgo-altay.ru,

<http://rgo-journal.ru>, <http://vk.com/rgojournal>, <http://t.me/rgojournal>

Certificate of mass media registration of Russian Federation III No TY22-00790 from 31.08.2021

Subscription index in «Rospechat» catalogue 95004

© Bulletin of the Altay branch of the Russian Geographical society, 2025

Barnaul – 2025

СОДЕРЖАНИЕ

НАУЧНЫЕ СООБЩЕНИЯ

РАЗДЕЛ 1. ГЕОЭКОЛОГИЯ

- Андреева И.В., Циликина С.В.* РЕКРЕАЦИОННОЕ ВОДОПОЛЬЗОВАНИЕ В РЕГИОНАХ ВЕРХНЕЙ ОБИ: СОСТОЯНИЕ, ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ..... 5
- Колотушкина Л.В., Эйрих С.С., Папина Т.С.* ВЫЯВЛЕНИЕ ИСТОЧНИКОВ ПОСТУПЛЕНИЯ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ С АТМОСФЕРНЫМИ ОСАДКАМИ НА ЮГЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ..... 17
- Николаева О.П., Савенко К.С., Ситникова В.А., Любимов Р.В.* ОЦЕНКА СОВРЕМЕННОГО РЕКРЕАЦИОННОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИРОДНОГО ПАРКА «БЕЛУХА»..... 33
- Орлова Е.С., Головин А.В., Губарев М.С., Резников В.Ф., Рыбкина И.Д.* ПРИРОДНЫЕ И АНТРОПОГЕННЫЕ ФАКТОРЫ РАЗВИТИЯ ПРОЦЕССОВ ПОДТОПЛЕНИЯ СЕЛЬСКИХ СЕЛИТЕБНЫХ ТЕРРИТОРИЙ АЛТАЙСКОГО КРАЯ..... 46

РАЗДЕЛ 2. ГИДРОЛОГИЯ СУШИ, ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ, ГИДРОХИМИЯ

- Кирста Ю.Б., Пузанов А.В., Трошкова И.А.* СИСТЕМНО-АНАЛИТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЕЖЕГОДНЫХ МАКСИМУМОВ ВЕСЕННИХ ПОЛОВОДИЙ НА ГОРНЫХ РЕКАХ..... 69
- Савичев О.Г., Домаренко В.А., Надеева А.М.* МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОТЛОЖЕНИЙ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ ГОРНОГО АЛТАЯ В УСЛОВИЯХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ..... 83

CONTENTS

SCIENTIFIC REPORTS

SECTION 1. GEOECOLOGY

- Andreeva I.V., Tsilikina S.V.* RECREATIONAL WATER USE IN THE UPPER OB REGION: STATUS, PROBLEMS, PROSPECTS..... 5
- Kolotushkina L.V., Eyrikh S.S., Papina T.S.* IDENTIFICATION OF SOURCES OF EMISSIONS OF POLLUTANTS WITH ATMOSPHERIC DEPOSITION IN THE SOUTH OF WESTERN SIBERIA..... 17
- Nikolaeva O.P., Savenko K.S., Sitnikova V.A., Lyubimov R.V.* ASSESSMENT OF THE CURRENT RECREATIONAL USE OF THE BELUKHA NATURE PARK..... 33
- Orlova E.S., Golovin A.V., Gubarev M.S., Reznikov V.F., Rybkina I.D.* NATURAL AND ANTHROPOGENIC FACTORS IN THE DEVELOPMENT OF FLOODING PROCESSES IN RURAL RESIDENTIAL AREAS OF THE ALTAI TERRITORY..... 46

SECTION 2. HYDROLOGY OF LAND, WATER RESOURCES, HYDROCHEMISTRY

- Kirsta Y.B., Puzanov A.V., Troshkova I.A.* SYSTEM-ANALYTICAL MODELING OF ANNUAL SPRING FLOOD MAXIMA IN MOUNTAIN RIVERS..... 69
- Savichev O.G., Domarenko V.A., Nadeeva A.M.* MINERALOGICAL-GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF SEDIMENTS OF SURFACE WATER BODIES OF THE ALTAI MOUNTAIN UNDER CLIMATE CHANGES..... 83

Раздел 1

ГЕОЭКОЛОГИЯ

Section 1

GEOECOLOGY

УДК 504.54.062.4

РЕКРЕАЦИОННОЕ ВОДОПОЛЬЗОВАНИЕ В РЕГИОНАХ ВЕРХНЕЙ ОБИ: СОСТОЯНИЕ, ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ

И.В. Андреева, С.В. Циликина

*Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул,**E-mail: direction-altai@yandex.ru, sv.cilikina@mail.ru*

Представлены результаты обобщающего анализа рекреационного водопользования и водопотребления объектами рекреации и гостеприимства в Алтайском крае, Кемеровской, Новосибирской и Томской областях, на озере Телецком в Республике Алтай в 2021–2025 гг. По отраслевым программным документам в области развития туризма регионов Верхней Оби выделены и проанализированы решения, касающиеся развития рекреационного водопользования и водозависимых рекреационных практик в регионах. На основе полученной аналитики установлен ряд системных проблем в отрасли. Для их устранения предложены генерализованные рекомендации в документы стратегического планирования в части использования и охраны рекреационно значимых водных объектов.

Ключевые слова: водная рекреация; рекреационное водопользование; рекреационное водопотребление; программное развитие; управление водопользованием.

DOI: 10.24412/2410-1192-2025-17901

Дата поступления: 6.11.2025. Принята к печати: 2.12.2025

Водопользование и прямое водопотребление – неотъемлемая часть туристских и рекреационных практик. Любые досуговые путешествия, даже не связанные с каноническим рекреационным водопользованием – использованием водных объектов для целей туризма, спорта и отдыха (ст. 50 Водного кодекса Российской Федерации), в той или иной мере задействуют инфраструктуру гостеприимства, транспорта, общественного питания, развлечений. Производственные циклы инфраструктуры опираются на ресурс технической и питьевой воды. Часто водопотребление таких объектов недооценено и не учитывается при анализе воздействия рекреации и ту-

ризма на окружающую среду и здоровье человека.

Вместе с тем современная туристская активность происходит в узкой полосе вдоль автомобильных дорог [Родоман, 2021], а сфера гостеприимства активно развивается и предлагает путешествующим все более благоустроенное размещение. При этом потребляется существенный объем вод, который возвращается в ландшафт отягощенным специфическими загрязнителями. Химическая и микробиологическая нагрузка рекреационных вод связана с бытовым водопотреблением и выделениями во время купания соединений азота, фосфора, хлора, бактериального смыва

с тела человека [Molina et al., 2014; Napier et al., 2018; Чекмарева, 2020].

Для анализа водопотребления рекреационными учреждениями в регионах юга Западной Сибири выполнена инвентаризация объектов гостеприимства. Подготовлен пакет теоретико-методических, нормативных, картографических, кадастровых источников, включающих региональные (зональные) методики оценки рекреационных ресурсов прибрежных территорий и расчетов водопотребления, государственные стандарты, нормы и правила Российской Федерации, общегеографические и отраслевые карты, документы социально-экономического планирования регионов. Разработаны теоретические и документальные основы изучения взаимного влияния рекреационно ориентированной экономики и водной компоненты экосистем рекреационно значимых территорий [Архипова и др., 2021; Андреева и др., 2024; Андреева, Циликаина, 2024].

Представленная статья продолжает серию тематических публикаций по территориальному анализу и теоретико-методическим разработкам. Она посвящена части исследования, предметом которой определены пространственные особенности планового развития рекреационного водопользования в регионах верхней Оби и их соотношение с текущей ситуацией в отрасли. В статье показаны ситуация в региональных водопользовании и водопотреблении, их особенности и пути оптимизации отрасли в макрорегионе.

Материалы и методы

Алгоритм исследования включил широкий спектр исследовательских действий

аналитического характера. Так, инвентаризированы воднорекреационные практики и объекты гостеприимства в регионах. Установлен характер их водопотребления, выполнены расчеты текущей рекреационной ёмкости, прямого водопотребления и объемов специфичных загрязнителей. Построены отраслевые карты, отражающие современное состояние отрасли, ее пространственные и технологические особенности.

По разновременным отраслевым программным документам в области развития туризма регионов Верхней Оби выделены и проанализированы сущностные и территориальные решения, касающиеся развития рекреационного водопользования и водозависимых рекреационных практик. Пакеты правительственных документов, сформированные по состоянию на 2020 и на 2025 г. [Архипова и др., 2021; Андреева и др., 2024; Андреева, Циликаина, 2024], позволили определить изменения приоритетных целей, видов туризма и рекреации, а также пространственного размещения отраслевых объектов и функционала в регионах. Результаты анализа также картографированы.

Методическим инструментарием для выполнения перечисленных задач послужил междисциплинарный подход, положения и комплекс методов статистики, геоэкологии и рекреационной географии. На принципах системного подхода построены теоретико-методические положения целевой оценки территорий и межрегионального анализа.

Последующие, в том числе прогнозные и рекомендательные этапы исследования выполнены экспертным методом. Так,

для подготовки предложений по рационализации использования водных ресурсов в рекреации и охране водных объектов в регионах Верхней Оби рассмотрены и проанализированы современные методы управления водным хозяйством. Среди них определены соответствующие специфике водопотребления в туризме и направленные на достижение наилучших результатов в отрасли.

Результаты и обсуждение

На основании инвентаризации, анализа и систематизации открытых данных составлена суммированная характеристика объектов гостеприимства регионах. Для определения количества рекреационных водопотребителей использованы адаптированные положения методики Текущей (рекреационной) емкости (ТЕ) [Arias, 1992; Ceballos-Lascurain, 1996]. На основании авторского подхода, составленного на положениях локальных частных методик оценки рекреационных ресурсов водных объектов и методик расчетов водопотребления при планировании систем водоснабжения в районах жилой застройки, государственных стандартов, норм и правил

[Архипова и др., 2021; Андреева и др., 2024; Андреева, Циликина, 2024], рассчитано годовое водопотребление объектов гостеприимства (табл. 1).

Анализ стратегических и программных документов по развитию регионов Верхней Оби: Алтайского края, Кемеровской, Новосибирской и Томской областей, Республики Алтай позволил выполнить картографирование территорий перспективного рекреационного развития в разрезе административных районов. Среди перспективных выделены районы с преимущественного развития водных видов рекреации. Они сопоставлены с действующими в регионах туристскими дестинациями (рис. 1).

По состоянию на 2018 и 2025 гг. установлено, что государственная политика в области развития туризма больше уточняет принятые решения по рекреационному водопользованию, чем предлагает новые. Так, например, в Алтайском крае произошла пространственная замена: Егорьевский район с его детской оздоровительной специализацией исключен из перспективных, а Заринский с экологической в национальном парке «Салаир» – включен.

Таблица 1

Характеристики и водопотребление объектов гостеприимства

Table1

Characteristics and water consumption by hotels

Регион	Количество объектов гостеприимства, ед.	Количество мест в объектах гостеприимства, ед.	Годовое количество потребителей, чел/сут.	Годовое водопотребление объектами гостеприимства, м ³
Алтайский край	283	19608	605169	95809
Кемеровская область	308	13043	396536	61908
Новосибирская область	119	10887	313426	44946
Томская область	171	7716	208119	31635
Республика Алтай (Телецкое озеро)	96	3866	130496	45674

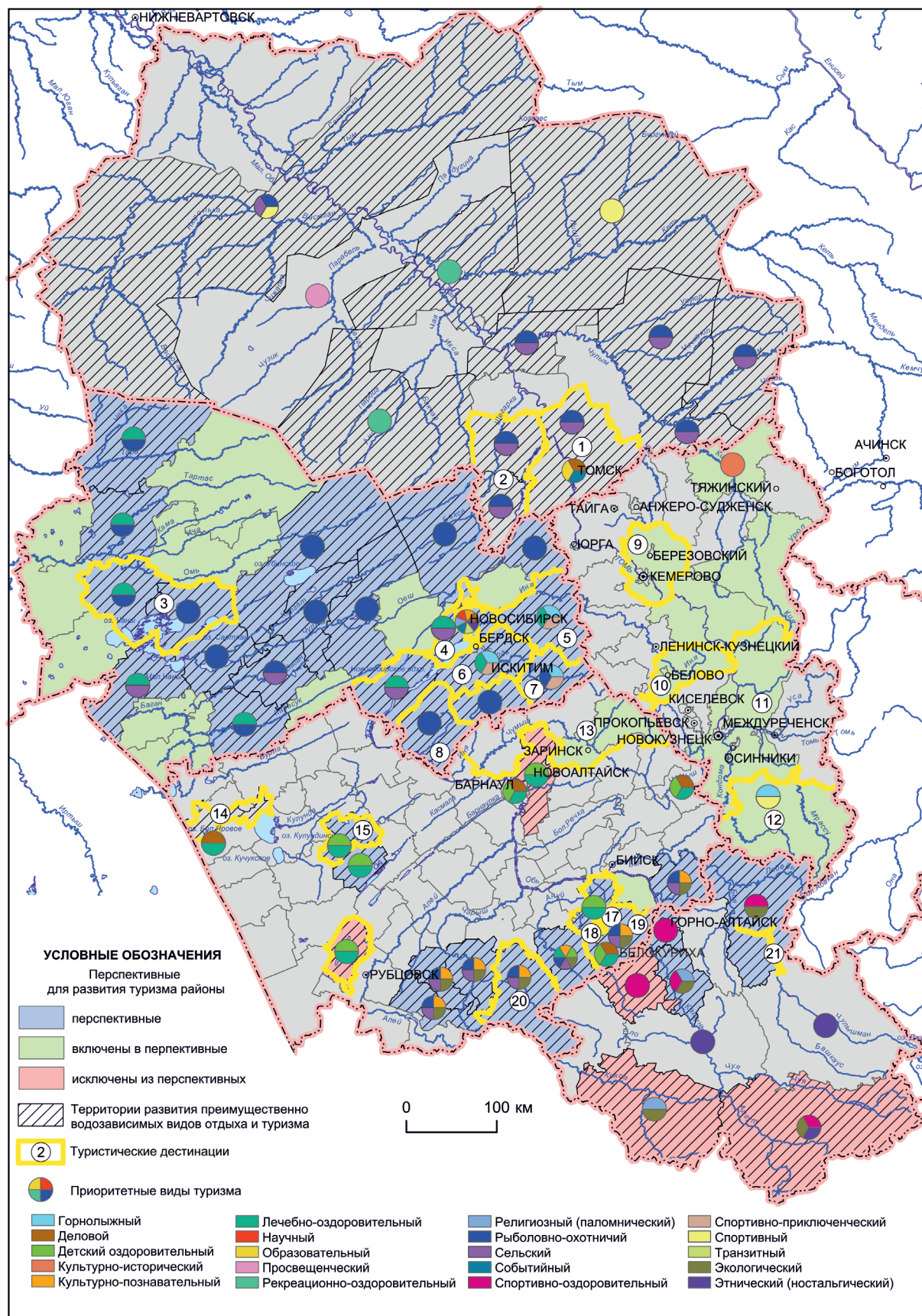


Рис. Рекреационное водопользование в регионах Верхней Оби
Fig. Recreational water use in the Upper Ob region

Такую замену нельзя считать обоснованной, поскольку в Егорьевском районе сформирована значимая водно-рекреационная дестинация и в самой государственной программе Егорьевский отнесен к наиболее посещаемым с целью туризма и рекреации муниципалитетам края.

Новосибирская область расширила территории перспективного развития водных видов рекреации до границ всего региона. Кемеровская область с нулевого уровня в 2018 году серьезно улучшила свои позиции, включив в программу развития водозависимых видов отдыха 7 муниципалитетов.

Вместе с тем, несмотря на декларируемый приоритет развития туризма как приоритетной отрасли экономики, утверждения о полноценности туристической отрасли в общей структуре региональной экономики, значительном потенциале для ускорения темпов роста и усиления роли в развитии экономики региона, в области водозависимых видов туризма (лечебно-оздоровительный, санаторно-курортный, водный, детский, сельский, экологический, культурно-познавательный), в Республике Алтай и Томской области принятые решения носят скорее деструктивный характер. Так, в Республике Алтай в половину уменьшилось число муниципалитетов (с 6 до 3), планомерно развивающих отдых у воды. Решение это вряд ли оправдано, поскольку рекреационный поток в исключенные районы не уменьшается (а, скорее растет, согласуясь с общими тенденциями), концентрируется вдоль русел рек (по автомобильным дорогам) и оседает на застроенных туристическими объектами участках побережья.

Томская область развивает, прежде всего, культурно-исторический и архивный

туризм. Несмотря на потребности собственного населения в рекреации у воды (это тоже общая черта внутреннего туризма в регионах), околотовные виды отдыха даже не упоминаются в документе.

На основе оценки актуальных региональных ситуаций и анализа программных планов развития туризма, региональных законодательств в области использования водных ресурсов и туризма установлен ряд системных проблем в регионах. Результаты приведены в форме SWOT-анализа (табл. 2) и обусловлены рядом обстоятельств:

- рекреационное водопользование в законодательствах регионов не имеет субъектности, формально интегрировано в лечебно-оздоровительный, санаторно-курортный, водный, детский, сельский, экологический, культурно-познавательный виды туризма как в определенной степени водозависимые, а также в гостиничный бизнес;
- законодательства регионов не уточняют (не детализируют) национальные требования к рекреационному водопользованию (нормативы водопотребления, нормы загрязнения, нормы рекреационной нагрузки);
- региональные государственные планы по инфраструктурному развитию околотовных пространств связаны преимущественно с городскими (урбанизированными) территориями;
- организационные принципы для управления рекреационным водопользованием в регионах не разработаны;
- экономические и технологические меры для рекреационного водопользования не дифференцированы из общей туристической отрасли, новации на местах носят частный добровольный характер.

Таблица 2

SWOT-анализ рекреационного водопользования в регионах Верхней Оби

Table 2

SWOT analysis of recreational water use in the Upper Ob region

Рекреационное водопользование в регионах Верхней Оби	Возможности (O):	Угрозы (T):
Сильные стороны (S): • вода – главный рекреационный ресурс; • повсеместность и многочисленность ресурса; • разнообразие ресурса; • близость ресурса к потребителю; • значительная инфраструктурная база в виде учреждений отдыха и гостеприимства	• высокий потребительский спрос; • поддержка региональными и федеральными властями; • высокая межрегиональная рекреационная мобильность	• снижение экологического качества прибрежных мест отдыха; • ухудшение экономической ситуации; • изменение уровня доходов населения; • смена ориентиров экономического развития и финансирования
Слабые стороны (W): • отсутствие сбалансированной функциональной и территориальной структуры рекреационного водопользования; • сезонность ресурса; • низкий уровень благоустройства и сервиса; • нерациональное использование водноресурсного потенциала	✓ продвижение рекреационного водопользования на законодательном уровне; ✓ привлечение финансирования через программы государственной поддержки и гранты; ✓ социальная и налоговая поддержка участников процесса рекреационного водопользования; ✓ информационное и экономическое продвижение отрасли; ✓ расширение географии отдыха в регионах; ✓ развитие межрегиональных программ; ✓ обустройство мест околотовного отдыха; ✓ модернизация учреждений отдыха	✓ развитие системы предложений разного уровня; ✓ развитие пакетов предложений «на местах»; ✓ развитие системы мониторинга качества рекреационных водных ресурсов и объектов, прибрежных мест отдыха
	✓ обеспечение всесезонности за счет привозных ресурсов и модернизации средств размещения; ✓ повышение эффективности использования водных ресурсов; ✓ повышение квалификации персонала	✓ повышение экологической и организационной культуры в рекреационном водопользовании регионов; ✓ повышение культуры отдыха через просветительские программы; ✓ развитие межрегиональной системы планирования, развития и управления в рекреационном водопользовании

Примечания: SO – как использовать сильные стороны для максимизации возможностей; WO – как минимизировать слабые стороны, используя возможности; ST – как использовать сильные стороны для минимизации угроз; WT – как минимизировать слабые стороны и избежать угроз

Для рационализации использования водных ресурсов в рекреации и охране водных объектов в регионах Верхней Оби рассмотрены и проанализированы современные методы управления водным хозяйством. К инновационным отнесены те из них, которые в соответствии со спецификой туристской отрасли позволяют достичь наилучших результатов: повысить уровень конкурентоспособности, оптимизировать потребление ресурса, уменьшить издержки (экономические, экологические, человеческие), повысить эффективность функционирования рекреационной системы и перевести ее на более прогрессивную ступень развития. В зависимости от предметности приложения, такие методы объединены в группы:

- законодательные – подразумевают нормирование (регулирование) отношений в водопользовании и туризме посредством продвижения законов и нормативно-правовых актов; в рекреационном водопользовании к ним относят договорное водопользование, режимное водопользование, нормированное водопользование (забор водных ресурсов, сброс сточных вод, допустимые воздействия на водные объекты, показатели качества воды);

- организационные – включают разработку и внедрение управленческих принципов в водопользовании и туризме с максимальным (или оптимальным) учетом географических, гидрографических, хозяйственных и социальных аспектов территории (зональность, бассейновость, координация разноуровневых решений, адресное финансирование, партнерское или договорное водопользование и др.);

- экономические – объединяют финансовые, налоговые, компенсационные (дифференциация ставок платы и налогов, льготное кредитование, система грантов и др.) меры по стимулированию рационального водопользования и социальной поддержке туризма;

- технологические – связаны с автоматизацией и экологизацией производственных и иных пользовательских процессов (централизация управления и автоматизация мониторинга через системы слежения за качеством вод и систем водоснабжения, ГИС); технологии в туризме связаны с внедрением интеллектуальных систем управления потреблением ресурсов на туристических объектах.

Эффективность методов оценивается наибольшим приближением значений целевых показателей к нормам допустимого воздействия на водные объекты и целевых показателей качества воды, долей водных объектов, находящихся в приоритетном водопользовании (рекреационном, природоохранном, питьевом и хозяйственно-бытовом). Учитывая предметные особенности групп методов, генерализованные рекомендации в документы стратегического планирования в части использования и охраны рекреационно значимых водных объектов регионов Верхней Оби дифференцированы на блоки, ориентированные на:

I. Комплексное развитие рекреационного водопользования в регионах:

1. Законодательное закрепление понятия «рекреационное водопользование» с разграничением опосредованного водопользования и прямого водопотребления в рекреационных и туристских целях и

для гостиничного сервиса (для ресурсных и планировочных оценок, оценок воздействий и последствий);

2. Разработка уточняющих (региональных) нормативов водопотребления и водоотведения объектами рекреации и туризма с учетом региональных специфик;

3. Обоснование и установление рациональной региональной специализации в рекреационном водопользовании (для регионального планирования и управления);

4. Согласование планов развития и территориальных структур рекреационного водопользования с актуальными и плановыми видами туризма и рекреации в регионах (для среднесрочного и долгосрочного регионального планирования и управления);

5. Выявление потенциальных конфликтов рекреационного водопользования, разработка и внедрение превентивных мер по их купированию;

6. Определение нормативов и пороговых значений допустимых или недопустимых природных, социальных или экономических изменений, связанных с развитием рекреационного водопользования в регионах;

7. Преодоление фактора жесткой сезонности за счет организации круглогодичного обслуживания и внедрения услуг по лечению и оздоровлению на основе привозных ресурсов и круглогодичных программ;

8. Разработка механизма территориального перераспределения рекреационных потоков;

9. Продвижение экологоориентированных форм отдыха.

II. Формирование основ для реализации инновационно-инвестиционной модели развития рекреационного водопользования в регионах:

1. Разработка и продвижение законодательных инициатив для создания и внедрения водно-рекреационных продуктов (специализированные зоны отдыха и маршруты, экскурсионные программы);

2. Продвижение и поддержка организационно-управленческих и технологических инноваций в рекреационном водопользовании;

3. Поддержка научной активности в области рекреационного водопользования;

4. Международный трансфер туристских технологий;

5. Поддержка инновационной активности в регионах;

6. Создание условий для экономической эффективности и конкурентоспособности водно-рекреационных услуг;

7. Разработка и внедрение мер по обеспечению качества рекреационной среды, сохранению водно-рекреационных ресурсов;

8. Разработка дифференциала платности водопользования в зависимости от вида водопользования, объёма и качества используемой воды, способа использования;

9. Дифференциация материального поощрения за водосберегающие и водоохраные мероприятия в соответствии с экономическим и экологическим эффектами от их проведения;

10. Дифференциация штрафных санкций за действия, связанные с нерациональным использованием водных ресурсов, их

загрязнением, нарушением водного законодательства;

11. Формирование профессионального резерва;

12. Организация контроля за соблюдением природоохранного законодательства и режима использования прибрежных территорий и акваторий;

13. Организация эффективного использования и управления прибрежными территориями;

14. Пропаганда максимального сохранения существующего ландшафта и водосбережения.

III. Формирование региональной территориальной структуры рекреационного водопользования:

1. Инвентаризация ресурсов и социальных условий, значимых для развития рекреационного водопользования;

2. Определение приоритетных территорий для развития рекреационного водопользования с учетом регионального спроса;

3. Определение точек роста водных видов рекреации и туризма для формирования водно-рекреационных кластеров;

4. Функциональное зонирование территорий и акваторий;

5. Разработка схемы территориального планирования и оценки воздействия на окружающую среду на выбранный вариант развития рекреационного водопользования на территории, разработка конкретных программ управленческих мероприятий;

6. Оценка экономической и экологической целесообразности осуществления варианта планируемого рекреационного освоения территории;

7. Создание условий модернизации и расширения базовых инфраструктур (сервисы, дороги, связь) для развития рекреационного водопользования.

Предложенные мероприятия предполагают систематизацию и оптимизацию организационной деятельности региональных правительств и экономических субъектов в области туризма и отдыха населения, но практическое их значение сводится к учету специфики местных водных ресурсов, уровня их освоенности и потребления при планировании и решении разнородных социально-экономических и экологических задач. Главная идея их заключается в делегировании инфраструктурным объектам (дороги, объекты размещения и сервиса) важнейшего регулирующего рекреационную нагрузку функционала.

Заключение

В общих случаях эффективность водопользования рассматривается как сочетание рациональности, экономической целесообразности и экологической безопасности при использовании воды. Эффективность рекреационного водопользования, чаще трактуемого как опосредованная деятельность относительно водных ресурсов, обычно оценивается рекреационной нагрузкой на побережье и акваторию. Полученные результаты позволили взглянуть на рекреационное водопользование через водопотребление рекреационных объектов и дестинаций – прямой забор воды из ландшафта и возвращение ее в ландшафт отягощенной специфическими загрязнителями после технологического цикла. Такой подход ближе к отраслевым ресурсным

оценкам, более детален и нагляден. Он расширяет возможности управления и повышения эффективности отрасли.

Повышение эффективности рекреации как отрасли и эффективность водопользования в ней, в частности, связаны с плановым развитием прибрежных территорий на основе нормирования рекреационной нагрузки посредством управления номерным фондом. Так, анализ программных документов в области развития туризма регионов Верхней Оби четко показал главный тренд территориального планирования: расширение региональных туристско-рекреационных пространств до границ регионов. Это означает как вовлечение большего числа водных объектов в процесс освоения, так и создание инфраструктуры, необходимой для дальних и длительных путешествий. Все это способствует повышению стихийности и бесконтрольности рекреационной нагрузки, росту ресурсопотребления и обратных воздействий на

окружающую среду в множатся и часто «теневых» объектах гостеприимства.

Полученные результаты и выводы служат нейтрализации возможных негативных последствий и позволяют формализовать рекреационное водопользование как специфичную сферу в экономике досуга, ситуационно распознаваемую и характеризующую количественно, а потому потенциально управляемую. Сформулированные предложения носят пионерный характер и связаны, прежде всего, с необходимостью концептуального обоснования и правового закрепления рекреационного водопользования в региональной отраслевой специализации. В настоящее время более детальная и регионально ориентированная дифференциация разработанных предложений невозможна из-за выровненной проблемности по всем предметным областям рекреационного водопользования: законодательной, организационной, экономической, технологической.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare that they have no conflict of interests.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИВЭП СО РАН.

Список литературы

Андреева И.В., Архипова И.В., Циликина С.В. Рекреационное водопотребление в туристских дестинациях Алтайского края и Новосибирской области: расчет и пространственный анализ // Гидрометеорология и экология. 2024. № 74. С. 120–134. doi: 10.33933/2713-3001-2024-74-120-134

Андреева И.В., Циликина С.В. Рекреационное водопотребление в туристских дестинациях Кемеровской и Томской областей // Известия Алтайского отделения Русского географического общества. 2024. № 4 (75). С. 5–19. doi: 10.24412/2410-1192-2024-17501

Архипова И.В., Андреева И.В., Циликина С.В. Оценка водопотребления и рекреационной нагрузки водозависимых рекреационных практик на Телецком озере // Известия Алтайского отделения Русского географического общества. 2021. №3 (62). С. 5–19. doi: 10.24412/2410-1192-2021-16201

Родоман Б.Б. «Поляризованный ландшафт»: полвека спустя // Известия РАН. Серия географическая. 2021. Т. 85, №3. С. 467–480.

Чекмарева Е.А. Геоэкологические исследования на водных объектах Центрального

федерального округа различной рекреационной доступности // «Четвертые Виноградовские чтения. Гидрология от познания к мировоззрению»: сборник докладов международной научной конференции (23–31 октября 2020 г., Россия). Санкт-Петербург: Изд-во ООО “Издательство ВВМ”, 2020. С. 1013–1018.

Arias M.C. Determinacion de capacitat de cargaturistica en areas protegidas. CATIE, Turrialba, 1992. 134 p.

Ceballos-Lascurain H. Tourism, ecotourism and protected areas. IUCN, 1996. 248 p.

Molina M., Hunter S., Cyterski M. et al. Factors affecting the presence of human-associated and fecal indicator real-time quantitative PCR genetic markers in urban-impacted recreational beaches // Water Res. 2014. Vol. 64. P. 196–208.

Napier M., Poole C., Stewar J. et al. Exposure to Human-Associated Chemical Markers of Fecal Contamination and Self-Reported Illness among Swimmers at Recreational Beaches // Environ. Sci. Technol. 2018. Vol. 52, no. 13. P. 7513–7523.

References

Andreeva I.V., Arhipova I.V., Cilikina S.V. Rekreativnoe vodopotreblenie v turistskix destinatsiyax Altajskogo kraja i Novosibirskoj oblasti: raschet i prostranstvennyj analiz [Recreational water use in tourist destinations of Altai Region and Novosibirsk Oblast: calculation and spatial analysis] // Gidrometeorologiya i ekologiya. 2024. No. 74. P. 120–134. (in Russian). doi: 10.33933/2713-3001-2024-74-120-134

Andreeva I.V., Cilikina S.V. Rekreativnoe vodopotreblenie v turistskix destinatsiyax Kemerovskoj i Tomskoj oblastej [Recreational water consumption in tourist destinations of Kemerovo and Tomsk regions] // Izvestiya Altajskogo otdeleniya Russkogo geograficheskogo obshchestva [Bulletin of the Altai Branch of the Russian Geographical Society]. 2024. No. 4 (75). P. 5–19. (in Russian). doi: 10.24412/2410-1192-2024-17501

Arhipova I.V., Andreeva I.V., Cilikina S.V. Ocenka vodopotrebleniya i rekreativnoj nagruzki vodozavisimykh rekreativnykh praktik na Teleczkom ozere [Assessment of water consumption and recreational load of water-dependent recreational practices on Lake Teletskoye] // Izvestiya Altajskogo otdeleniya Russkogo geograficheskogo obshchestva [Bulletin of the Altai Branch of the Russian Geographical Society]. 2021. No. 3. P. 5–19. (in Russian). doi: 10.24412/2410-1192-2021-16201

Rodoman B.B. «Polyarizovannyj landshaft»: polveka spustya [«Polarized Landscape»: Half a Century Later] // Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya. 2021. Vol. 85, no. 3. P. 467–480. (in Russian).

Chekmareva E.A. Geoekologicheskie issledovaniya na vodnykh ob'ektakh Central'nogo federal'nogo okruga razlichnoj rekreativnoj dostupnosti [Geoecological studies on water bodies of the Central Federal District of various recreational accessibility] // «Четвертые Виноградовские чтения. Гидрология от познания к мировоззрению»: сборник докладов международной научной конференции (23–31 окт. 2020 г.) [«The fourth Vinogradov readings. Hydrology from cognition to worldview»: collection of reports of the international scientific conference (Oct. 23–31, 2020)]. Izd-vo ООО Izdatel'stvo VVM (Sankt-Peterburg), 2020. P. 1013–1018. (in Russian).

Arias M.C. Determinacion de capacitat de cargaturistica en areas protegidas. CATIE, Turrialba, 1992. 134 p.

Ceballos-Lascurain H. Tourism, ecotourism and protected areas. IUCN, 1996. 248 p.

Molina M., Hunter S., Cyterski M. et al. Factors affecting the presence of human-associated and fecal indicator real-time quantitative PCR genetic markers in urban-impacted recreational beaches // Water Res. 2014. Vol. 64. P. 196–208.

Napier M., Poole C., Stewar J. et al. Exposure to Human-Associated Chemical Markers of Fecal Contamination and Self-Reported Illness among Swimmers at Recreational Beaches // Environ. Sci. Technol. 2018. Vol. 52, no. 13. P. 7513–7523.

RECREATIONAL WATER USE IN THE UPPER OB REGION: STATUS, PROBLEMS, PROSPECTS

I.V. Andreeva, S.V. Tsilikina

Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul,

E-mail: direction-altai@yandex.ru, sv.cilikina@mail.ru

The results of a generalized analysis of recreational water use and water consumption by recreational and hospitality facilities in the Altai Territory, Kemerovo, Novosibirsk and Tomsk regions, on Lake Teletskoye in the Altai Republic in 2021–2025 are presented. According to industry policy documents in the field of tourism development in the Upper Ob regions, solutions related to the development of recreational water use and water-dependent recreational practices in the regions are identified and analyzed. Based on the analysis obtained, a number of systemic problems in the industry have been identified. To eliminate them, generalized recommendations are proposed in strategic planning documents regarding the use and protection of recreationally significant water bodies.

Keywords: water recreation; recreational water use; recreational water consumption; programmatic development; water use management.

Received November 6, 2025. Accepted: December 2, 2025

Сведения об авторах

Андреева Ирина Владимировна – кандидат географических наук, старший научный сотрудник Института водных и экологических проблем СО РАН. Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, д. 1. ORCID: 0000-0003-4010-0826. E-mail: direction-altai@yandex.ru.

Циликина Светлана Владимировна – технолог Института водных и экологических проблем СО РАН. Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, д. 1. E-mail: sv.cilikina@mail.ru.

Information about the authors

Andreeva Irina Vladimirovna – PhD in Geography, senior researcher of the Institute of Water and Environmental Problems SB RAS. 1, Molodezhnaya St., 656038 Barnaul, Russia. ORCID: 0000-0003-4010-0826. E-mail: direction-altai@yandex.ru.

Tsilikina Svetlana Vladimirovna – Technologist of the Institute of Water and Environmental Problems SB RAS. 1, Molodezhnaya St., 656038 Barnaul, Russia. E-mail: sv.cilikina@mail.ru.

УДК 551.588.74:551.577

ВЫЯВЛЕНИЕ ИСТОЧНИКОВ ПОСТУПЛЕНИЯ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ С АТМОСФЕРНЫМИ ОСАДКАМИ НА ЮГЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Л.В. Колотушкина, С.С. Эйрих, Т.С. Папина

*Институт водных и экологических проблем СО РАН, г. Барнаул**E-mail: kolotushkina_l@iwep.ru, stella@iwep.ru, tanya.papina@mail.ru*

Работа посвящена изучению поступления загрязняющих веществ в составе атмосферных выпадений на подстилающую поверхность водосбора Верхней Оби (на примере водосборного участка в пределах г. Барнаула). Мониторинг состава атмосферных осадков (снег, дождь) остается одним из наиболее эффективных методов оценки загрязнения окружающей среды в пределах водосбора и прогноза качества поверхностных вод в период половодья. Для оценки объема поступления загрязняющих веществ из атмосферы на подстилающую поверхность в пробах осадков были определены почвенные (Al, Ca), природно-антропогенные (As, Fe, K, Mn, Na), преимущественно антропогенные (Cd, Si, Ni, Sn, Pb, Zn, V) элементы и ртуть (Hg), как глобальный загрязнитель. На основе рассчитанных средневзвешенных концентраций и потоков поллютантов с атмосферными выпадениями предложен способ, позволивший выявить основные источники поступления загрязняющих веществ на изучаемую территорию с использованием обратных траекторий движения воздушных масс (HYSPLIT).

Ключевые слова: загрязнение атмосферы; атмосферные осадки; источники загрязняющих веществ; HYSPLIT; юг Западной Сибири.

*DOI:10.24412/2410-1192-2025-17902**Дата поступления: 6.11.2025. Принята к печати: 5.12.2025*

Качество атмосферного воздуха формируется под влиянием антропогенных (промышленность, энергетика, транспорт, сжигание отходов, сельское хозяйство) и природных (вулканы, природные пожары, пыльные бури, морские аэрозоли, выветривание и дегазация земной коры) источников эмиссии загрязняющих веществ. Большинство тяжелых металлов имеют природно-антропогенное происхождение, при этом природные источники создают глобальный фоновый уровень, а антропогенная деятельность вносит основной вклад в их поступление в атмосферу, особенно в промышленных регионах. Дальность распространения и уровни загрязнения атмосферы зависят от мощности источника, условий выбросов и метеорологических параметров, а также физико-географического расположения [Селегей, 2005]. Поступающие в атмосферу загрязняющие вещества, сорбированные на крупных частицах, преимущественно выпадают вблизи источников их эмиссии, в то время как микрочастицы аэрозолей, обладающие повышенной сорбционной емкостью, могут переносить поллютанты на значительные расстояния, главным образом за счет об-

щей циркуляции атмосферы, и осаждаться из нее на поверхность земли путем сухого или влажного осаждения [Таловская, 2022; Li et al., 2023]. Основными источниками эмиссии тяжелых металлов в атмосферу являются выбросы металлургического производства: цветной – Cu, Zn, Ni, Cr, Cd, Sb, Pb и черной металлургии – Fe, Mn, Cr, V; сжигание ископаемого топлива, прежде всего угля – Hg, As, Pb, Se, Cd, Ge; сжигание и переработка нефтепродуктов – Ni, V; транспорт и истирание дорожного полотна – Pb, Zn, Sb, Cu, Cd; сельское хозяйство – Cd, Cu, Zn, Hg и др.; сжигание отходов – широкий спектр металлов. Таким образом, тяжелые металлы поступают в атмосферу от разных источников, доля которых сильно варьируется, но для некоторых, например, меди > 80% поступает при ее производстве [Eichler et al., 2025]. Тяжелые металлы могут оказывать значительное вредное воздействие на здоровье человека или окружающую среду. В целях их ограничения был ратифицирован Протокол по тяжелым металлам к Конвенции о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния [Protocol..., 2024], направленный на три особенно токсичных металла: кадмий, свинец и ртуть. Известно, что некоторые металлы, такие как Na, K, Mg, Ca, Cu, Cr, Co, Fe, Mn, Mo, Zn являются жизненно необходимыми для нормального функционирования живых организмов [Jomova et al., 2022], но их повышенные уровни тоже вредны и требуют контроля. В РФ концентрации металлов в атмосферном воздухе, перечень которых включает алюминий, железо, кадмий, кобальт, магний, марганец, медь, никель,

свинец, хром и цинк, измеряются в 132 городах России. Наблюдения за фоновым загрязнением атмосферного воздуха тяжелыми металлами проводятся на трех станциях фонового мониторинга (СКФМ) в Центральных районах Европейской части России (ЕЧР) [Обзор состояния..., 2025]. Высокоинформативным индикатором загрязнения атмосферы являются атмосферные осадки [Dong et al., 2015; Li et al., 2023]. Для идентификации источников загрязнения тяжелыми металлами по их содержанию в атмосферных осадках широко используется обратный траекторный анализ на базе модели HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model) [Vach et al., 2009; Виноградова, 2014]. Данная модель разработана Лабораторией воздушных ресурсов ARL (The Air Resources Laboratory) Национального управления океанических и атмосферных исследований NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, США) и находится в частично открытом доступе в интернете [Air..., 2024].

Актуальность регионального изучения подтверждается тем, что по данным Алтайского ЦГМС уровень загрязнения атмосферного воздуха города Барнаула в 2019–2023 гг. оценивался как высокий [Государственный доклад..., 2024]. Предприятия и транспорт в Алтайском крае за 2023 год выбросили в атмосферу порядка 458.6 тысяч тонн загрязняющих веществ, которые впоследствии выпадали на поверхность водосбора в составе атмосферных осадков. При этом на предприятия приходилось 42% от этого объема, на транспорт – 58%.

Материалы и методы

Исследование поступления загрязняющих веществ с влажными атмосферными выпадениями проводилось в г. Барнауле на мониторинговой экспериментальной площадке Института водных и экологических проблем СО РАН (ИВЭП СО РАН) (рис. 1).

Умеренный континентальный климат изучаемой территории определяется географическим положением города на юго-востоке Западной Сибири. Открытость территории города, его расположенность на равнинной части Приобского плато и частая смена воздушных масс, поступающих из Атлантики, Арктики, Восточной Сибири и Средней Азии способствуют контрастности погодных условий [Доклад..., 2024]. Территория Алтайского края открыта с северной (Северного Ледовитого океана) и южной (азиатских пустынь) сторон. Западнее находятся Уральские горы, восточнее – Среднесибирское плоскогорье,

на юго-востоке – горы Алтай. Такое географическое расположение обуславливает существование преимущественно меридиональной циркуляции (зональная практически отсутствует). Таким образом, на территорию Алтайского края воздушные массы поступают с атмосферным переносом с запада (с Атлантики, много влаги), юга, юго-запада и юго-востока (с территории Средней и Центральной Азии, низкая влажность, континентальный воздух), с севера (с Арктики, относительно высокая влажность) [Селегей, 2005].

Отбор проб атмосферных осадков (АО) проводился после каждого единичного их выпадения на мониторинговой площадке, расположенной на крыше ИВЭП СО РАН на высоте 25 метров от поверхности земли, с 27.03.2023 г. по 24.03.2024 г. В зависимости от сезона пробы отбирали в виде дождя или снега с использованием соответствующих пробоотборников.

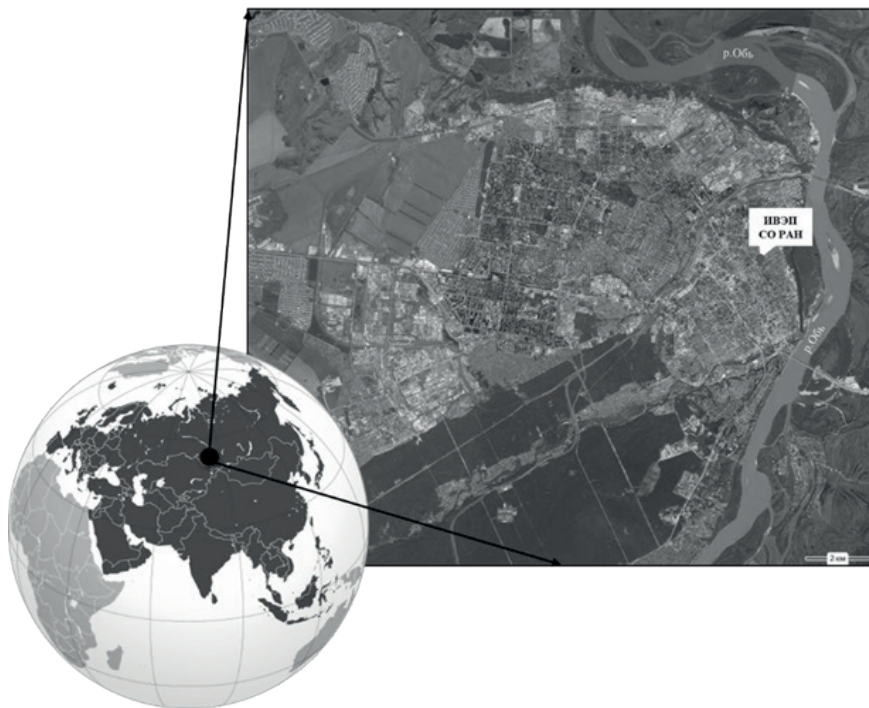


Рис. 1. Расположение мониторинговой точки отбора атмосферных осадков
Fig. 1. Location of the atmospheric precipitation monitoring point

Разделение на теплый и холодный периоды проводили по типу выпадающих осадков: холодный период – твердые осадки (снег), летний – жидкие (дождь) и по температурному режиму, где за начало холодного периода принимали устойчивый переход ниже 0°C, а теплого – выше 0°C.

Для выявления источников поступления загрязняющих веществ на территорию ключевых участков бассейна Оби был выбран следующий набор элементов: Al, Ca (почвенные); As, Fe, K, Mn, Na (природно-антропогенные); Cd, Cu, Ni, Sn, Pb, Zn, V (преимущественно антропогенные, в том числе от металлургических производств, сжигания угля, топлива и др.); Hg (как глобальный загрязнитель). Определение их содержания в пробах атмосферных осадков (АО) проводили с помощью методов ионной хроматографии (Dionex 3000), атомно-флуоресцентной спектроскопии (Mercur DUO Plus) и масс-спектропии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS Thermo Fisher Scientific, iCAP-Qc), используя следующие методики определения:

- 1) М 002-2016 – Ca,
- 2) РД 52.04.333-93 – K, Na,
- 3) US EPA 1631e – Hg,
- 4) ПНД Ф 14.1:2:4.139-98 – Fe, Mn,
- 5) ГОСТ Р 56219-2014 – Al, As, Cd, Cu, Ni, Pb, Sn, Zn, V.

Для оценки сезонного уровня загрязнения атмосферных осадков рассчитаны значения средневзвешенных концентраций (C_{vwc}) за соответствующий период, которые учитывают концентрацию элемента в каждой пробе и ее вклад в общее количество осадков, выпадающих за этот период на

подстилающую поверхность (формула 1):

$$C_{vwc} = \frac{\sum_{i=1}^n (C_i \times q_i)}{Q}, \quad (1)$$

где C_{vwc} – средневзвешенная концентрация ртути в АО, мкг/л; C_i – концентрация элемента в i -й пробе (мкг/л); q_i – количество АО в i -й пробе (мм в. э.); n – количество i -тых проб АО; Q – общее количество АО за сезон (мм в.э.).

Для расчета сезонных потоков элементов, выпадающих на подстилающую поверхность с атмосферными осадками, использовали формулу 2:

$$P = C_{vwc} \times Q, \quad (2)$$

где P – поток элемента за сезон (мкг/м²); C_{vwc} – средневзвешенная концентрация элемента в пробе (мкг/л); Q – количество АО за сезон (мм в.э.)

Результаты и обсуждение

За изученный период были определены концентрации макро- и микроэлементов в единичных пробах атмосферных осадков, рассчитаны их средневзвешенные концентрации и потоки поступления загрязняющих веществ с влажным осаждением за теплый и холодный сезоны года (табл.).

Средневзвешенные концентрации большинства почвенных и антропогенных элементов были ниже в 1.5–2.5 раза в теплый период по сравнению с холодным, еще больше была разница для Na и Sn – в 3 и 4.3 раза, соответственно; примерно на одинаковом уровне оставались концентрации ртути, калия и кальция. При этом максимальные концентрации элементов, напротив, в летний период были выше, чем в зимний в 1.4–3.6 раза (кроме Na, Hg, Pb и Sn).

Таблица

Сезонные средневзвешенные концентрации, диапазон варьирования, потоки макро- и микроэлементов во влажных атмосферных осадках г. Барнаула в 2023–2024 гг. и коэффициенты корреляции концентраций с количеством взвешенного вещества (ВВ)

Table

Seasonal volume weighted concentrations, variation range, and deposition fluxes of macro- and microelements in wet atmospheric precipitation in Barnaul in 2023–2024 and the correlation coefficients of concentrations with the amount of suspended matter

Показатель	Теплый период 2023 г. (27.03.23–26.10.23)		Холодный период 2023–2024 гг. (27.10.23–24.03.24)		Коэффициент корреляции C_i и ВВ _г	
	C_{vwc} / min-max мкг/л	P, мкг/ м ² /т.п.	C_{vwc} / min-max мкг/л	P, мкг/ м ² /х.п.	т.п.	х.п.
Al	137 / 0.35–2989	34017	293 / 75–1282	54379	0.87	0.76
As	0.38 / <0.01–8.34	95.0	0.58 / 0.05–4.2	108	0.55	0.64
Ca	3.1 / 0.94–25.8	776	3.6 / 1.1–16.5	675	0.76	0.88
Cd	0.028 / <0.01–2.11	7.0	0.052 / <0.01–0.58	9.6	0.58	0.45
Cu	1.89 / 0.24–40.3	468	3.54 / 0.87–15.4	657	0.81	0.51
Fe	253 / <40–5154	62547	495 / <40–2604	91693	0.83	0.84
Hg	0.014 / <0.001–0.046	3.44	0.012 / <0.001–0.097	2.3	0.47	н.д.
K	0.22 / 0.052–4.7	53.4	0.21 / 0.05–1.1	38.3	0.58	0.37
Mn	10.8 / <0.01–260	2669	15.9 / 3.0–93.5	2942	0.86	0.88
Na	0.23 / 0.04–4.7	57.9	0.71 / 0.09–6.3	132	0.44	0.46
Ni	0.90 / <0.01–20.6	224	1.29 / 0.05–9.0	240	0.72	0.83
Pb	1.81 / 0.08–27.9	447	4.9 / 1.3–67.5	918	0.88	0.29
Sn	0.066 / <0.06–1.2	16.3	0.28 / <0.06–11.8	52.4	н.д.	н.д.
Zn	13.3 / 0.43–315	3294	34.7 / 5.8–227	6427	0.79	0.41
V	0.50 / <0.01–20.7	123	1.18 / 0.23–7.78	219	0.81	0.75
n	56		41		–	–
Кол-во АО, мм в.э.	248		185		н.д.	н.д.
Кол-во ВВ в АО, мг/л	1952		707		–	–

Примечания: C_{vwc} – средневзвешенные концентрации; C_i – концентрация в *i*-ой (единичной) пробе; min-max – диапазон варьирования; P – поток элемента в течение холодного или теплого сезона года; ВВ_{*i*} – взвешенное вещество в *i*-ой (единичной) пробе; т.п. – теплый период; х.п. – холодный период; н.д. – достоверной корреляции не выявлено; – неприменимо

Максимальные концентрации металлов в осадках (например, события атмосферных выпадений 10.04.23, 10.05.23 и 8.06.23) прежде всего, связаны с интенсивным пылевым переносом, что подтверждается максимальными концентрациями взвешенного вещества в указанных пробах.

Общее количество взвешенного вещества, поступившего с АО в теплый период, было выше в 2.8 раза по сравнению с холодным, что закономерно связано с интенсивным выветриванием почв и пылевым переносом в летнее время. В целом, достоверная сильная положительная корреляция ($r > 0.7$) между

концентрациями металлов и количеством ВВ в пробах АО выявлена для таких элементов как Al, Ca, Fe, Mn, Ni, V как в холодный, так и в теплый периоды, тогда как для Cu, Pb, Zn – только в теплый период, для остальных элементов наблюдалась достоверная средняя положительная корреляция ($0.3 < r < 0.69$), что свидетельствует о том, что значительная часть металлов поступает из атмосферы с АО в составе пыли (теплый период), либо золы (холодный период). Для Hg достоверная средняя положительная корреляция ($r = 0.47$) ее концентрации с количеством ВВ наблюдалась только в теплый период, в холодный же достоверной корреляции не выявлено, что свидетельствует о значительной доле газообразной элементарной (GEM) и реактивной газообразной (RGM) ртути, поступающей вследствие сжигания угля в атмосферу и вымываемой из нее атмосферными осадками.

Следует отметить значительное увеличение концентраций кальция и натрия в холодный период в целом, а не только для единичных событий. Значительный рост может быть связан с использованием в зимний период песко-соляной смеси, а также материала для противогололедной обработки «Бионорд», в составе которого может содержаться: NaCl (45–89%), CaCl₂ (10–30%), KCl ($\leq 10\%$), карбамид (мочевина) ($\leq 10\%$), формиат Na ($\leq 15\%$), формиат K ($\leq 15\%$). Формиаты используются как ингибиторы коррозии, а карбамид в качестве биофильной добавки для улучшения почвы. В Барнауле «Бионорд» начал активно использоваться в холодный период 2023–2024 гг.: для обработки дорог и тротуаров было подготовлено более 50 тыс. т песко-соляной смеси и 170 т противоголо-

ледной смеси «Бионорд» [В преддверии..., 2023]. В составе атмосферных осадков холодного периода 2023–2024 гг. наблюдалось увеличение концентраций по сравнению с холодным периодом 2022–2023 гг.: Na – в 2 раза, Ca и K – в 1.7 раза. В отношении данных элементов локальные источники загрязнения атмосферы в зимний период могут быть определяющими.

В теплый период количество атмосферных осадков было выше в 1.3 раза по сравнению с холодным, тогда как сравнение сезонных потоков атмосферных выпадений изученных элементов показало, что в теплый период они выше только для Hg и K, на близком уровне – для As, Ca, Mn, Ni, а для остальных элементов (Al, Cd, Cu, Fe, Na, Pb, Sn, Zn, V) их потоки в холодный период выше в 1.4–3 раза, чем в теплый.

Сравнение средневзвешенных годовых концентраций тяжелых металлов (Cd, Cu, Pb, Hg) в атмосферных осадках г. Барнаула со средневзвешенными годовыми фоновыми концентрациями в АО на территории Алтайского биосферного заповедника (БЗ) по данным сети СКФМ [Обзор состояния..., 2025], показало, что концентрации Pb выше по сравнению с фоновой территорией в 3.4 раза, тогда как остальные концентрации, напротив, ниже: Cu – в 1.5, Cd – в 2.5, а Hg – в 8.3 раза. Сравнение годовых потоков продемонстрировало еще большие различия: влажные выпадения свинца на территории г. Барнаула составили 1.4 мг/м², на территории Алтайского БЗ – 1.0 мг/м²; выпадения Cu, Cd и Hg на территории Алтайского БЗ были существенно выше, чем в г. Барнауле – в 3.4, в 5.4 и в 19.2 раза, соответственно. Данные различия могут быть связаны с методикой отбора, пробоподго-

товкой и анализом проб и требуют межлабораторных сличительных испытаний.

На основании полученных результатов для более детального изучения и выявления региональных и трансграничных источников поступления загрязняющих веществ был предложен способ, выделяющий следующие случаи:

1. Высокие концентрации, большие потоки элементов;
2. Высокие концентрации, малые потоки элементов;
3. Низкие концентрации, большие потоки элементов;
4. Высокие концентрации и потоки отдельных загрязняющих веществ при средней или низкой концентрации остальных.

Все пробы были сгруппированы в соответствии с представленным способом и построены модели обратных траекторий движения воздушных масс HYSPLIT на даты этих атмосферных выпадений как в теплый, так и холодный периоды. Используя открытые интернет-ресурсы [Архив погоды..., 2024], для каждого случая выпадения осадков фиксировали необходимую метеоинформацию: начало и продолжительность выпадения АО, количество и вид выпавших осадков, температура, направление и сила ветра, высота нижней границы облачности. Генерацию обратных траекторий проводили непосредственно в интерактивном режиме на веб-сайте [READY..., 2024]. Момент окончания выпадения осадков и место отбора проб (г. Барнаул, экспериментальная площадка ИВЭП СО РАН) считали начальной точкой построения модели. Для построения выбирали обратное направление траектории и использовали метод вертикального движения на осно-

ве метеоданных. Каждая сгенерированная траектория охватывала временной интервал от 72 до 120 часов, с шагом по времени 6 ч. На основе анализа метеоданных для каждого случая атмосферных выпадений были выбраны соответствующие высоты облачности. Стандартный вид сгенерированных траекторий на рисунке представляет проекции траекторий в горизонтальной плоскости на географической карте с координатами (сверху), а также вертикальные проекции траекторий по высоте (снизу).

Анализ сгенерированных моделей обратных траекторий движения воздушных масс (ВМ), показал, что ВМ, внесшие существенный вклад в общее выпадение загрязняющих веществ на изучаемую территорию, брали начало с различных высот (от 1000 до 5000 м над землей) с последующим выпадением осадков в точке отбора большей частью на высотах 300, 600, 1000 и 2500 м. Было установлено, что ВМ преимущественно проходили над территорией Республики Казахстан, примеры таких траекторий приведены на рисунке 2: АО №240 (все три траектории) и АО №249 (траектория красного цвета). В ряде случаев ВМ поступали с территории Сибири: АО №232 (траектория зеленого цвета, большая часть красной и синей траекторий) и АО №249 (траектория зеленого цвета). В единичном случае ВМ поступали с территории Республики Монголии, Китайской Народной Республики и Республики Казахстан (АО №172, все три траектории), при этом состав атмосферных осадков отличался максимальными для теплого периода концентрациями практически всех микроэлементов, как природных, так и антропогенных. Количество ВВ в данной пробе также было максимальным.

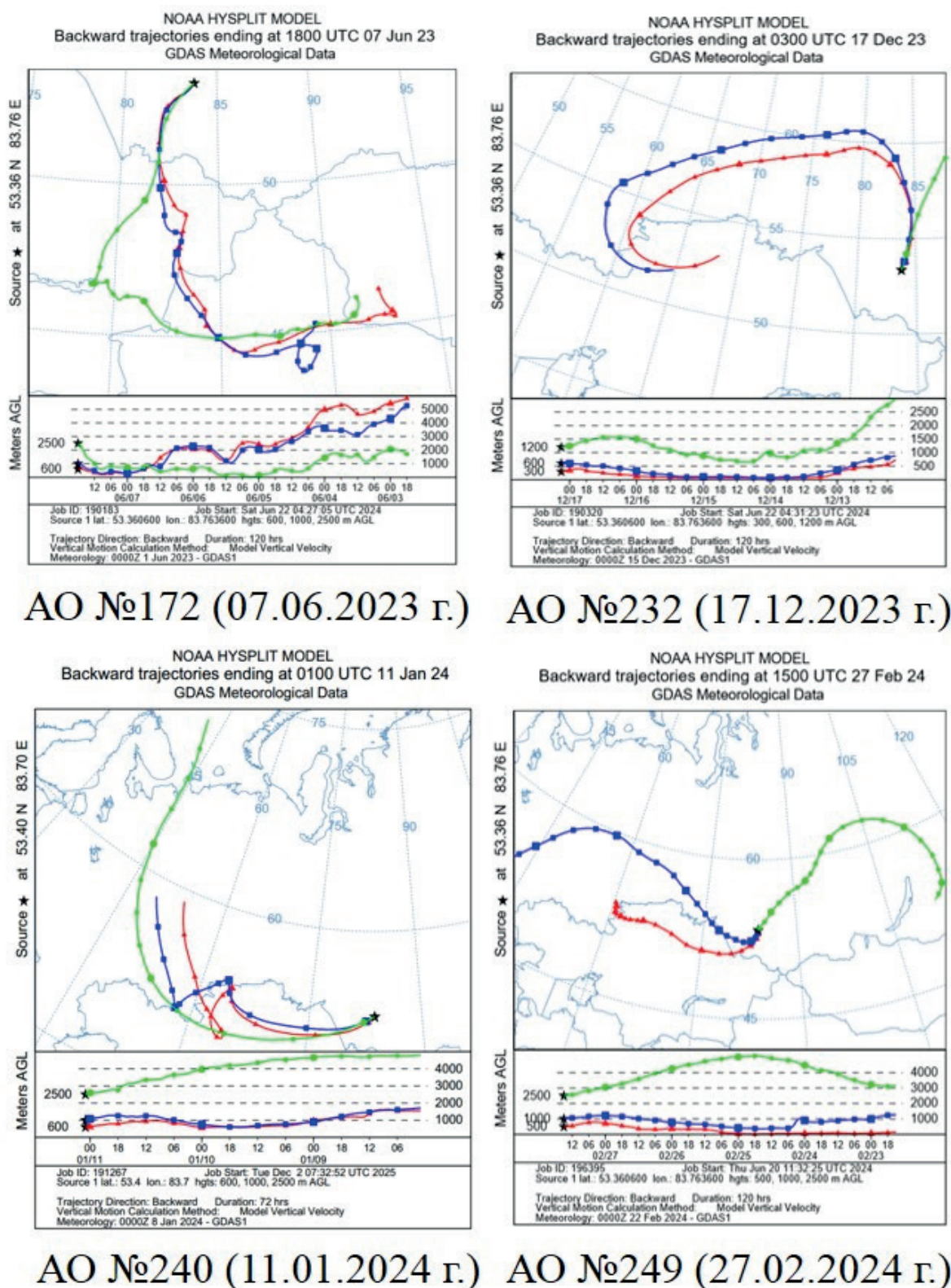


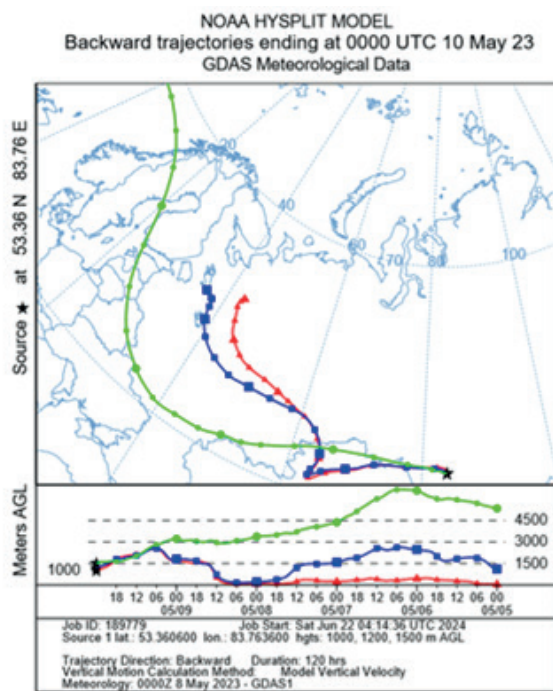
Рис. 2. Обратные траектории движения воздушных масс для АО с высокими концентрациями элементов, вносящих существенный вклад в поступление загрязняющих веществ

Fig. 2. Backward trajectories of air masses for atmospheric deposition with high concentrations of elements that make a significant contribution to the input of pollutants

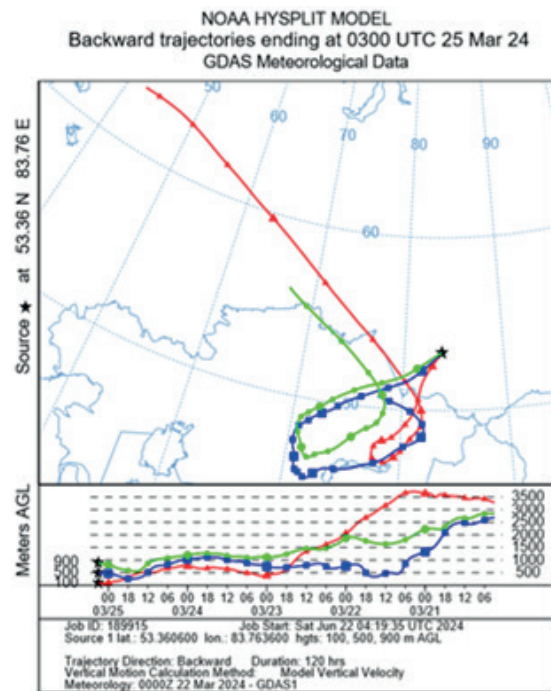
Для случаев высоких концентраций микроэлементов, но небольшого их потока вследствие малого количества выпавших атмосферных осадков возможные источники поступления загрязняющих веществ довольно разнообразны. Примеры обратных траекторий приведены на рисунке 3: промышленность Южного Урала (АО №167), горнорудные предприятия Республики Казахстан (АО №257). Высота облачности ВМ в момент выпадения осадка варьирует в пределах от 100 до 1000 м, что свидетельствует о возможном вкладе загрязнений на локально-региональном уровне.

В случае, когда большой поток загрязняющих веществ формируется за счет значительного количества осадков

(до 22.5 мм в.э.), низкие и средние концентрации микроэлементов в них обусловлены разбавлением. Траектории движения ВМ, представленные для данного случая (рис. 4), берут начало преимущественно с высот 1500–2000 м (Юг России, Поволжье, АО №211 – зеленая и синяя траектории; территории Центральной Азии, Республики Казахстан – АО №230, зеленая и красная траектории), с высот более 2000 м (юг Западной Сибири, АО №174), в редких случаях от 500 м (Юг России, АО №211 – красная траектория). Сгенерированные обратные траектории для данных случаев демонстрируют поступление элементов преимущественно с территорий Центральной Азии и юга Западной Сибири.



АО №167 (10.05.2023 г.)



АО №257 (25.03.2024 г.)

Рис. 3. Обратные траектории движения воздушных масс для АО с высокими концентрациями элементов, не вносящих существенного вклада в общее поступление загрязняющих веществ

Fig. 3. Backward trajectories of air masses for atmospheric deposition with high concentrations of elements that that do not contribute significantly to the total pollutant input

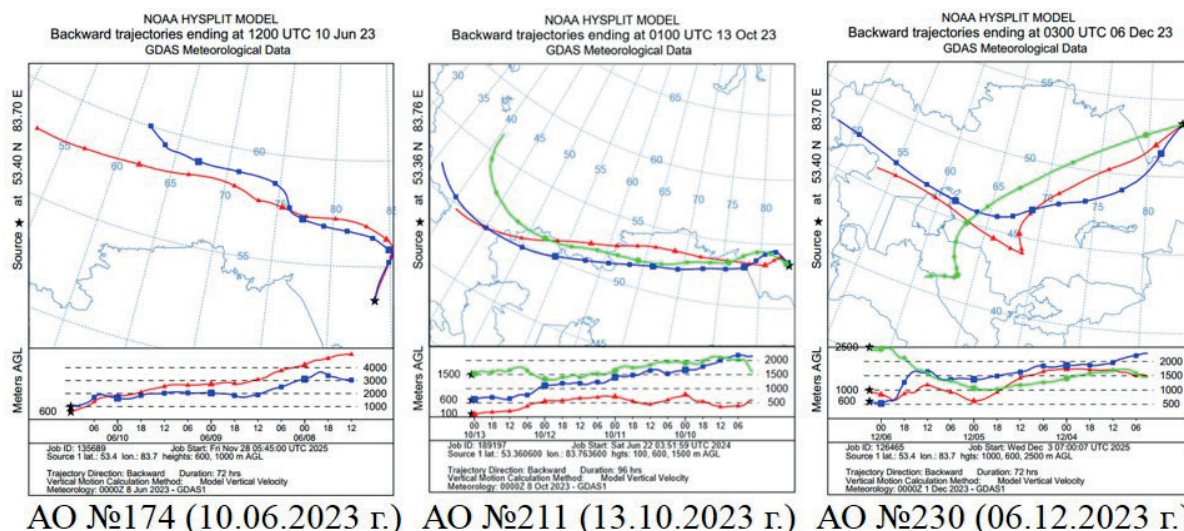


Рис. 4. Обратные траектории движения воздушных масс для АО с низкими и средними содержаниями элементов, вносящих существенный вклад в общее поступление загрязняющих веществ

Fig. 4. Backward air mass trajectories for atmospheric deposition with low and medium concentrations of elements that contribute significantly to the total pollutant input

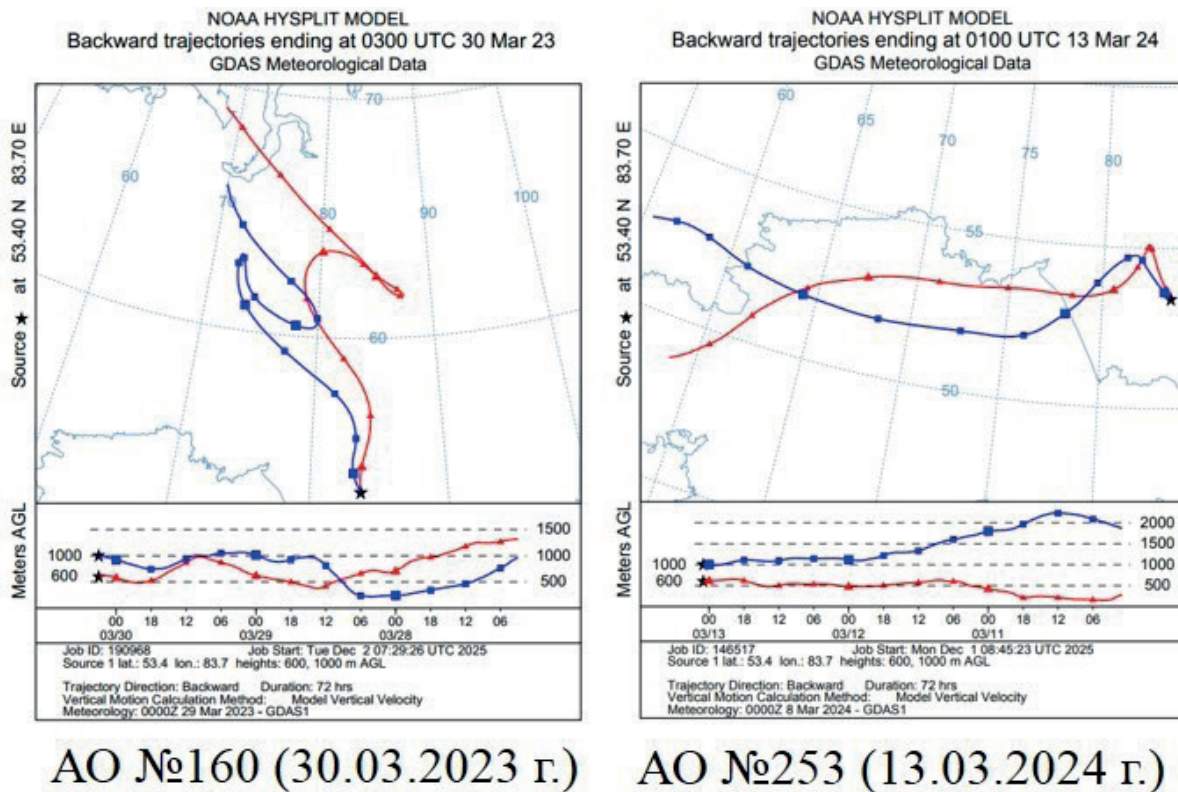
Отдельно были рассмотрены случаи, когда наблюдались высокие концентрации и потоки отдельных загрязняющих веществ (V, Hg) при средней или низкой концентрации остальных (рис. 5).

Поступление ванадия (V) (АО №160) возможно связано с его эмиссией от нефтедобывающих и перерабатывающих предприятий Западной Сибири. Воздушные массы, принесшие повышенное содержание ртути (Hg) с АО №253, проходили над северной и северо-западной территорией Республики Казахстан, где источником ртути могли быть ТЭЦ и добывающая промышленность (АО №253). Для представленных случаев, высоты облачности на момент выпадения осадков, находились на уровне 600–1000 м от земли. При движении ВМ не поднимались на высоту более 1500 м, тем самым сорбируя на себя загрязняющие вещества от предполагаемых источников эмиссии.

Заключение

Химический анализ единичных выпадений дождя или снега позволяет качественно и количественно оценить уровень

загрязнения и сезонную и годовую динамику поступления загрязняющих веществ на подстилающую поверхность водосбора на основе мониторинговых наблюдений. Обратные траектории движения воздушных масс, сгенерированные по программе HYSPLIT, позволяют оценить возможность переноса загрязняющих веществ на большие расстояния и идентифицировать вероятные источники загрязнения. Для наиболее характерных дат выпадения осадков в различные сезоны 2023–2024 гг., траекторный анализ продемонстрировал, что для юга Западной Сибири вклад дальнего трансграничного переноса поллютантов с территории Центральной Азии был значителен как для теплого, так и для холодного периода, а вклад их поступления с территории Западной Сибири выше в теплый. В холодный период важную роль играют региональные источники поступления загрязняющих веществ вследствие сжигания угля, а также локальные, связанные с активным использованием в зимний период противогололёдных средств.



АО №160 (30.03.2023 г.)

АО №253 (13.03.2024 г.)

Рис. 5. Обратные траектории движения воздушных для АО с высокими концентрациями V и Hg

Fig. 5. Backward air mass trajectories for atmospheric deposition with high V and Hg concentrations

В целом, в теплый период года концентрации загрязняющих веществ в атмосферных осадках ниже и формируются в основном региональными и локальными источниками природного и антропогенного происхождения (почвенная пыль, транспорт), хотя дальний трансграничный перенос с терри-

тории Центральной Азии также возможен. Максимальные концентрации металлов в осадках связаны, прежде всего, с интенсивным пылевым переносом (антропогенные пылеаэрозоли), что подтверждается корреляцией между концентрациями металлов и количеством взвешенного вещества в пробах.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interests

Работа выполнена в рамках государственного задания ИВЭП СО РАН РАН.

Авторы выражают благодарность сотрудникам ХАЦ ИВЭП СО РАН за участие в отборе и анализе проб атмосферных осадков и обсуждение результатов.

Список литературы

Архив погоды в г. Барнаул (аэропорт). [Электронный ресурс]. URL: [https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Барнауле_\(аэропорт\)](https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Барнауле_(аэропорт)) (дата обращения: 21.06.2024).

Виноградова А.А. Дистанционная оценка влияния загрязнения атмосферы на удаленные территории // Геофизические процессы и биосфера. 2014. Т. 13, № 4. С. 5–20.

В преддверии непогоды. 24 октября 2023 г. Вторник. № 158 (5831). Первая городская газета «Вечерний Барнаул». [Электронный ресурс]. URL: <https://barnaul.press/upload/>

iblock/dd4/bqkogchn52fd02zrx1utzhbqkyrj6zs5/158_A.pdf (дата обращения: 22.12.2024).

ГОСТ Р56219-2014. (ИСО 17294-2:2003). Вода. Определение содержания 62 элементов методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. Введен в действие Приказом Росстандарта № 1536-ст от 11.11.2014 г. ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ». 32 с.

Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды в Алтайском крае в 2023 году». Барнаул, 2024. 192 с.

Доклад «О состоянии и об охране окружающей среды городского округа - города Барнаула Алтайского края в 2023 году». Барнаул, 2024. 195 с.

М 002-2016. Методика измерений массовых концентраций ионов лития, натрия, аммония, калия, магния, кальция, стронция и бария в воде методом ионной хроматографии. М: ООО «Спектроника», 2016. 27 с.

Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2024 год / Ред. Г.М. Черногаева. М: Росгидромет, 2025. 222 с. URL: <https://www.meteorf.gov.ru/product/infomaterials/90/?year=2024&ID=90> (дата обращения: 10.10.2025).

ПНД Ф 14.1:2.4.139-98. Количественный химический анализ вод. Методика измерений массовых концентраций кобальта, никеля, меди, цинка, хрома, марганца, железа, серебра, кадмия и свинца в пробах питьевых, природных и сточных вод методом атомно-абсорбционной спектрометрии. Государственный комитет Российской Федерации по охране окружающей среды. М., 1998 г. (изд. 2010 года). 24 с.

РД 52.04.333-93. Методические указания. Хроматографический метод определения содержания хлоридов, нитратов, сульфатов, лития, натрия, аммония и калия в атмосферных осадках. / Федеральная служба России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. М., 1993. 21 с.

Селегей Т.С. Формирование уровня загрязнения атмосферного воздуха в городах Сибири. Наука. 2005. 347 с.

Таловская А.В. Экогеохимия атмосферных аэрозолей на урбанизированных территориях юга Сибири (по данным изучения состава нерастворимого осадка снегового покрова): Дис. ... докт. геол.-мин. наук. Томск. 2022. 373 с.

Air Resources Laboratory / HYSPLIT [Электронный ресурс]. URL: <https://www.arl.noaa.gov/hysplit/> (дата обращения: 22.06.2024).

Dong Z.W., Kang S.C., Qin X., Li X.F., Qin D.H., Ren J.W. New insights into trace elements deposition in the snow packs at remote alpine glaciers in the northern Tibetan plateau, China // Sci. Total Environ. 2015. Vol. 529. P. 101–113. doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.05.065

Eichler A., Nalivaika P., Kakareka S., Kukharchyk T., Jenk T. M. et al. Recent heavy metal pollution from the territory of the former Soviet Union (FSU): Ice core records and emission estimates // Science of The Total Environment. 2025. Vol. 983. P. 179632. doi: 10.1016/j.scitotenv.2025.179632

Jomova K., Makova M., Alomar S., Alwasel S., Nepovimova E. et al. Essential metals in health and disease // Chemico-biological interactions. 2022. Vol. 367. P. 110173. doi: 10.1016/j.cbi.2022.110173

Li D., Zheng J., Yang M., Meng Y., Yu X. et al. Atmospheric wet deposition of trace metal elements: Monitoring and modelling // *Sci. Total Environ.* 2023. Vol. 893. P. 164880. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.164880

Protocol on Heavy Metals // UNECE. [Электронный ресурс]. URL: <https://unece.org/environmental-policy/air/protocol-heavy-metals> (дата обращения: 25.09.2024).

READY NOAA HYSPLIT. URL: <https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php> (дата обращения: 22.06.2024).

US EPA Method 1631, Revision E. 2002. Mercury in Water by Oxidation, Purge and Trap, and Cold Vapor Atomic Fluorescence Spectrometry. In U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water, Office of Science and Technology, Engineering and Analysis Division (4303). Washington, D.C. 46 p.

Vach M., Skřivan P., Rohovec J. et al. Inorganic Pollutants in Wet Atmospheric Deposition and the Trajectories of Their Possible Transport // *Water Air Soil Poll.* 2009. V. 196, P. 369–383. doi: 10.1007/s11270-008-9784-y

References

Arhiv pogody v g. Barnaul (ajeroport) [Archive of weather in Barnaul (airport)]. URL: [https://rp5.ru/Arhiv_pogody_v_Barnaule_\(ajeroport\)](https://rp5.ru/Arhiv_pogody_v_Barnaule_(ajeroport)) (accessed: 21.06.2024).

Vinogradova A.A. Distancionnaja ocenka vlijaniya zagryaznenija atmosfery na udalennye territorii [Remote assessment of the impact of atmospheric pollution on remote territories] // *Geofizicheskie processy i biosfera* [Geophysical processes and biosphere]. 2014. Vol. 13, no. 4. P. 5–20. (in Russian).

V preddverii nepogody. 24 oktjabrja 2023 g. Vtornik. № 158 (5831). Pervaya gorodskaya gazeta «Vechernij Barnaul» [On the eve of bad weather. Tuesday, October 24, 2023. № 158 (5831). The first city newspaper «Evening Barnaul»]. URL: https://barnaul.press/upload/iblock/dd4/bqkogchn52fd02zrx1utzhbqkyrj6zs5/158_A.pdf (accessed: 22.12.2024).

GOST R56219-2014. (ISO 17294-2:2003). Voda. Opredelenie sodержaniya 62 jelementov metodom mass-spektrometrii s induktivno-svjazannoj plazmoj. Vveden v dejstvie Priказom Rosstandarta № 1536-st ot 11.11.2014 g. [Water. Determination of the content of 62 elements by inductively coupled plasma mass spectrometry. It was put into effect by Order of Rosstandart No. 1536-st dated 11.11.2014]. FGUP «STANDARTINFORM». 32 p. (in Russian).

Gosudarstvennyj doklad «O sostojanii i ob ohrane okruzhajushhej sredy v Altajskom krae v 2023 godu» [The State report «On the state and protection of the environment in the Altai Territory in 2023»]. Barnaul, 2024. 192 p. (in Russian).

Doklad «O sostojanii i ob ohrane okruzhajushhej sredy gorodskogo okruga – goroda Barnaula Altajskogo kraja v 2023 godu» [The report “On the state and environmental protection of the urban district of Barnaul, Altai Territory in 2023”]. Barnaul, 2024. 195 p. (in Russian).

M 002-2016. Metodika izmerenij massovyh koncentracij ionov litija, natrija, ammonija, kalija, magnija, kal’cija, stroncija i barija v vode metodom ionnoj hromatografii [The method

of measuring the mass concentrations of lithium, sodium, ammonium, potassium, magnesium, calcium, strontium and barium ions in water by ion chromatography]. Moscow: LLC «Spectronica», 2016. 27 p. (in Russian).

Obzor sostojanija i zagrijaznenija okruzhajushhej sredy v Rossijskoj Federacii za 2024 god [Review of the state and pollution of the environment in the Russian Federation for 2024] / Ed. G.M. Chernogaeva. M: Rosgidromet, 2025. 222 p. URL: <https://www.meteorf.gov.ru/product/infomaterials/90/?year=2024&ID=90> (accessed: 10.10.2025). (in Russian).

PND F 14.1:2:4.139-98. Kolichestvennyj himicheskij analiz vod. Metodika izmerenij massovyh koncentracij kobal'ta, nikelja, medi, cinka, hroma, marganca, zheleza, serebra, kadmija i svinca v probah pit'evykh, prirodnykh i stochnykh vod metodom atomno-absorbcionnoj spektrometrii. Gosudarstvennyj komitet Rossijskoj Federacii po ohrane okruzhajushhej sredy. M., 1998 god (izdanie 2010 goda) [Quantitative chemical analysis of waters. Method of measuring mass concentrations of cobalt, nickel, copper, zinc, chromium, manganese, iron, silver, cadmium and lead in samples of drinking, natural and waste waters by atomic absorption spectrometry. State Committee of the Russian Federation for Environmental Protection, Moscow, 1998 (ed. 2010)]. 24 p. (in Russian).

RD 52.04.333-93. Metodicheskie ukazaniya. Hromatograficheskij metod opredelenija sodержaniya hloridov, nitratov, sul'fatov, litija, natrija, ammonija i kalija v atmosferykh osadkah. Federal'naja sluzhba Rossii po gidrometologii i monitoringu okruzhajushhej sredy [Methodological guidelines. Chromatographic method for determining the content of chlorides, nitrates, sulfates, lithium, sodium, ammonium and potassium in atmospheric precipitation. Federal Service of Russia for Hydrometeorology and Environmental Monitoring]. Moscow, 1993. 21 p. (in Russian).

Selegej T.S. Formirovanie urovnja zagrijaznenija atmosfernogo vozduha v gorodakh Sibiri [Formation of the level of atmospheric air pollution in the cities of Siberia]. Nauka. 2005. 347 p. (in Russian).

Talovskaja A.V. Jekogeohimija atmosferykh ajerozolej na urbanizirovannykh territorijah juga Sibiri (po dannym izuchenija sostava nerastvorimogo osadka snegovogo pokrova) [Ecogeochemistry of atmospheric aerosols in urbanized areas of southern Siberia (based on the study of the composition of insoluble snow cover sediment)]: DSc (Dr. of Geol.-min.) thesis. Tomsk. 2022. 373 p. (in Russian).

Air Resources Laboratory. HYSPLIT. URL: <https://www.arl.noaa.gov/hysplit/> (accessed: 22.06.2024).

Dong Z.W., Kang S.C., Qin X., Li X.F., Qin D.H., Ren J.W. New insights into trace elements deposition in the snow packs at remote alpine glaciers in the northern Tibetan plateau, China // Sci. Total Environ. 2015. Vol. 529. P. 101–113. doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.05.065

Eichler A., Nalivaika P., Kakareka S., Kukharchyk T., Jenk T. M. et al. Recent heavy metal pollution from the territory of the former Soviet Union (FSU): Ice core records and emission estimates // Science of The Total Environment. 2025. Vol. 983. P. 179632. doi: 10.1016/j.scitotenv.2025.179632

Jomova K., Makova M., Alomar S., Alwasel S., Nepovimova E. et al. Essential metals in health and disease // *Chemico-biological interactions*. 2022. Vol. 367. P. 110173. doi: 10.1016/j.cbi.2022.110173

Protocol on Heavy Metals // UNECE. URL: <https://unece.org/environmental-policy/air/protocol-heavy-metals> (accessed: 09/25/2024)

Li D., Zheng J., Yang M., Meng Y., Yu X. et al. Atmospheric wet deposition of trace metal elements: Monitoring and modelling // *Sci. Total Environ.* 2023. Vol. 893. P. 164880. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.164880

READY NOAA HYSPLIT. URL: <https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php> (accessed: 22.06.2024).

US EPA Method 1631, Revision E. 2002. Mercury in Water by Oxidation, Purge and Trap, and Cold Vapor Atomic Fluorescence Spectrometry. In U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water, Office of Science and Technology, Engineering and Analysis Division (4303). Washington, D.C. 46 p.

Vach M., Skřivan P., Rohovec J. et al. Inorganic Pollutants in Wet Atmospheric Deposition and the Trajectories of Their Possible Transport // *Water Air Soil Poll.* 2009. V. 196, P. 369–383. doi: 10.1007/s11270-008-9784-y

IDENTIFICATION OF SOURCES OF EMISSIONS OF POLLUTANTS WITH ATMOSPHERIC DEPOSITION IN THE SOUTH OF WESTERN SIBERIA

L.V. Kolotushkina, S.S. Eyrikh, T.S. Papina

Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul,

E-mail: kolotushkina_l@iwep.ru, stella@iwep.ru, tanya.papina@mail.ru

This article focuses on the study of atmospheric pollutant input via wet precipitation to the south of Western Siberia (Barnaul as a case study). Monitoring the composition of precipitation (snow, rain) remains one of the most effective methods for assessing environmental pollution. To assess the level of atmospheric pollution, precipitation samples were analyzed for soil (Al, Ca), natural-anthropogenic (As, Fe, K, Mn, Na), predominantly anthropogenic elements (Cd, Cu, Ni, Sn, Pb, Zn, V), and mercury (Hg) as a global pollutant. Based on the calculated volume weighted concentrations and fluxes of pollutants via wet precipitation, a way for identifying the main sources of pollutant input to the study area using backward air mass trajectories (HYSPLIT) was proposed.

Keywords: atmospheric pollution; wet precipitation; sources of pollutants; HYSPLIT; south of Western Siberia.

Received November 6, 2025. Accepted: December 5, 2025

Сведения об авторах

Колотушкина Лилия Вячеславовна – младший научный сотрудник Химико-аналитического центра Института водных и экологических проблем СО РАН. Россия, 656038, г. Барнаул, пр. Молодежная, д. 1. ORCID: 0000-0003-2594-0659. E-mail: kolotushkina_l@iwep.ru.

Эйрих Стелла Сергеевна – кандидат химических наук, старший научный сотрудник Химико-аналитического центра Института водных и экологических проблем СО РАН. Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, д. 1. ORCID: 0000-0001-9346-2068. E-mail: stella@iwep.ru.

Папина Татьяна Савельевна – доктор химических наук, начальник Химико-аналитического центра Института водных и экологических проблем СО РАН. Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, д. 1. ORCID: 0000-0002-8388-7289. E-mail: tanya.papina@mail.ru.

Information about authors

Kolotushkina Liliya Vyacheslavovna – Junior researcher at the Chemical Analytical Center of the Institute for Water and Environmental Problems for Water and Environmental Problems SB RAS. 1, Molodezhnaya Str., 656038, Barnaul, Russia. ORCID: 0000-0003-2594-0659. E-mail: kolotushkina_l@iwep.ru.

Eyrikh Stella Sergeevna – PhD in Chemistry, senior researcher at the Chemical Analytical Center of the Institute for Water and Environmental Problems SB RAS. 1, Molodezhnaya St., 656038 Barnaul, Russia. ORCID: 0000-0001-9346-2068. E-mail: stella@iwep.ru.

Papina Tatyana Savelyevna – Dr Sc. in Chemistry, Head of the Chemical Analytical Center of the Institute for Water and Environmental Problems SB RAS. 1, Molodezhnaya St., 656038 Barnaul, Russia. ORCID: 0000-0002-8388-7289. E-mail: tanya.papina@mail.ru.

УДК: 502.45

ОЦЕНКА СОВРЕМЕННОГО РЕКРЕАЦИОННОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИРОДНОГО ПАРКА «БЕЛУХА»

О.П. Николаева^{1,2}, К.С. Савенко², В.А. Ситникова², Р.В. Любимов²

¹Горно-Алтайский государственный университет, Горно-Алтайск,

²Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул,

E-mail: nikool@mail.ru, kassiSav@yandex.ru, valya_90_well@mail.ru, geokol04@mail.ru

В статье рассмотрена комплексная оценка современного рекреационного использования природного парка «Белуха» как одной из ключевых особо охраняемых природных территорий (ООПТ) Республики Алтай. Для анализа происходящих изменений в природной среде под влиянием рекреационного воздействия были выбраны две тропы – Аккемская и Кучерлинская. На указанные маршруты приходится наибольшая сезонная туристская активность. На основе известных методик стадийной оценки для данных троп были установлены различные степени рекреационной дигрессии, варьирующие в основном от третьей до четвертой стадии.

Ключевые слова: стадии рекреационной дигрессии; рекреационные нагрузки; антропогенное воздействие; ООПТ; природный парк «Белуха»; Республика Алтай.

DOI: 10.24412/2410-1192-2025-17903

Дата поступления: 6.10.2025. Принята к печати: 2.12.2025

Природный парк «Белуха» занимает важное место в системе особо охраняемых природных территорий Республики Алтай. Территория парка пользуется большой популярностью среди туристов. В настоящее время здесь развиваются самые разные виды рекреации – от спортивного туризма и альпинизма до духовного паломничества. Альпинизм активно развивается на территории горного массива Белухи – ежегодно около 500 человек совершают восхождение с территории природного парка. Спортивный туризм представлен пешими походами по Катунскому хребту различной сложности (от I до V категории). Данным видом туризма занимаются спортивно-туристические клубы и секции, а также индивидуальные туристы без использования услуг туристических фирм, аренды лошадей, услуг местных проводников.

Массовый активный туризм – это наиболее развитое направление туризма в природном парке «Белуха». Преимущественно – это организованные туристскими компаниями группы и «дикие» туристы.

Для духовного паломничества основной точкой притяжения является гора Белуха. Эта гора издавна окутана легендами и мифами. Русские старообрядцы считали это место волшебной страной Беловодьем. Индусы и буддисты до сих пор называют Белуху Сумерой (или Мерой) – священной горой, являющейся центром всех материальных и духовных миров. Коренные жители считают Белуху (на алт. Кадын-Бажи) священной горой, на которой обитает божество Ульгень. Для последователей Н.К. Рериха район горы Белухи – вход в Шамбалу (мистическое место). Активное паломничество происходит и в долине Ярлу

(Долина эдельвейсов), где последователи Н.К. Рериха устроили каменный городок, во главе с особо почитаемым камнем. Именно поэтому сюда приезжают туристы, увлекающиеся эзотерикой, со всего мира.

Важно отметить отсутствие официальных договоренностей и какого-либо взаимодействия турфирм с бюджетным учреждением Республики Алтай «Дирекция особо охраняемых природных территорий Республики Алтай» (далее – БУ РА «Дирекция ООПТ РА»), выполняющим функции экологического контроля на особо охраняемых природных территориях регионального значения.

В целом, в настоящее время рекреационная деятельность является основным источником негативного влияния на природные ландшафты природного парка «Белуха». Увеличение потока туристов, недостаток инфраструктуры и отсутствие должного контроля за соблюдением экологических норм способствует эрозии почв, загрязнению экосистем, уничтожению растительного покрова, что в свою очередь угрожает биоразнообразию и устойчивости природной среды исследуемого парка [Николаева и др., 2025].

Материалы и методы

Для оценки текущей ситуации и более глубокого понимания влияния рекреационной деятельности на природные экосистемы парка авторы статьи провели анализ и описание наиболее популярных маршрутов – Аккемская и Кучерлинская тропы. Выбор данных троп в качестве реперных участков для анализа происходящих изменений в природной среде под влиянием рекреационного воздействия обусловлен основной туристской нагрузкой именно на этих маршрутах. Обе эти тропы ведут к главной природной достопримечательности при-

родного парка и Республики Алтай – горе Белуха. Вблизи этих маршрутов расположены радиальные пути, ведущие к природным объектам, преимущественно озерам и водопадам (рис. 1).

На маршрутах были охарактеризованы природные комплексы с учетом типа ландшафта, крутизны и экспозиции склонов, типа почвенного покрова. Кроме того, были изучены параметры, связанные с рекреационным воздействием на тропы: ширина и глубина тропы, уровень эрозии, наличие троп-дублёрсов, изменение растительности. Материал для исследований собран в ходе полевых экспедиций в 2023–2024 гг.

В качестве интегрального показателя влияния туристов использовались стадии рекреационной дигрессии троп, выделенные на основе методических подходов, описанных в работах В.П. Чижовой [2022], В.В. Непомнящего [2021], А.Н. Иванова [2023] и Т.В. Яшиной [2005] с соавторами (табл.). Для оценки текущего экологического состояния учитывалась ландшафтная структура троп по всей их протяженности.

Результаты и обсуждение

Среди видов рекреационной деятельности, осуществляемых на территории природного парка – конный туризм относится к наиболее «агрессивным». Копыта животных более интенсивно воздействуют на почвенно-растительный покров и разрушают его, а активизировавшиеся в последнее десятилетие различные турфирмы значительно увеличили число конных походов на территории ООПТ. В основном конные группы следуют по маршруту: с. Тюнгур – р. Кучерла – оз. Кучерлинское – пер. Кара-Тюрек – оз. Аккемское – водораздел Аккема и Аргута – Тукман – Ороктой – пер. Кузуюк – с. Тюнгур.

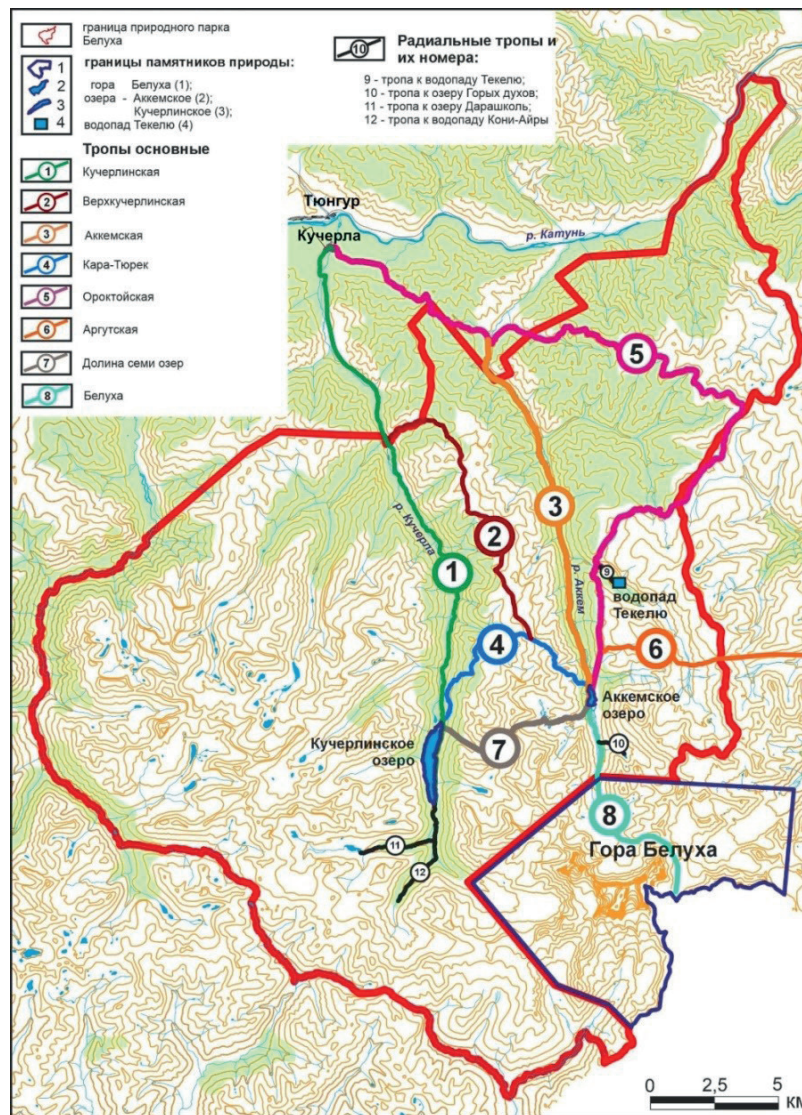


Рис. 1. Карта-схема расположения троп в районе природного парка «Белуха»
(сост. авторами статьи)

Fig. 1. A map showing the location of trails in the Belukha Nature Park area
(compiled by the authors of the article)

Для конного туризма свойственна такая проблема как недостаток кормовой базы для лошадей и ограничение территориальной емкости стоянок. Все стоянки расположены в пределах дневного перехода друг от друга, и в пик сезона наблюдается дефицит мест для стоянок конных групп. Так, например, в низовьях р. Ороктой на одной стоянке могут скапливаться до 6 конных групп – около 30 лошадей, на Аккемском озере – свыше 40 лошадей. Столь интенсивные единовременные нагрузки негативно сказываются на состоянии природных

комплексов, а также создают психологический дискомфорт для туристов.

На территории парка насчитывается пять стационарных туристских объектов (турбаз), что обусловлено действующими ограничениями на виды деятельности внутри парка. Наиболее крупная по площади турбаза «Кучерла» (2.3 га) находится на северо-западном берегу Кучерлинского озера (включает жилые коттеджи, баню с бассейном, ресторан). Другая турбаза «Вита» расположена возле моста через р. Кучерла, напротив питомника для разведения кабарги.

Таблица

Стадии дигрессии растительного покрова и состояния тропы
[Яшина, Шаравина, 2005; Чижова, Лукашева, 2022]

Table

Stages of vegetation degradation and trail conditions
[Yashina, Sharavina, 2005; Chizhova, Lukasheva, 2022]

Стадия дигрессии	Состояние тропы
0	Наиболее устойчивые участки тропы, которые в принципе не поддаются разрушению при проходе по ним туристов (курумники, скальные участки, деревянные лестницы и мосты)
1	Слегка вытопанные участки с небольшими углублениями полотна тропы по сравнению с остальной поверхностью, состав фитоценоза не изменён
2	Корни стоящих рядом деревьев местами обнажены, тропа чётко выражена (глубина её более 20 см), в некоторых местах сохранился травяной покров, восстановление фитоценозов сравнительно быстрое
3	Имеются дополнительные тропы-дублёры в обход различных препятствий (лужи, камни, деревья), в составе фитоценозов появляются сорные виды
4	Существенные нарушения полотна тропы, вдоль неё по обеим сторонам произрастают сорные виды и антропохоры, в различных местах проявляется эрозия почв; такие участки трудновосстановимы
5	Полная деградация растительного покрова, почвенный слой на тропе может полностью отсутствовать, для естественного восстановления почвенно-растительного покрова на тропе и прилегающих участках требуется продолжительное время (больше года)

Представляет собой огороженную территорию площадью 0.1 га с летними домиками.

Турбаза «Горный приют «Аккем» размещена на берегу р. Ак-Кем, в 1.5 км ниже одноименного озера на площади 0.5 га. Здесь расположены стационарные палатки, аил, здание администрации, баня, столовая, а также большой деревянный двухэтажный гостевой дом. Одновременно лагерь может принимать до 30 туристов.

На западном побережье Аккемского озера организован стационарный лагерь контрольно-спасательного отряда «Белуха». Его инфраструктура представлена сооружениями для временного проживания. В непосредственной близости расположена база ГУ МЧС России по Республике Алтай. Помимо этого, туристические услуги оказывает гидрометеорологическая станция «Аккем», расположенная на северо-западном берегу озера.

По ведомственным данным БУ РА «Дирекция ООПТ РА» парк ежегодно посещает порядка 3.5–5 тыс. человек, при этом

рекреационные ресурсы эксплуатируются бессистемно и без должного контроля, что приводит к их деградации.

Аккемская тропа является самой посещаемой тропой в природном парке. Она популярна из-за того, что это самый быстрый маршрут к подножью горы Белуха. За день в «высокий» сезон (июль-август) по тропе проходят до 50–100 человек (в обе стороны). Обычно это организованные группы от 5 до 20 человек, однако есть и одиночные туристы.

Тропа, протяженностью 21.3 км (общая 23.8 км), начинается в селе Тюнгур (или поселке Кучерла) и заканчивается у впадения реки Аккем в Аккемское озеро. Она используется преимущественно как познавательно-туристическая в летний период и в теплую погоду в сентябре. Основной способ прохождения тропы – пеший, однако встречаются конные переходы. Существует также возможность «заброски» через перевал Кузуюк на грузовом автомобиле.

Перепад высотных отметок тропы на протяжении всего маршрута составляет 1000 м (1050–2050 м). При этом подъем достаточно плавный. Маршрут пересекает ландшафты – от горно-долинных лугово-лесных комплексов ледникового генезиса, представленных хвойными (кедрово-, лиственнично-еловыми) лесами и пойменными ивняками на горно-лесных и аллювиальных почвах, до среднегорных лесостепных территорий со злаково-разнотравными степями и перелесками на горно-степных черноземовидных почвах. В высокогорных частях преобладают подгольцово-субальпинотипные ландшафты с лиственнично-кедровыми редколесьями, лугами и тундрами на горно-тундровых почвах [Черных, Самойлова, 2011].

Главными достопримечательностями на тропе является река Аккем, Аккемское озеро и подножье северного склона горы Белуха с видом на ее вершину. Туристы, добравшись до озера Аккем, размещаются либо в палатках на стоянках, либо на турбазах, расположенных ниже озера.

На протяжении всей тропы зафиксировано 45 стоянок разного размера. В основном это небольшие поляны, вмещающие от одной до трех палаток с костровищем (3–4 стадии дигрессии). Во время большого турпотока поляны заняты и замусорены. Уровень обустройства тропы и стоянок неудовлетворительный из-за отсутствия сопутствующей инфраструктуры: информационных щитов, туалетов, мусорных баков, специальных покрытий на переувлажненных участках и других элементов снижающих негативные последствия вытаптывания. Создание сети туалетов и контейнеров под мусор осложнено их обслуживанием, так как необходимые для этого автодороги отсутствуют.

Средняя ширина тропы составляет 100 см (от 30 до 200 см). Большая часть тропы находится на 3-й и 4-й стадиях дигрессии растительного покрова и состояния тропы, а на крупных стоянках (возле озера) – на 5-й стадии. Встречаются участки с нулевой стадией дигрессии, т.к. курумники и скальные участки не разрушаются при проходе по ним туристов (рис. 2).

Тропы-дублёры распространены на всем маршруте, в виду того, что существуют пешие и конные тропы. Пешие тропы идут в обход конных, потому что конные тропы в дождливую погоду, очень влажны и сложно проходимы. Например, на тропах-дублёрах на радиальных маршрутах к Аккемскому леднику и к Долине семи озер проявляется активное развитие глубинной эрозии и поверхностного размыва почвы.

Наиболее уязвимый участок всего маршрута – тропа и стоянки возле озера Аккем. На озере останавливаются туристы и разбивают лагерь, затем отправляются в радиальные выходы к природным объектам, к которым тоже есть тропы – Долина Горных духов, долина р. Ярлу, Долина семи озер, Аккемский ледник. Эти радиальные маршруты в основном идут по скальным участкам и курумникам. Растительный и почвенный покровы на этих тропах на разных их участках достигают от 0 до 2 стадии дегрессии.

В районе озера преобладает высокогорные подгольцово-субальпинотипные ландшафты с крутыми склонами, в том числе троговыми [Черных, Самойлова, 2011]. Вдоль береговой линии озера (1.3 км) расположены 6 частично оборудованных стоянок для палаточных лагерей общей площадью 1.5 га. На данном участке рекреационная нагрузка оказывается намного интенсивнее, чем на тропах.



Рис. 2. Участки тропы, стоянок и радиальных маршрутов в районе Аккемской тропы.

1 – тропа через лиственничный лес по корням и курумникам (стадия дигрессии 3); 2 – тропа вдоль р. Аккем по курумникам (стадия 0); 3 – участок тропы с ручьем (стадия 1); 4 – тропа и стоянка в лиственничном лесу (стадия 4); 5 – стоянка по пути тропы (стадия 5); 6 – крупная стоянка на Аккемском озере (стадия 4); 7 – тропиочная сеть на северо-западной части озера Аккем (стадия 3); 8 – тропы-дублиеры на озере Аккем (стадия 3); 9 – радиальный маршрут в Долину семи озер (стадия 2); 10 – тропа до Аккемского ледника (стадия 3)

Fig. 2. Sections of the trail, parking lots and radial routes in the Akkem trail area.

1 – trail through larch forest over roots and kurum (digression stage 4); 2 – trail along the Akkem River over kurum (stage 0); 3 – section of the trail with a stream; 4 – trail and campsite in the larch forest (stage 4); 5 – campsite along the trail (stage 5); 6 – large campsite on Lake Akkem (stage 4); 7 – trail network in the northwestern part of Lake Akkem (stage 3); 8 – duplicate trails on Lake Akkem (stage 3); 9 – radial route to the Valley of Seven Lakes (stage 2); 10 – trail to the Akkem Glacier (stage 3)

Это обусловлено троговой формой рельефа долины водоема, крутизной склона и большим потоком туристов, которые останавливаются на несколько ночевков возле озера.

В окрестностях озера распространены горно-тундровые перегнойные маломощные почвы, которые подвержены эрозии при постоянном рекреационном воздействии, а восстановление экосистем медленное. В целом состояние тропы оце-

нено как удовлетворительное, местами неудовлетворительное.

Ороктойская тропа – маршрут нестандартный и длиннее тропы до горы Белуха в 2.5 раза. На ней распространены высокогорные тундровые и луговые альпинотипные ландшафты. Маршрут проходит по гольцово-альпинотипным склонам. Большая часть (70%) – по курумникам, скальным участкам, которые не поддаются разрушению

при проходе по ним (стадия депрессии – 0). Также на тропе есть лесные участки 2 стадии депрессии, и участки 1 стадии депрессии. Состояние тропы в целом удовлетворительное. На ней располагаются мелкие стоянки, площадь замусоренной территории составляет не больше 10%.

Второй по популярности тропой в природном парке «Белуха» является Кучерлинская. Она идет вдоль правого берега реки Кучерла, завершаясь у одноименного озера. Общая протяженность Кучерлинской тропы в пределах границ природного парка составляет 23.5 км (всего 37.2 км). Она постепенно поднимается вверх от поселка Кучерла на 900 м, в пределах парка на 560 м (1220–1780 м), без резких спусков и подъемов. Однако для ее прохождения требуется физическая подготовка, т.к. приходится преодолевать перевалы Кара-Тюрек или Рига-Турист. По этой причине Кучерлинская тропа посещается меньше, чем Аккемская.

Природными достопримечательностями по пути к Кучерлинскому озеру являются: петроглифы в гроте Куйлю, каскад водопадов на ручье Тегеек, река Кучерла. У Кучерлинского маршрута есть альтернативный вариант, который идет по водораздельному хребту на высоте более 2500 м. Тропа начинается от р. Куйлю и резко поднимается вверх, заканчиваясь на перевале Кара-Тюрек. К горе Белуха можно попасть именно через этот перевал. Обычно его преодолевают за 2 дня пешком и за 1 день на конях.

В день по тропе в «высокий» сезон (июль-август) проходят от 50–80 человек (в обе стороны). Обычно это организованные группы от 5 до 20 человек, однако есть одиночные туристы. На Кучерлинской тропе зафиксировано 47 стоянок различного

размера. Они представляют собой поляны без растительности, вмещающие от одной до трех палаток с костровищем (стадии депрессии 3–4). Во время большого турпотока на Белуху поляны замусорены и заняты. Уровень обустройства тропы неудовлетворительный из-за отсутствия сопутствующей инфраструктуры (информационных щитов, туалетов, мусорных баков).

Ширина полотна тропы составляет от 30 до 200 см, в среднем 50–80 см. Наблюдается 3–4 стадии рекреационной депрессии. Встречаются участки равные нулевой стадии депрессии, т.к. состоят из курумника и скальных участков (рис. 3).

Также как и на Аккемской тропе, на Кучерлинской есть тропы-дублёры из-за разного вида передвижения по маршруту (пеший, конный). На них выявлено развитие эрозии и поверхностного размыва почвы.

Самый уязвимый участок всего маршрута – тропа и стоянки возле Кучерлинского озера. На озере останавливаются лагерем и затем отправляются в радиальные выходы к природным объектам, к которым тоже есть тропы. В целом состояние Кучерлинской тропы удовлетворительное, местами, где тропа дублируется – неудовлетворительное.

Туристы, дойдя до озера, останавливаются либо в палаточном лагере на правой стороне озера, либо на турбазе «Кучерла». Есть небольшие стоянки в верховьях озера, расположенные на тропах, ведущих к озеру Дарашколь, водопаду Кони-Айры и в долину Цветных озер. Тропы проходят по скальным участкам и курумникам. Стадии депрессии растительного и почвенного покрова на этих тропах на разных их участках равны от 0 до 2. Состояние данных троп в целом удовлетворительное, замусоривание территории не превышает 10%.

В районе Верхнекаратюрской тропы развиты гляциально-нивальные гольцово-субальпинотипные и горно-таежные ландшафты [Черных, Самойлова, 2011]. Маршрут тропы проходит по гольцово-альпинотипным склонам. Большая часть (70%) – по курумникам, скальным участкам, которые не поддаются разрушению при прохождении по ним (стадия дегрессии – 0). Также на тропе есть лесные участки 1 стадии дигрессии и сильно загрязненный участок – «каменная изба». Очистка последнего затрудняется высокогорным положением – более 2500 м над уровнем моря.

По данным Красной книги за 2007 год в районе долины реки Аккем и Аккемского озера произрастало 9 краснокнижных растений [Красная книга..., 2007]. В Красной книге Республики Алтай 2017 года на

изучаемой территории 3 наименования не зафиксированы вообще, отмечены только 2 вида из оставшихся шести редких растений – родиола розовая и живокость укокская [Красная книга..., 2017].

На Кучерлинской тропе по данным Красной книги 2007 года произрастало 5 редких видов растений. В Красной книге 2017 года зафиксировано 4 наименования из пяти редких видов. Фактически только ремень алтайский до сих пор зафиксирован в исследуемом районе.

Изменение числа редких видов за 10 лет более чем на 60% указывает на негативное воздействие рекреационной деятельности на объекты растительного мира. С 2017 года поток туристов вырос на 20%. Большая вероятность, что число редких видов еще больше сократится.

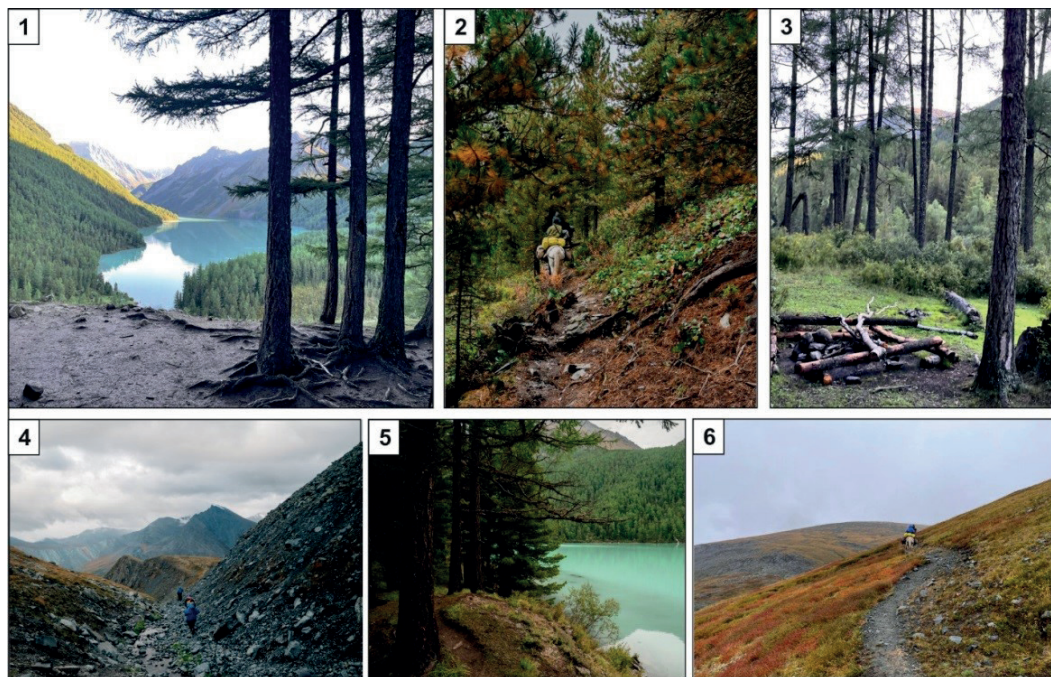


Рис. 3. Участки тропы, стоянок и радиальных маршрутов в районе Кучерлинской тропы.
1 – смотровая (тропа и стоянка) на Кучерлинское озеро (стадия дигрессии 5); 2 – тропа на перевал Кара-Тюрек (стадия 2); 3 – стоянка с костровищем (стадия 4); 4 – спуск с перевала Кара-Тюрек (стадия 0); 5 – стоянка на левом берегу Кучерлинского озера (стадия 4); 6 – тропа на перевал Кара-Тюрек (стадия 4)

Fig. 3. Sections of the trail, parking lots and radial routes the area of the Kucherlinskaya trail.
1 – lookout (trail and campsite) to Lake Kucherlinskoye (stage 3 of digression); 2 – trail to the Kara-Turek Pass (stage 2); 3 – campsite with a ossuary; 4 – descent from the Kara-Turek Pass (stage 0); 5 – campsite on the left bank of Lake Kucherlinskoye (stage 4); 6 – trail to the Kara-Turek Pass (stage 4)

Кроме того, наблюдается снижение проективного покрытия редких видов растений.

В районе троп природного парка часто встречаются дикие животные (косуля, аргали, марал, бурундуки, пищухи и пр.). Для них значительным фактором тревожности является увеличивающийся поток туристов и летающие вертолеты. Шумовое загрязнение от вертолётов распространяется не только на речную долину Аккема, но и за соседние хребты.

Общими закономерностями для обеих троп является то, что большая часть маршрута проходит по уязвимым, быстро деградирующим под воздействием вытаптывания тундровым, луговым альпинотипным и лугово-лесным высокогорным зонам. В настоящее время в пределах троп фиксируется 3 (предельная для самовосстановления), реже 4 стадии рекреационной дигрессии. При этом на уровень нарушенности почвенно-растительного покрова не влияет крутизна склонов, т.е. сильно нарушенные участки, есть и на пологих отрезках тропы.

В горно-лесных ландшафтах стадии дигрессии зависят от крутизны склонов, при этом, чем меньше уклон тропы, тем слабее воздействие на полотно тропы, но сильнее проявляется влияние рекреационной деятельности на прилегающую территорию (увеличивается ширина тропы, больше меняется растительность, причём не столько видовой состав травяного яруса, сколько его проективное покрытие). Активизация эрозионных процессов в лесу сдерживается древесной растительностью.

Заключение

Таким образом, проведенное исследование позволило отметить следующее:

- территория природного парка

«Белуха» в целом нарушена умеренно, местами сильно в результате многолетней деятельности метеостанции «Аккем», альплагеря «Белуха» и базы МЧС, а также особенно из-за активно нарастающего потока туристов, преимущественно размещающихся на участках неорганизованной рекреации и способствующих расширению участков с вытоптаным почвенно-растительным покровом, замусориванию, нарушению лесных насаждений и т.п.;

- современный уровень обустройства троп для целей рекреации, в том числе с технической стороны характеризуется в основном, как малоудовлетворительное, особенно в местах скопления стоянок.

Для выполнения основной цели природного парка по сохранению экосистем в условиях интенсивного развития туризма необходимы, прежде всего, грамотное обустройство территории и контроль за соблюдением туристами правил посещения ООПТ, что достижимо при эффективной реализации мер по экологическому просвещению посетителей.

Рекомендуемые меры по обустройству и улучшению троп включают:

- устройство пешеходных мостиков через ручьи на тропах (часто ручьи нужно переходить вброд, а после дождей вода в ручьях поднимается). Такие мостики должны быть легкими и сделаны из природных материалов. Зачастую на маленьких ручьях проходит большая вода после дождей или сели, которые такие мосты смывают;

- расчистка отдельных участков от крупных камней, валежника, сухостоя, деревьев-угроз; укрепление и восстановление участков тропы, которые на длительное время остаются переувлажненными. Это необходимо для упрощения прохождение-

ния опасных зон и предотвращения расширения тропы в результате необходимости обходить такие участки;

– благоустройство площадок под стоянки. Сооружение навесов, лесной мебели (скамьи, сидения, столы), туалетов, ям для мусора, устройство кострищ, очагов и пр. При этом необходимо не только вписать эту инфраструктуру в уникальный природный ландшафт, но и поддерживать ее удовлетворительное состояние. На Кучерлинской и Акемской тропе популярен конный туризм, однако специальные стоянки для размещения на них коней отсутствуют;

– информационное оснащение и маркировка троп (указатели направлений, информационные щиты и пр.). Этот вопрос очень актуальный, так как все тропы значительно удалены от населённых пунктов (от 30 и более км), на тропах нет мобильной связи и дополнительную информацию по конкретному направлению туристы обычно просматривают заранее, или уточняют у других туристов.

Территория природного парка «Белуха» является очень перспективной для развития экотуризма. Для рационального развития необходимо придерживаться баланса в принципах устойчивого развития, куда входят социальные, экономические, экологические и культурные цели и учитывать интересы всех сторон, которые будут задействованы в развитии туризма.

Необходимо создавать механизмы, в т.ч. правовые, которые позволят наладить взаимодействие БУ РА «Дирекция ООПТ РА» с туробъектами, расположенными на охраняемой территории и другими туроператорами, предоставляющими туры на этой территории. Это позволит повысить уровень контроля за посещением туристов.

Перспективным направлением является создание единой электронной регистрационной базы данных для туристских групп и граждан, посещающих региональные ООПТ. Данная мера позволит, с одной стороны, оптимизировать процедуру регистрации, а с другой – существенно расширить охват регистрируемых лиц и повысить уровень их информированности о режиме функционирования и правилах посещения ООПТ. Электронный талон с уникальным номером, выдаваемый после оплаты, может быть реализован в формате pdf-буклета, содержащего картографические материалы маршрутов, детальные правила пребывания, рекомендации по технике безопасности и контакты экстренных служб.

В целях предотвращения деградации природных комплексов при осуществлении туристской деятельности помимо мероприятий по обустройству необходимо также ведение специализированного мониторинга. В настоящее время выполнены расчеты по предельно допустимой рекреационной емкости описанных троп и стоянок, которая может корректироваться в зависимости от изменений уровня обустройства и оценки текущего состояния [Николаева и др., 2025]. При появлении первых признаков негативного изменения состояния природных комплексов и объектов, рекреационные нагрузки должны корректироваться в сторону снижения, а также при необходимости применяться меры, направленные на повышение устойчивости территории к внешнему воздействию (именно для этого, в первую очередь, реализуются мероприятия по благоустройству туристских объектов).

В ходе мониторинга состояние каждого туристского объекта должно оцениваться до трех раз в год (до начала туристского сезо-

на, в его середине и в конце); при выявлении изменения состояния оцениваемых природных компонентов осуществляется расчет поправочных коэффициентов и перерасчет предельно допустимой рекреационной емкости. При этом участки в заповедной зоне природного парка с признаками активно нарастающей деградации, могут частично или даже полностью закрываться для посетителей до полного восстановления.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interests.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Института водных и экологических проблем СО РАН (№ FUFZ-2021-0007; № FUFZ-2021-0003).

Список литературы

Иванов А.Н., Сафронова А.А., Чижова В.П. Оценка рекреационного воздействия и дигрессии ландшафтов на основных туристических маршрутах Кавказского заповедника // Региональные геосистемы. 2023. 47 (4). С. 507–517. doi: 10.52575/2712-7443-2023-47-4-507-517

Красная книга Республики Алтай (растения). Горно-Алтайск, 2007. 272 с.

Красная книга Республики Алтай (растения). 3-е изд. перераб. и доп. Горно-Алтайск, 2017. 267 с.

Непомнящий В.В., Завадская А.В., Чижова В.П. Методические рекомендации по определению рекреационной ёмкости особо охраняемых природных территорий. Новосибирск: Наука, 2021. 96 с.

Николаева О.П., Савенко К.С., Любимов Р.В., Ситникова В.А. Расчет предельно допустимой рекреационной емкости территории природного парка «Белуха» // Известия Русского географического общества. 2025. Т. 157, №3. С. 340–358. doi: 10.7868/S3034538325030062

Черных Д.В., Самойлова Г.С. Ландшафты Алтая (Республика Алтай и Алтайский край). Карта М-1:500000. Новосибирск, 2011 (фондовые материалы).

Чижова В.П., Лукашева М.А. О методике проведения мониторинга горных туристских маршрутов на основе оценки их экологического состояния (на примере маршрута «К водопаду Учар», Алтайский заповедник) // Экологический мониторинг на ООПТ: Труды VII Междунар. науч.-практ. конф. «Чтения памяти Н.М. Пржевальского» (1–3 декабря 2022 г., Россия). Смоленск, Маджента. 2022. С. 166–169.

Яшина Т.В., Шаравина Л.В. К вопросу определения допустимых рекреационных нагрузок в ООПТ (на примере Катунского 490 хребта) // Горные экосистемы Южной Сибири: изучение, охрана, рациональное природопользование. Труды заповедника «Тигирекский». Вып. 1. Барнаул, 2005. С. 126–129.

References

Ivanov A.N., Safronova A.A., Chizhova V.P. Ocenka rekreacionnogo vozdejstviya i digressii landshaftov na osnovny`x turisticheskix marshrutax Kavkazskogo zapovednika [Assessment of recreational effects and digression of landscapes on the main tourist routes of the Caucasian Nature Reserve] // Regional`ny`e geosistemy` [Regional Geosystems]. 2023. 47 (4).

P. 507–517. (in Russian). doi: 10.52575/2712-7443-2023-47-4-507-517

Krasnaya kniga Respubliki Altaj (rasteniya) [The Red Book of the Altai Republic (plants)]. Gorno-Altajsk, 2007. 272 p. (in Russian).

Krasnaya kniga Respubliki Altaj (rasteniya). 3-e izd. pererab. i dop [The Red Book of the Altai Republic (plants). 3rd ed. revision. and add.]. Gorno-Altajsk, 2017. 267 p. (in Russian).

Nepomnyashnij V.V., Zavadskaya A.V., Chizhova V.P. Metodicheskie rekomendacii po opredeleniyu rekreacionnoj yomkosti osobo oxranyaemy'x prirodny'x territorij [Methodological recommendations for determining the recreational capacity of specially protected natural territories]. Novosibirsk: Nauka, 2021. 96 p. (in Russian).

Nikolaeva O.P., Savenko K.S., Lyubimov R.V., Sitnikova V.A. Raschet predel'no dopustimoy rekreacionnoj emkosti territorii prirodnogo parka «Beluxa» [Calculation of the maximum allowable recreational capacity of the territory of the Belukha Nature Park] // Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshhestva [Bulletin of the Russian Geographical Society]. 2025. Vol. 157, no. 3. P. 340–358. (in Russian). doi: 10.7868/S3034538325030062

Cherny'x D.V., Samojlova G.S. Landshafty' Altaya (Respublika Altaj i Altajskij kraj). Karta M-1:500000 [Landscapes of Altai (Altai Republic and Altai Territory). Map M-1:500000]. Novosibirsk, 2011 (fondovy'e materialy'). (in Russian).

Chizhova V.P., Lukasheva M.A. O metodike provedeniya monitoringa gorny'x turistskix marshrutov na osnove ocenki ix e'kologicheskogo sostoyaniya (na primere marshruta «K vodopadu Uchar», Altajskij zapovednik) [On the methodology of monitoring mountain tourist routes based on an assessment of their ecological condition (using the example of the route “To Uchar Waterfall”, Altai Nature Reserve)] // E'kologicheskij monitoring na OOPT: Trudy' VII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. «Chteniya pamyati N.M. Przheval'skogo» (1–3 dekabrya 2022 g.) [Environmental monitoring in protected areas: Proceed. of the VII International Scientific and Practical Conference “Readings in memory of N.M. Przhevalsky” (Dec. 1–3, 2022)]. Smolensk, Madzhenta. 2022. P. 166–169. (in Russian).

Yashina T.V., Sharavina L.V. K voprosu opredeleniya dopustimy'x rekreacionny'x nagruzok v OOPT (na primere Katunskogo 490 xrebtá) [On the issue of determining permissible recreational loads in protected areas (on the example of the Katunsky 490 ridge)] // Gorny'e e'kosistemy' Yuzhnoj Sibiri: izuchenie, oxrana, racional'noe prirodopol'zovanie. Trudy' zapovednika «Tigirekskij» [Mountain ecosystems of Southern Siberia: study, protection, rational use of natural resources. Proceedings of the Tigireksky Nature Reserve]. Is. 1. Barnaul, 2005. P. 126–129. (in Russian).

ASSESSMENT OF THE CURRENT RECREATIONAL USE OF THE BELUKHA NATURE PARK

O.P. Nikolaeva^{1,2}, K.S. Savenko², V.A. Sitnikova², R.V. Lyubimov²

¹Gorno-Altaysk State University, Gorno-Altaysk,

²Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul,

E-mail: nikool@mail.ru, kassiSav@yandex.ru, valya_90_well@mail.ru, geoekol04@mail.ru

This article examines a comprehensive assessment of current recreational use of Belukha Nature Park, one of the key specially protected natural areas (SPNA) in the Altai Republic.

To analyze changes in the natural environment under the influence of recreational impacts, two trails – Akkenskaya and Kucherlinskaya – were selected. These routes account for the highest seasonal tourist activity. Using established staging assessment methods, various degrees of recreational degradation were identified for these trails, ranging primarily from stage three to stage four.

Keywords: stages of recreational decline; recreational pressure; anthropogenic impact; SPNA; nature park «Belukha»; Altai Republic.

Received October 6, 2025. Accepted: December 2, 2025

Сведения об авторах

Николаева Ольга Петровна – кандидат географических наук, доцент кафедры экономики, туризма и прикладной информатики Горно-Алтайского государственного университета. Россия, 640000, Республика Алтай, г. Горно-Алтайск, пул. Ленкина, 1; научный сотрудник Института водных и экологических проблем СО РАН. Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, д. 1. ORCID 0009-0007-1890-8446. E-mail: nikool@mail.ru.

Савенко Ксения Сергеевна – кандидат географических наук, научный сотрудник Института водных и экологических проблем СО РАН. Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, д. 1. ORCID: 0009-0004-9903-7299. E-mail: kassiSav@yandex.ru.

Ситникова Валентина Александровна – кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник Института водных и экологических проблем СО РАН. Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, д. 1. ORCID: 0000-0002-4606-3766. E-mail: valya_90_well@mail.ru.

Любимов Роман Владимирович – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Института водных и экологических проблем СО РАН. Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, д. 1. ORCID: 0009-0006-6254-737X. E-mail: geokol04@mail.ru.

Information about the authors

Nikolaeva Olga Petrovna – PhD in Geography, Associate Professor at the Department of Economics, Tourism, and Applied Informatics at the Gorno-Altai State University. 1, Lenkina Pool, 640000 Gorno-Altai, Altai Republic, Russia; Researcher of the Institute for Water and Environmental Problems SB RAS (IWEP SB RAS). 1, Molodezhnaya St., 656038 Barnaul, Russia. ORCID 0009-0007-1890-8446. E-mail: nikool@mail.ru.

Savenko Ksenia Sergeevna – PhD in Geography, researcher of the Institute for Water and Environmental Problems SB RAS (IWEP SB RAS). 1, Molodezhnaya St., 656038 Barnaul, Russia. ORCID: 0009-0004-9903-7299. E-mail: kassiSav@yandex.ru.

Sitnikova Valentina Aleksandrovna – PhD in Geological and Mineralogical Sciences, researcher at the Institute for Water and Environmental Problems SB RAS (IWEP SB RAS). 1, Molodezhnaya St., 656038 Barnaul, Russia. ORCID: 0000-0002-4606-3766. E-mail: valya_90_well@mail.ru.

Lyubimov Roman Vladimirovich – PhD in Geology and Mineralogy, senior researcher of the Institute for Water and Environmental Problems SB RAS (IWEP SB RAS). 1, Molodezhnaya St., 656038 Barnaul, Russia. ORCID: 0009-0006-6254-737X. E-mail: geokol04@mail.ru.

УДК 504.058: 631.432.1: 504.75.06

ПРИРОДНЫЕ И АНТРОПОГЕННЫЕ ФАКТОРЫ РАЗВИТИЯ ПРОЦЕССОВ ПОДТОПЛЕНИЯ СЕЛЬСКИХ СЕЛИТЕБНЫХ ТЕРРИТОРИЙ АЛТАЙСКОГО КРАЯ

Е.С. Орлова, А.В. Головин, М.С. Губарев, В.Ф. Резников, И.Д. Рыбкина

Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул,

E-mail: el.orlova11@yandex.ru

В статье рассмотрены природные и антропогенные факторы, определяющие развитие процессов подтопления сельских селитебных территорий Алтайского края на примере, с. Поспелиха, где с 1990-х годов наблюдается усиление негативных процессов подтопления. Изучены особенности природно-климатических, гидрогеологических условий и выделены основные антропогенные причины, способствующие развитию процессов подтопления. На основе данных полевых исследований проведена инвентаризация имеющихся дренажных систем с. Поспелиха, выделены зоны подтопления, выполнен изотопный анализ дренажных вод с определением генезиса. Проведена укрупненная оценка составляющих водно-балансовых расчетов для территории сельского населенного пункта для разного процента обеспеченности. При среднегодовых значениях осадков наблюдается положительный баланс в холодный период за счет талого стока и отрицательный в теплый период из-за преобладания испарения. Научно-обоснованы направления инженерной защиты для понижения и стабилизации уровней грунтовых вод и осушения локальных зон аккумуляции.

Ключевые слова: природные и антропогенные факторы; зоны подтопления; дренажные системы; инженерная защита территории; грунтовые воды.

DOI: 10.24412/2410-1192-2025-17904

Дата поступления: 5.11.2025. Принята к печати: 27.11.2025

Подтопление территории является Алтайского края [Отчет НИР..., 2022]. комплексным гидрогеологическим и Она обострилась в середине 1990-х гг., что инженерно-геологическим процессом, связано с происходящими изменениями возникающим при изменении водного как природных, так и антропогенных режима и баланса территории. В факторов и условий хозяйствования в результате происходит повышение степной части региона. Современный уровней подземных вод и влажности тренд на усиление негативных грунтов, превышающих критические процессов подтопления территорий значения, что приводит к нарушению характеризуется формированием устойчивых неблагоприятных последствий и эксплуатации объектов [СП 116.13330, экологического и социально-экономического плана. Проведение мероприятий территорий является актуальной для по минимизации негативного воздействия

вод требуются как в городских поселениях (Барнаул, Рубцовск, Славгород, Горняк), так и в сельских населенных пунктах (сс. Пospelиха, Пригородное, Славгородское, Покровка, Семеновка, пп. Бурсоль, Балластный карьер и др.).

Первыми попытками решения проблемы подтопления территорий населенных пунктов стали проектные обоснования 1980–1990-х гг., разработанные институтами «Гипрокоммунстрой» (г. Москва) и «Алтайгипроводхоз» (г. Барнаул) на примере города Рубцовска и села Пospelиха [Технико-экономическое..., 1992; Рубцовск..., 2004]. Московский институт выполнил проект «Схемы инженерной защиты г. Рубцовска от подтопления», который предусматривал мероприятия по организации поверхностного стока на общей площади в 120 га в обводненный карьер-озеро с последующим сбросом водных масс в р. Алей. Позднее, в разные годы происходила актуализация принятых проектных решений: в 1988 г. Ленгипрогором в Генплане г. Рубцовска, в 2001 г. ОАО «Алтайводпроект» в рамках «Предпроектных проработок возможности восстановления или ликвидации существующего оросительного канала Р-1», в 2018 г. ИВЭП СО РАН в проекте «Разработка программы на выполнение научно-исследовательских и изыскательских работ, направленных на минимизацию или ликвидацию негативного воздействия вод – подтопление территории г. Рубцовска» [Отчет НИР..., 2018].

В настоящее время строительство и реконструкция сооружений инженерной защиты таких территорий осуществляется

в недостаточных объемах, что еще более повышает риск возникновения чрезвычайных ситуаций от негативного воздействия вод, в том числе подтопления. Это относится и к территории села Пospelиха, где причины подъема грунтовых вод прослеживаются с 1990-х гг. и связаны с природными и антропогенными факторами.

Целью работы является выявление ключевых природных и антропогенных факторов, определяющих развитие процессов подтопления сельских селитебных территорий Алтайского края, и разработка научно-обоснованных рекомендаций по их минимизации на примере с. Пospelиха.

Задачи исследования последовательно способствовали достижению поставленной цели:

- Определить границы зон подтопления на местности и выполнить инвентаризацию состояния существующих дренажных систем и объектов в зоне подтопления;
- Выделить факторы, способствующие возникновению опасных природных явлений (подтопление) на рассматриваемой территории;
- Выполнить изотопный анализ происхождения дренажных вод и водно-балансовые расчеты для территории с. Пospelиха;
- Предложить основные направления выполнения работ по минимизации и/или ликвидации негативного воздействия вод.

Материалы и методы

Исследование опиралось на обобщение теоретико-методических подходов к

изучению проблем подтопления освоенных селитебных территорий, отраженных в литературных и фондовых источниках информации [Мелиоративные..., 1989; Елизаров и др., 2020; отчеты ИВЭП СО РАН (2024, 2022, 2018 гг.) и др.], а также на рекомендации по защите населенных пунктов от подтопления, содержащиеся в сводах строительных норм и правил, и утвержденные органами государственного управления [СП 42.13330, СП 104.13330, СП 116.13330].

Для определения зон подтопления, уточнения глубин залегания грунтовых вод и инвентаризации состояния существующей дренажной сети в августе 2024 и мае 2025 гг. на территории с. Пospелиха были проведены полевые работы, в том числе с использованием БПЛА и наземной верификации данных полученной видеосъемки. Картографирование зон подтопления выполнялось с использованием программного продукта Google Earth Pro и геоинформационной системы QGIS.

Помимо этого, в рамках полевых исследований был проведен ретроспективный анализ проявления подтопления территории села на основе опроса местных жителей и изучения архивных материалов администрации сельского поселения.

Для анализа влияния природных факторов использовались многолетние данные ближайшей метеостанции (МС) г. Рубцовск за период 1976–2023 гг. для выявления климатических особенностей и наблюдаемых трендов климатических изменений [ВНИИГМИ-МЦД, 2024]. С использованием метода наименьших

квадратов были построены линейные тренды и уравнения линейной регрессии, определялись направление и скорость метеопараметров. Достоверность коэффициентов детерминации полученных уравнений оценивалась по критерию Фишера ($\alpha = 5\%$). Гидрогеологическая характеристика изучаемой территории проводилась по литературным данным, сведениям мониторинговых наблюдений [Государственный доклад..., 2025], учетным карточкам буровых скважин [Электронный каталог..., 2024], отчетам оценки запасов подземных вод на территории Пospелихинского комбината хлебопродуктов и ЗАО «ПМК» [Отчет..., 2011; Отчет..., 2012], а также соответствии с описанием Государственной геологической карты РФ (лист М-44-IV Рубцовск) [2019].

В августе 2024 г. были отобраны пробы воды для проведения изотопного анализа с целью выявления исходного источника поступления воды, заполнившей дренажные системы в селе Пospелиха. Отбор производился на разных участках открытых каналов дренажной системы, водопроводных колодцев и в подполе частного дома на пересечении ул. Первомайская и пер. Алейский. В химико-аналитическом центре Института водных и экологических проблем СО РАН (ХАЦ ИВЭП СО РАН) с помощью метода лазерной абсорбционной ИК-спектроскопии на приборе PICARROL 2130-i определен изотопный состав отобранных вод. Результаты анализа сравнивались с литературными данными об изотопном составе атмосферных осадков, выпа-

дающих на территории юга Западной Сибири в теплый и холодный сезоны года, а также с результатами ранее выполненных исследований в ХАЦ ИВЭП СО РАН.

Для идентификации исходного источника водных масс в дренажных системах села Поспелиха был оценен раздельный вклад зимних и летних атмосферных осадков в формирование изотопного состава воды в дренажных системах с помощью уравнения, предложенного в работе [Papina et al., 2023]:

$$a \cdot X + b \cdot (1 - X) = c,$$

где X – доля вклада зимних атмосферных осадков в изотопный состав воды в объекте системы; $(1 - X)$ – доля вклада летних атмосферных осадков в изотопный состав воды в объекте системы; a , b – средневзвешенное значение изотопа $\delta^{18}\text{O}$ в атмосферных осадках соответственно холодного и теплого периодов года ‰; c – значение изотопа $\delta^{18}\text{O}$ в воде изучаемого водного объекта, ‰.

Соотношение элементов водного баланса рассчитано по площадям водосборных областей, без учета грунтового стока. Прогнозные значения представлены в соответствии с расчетными значениями суточного слоя осадков для лет 5% и 99% обеспеченности.

Дождевой и талый сток (в том числе прогнозные значения) определен как равномерный средний суточный слой осадков для теплого периода и периода снеготаяния согласно «Рекомендациям...» [2015]. Исходными данными послужили значения средних многолетних осадков и среднемесячные значения испарения по данным МС г. Рубцовск [Атлас..., 1963; ВНИИГМИ-МЦД, 2024].

Потери при транспортировке в системах водоснабжения села, пополняющие верхние горизонты подземных вод и способствующие развитию проблемы подтопления, рассчитывались по данным АИС ГМВО [Автоматизированная..., 2024] как доля от среднегодового значения используемых вод за период 2009–2023 гг. в зависимости от общей длины водонесущих коммуникаций [Схема водоснабжения..., 2023; Схема теплоснабжения котельных № 1..., 2024; Схема теплоснабжения котельных №3..., 2024]. Расчет водопотребления на полив приусадебных участков производился на основе ВНТП-Н-97 [1995] и методике оценки фактического водопотребления населения сельских поселений [Орлова, Рыбкина, 2025]. За основу приняты годовые нормы для полива в соответствии с ВНТП-Н-97 [1995]: овощи – 4691 л/га, сады – 5131 л/га. Количество приусадебных участков и их площади определялись по космоснимкам в QGIS.

Фильтрационные свойства грунтов, от которых также зависит скорость пополнения верхних горизонтов подземных вод, рассчитывались на основе методики фильтрации с поверхности земли сточных вод, сбрасываемых с постоянным расходом на определенную площадь [Гольдберг, 1987]. Оценено время фильтрации равномерного суточного слоя стока через покровные отложения, без учета прочих факторов (испарение, поверхностный сток и др.). Методика адаптирована для целей настоящего исследования, в частности понятие и расчет объема сточных вод заменены на слой стока атмосферных осадков теплого периода и талый сток.

Результаты и обсуждение

Село Поспелиха расположено в исторически освоенной юго-западной части Алтайского края. Численность населения на 01.01.2025 г. составляет 10 317 человек, что позволяет считать его одним из крупных сел региона. По Стратегии пространственного развития РФ на период до 2030 г. [2024] относится к опорным населенным пунктам Алтайского края.

Первые инженерные изыскания по определению комплекса защитных мероприятий от подтопления в с. Поспелиха были проведены в 1991–1992 г. Институтом «Алтайгипроводхоз» было подготовлено технико-экономическое обоснование проектирования защитных мероприятий двух очередей строительства [Технико-экономическое..., 1992]. Первая очередь проекта была осуществлена в 1992–1993 годах: построен проводящий канал-коллектор и сбросный канал для отвода паводковых и дождевых вод. Реализованные меры позволили решить вопрос подтопления талыми и дождевыми водами центральной части села, однако западная и юго-западная части села Поспелиха остались подвержены подтоплению грунтовыми водами. Второй этап работ, направленный на строительство проводящего канала-коллектора для отвода паводковых и дождевых вод в западной части, не был осуществлён. В 1996 году проектным институтом «Алтайводпроект» была разработана рабочая документация на строительство защитных сооружений от подтопления, но данный проект так же не реализован.

В настоящее время имеющаяся дренажная сеть не выполняет свои функции. Инвентаризация основных водоотводящих каналов позволила выявить ряд характерных проблем, связанных с нарушением эксплуатационных характеристик существующих элементов дренажной сети села (рис. 1). Руслу каналов и откосы размывы, берегоукрепление отсутствует. Местами русла каналов теряются, в результате чего подтапливается вся прилегающая территория. Отмечено зарастание русел и откосов каналов растительностью и замусоренность. Водопрпускные сооружения через улично-дорожную сеть, железнодорожное полотно, подъезды к частным домовладениям располагаются практически повсеместно выше дна каналов, замусоренные, заиленные и заросшие растительностью.

По категории опасности процесса подтопления с. Поспелиха относится к опасным – подтопление зданий и сооружений в той или иной мере происходит почти ежегодно и проведение специальных мероприятий по инженерной защите необходимо для 70% площади села [Отчет НИР..., 2022]. Отсутствие на большей части территории села системы организованного поверхностного стока, продолжительное время формирующиеся антропогенные факторы еще больше обострили ситуацию. По состоянию на май 2025 года свыше 330 земельных участков общей площадью 108 тыс. м² в той или иной степени подвержены негативному воздействию вод (подтоплению) (рис. 2). Общая площадь участков подтопления составила 881 тыс. м².



Рис. 1. Состояние некоторых элементов существующей дренажной сети (фото авторов)

Fig. 1. Condition of some elements of the existing drainage systems



Рис. 2. Зоны подтопления и существующая дренажная сеть

Fig. 2. Flooding zones and existing drainage systems

Причины подтопления носят как естественный, так и антропогенный характер. В сложившихся условиях ведения хозяйственной деятельности они только усиливают развитие негативных процессов (подтопления).

Территория села в целом характеризуется плоским рельефом, слабой степенью дренированности и низкими коэффициентами фильтрации вод, что способствует аккумуляция поверхностного стока в понижениях рельефа.

В физико-географическом отношении исследуемая территория приурочена к юго-западной части Западно-Сибирской равнины. Село расположено на левобережье р. Алей, юго-западнее протекает р. Пospelиха. Основная застройка населенного пункта приурочена к первой надпойменной террасе р. Алей. Рельеф плоский, слаборасчлененный с уклоном территории – с северо-востока на юго-запад. Максимальный перепад высот не превышает 10 м.

Геологический разрез представлен мезозойскими и кайнозойскими отложениями чехла, залегающими на складчатом палеозойском фундаменте. Покровные образования первой надпойменной террасы относятся к горизонту верхнелептостенного возраста, который сложен современными непроницаемыми и слабопроницаемыми суглинистыми и глинистыми отложениями. Мощность поверхностных отложений в среднем составляет 6–8 м. В ряде случаев данные отложения являются водовмещающими [Отчет..., 2011; Государственная..., 2019; Электронный каталог..., 2024].

Грунтовые воды приурочены к четвертичным отложениям. На первой надпойменной террасе р. Алей первым от поверхности вскрывается верхнелептостенный аллювиальный горизонт. Водовмещающими породами являются мелко- и тонкозернистые пески с прослоями и линзами суглинков и супесей. Мощность изменяется от 4 до 7 м, реже до 10 м [Отчет..., 2011; Государственная..., 2019].

В границах территории с. Пospelиха горизонт грунтовых вод вскрывается от 1 м и глубже в зависимости от рельефа местности [Государственная..., 2019; Электронный каталог..., 2024]. В целом наблюдается уменьшение глубины грунтовых вод от северо-восточной окраины села в юго-западном направлении к долине р. Пospelиха. Так в восточной части села глубина залегания грунтовых вод составляет 6 м, в центральной – 4 м [Отчет..., 2011; Отчет..., 2012].

По мониторинговой скважине за период 1974–2023 гг. наблюдается тренд на увеличение уровня грунтовых вод (рис. 3). Пик приходится на 1991 г. – начало разработки первых инженерных решений по защите села от подтопления. В настоящее время уровень близок к максимальному [Государственный доклад..., 2025].

Согласно мониторинговым данным [Отчет..., 2015] режим грунтовых вод на данной территории – гидрологический (приречный): колебания уровней грунтовых вод следуют за колебаниями уровней рек с незначительным по времени отставанием. В годовом цикле характерен четко выраженный весенний подъем,

совпадающий с паводком рек Алей и Пospелиха, и более плавный осенний, имеющий значительно меньшую амплитуду и обусловленный дополнительным питанием горизонта за счет инфильтрации осенних дождевых осадков (рис. 4).

Изотопный анализ показал, что воды открытых каналов, неглубоких колодцев и подполий частных домов

имеют преимущественно (на 85–99%) атмосферно-дождевое происхождение. В то время как в воде из глубоких колодцев, оснащенных насосами и качающих воду с водоносных горизонтов на глубине от 85–100 см до 250 см, вклад зимних (снеговых) атмосферных осадков повышается и достигает в изотопном составе вод 30% и более.

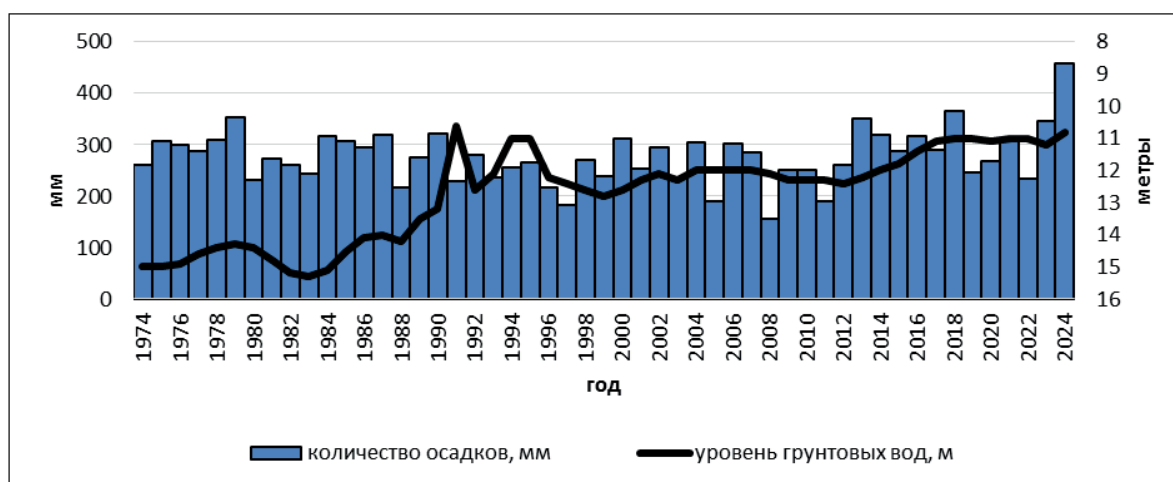


Рис. 3. График колебания среднемноголетнего уровня грунтовых вод [Государственный доклад..., 2025]

Fig. 3. Fluctuation chart of the average long-term groundwater level [Gosudarstvennyi doklad..., 2025]

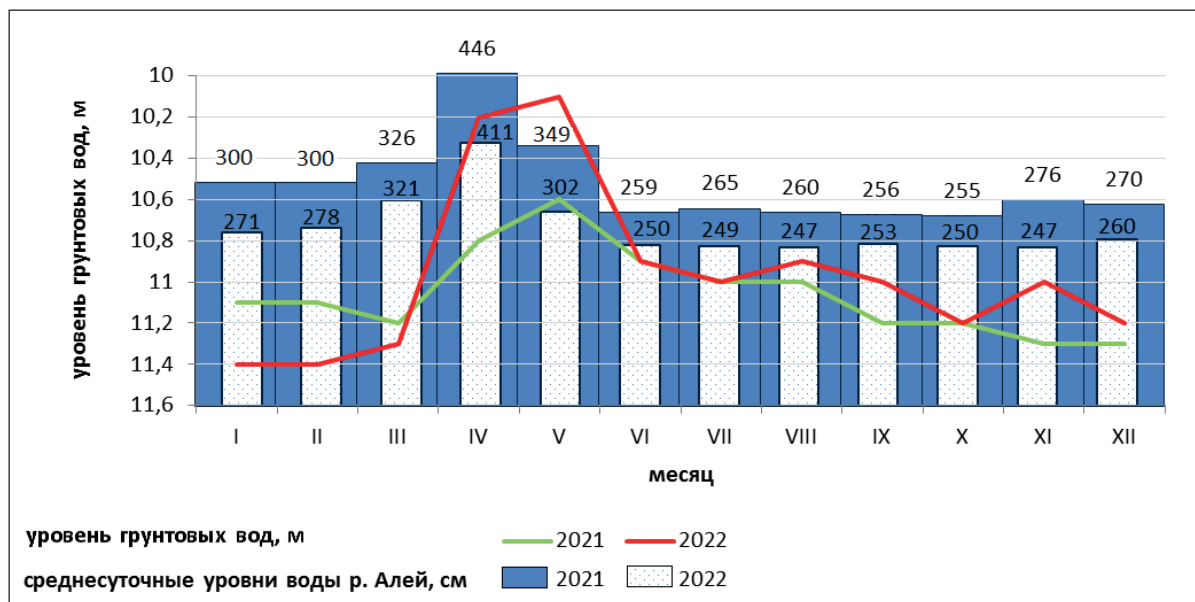


Рис. 4. График колебания годового уровня грунтовых вод по мониторинговой скважине и уровня воды в р. Алей (пост г. Рубцовск) [Автоматизированная..., 2024; Государственный доклад..., 2025]

Fig. 4. Fluctuation chart of the annual groundwater level from the monitoring well and the water level in the Aley River (Rubtsovsk city station) [Avtomatizirovannaya..., 2024; Gosudarstvennyi doklad..., 2025]

Региональные особенности климата и климатические изменения способствуют развитию процессов подтопления исследуемой территории. Среди климатических факторов, усиливающих негативное влияние природных вод, можно выделить: неравномерное распределение осадков и тренд на увеличение их количества (в том числе рост значений влагозапасов в снежном покрове), промерзание почвы, снижение скоростей ветра.

Среднее многолетнее количество осадков составляет 273 мм, основное количество выпадает в теплый период (67% от всей суммы осадков) в жидком, иногда смешанном и твердом виде. Размах годовой суммы осадков за период 1976–2023 гг. составляет 210 мм (от 155 до 365 мм), т.е. на территории наблюдаются как засушливые, так и относительно влажные годы. За последнее десятилетие отмечается выпадение осадков выше среднего многолетнего на 105–133% (2013–2018, 2021, 2023 гг.). Кроме того, статистически подтверждено, что R^2 (коэффициент детерминации) линейных трендов достоверен по критерию Фишера при уровне значимости $\alpha = 5\%$ для рядов за март (тренд 1976–2023) и холодный период (тренд 1996–2023 (рис. 5)). Скорости изменения осадков составляют +2.2 мм и +17.9 мм за 10-летие соответственно.

Выпадение первого снега и образование временного снежного покрова возможно с первых чисел октября. Устойчивый снежный покров, как правило, формируется в первой половине ноября и к концу первой декады февраля достигает максимума, а к концу первой декады апреля полностью сходит. Средняя многолетняя высота снежного покрова

составляет 16.8 см. Размах значений 26 см (от 10 до 36 см). Мощный снежный покров лучше предохраняет почву от глубокого промерзания, однако содержит в себе большие объемы водных масс. Запас воды в снеге сильно изменяется от года к году и на первую декаду марта может составлять от 0 мм (1983, 1984) до 97 мм (2006).

Параллельно с ростом количества осадков увеличивается высота снежного покрова и влагозапасы. R^2 линейных трендов (1976–2023) высот достоверен для рядов данных за ноябрь (+1.1 см/10 лет), декабрь (+1.3 см/10 лет), январь (+1.2 см /10 лет), март (+1.5 см/10 лет) и холодный период (+1.3 см/10 лет); R^2 линейных трендов (1976–2023) влагозапасов статистически значим для ряда за ноябрь (+1.1 мм/10 лет); однако коэффициенты детерминации достоверны при анализе периода 1978–2023 г. для рядов за ноябрь – март и холодный период (рис. 5).

С наступлением холодного периода и выпадением первого снега, как правило, начинается промерзание почвы. Среднее многолетнее промерзание почвенного покрова составляет в ноябре 0–20 см, в декабре 40–80 см, январе 80–120 см, феврале и марте – 120–160 см.

Анализ минимальных и максимальных температур почв показал, что в отдельные годы возможны значительные сдвиги замерзания и оттаивания почвенного покрова. Наиболее ранняя дата замерзания – вторая декада октября (1976, 2002), поздняя – вторая декада ноября (1995, 1999, 2001, 2006, 2010, 2011, 2017, 2019, 2020, 2022); наиболее ранняя дата оттаивания – третья декада марта (1983, 2001, 2014, 2016), поздняя – вторая декада мая (1980, 1985).

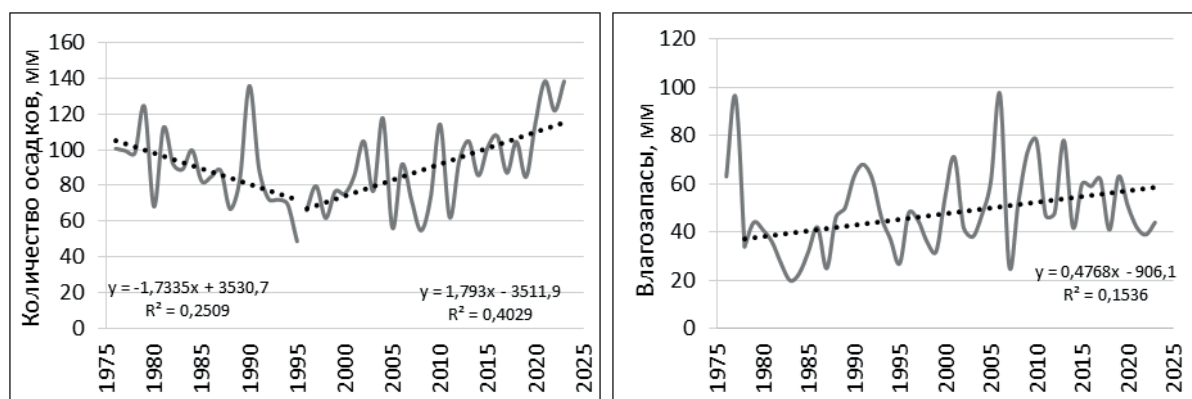


Рис. 5. Графики количества осадков, влагозапасов в снежном покрове и линейные тренды за холодный период по данным МС Рубцовск

Fig. 5. Charts of precipitation amount, moisture reserves in the snow cover, and linear trends for the cold period based on data from the Rubtsovsk meteorological station

При особых условиях (отрицательные температуры воздуха при незначительном снежном покрове или его отсутствии) почва может промерзнуть до глубины 160–240 см, как это было в 1977, 1980, 1982, 1984, 1985, 1986, 1987, 1988, 1998, 2005, 2008, 2011, 2018 годах (Табл. 1).

Промерзание почвы создает свои коррективы в распределении поверхностного стока в период снеготаяния. Часть талой воды просачивается в верхний слой почвы, часть скатывается по промёрзшей поверхности в западины и понижения, где

скапливается, затапливая прилегающие территории.

Открытые степные пространства исследуемой и ближайших территорий создают условия для возникновения ветров от слабых до ураганных. Ветер способствует усилению испарения с территории, что благоприятно при условии скопление водных масс. Средняя многолетняя скорость ветра составляет 3.2–5.0 м/с, с максимумом в холодным периоде (4.6–5.0 м/с). Преобладающее направление в теплый (21.2%) и холодный (39.2%) периоды южное.

Таблица 1

Абсолютная минимальная температура почвы (°C) на глубинах по МС Рубцовск

Table 1

Absolute minimum soil temperature (°C) at depths according to data from the Rubtsovsk meteorological station

Месяц	Глубина						
	20 см	40 см	80 см	120 см	160 см	240 см	320 см
X	-2.3	0.8	4.6	6.3	7.5	8.2	7.9
XI	-17.1	-10.4	0.2	3.0	4.5	6.0	6.9
XII	-15.0	-10.6	-5.4	-1.9	1.1	4.3	5.7
I	-18.6	-14.2	-6.6	-3.4	-0.8	1.9	0.5
II	-17.0	-12.5	-6.6	-3.4	-1.1	1.4	3.0
III	-12.2	-9.7	-6.4	-4.1	-1.4	0.9	2.6
IV	-2.4	-2.1	-2.1	-1.8	-0.9	0.5	1.4
V	4.3	3.2	0.9	-0.2	-0.3	0.7	1.8

Примечание: цветом выделены отрицательные температуры почвы

Абсолютные максимальные скорости ветра наблюдались в апреле 1978 (до 44 м/с), марте 1977 (до 40 м/с), июне 2007 (до 40 м/с). R^2 линейных трендов (1976–2023) средних скоростей ветра достоверен для рядов данных за все месяцы (-0.1...-0.5 м/с / 10 лет), кроме марта.

Естественно-сложившиеся неблагоприятные природно-климатические и гидрогеологические условия территории с. Пospelixa усиливаются влиянием хозяйственной деятельности человека. Существенным влиянием характеризуются созданные в процессе освоения территории искусственные препятствия и насыпи, которые задерживают поверхностный сток и нарушают ее естественное дренирование. Транспортные магистрали, включая железнодорожные и автомобильные дороги, инженерные объекты (в том числе подземных сооружений), а также плотная частная застройка с использованием подземного пространства на территории села изменяют направление и интенсивность как поверхностного, так и подземного стока, снижают инфильтрационные способности покровных отложений. Стоит также отметить, что для с. Пospelixa не была своевременно выполнена вертикальная планировка территории, которая могла бы минимизировать негативное воздействие вод. На значительной части существующей застройки отсутствует система организованного водоотведения поверхностного стока, что способствует накоплению атмосферных осадков в понижениях рельефа и формированию локальных очагов переувлажнения.

За счет полива приусадебных

участков, утечек из водонесущих инженерных и временных коммуникаций и инфильтрации производственных сбросов наблюдается искусственное (техногенное) подпитывание грунтов. Ретроспективный анализ показывает, что первый значимый подъем грунтовой воды начался после ввода в эксплуатацию централизованного водоснабжения в 1983 г. Население в это время отказалось от использования индивидуальных колодцев, в результате чего резко снизился забор воды из первых водоносных горизонтов.

Таким образом, к ключевым факторам антропогенного происхождения, влияющим на подтопление, относятся изменение естественного стока поверхностных вод и процесса фильтрации грунтовых вод на хозяйственно освоенных и подвергнутых трансформациям водосборных участках населенного пункта. В результате процессы подтопления получили дополнительный фактор развития, который в настоящее время является определяющим.

Вследствие этого на территории села образовались четыре зарегулированные области (зоны подтопления), в которых произошло нарушение естественного водного баланса при формировании поверхностного и грунтового стока (рис. 6). Выделение участков осуществлялось с учетом рельефа местности, инфраструктурного обустройства и выполненной инвентаризации территории.

Основные потоки формируются на северо-западе села, на сельскохозяйственных землях (участки №№ 1, 2) и направляются на юг, где частично аккумулируются в понижениях рельефа, а частично отводятся через водопропускные сооружения.

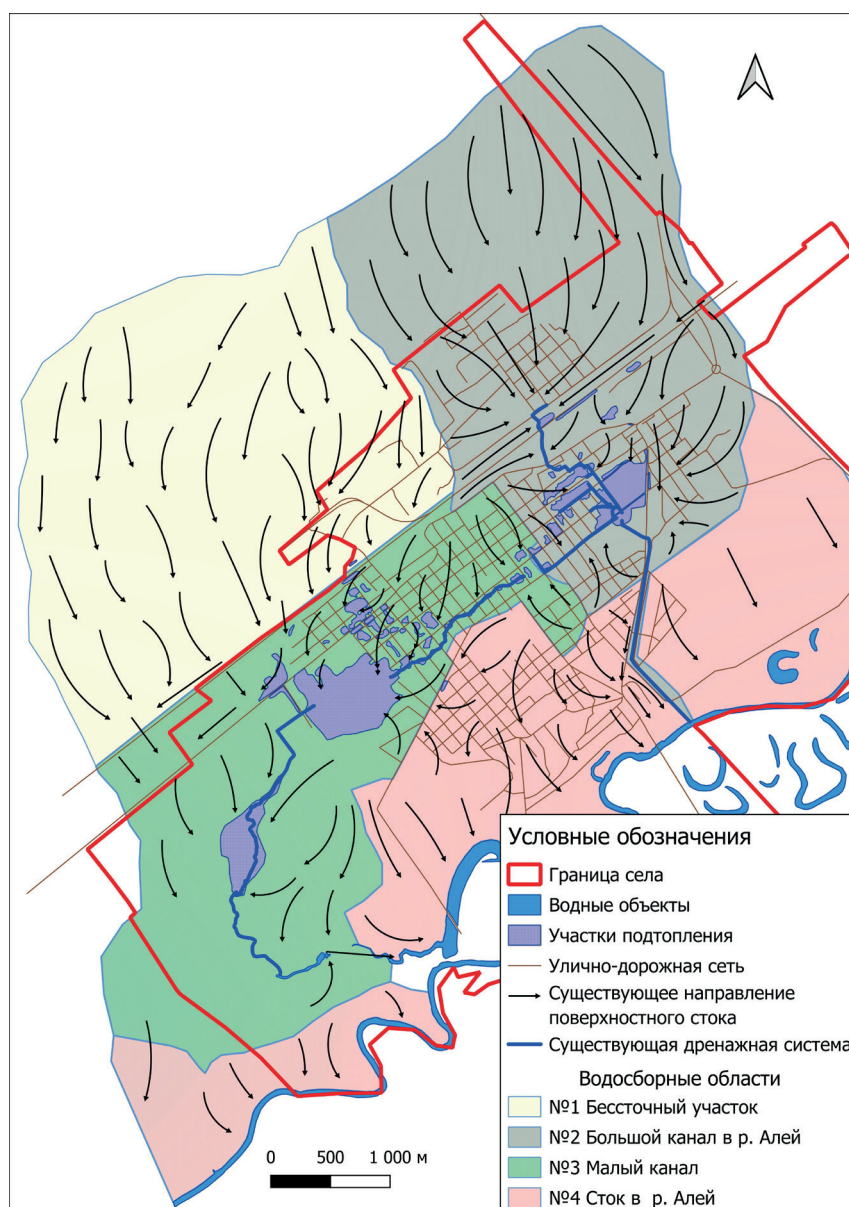


Рис. 6. Схема водосборных областей и существующих участков подтопления на территории с. Пospelikha (с учетом антропогенного фактора) на май 2025 г.

Fig. 6. Scheme of catchment areas and flooding sections in the territory of Pospelikha village (considering the anthropogenic factor) as of May 2025

Значительная часть стока перехватывается системой каналов – Большим и Малым (участки №№ 2, 3), обеспечивающих дренирование территории и последующее поступление воды в реку Алей. Южные и юго-восточные участки села (участок № 4) характеризуются сравнительно большим уклоном поверхности, способствующим непосредственному стеканию воды в русло р. Алей без аккумуляции в понижениях.

Для каждого участка и территории с. Пospelikha в целом рассчитаны элементы водного баланса, при условии равномерного распределения суточного слоя осадков.

Приходная часть водного баланса территории включает в себя атмосферные осадки (дождевой и талый сток), потери при транспортировке из водонесущих коммуникаций, полив приусадебных участков.

За счет поступления дождевых (слой осадков за теплый период года = 183 мм) и талых (запас воды в снежном покрове к началу снеготаяния = 49.1 мм) вод, среднегодовой объем поверхностных вод, образующихся в границах водосборных областей составляет 9 010 тыс. м³, а на селитебных территориях с. Пospelиха – 3 217 тыс. м³. Сток отводится по рельефу, существующим каналам и частично скапливается в локальных понижениях. Средний суточный слой осадков для теплого периода и периода снеготаяния различной обеспеченности представлены в таблице 2.

В настоящее время на территории с. Пospelиха имеются централизованные системы холодного водоснабжения, водоотведения и теплоснабжения. Износ сетей значительный до 80%, особенно канализационных, что способствует увеличению потерь воды при транспортировке и, соответственно, пополнению грунтовых вод [Схема..., 2023; Схема теплоснабжения котельных № 1..., 2024; Схема теплоснабжения котельных №3..., 2024]. Среднегодовое значение потерь, согласно данным статистической отчетности [Автоматизированная..., 2024], составляет 9.52 тыс. м³/год. За последние пять лет данный показатель увеличился в 11 раз.

Полив приусадебных участков осуществляется, как правило, ручным методом. В с. Пospelиха преобладает усадебная застройка с участками для ведения личного подсобного хозяйства. Количество участков и их размер определены по космоснимку Google по состоянию на июнь 2022 г. в программе QGIS: 2 569 участков с средней площадью 0.07 га (из которых около 0.05 га, приходится на посадки плодово-ягодных и овощных культур). Поливочный сезон длится 123 дня с мая по сентябрь, из которых в среднем 54 дня с дождем. Расход воды на полив неравномерен в течение сезона: уменьшается ближе к концу и в целом зависит от погодных условий. Для расчета водного баланса число дней с поливом принято – 69. Таким образом, для полива всех приусадебных участков необходимо 42 тыс. м³ воды за поливочный сезон.

Расходная часть баланса представлена испарением и фильтрацией.

Среднее многолетнее испарение с поверхности суши для территории с. Пospelиха лимитируется количеством осадков и составляет около 300 мм. Испарение зимой незначительно, летом наибольшее в июле – 54 мм. Со всей селитебной территории в среднем за год испаряется 12 833 тыс. м³.

Таблица 2
Среднесуточный слой осадков различной обеспеченности для с. Пospelиха
Table 2
Average daily precipitation layer of varying reliability for Pospelikha village

Слой осадков:	Обеспеченность, %								
	5	10	25	39	63	80	86	95	99
за теплый период года, мм	1.54	1.28	0.95	0.79	0.61	0.51	0.46	0.39	0.33
за холодный период года, мм	9.43	7.83	5.81	4.86	3.75	3.10	2.82	2.40	2.03

Фильтрационные свойства определяются литологическим составом покровных отложений, которые практически повсеместно представлены суглинками с коэффициентом фильтрации (Кф) 0.3 м/сут. Локально встречаются участки с глиняными ($K_f \leq 0.001$ м/сут) и супесчаными ($K_f = 0.1$ м/сут) отложениями [Технико-экономическое..., 1992; Отчет..., 2012; Электронный каталог..., 2024]. При среднегодовом суточном слое дождевого стока (соответствует 39% обеспеченности) на суглинистых грунтах в сутки фильтруется только 163 м³ поступившей воды, остальной объем стекает по рельефу в понижения. Среднегодовой объем фильтрации суточного слоя составляет 0.7% (66 тыс. м³) от объема поступивших осадков.

Годовое соотношение приведенных элементов водного баланса территории с. Пospelиха для среднегодовых значений отрицательное. Новразрезе сезонов года для холодного периода и периода снеготаяния баланс положительный и составляет 1064 тыс. м³/г. Для теплого периода – отрицательный и равен -3 702 тыс. м³/г., а положительного значения достигает только при 10% обеспеченности.

В условиях аккумуляции стока в понижениях время и объемы фильтрации увеличиваются, а испарение уменьшается. Так для суглинистых грунтов с. Пospelиха столб воды размером в один кубический метр профильтруется на глубину один метр в течение четырех дней. Доля талого стока, скатывающегося по рельефу, может составлять 80–90% от общего объема в зависимости от степени обеспеченности. В среднем на конец периода снеготаяния

данный объем составляет 174 тыс. м³. Атмосферные осадки теплого периода при среднегодовых значениях испаряются в течение суток, но при 5–10% обеспеченности, при ливневых осадках доля аккумулирующихся вод составляет 14–16% (в среднем 9 тыс. м³/сут).

Климатические изменения вносят существенный вклад в водный баланс территории. При условии увеличения увлажнения прогнозируется рост площадей существующих участков подтопления и появление новых.

Для минимизации негативного воздействия вод необходимо перехватывать и отводить поверхностный сток, поступающий на территорию села. В связи с чем, предлагаются основные мероприятия, направленные на реконструкцию существующей дренажной системы, включающие расчистку русел и откосов каналов от древесно-кустарниковой и травянистой растительности, коммунально-бытовых отходов и строительного мусора, их углубление и берегоукрепление. Сбор стока также предлагается организовать с помощью строительства боковых канав вдоль улично-дорожной сети, с обустройством дорожных водопропускных сооружений через пересекающиеся улицы.

При реализации данных мероприятий величина минимального понижения грунтовых вод должна составить 2–3 м. Данные каналы и канавы должны осушить существующие места аккумуляции воды и сократить объемы требуемой фильтрации.

Для увеличения эффективности основных средств инженерной защиты рекомендуется использовать допол-

нительные меры по фитомелиорации и агролесотехнические мероприятия. На осушаемых территориях актуально устройство биодренажа на основе использования видов растений, активно поглощающих влагу (береза, ива, тополь, вяз, ясень, шелковица и т.д.) [Межерицкий, Лукьянова, 2020].

Заключение

Село Пospелиха на протяжении многих лет подвергается подтоплению. Реализация ряда инженерных решений в 1990-х гг. позволила на некоторое время минимизировать негативное воздействие грунтовых вод, но в последние годы проблема усилилась. Зона подтопления охватывает жилую застройку в восточной, центральной и западной частях села. Причинами усиления негативных процессов являются климатические изменения, плоский рельеф и особенности литологии поверхностных отложений, а также антропогенное влияние на формирование поверхностного стока.

Изотопный анализ подтвердил концепцию преимущественно атмосферно-дождевого происхождения вод в дренажных системах с. Пospелиха, что не противоречит ранее известным по литературным источникам [Ренна, 2016; Feng, 2022; Papina et al., 2023; Папина и др., 2025]

причинам подтопления территории. Анализ соотношения составляющих водного баланса показал, что в среднем за год расходная часть превалирует над приходной – основная доля водных масс в течении теплого периода испаряется. Лишь при 10% обеспеченности и менее водный баланс имеет положительные значения. За счет талого стока весной, ливневых или продолжительных дождей летом, а также слабой фильтрационной способности грунтов поверхностные воды накапливаются в локальных понижениях, способствуя увеличению времени испарения воды с поверхности и объема фильтрации, что приводит к поднятию уровня грунтовых вод. Дополнительным фактором развития проблемы подтопления территорий является искусственное (антропогенное) подпитывание грунтов.

В качестве основного инженерного решения по защите территории с. Пospелиха от подтопления предлагается дренажная система, которая в настоящий момент требует реконструкции и расширения, а также совмещения с сетью дождевой канализации. Реализация указанных мероприятий обеспечит эффективный отвод поверхностного стока с территории населенного пункта и предотвратит формирование локальных зон аккумуляции поверхностных вод.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare that they have no conflict of interests.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИВЭП СО РАН.

Список литературы

Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО) [Электронный ресурс]. URL: <https://gmvo.skniivh.ru/> (дата обращения: 02.09.2024).

Атлас теплового баланса Земного шара / Ред. М.И. Будыко. Международный Геофизический комитет при Президенте Академии наук СССР, Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, 1963.

Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных (ВНИИГМИ-МЦД) [Электронный ресурс]. URL: <http://meteo.ru/> (дата обращения: 05.07.2024).

Гольдберг В.М. Взаимосвязь загрязнения подземных вод и природной среды. Ленинград: Гидрометеиздат, 1987. 248 с.

Государственная геологическая карта Российской Федерации М-44-IV (Рубцовск). Издание второе. ФГБУ «ВСГЕИ», 2019.

Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды в Алтайском крае в 2024». Барнаул, 2025. 180 с.

Елизаров Н.В., Попов В.В., Семендяева Н.В.. Современный гидроморфизм солонцов лесостепной зоны Западной Сибири // Почвоведение. 2020. № 12. С. 1451–1459.

Межеричкий С.И., Лукьянова Т.И. Биодренаж в ландшафтной архитектуре Донбасса: польза + красота // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2020. № 3 (143). С. 26–29.

Мелиоративные и водохозяйственные проблемы Сибири: сб. науч. тр. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1989. 232 с.

Нормы расходов воды потребителей систем сельскохозяйственного водоснабжения ВНТП-Н-97. Утверждены Минсельхозпродом РФ от 14 февраля 1995 г. Протокол НТС №1 [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200030871> (дата обращения: 14.04.2024).

Орлова Е.С., Рыбкина И.Д. Оценка фактического водопотребления населения сельских поселений Обь-Иртышского междуречья // Географическая среда и живые системы. 2025. № 1. С. 67–86. doi: 10.18384/2712-7621-2025-1-67-86

Отчет НИР по теме: «Разработка отдельных разделов паспорта климатической безопасности Алтайского края» / науч. рук. д.б.н., проф. Пузанов А.В., отв. исполнитель Резников В.Ф. Барнаул: ИВЭП СО РАН, 2022. 269 с.

Отчет НИР ИВЭП СО РАН по теме «Разработка программы на выполнение научно-исследовательских и изыскательских работ, направленных на минимизацию или ликвидацию негативного воздействия вод – подтопление территории села Пospelиха Пospelихинского района Алтайского края» / науч. рук. д.б.н. Пузанов А.В., д.г.н. Рыбкина И.Д., отв. исп. Резников В.Ф. Барнаул, 2024. 79 с.

Отчет НИР ИВЭП СО РАН по теме «Разработка программы на выполнение научно-исследовательских и изыскательских работ, направленных на минимизацию или ликвидацию негативного воздействия вод – подтопление территории г. Рубцовска» / отв. исп. Резников В.Ф. Барнаул, 2018. 46 с.

Отчет о результатах оценки запасов подземных вод действующего водозабора ЗАО «ПМК» на Пospelихинском участке в селе Пospelиха Пospelихинского района Алтайского края. Лицензия БАР 01017 ВЭ. Отчет по договору с ЗАО «ПМК» от 15.02.2012 г. № 99. Барнаул, 2012. 45 с.

Отчет о результатах работ по объекту «Государственный мониторинг состояния недр территории Сибирского федерального округа (Алтайский край) в 2014–2015 гг.». Отчет по договору №5/2013 от 01.10.2013 г. Боровиха, 2015.

Отчет по гидрогеологическому доизучению и мониторингу водозабора открытого акционерного общества «Пospelихинский комбинат хлебопродуктов» в селе Пospelиха с целью оценки запасов подземных вод за 2008 –2010 годы. Барнаул, 2011.

Папина Т.С., Эйрих А.Н., Орлова Е.С., Рыбкина И.Д. Изотопный состав подземных вод территории бессточной области Обь-Иртышского междуречья // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2025. Т. 336, № 4. С. 212–224. doi: 10.18799/24131830/2025/4/4684

Рекомендации по расчету систем сбора, отведения и очистки поверхностного стока селитебных территорий, площадок предприятий и определению условий выпуска его в водные объекты. Методическое пособие / Ред. Ю.А. Меншутин, Л.М. Верещагина, А.С. Керин, Е.В. Фомичёва, А.Ю. Логунова. НИИ ВОДГЕО. Москва, 2015. 146 с.

Рубцовск. Генеральный план города. Пояснительная записка [Текст] / ФГУП Российский государственный научно-исследовательский и проектный институт урбанистики. СПб, 2004.

СП 42.13330 «Свод правил. Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений. Актуализированная редакция СНиП 2.07.01-89*»: утв. Приказом Минстроя России от 30.12.2016 №1034/пр // СПС КонсультантПлюс.

СП 104.13330. «Инженерная защита территории от затопления и подтопления». Актуализированная редакция СНиП 2.06.15-85: утв. Приказом Минстроя России от 16.12.2016 №964/пр (ред. от 23.12.2020) // СПС КонсультантПлюс.

СП 116.13330 «Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов»: утв. Приказом Минрегиона России от 30.06.2012 г. № 274 (ред. от 30.12.2020) // СПС КонсультантПлюс.

Стратегия пространственного развития Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом до 2036 года. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 28 декабря 2024 г. № 4146-р [Электронный ресурс]. URL: https://www.economy.gov.ru/material/directions/regionalnoe_razvitie/strategicheskoe_planirovanie_prostranstvennogo_razvitiya/strategiya_prostranstvennogo_razvitiya_rossii_do_2030_goda_s_prognozom_do_2036_goda/ (дата обращения: 04.08.2025).

Схема водоснабжения и водоотведения Муниципального образования Пospelихинский Центральный сельсовет Пospelихинского района Алтайского края на период до 2026 года. Постановление Администрации Пospelихинского района № 218 от 10.05.2023 г.

Схема теплоснабжения котельных № 1, № 6, № 7, № 9, № 10 муниципального образования Поспелихинский Центральный сельсовет Поспелихинского района Алтайского края на период до 2035 года. 2024. [Электронный ресурс]. URL: <https://pospelixa-adminoffical.gosuslugi.ru/spravochnik/teplosnabzhenie/> (дата обращения: 29.05.2025).

Схема теплоснабжения котельных №3 РОВД, Модульная ПМК, котельная № 75 муниципального образования Поспелихинский Центральный сельсовет Поспелихинского района Алтайского края на период до 2026 года. 2024. [Электронный ресурс]. URL: <https://pospelixa-adminoffical.gosuslugi.ru/spravochnik/teplosnabzhenie/> (дата обращения: 29.05.2025).

Технико-экономическое обоснование на проектирование защитных мероприятий от подтопления р.п. Поспелиха Поспелихинского района Алтайского края. АлтайГипроводхоз, 1992.

Электронный каталог учетных карточек буровых на воду скважин // ФГБУ «РОСГЕОЛФОНД». [Электронный ресурс]. URL: <https://rfgf.ru/bur/> (дата обращения: 24.07.2025).

Feng M., Zhang W., Zhang S., Sun Z., Li Y., Huan Y., Wang W., Qi P., Zou Y., Jiang M. The role of snowmelt discharge to runoff of an alpine watershed: Evidence from water stable isotopes // Journal of Hydrology. 2022. Vol. 604. P. 127209. doi: 10.1016/j.jhydrol.2021.127209

Papina T., Eirikh A., Kotovshchikov A., Noskova T. Impact of Snowmelt Conditions on the Isotopic Composition of the Surface Waters of the Upper Ob River during the Flood Period // Water. 2023. Vol. 15, Is. 11. P. 2096. doi: 10.3390/w15112096

Penna D., Meerveld H.J., Zuecco G., Fontana G.D., Borga M. Hydrological response of an Alpine catchment to rainfall and snowmelt events // Journal of Hydrology. 2016. Vol. 537. P. 382–397. doi: 10.1016/j.jhydrol.2016.03.040

References

Avtomatizirovannaya informatsionnaya sistema gosudarstvennogo monitoringa vodnykh ob'ektov (AIS GMVO) [The automated information data system of the state monitoring of the water bodies]. URL: <https://gmvo.skniivh.ru/> (accessed: 02.09.2024). (in Russian).

Atlas teplovogo balansa Zemnogo shara [Atlas of the Thermal Balance of the Earth] / Ed. M.I. Budyko. Mezhdunarodnyi Geofizicheskii komitet pri Prezidente Akademii nauk SSSR, Glavnaya geofizicheskaya observatoriya im. A.I. Voeikova, 1963. (in Russian).

Vserossiiskii nauchno-issledovatel'skii institut gidrometeorologicheskoi informatsii – Mirovoi tsentr dannykh (VNIIGMI-MTSD) [All-Russian Scientific Research Institute of Hydrometeorological Information - World Data Center]. URL: <http://meteo.ru/> (accessed: 05.07.2024). (in Russian).

Gol'dberg V.M. Vzaimosvyaz' zagryazneniyapodzemnykhvodiprirodnoisredy [Interrelation of groundwater pollution and the natural environment]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1987. 248 p. (in Russian).

Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii M-44-IV (Rubtsovsk) [State Geological Map of the Russian Federation M-44-IV (Rubtsovsk)]. Izdanie vtoroje. FGBU «VSGEI», 2019. (in Russian).

Gosudarstvennyi doklad «O sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchei sredy v Altaiskom krae v 2024 g.» [State Report «On the Condition and Protection of the Environment in the Altai Krai in 2024»]. Barnaul, 2025. 180 p. (in Russian).

Elizarov N.V., Popov V.V., Semendyaeva N.V. Sovremennyyi gidromorfizm solontsov lesostepnoi zony Zapadnoi Sibiri [Modern hydromorphism of solonetz soils in the forest-steppe zone of Western Siberia] // Pochvovedenie [Eurasian Soil Science]. 2020. № 12. P. 1451–1459. (in Russian).

Mezheritskii S.I., Luk'yanova T.I. Biodrenazh v landshaftnoi arkhitekture Donbassa: pol'za + krasota [Biadrainage in the landscape architecture of Donbass: benefits + beauty] // Vestnik Donbasskoi natsional'noi akademii stroitel'stva i arkhitektury [Bulletin of the Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2020. № 3 (143). P. 26–29. (in Russian).

Meliorativnye i vodokhozyaistvennye problemy Sibiri: sb. nauch. tr. [Reclamation and water management problems of Siberia]. Novosibirsk: Nauka. Sib. otd-nie, 1989. 232 p. (in Russian).

Normy raskhodov vody potrebitelei sistem sel'skokhozyaistvennogo vodosnabzheniya VNTP-N-97 [Norms of water consumption for users of agricultural water supply systems]. Utverzhdeny Minsel'khozprodrom RF ot 14 fevralya 1995 g. Protokol NTS №1 [Elektronnyi resurs]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200030871> (accessed: 14.04.2024). (in Russian).

Orlova E.S., Rybkina I.D. Otsenka fakticheskogo vodopotrebleniya naseleniya sel'skikh poselenii Ob'-Irtyskogo mezhdurech'ya [Assessment of actual water consumption by the population of rural settlements in the Ob-Irtys interfluve] // Geograficheskaya sreda i zhivye sistemy [Geographical Environment and Living Systems]. 2025. № 1. P. 67–86. (in Russian). doi: 10.18384/2712-7621-2025-1-67-86

Otchet NIR po teme: «Razrabotka otdel'nykh razdelov pasporta klimaticheskoi bezopasnosti Altaiskogo kraya» [Research report on the topic: «Development of specific sections of the climate safety passport for Altai Krai»] / nauch. ruk. d.b.n., prof. Puzanov A.V., otv. ispolnitel' Reznikov V.F. Barnaul: IVEHP SO RAN, 2022. 269 p. (in Russian).

Otchet NIR IVEP SO RAN po teme «Razrabotka programmy na vypolnenie nauchno-issledovatel'skikh i izyskatel'skikh rabot, napravlennykh na minimizatsiyu ili likvidatsiyu negativnogo vozdeistviya vod – podtoplenie territorii sela Pospelikha Pospelikhinskogo raiona Altaiskogo kraya» [Research report of the Institute of Water and Environmental Problems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences on the topic «Development of a program for conducting scientific research and exploratory work aimed at minimizing or eliminating the negative impact of water – flooding of the village Pospelikha in Pospelikhinsky District of Altai Krai»] / nauch. ruk. d.b.n. Puzanov A.V., d.g.n. Rybkina I.D., otv. isp. Reznikov V.F. Barnaul, 2024. 79 p. (in Russian).

Otchet NIR IVEP SO RAN po teme «Razrabotka programmy na vypolnenie nauchno-issledovatel'skikh i izyskatel'skikh rabot, napravlennykh na minimizatsiyu ili likvidatsiyu negativnogo vozdeystviya vod – podtoplenie territorii g. Rubtsovsk» [Research report of the Institute of Water and Environmental Problems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences on the topic «Development of a program for conducting scientific research and exploratory work aimed at minimizing or eliminating the negative impact of water – flooding of the territory of Rubtsovsk city»] / otv. isp. Reznikov V.F. Barnaul, 2018. 46 p. (in Russian).

Otchet o rezul'tatakh otsenki zapasov podzemnykh vod deistvuyushchego vodozabara ZAO «PMK» na Pospelikhinskom uchastke v sele Pospelikha Pospelikhinskogo raiona Altaiskogo kraya [Report on the results of the assessment of groundwater reserves of the active water intake of JSC «PMK» at the Pospelikha site in the village of Pospelikha, Pospelikhinsky District, Altai Krai]. Litsenziya BAR 01017 VEH. Otchet po dogovoru s ZAO «PMK» ot 15.02.2012 g. № 99. Barnaul, 2012. 45 p. (in Russian).

Otchet o rezul'tatakh rabot po ob'ektu «Gosudarstvennyi monitoring sostoyaniya nedr territorii Sibirskogo federal'nogo okruga (Altaiskii krai) v 2014–2015 gg.» [Report on the results of work on the object «State monitoring of the condition of subsoil in the territory of the Siberian Federal District (Altai Krai) in 2014–2015»]. Otchet po dogovoru №5/2013 ot 01.10.2013 g. Borovikha, 2015. (in Russian).

Otchet po gidrogeologicheskomu doizucheniyu i monitoringu vodozabara otkrytogo aktsionernogo obshchestva «Pospelikhinskii kombinat khleboproduktov» v sele Pospelikha s tsel'yu otsenki zapasov podzemnykh vod za 2008–2010 gody [Report on hydrogeological additional study and monitoring of the water intake of the open joint-stock company “Pospelikhinsky Bread Products Plant” in the village of Pospelikha for the purpose of assessing groundwater reserves for 2008–2010]. Barnaul, 2011. (in Russian).

Papina T.S., Ehirikh A.N., Orlova E.S., Rybkina I.D. Izotopnyi sostav podzemnykh vod territorii besstochnoi oblasti Ob'-Irtyskogo mezhdurech'ya [Isotopic composition of groundwater in the territory of the endorheic basin of the Ob-Irtys interfluve] // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov [Bulletin of Tomsk Polytechnic University. Geo Resources Engineering]. 2025. Vol. 336, no. 4. P. 212–224. (in Russian). doi: 10.18799/24131830/2025/4/4684

Rekomendatsii po raschetu sistem sbora, otvedeniya i ochistki poverkhnostnogo stoka selitebnykh territorii, ploshchadok predpriyatii i opredeleniyu uslovii vypuska ego v vodnye ob'ekty [Recommendations for the calculation of systems for collection, diversion, and treatment of surface runoff from residential areas, industrial sites, and determination of conditions for its discharge into water bodies]. Metodicheskoe posobie / Eds. Yu.A. Menshutina, L.M. Vereshchagina, A.S. Kerin, E.V. Fomicheva, A.Yu. Logunova. Moskva, 2015. 146 p. (in Russian).

Rubtsovsk. General'nyi plan goroda. Poyasnitel'naya zapiska [Rubtsovsk. General city plan. Explanatory note] / FGUP Rossiiskii gosudarstvennyi nauchno-issledovatel'skii i proektnyi institut urbanistiki. SPb, 2004. (in Russian).

SP 42.13330 «Svod pravil. Gradostroitel'stvo. Planirovka i zastroika gorodskikh i sel'skikh poselenii. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIP 2.07.01-89» [SP 42.13330 «Code of Practice. Urban Planning. Planning and Development of Urban and Rural Settlements. Updated edition of SNIP 2.07.01-89»]: utv. Prikazom Ministroya Rossii ot 30.12.2016 №1034/pr // SPS Konsul'tantPlyus. (in Russian).

SP 104.13330. «Inzhenernaya zashchita territorii ot zatopleniya i podtopleniya» [SP 104.13330 «Engineering protection of territories from flooding and waterlogging»]. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIP 2.06.15-85: utv. Prikazom Ministroya Rossii ot 16.12.2016 №964/pr (red. ot 23.12.2020) // SPS Konsul'tantPlyus. (in Russian).

SP 116.13330 «Inzhenernaya zashchita territorii, zdanii i sooruzhenii ot opasnykh geologicheskikh protsessov» [SP 116.13330 «Engineering protection of territories, buildings, and structures from hazardous geological processes»]: utv. Prikazom Minregiona Rossii ot 30.06.2012 g. № 274 (red. ot 30.12.2020) // SPS Konsul'tantPlyus. (in Russian).

Strategiya prostranstvennogo razvitiya Rossiiskoi Federatsii na period do 2030 goda s prognozom do 2036 goda [Spatial Development Strategy of the Russian Federation for the period up to 2030 with a forecast up to 2036]. Utverzhdena rasporyazheniem Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 28 dekabrya 2024 g. № 4146-r. URL: https://www.economy.gov.ru/material/directions/regionalnoe_razvitie/strategicheskoe_planirovanie_prostranstvennogo_razvitiya/strategiya_prostranstvennogo_razvitiya_rossii_do_2030_goda_c_prognozom_do_2036_goda/ (accessed: 04.08.2025). (in Russian).

Skhema vodosnabzheniya i vodootvedeniya Munitsipal'nogo obrazovaniya Pospelikhinskii Tsentral'nyi sel'sovet Pospelikhinskogo raiona Altaiskogo kraia na period do 2026 goda [Water supply and sanitation scheme of the municipal formation Pospelikhinsky Central rural council of Pospelikhinsky District, Altai Krai for the period up to 2026]. Postanovlenie Administratsii Pospelikhinskogo raiona № 218 ot 10.05.2023 g. (in Russian).

Skhema teplosnabzheniya kotel'nykh № 1, № 6, № 7, № 9, № 10 munitsipal'nogo obrazovaniya Pospelikhinskii Tsentral'nyi sel'sovet Pospelikhinskogo raiona Altaiskogo kraia na period do 2035 goda [Heating supply scheme for boiler houses No. 1, No. 6, No. 7, No. 9, No. 10 of the municipal formation Pospelikhinsky Central rural council, Pospelikhinsky District, Altai Krai for the period up to 2035]. 2024. URL: <https://pospelixa-adminoffical.gosuslugi.ru/spravochnik/teplosnabzhenie/> (accessed: 29.05.2025). (in Russian).

Skhema teplosnabzheniya kotel'nykh №3 ROVD, Modul'naya PMK, kotel'naya № 75 munitsipal'nogo obrazovaniya Pospelikhinskii Tsentral'nyi sel'sovet Pospelikhinskogo raiona Altaiskogo kraia na period do 2026 goda [Heating supply scheme for boiler house No. 3 of the Department of Internal Affairs, Modular PMK, and boiler house No. 75 of the municipal formation Pospelikhinsky Central rural council, Pospelikhinsky District, Altai Krai for the period up to 2026]. 2024. URL: <https://pospelixa-adminoffical.gosuslugi.ru/spravochnik/teplosnabzhenie/> (accessed: 29.05.2025). (in Russian).

Tekhniko-ehkonomicheskoe obosnovanie na proektirovanie zashchitnykh meropriyatii ot

podtopleniya r.p. Pospelikha Pospelikhinskogo raiona Altaiskogo kraia [Feasibility study for the design of protective measures against flooding in the urban-type settlement Pospelikha, Pospelikhinsky District, Altai Krai]. AltaIGiprovodkhoz, 1992. (in Russian).

Ehlektronnyi katalog uchetnykh kartochek burovykh na vodu skvazhin [Electronic catalog of inventory cards for water boreholes] // FGBU «ROSGEOLFOND». URL: <https://rfgf.ru/bur/> (accessed: 24.07.2024). (in Russian).

Feng M., Zhang W., Zhang S., Sun Z., Li Y., Huan Y., Wang W., Qi P., Zou Y., Jiang M. The role of snowmelt discharge to runoff of an alpine watershed: Evidence from water stable isotopes // Journal of Hydrology. 2022. Vol. 604. P. 127209. doi: 10.1016/j.jhydrol.2021.127209

Papina T., Eirikh A., Kotovshchikov A., Noskova T. Impact of Snowmelt Conditions on the Isotopic Composition of the Surface Waters of the Upper Ob River during the Flood Period // Water. 2023. Vol. 15, Is. 11. P. 2096. doi: 10.3390/w15112096

Penna D., Meerveld H.J., Zuecco G., Fontana G.D., Borga M. Hydrological response of an Alpine catchment to rainfall and snowmelt events // Journal of Hydrology. 2016. Vol. 537. P. 382–397. doi: 10.1016/j.jhydrol.2016.03.040

NATURAL AND ANTHROPOGENIC FACTORS IN THE DEVELOPMENT OF FLOODING PROCESSES IN RURAL RESIDENTIAL AREAS OF THE ALTAI TERRITORY

E.S. Orlova, A.V. Golovin, M.S. Gubarev, V.F. Reznikov, I.D. Rybkina

Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul,

E-mail: el.orlova11@yandex.ru

The article examines natural and anthropogenic factors determining the development of flooding processes in rural populated areas of Altai Krai, using Pospelikha village as a case study, where since the 1990s, the intensification of negative flooding processes has been observed. It studies the features of natural, climatic, and hydrogeological conditions and highlights the main anthropogenic causes contributing to the development of flooding processes. Based on field research data, an inventory of existing drainage systems in Pospelikha has been conducted, flooding zones identified, and isotopic analysis of drainage waters performed to determine their genesis. A generalized assessment of the components of water balance calculations for the rural settlement area has been carried out for different reliability levels. During the average annual precipitation, a positive water balance is observed in the cold period due to snowmelt runoff, while a negative balance occurs in the warm period due to predominant evaporation. Scientific directions for engineering protection aimed at lowering and stabilizing groundwater levels and draining local accumulation zones have been substantiated.

Keywords: natural and anthropogenic factors; flood zones; drainage systems; engineering protection of the territory; groundwater.

Received November 5, 2025. Accepted: November 27, 2025

Сведения об авторах

Орлова Елена Сергеевна – младший научный сотрудник лаборатории водных ресурсов и водопользования Института водных и экологических проблем СО РАН. Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, д. 1. ORCID: 0009-0004-0650-4055. E-mail: el.orlova11@yandex.ru.

Головин Антон Владимирович – младший научный сотрудник лаборатории водных ресурсов и водопользования Института водных и экологических проблем СО РАН. Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, д. 1. ORCID: 0000-0003-0946-9393. E-mail: golovin.anton.vl@gmail.com.

Губарев Михаил Сергеевич – ведущий инженер Института водных и экологических проблем СО РАН. Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, д. 1. ORCID: 0000-0003-0693-6371. E-mail: maik1980@bk.ru.

Резников Виктор Федорович – ведущий инженер Института водных и экологических проблем СО РАН. Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, д. 1. ORCID: 0009-0003-3681-6802. E-mail: rvf@iwep.ru.

Рыбкина Ирина Дмитриевна – доктор географических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией водных ресурсов и водопользования Института водных и экологических проблем СО РАН. Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, д. 1. ORCID: 0000-0002-0081-9652. E-mail: irina.rybkina@mail.ru.

Information about the authors

Orlova Elena Sergeevna – Junior researcher at the Laboratory of Water Resources and Water Management of the Institute for Water and Environmental Problems SB RAS (IWEP SB RAS). 1, Molodezhnaya St., 656038 Barnaul, Russia. ORCID: 0009-0004-0650-4055. E-mail: el.orlova11@yandex.ru.

Golovin Anton Vladimirovich – Junior researcher at the Laboratory of Water Resources and Water Management of the Institute for Water and Environmental Problems SB RAS (IWEP SB RAS). 1, Molodezhnaya St., 656038 Barnaul, Russia. ORCID: 0000-0003-0946-9393. E-mail: golovin.anton.vl@gmail.com.

Gubarev Mikhail Sergeevich – Leading engineer of the Institute for Water and Environmental Problems SB RAS (IWEP SB RAS). 1, Molodezhnaya St., 656038 Barnaul, Russia. ORCID: 0000-0003-0693-6371. E-mail: maik1980@bk.ru.

Reznikov Viktor Fedorovich – Leading engineer of the Institute for Water and Environmental Problems SB RAS (IWEP SB RAS). 1, Molodezhnaya St., 656038 Barnaul, Russia. ORCID: 0009-0003-3681-6802. E-mail: rvf@iwep.ru.

Rybkina Irina Dmitrievna – Dr Sc. in Geography, Associate Professor, leading researcher, Head of the Department Laboratory of Water Resources and Water Use of the Institute for Water and Environmental Problems SB RAS (IWEP SB RAS). 1, Molodezhnaya St., 656038 Barnaul, Russia. ORCID: 0000-0002-0081-9652. E-mail: irina.rybkina@mail.ru.

**Раздел 2 ГИДРОЛОГИЯ СУШИ, ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ,
ГИДРОХИМИЯ**

**Section 2 HYDROLOGY OF LAND, WATER RESOURCES,
HYDROCHEMISTRY**

УДК [556.51+911.5]: 519.85

СИСТЕМНО-АНАЛИТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЕЖЕГОДНЫХ МАКСИМУМОВ ВЕСЕННИХ ПОЛОВОДИЙ НА ГОРНЫХ РЕКАХ

Ю.Б. Кирста, А.В. Пузанов, И.А. Трошкова

Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул,

E-mail: kirsta@iwep.ru, puzanov@iwep.ru, egorka_iren@mail.ru

Весенние половодья на горных реках представляют серьезную угрозу хозяйственной деятельности местного населения. Они характеризуются максимальными значениями речного стока и наибольшим, хотя и кратковременным затоплением территорий близ рек. Используя методологию системно-аналитической обработки больших выборок гидрометеорологических данных, мы проанализировали формирование половодий на 34 реках Алтае-Саянской горной страны за период 1951–2023 гг. Разработана математическая модель максимумов их весеннего стока и оценена ее чувствительность к факторам среды. С помощью модели количественно охарактеризовано влияние ландшафтов, зимне-весенних температур воздуха и осадков на ежегодные максимальные значения стока у каждой реки. Для этого рассчитаны вклады естественных вариаций факторов среды в дисперсию указанных значений. Вклады зимних и апрельских осадков, зимних и апрельских температур воздуха в данную дисперсию составили 34.7, 21.9, 7.8 и 6.1% соответственно. Дано объяснение полученных сложных зависимостей ежегодных максимумов весеннего стока от метеорологических факторов и приходящей солнечной радиации.

Ключевые слова: системно-аналитическое моделирование; горные реки; весеннее половодье; метеорологические факторы; ландшафты; Алтай; Саяны.

DOI: 10.24412/2410-1192-2025-17905

Дата поступления: 14.11.2025. Принята к печати: 27.11.2025

Проблема неблагоприятного воздействия речных половодий и наносимого ими ущерба становится все более острой из-за повсеместной дестабилизации метеорологических процессов в условиях меняющегося климата [Медведков, Штриплинг, 2018]. Для принятия эффективных мер по снижению такого ущерба требуется разработка прогнозных моделей, адекватно характеризующих гидрологические процессы на водосборных территориях [Brinkerhoff et al., 2020; Langhammer,

Bernsteinova, 2020; Dibike et al., 2021]. Особые сложности здесь представляют горные территории, имеющие сложную орографию и контрастную мозаику климатических зон.

Привлечение современных методов исследований – нейронных сетей и искусственного интеллекта – пока не позволяет адекватно охарактеризовать реальные физические процессы и воздействие факторов среды на половодья [Fleming et al., 2021; Bentivoglio et al., 2022; Palchevsky et al., 2023]. Одной из трудных задач является адекватный учет влияния на половодья климатических факторов [Dikshit et al., 2024]. В определенной степени помогает решению проблем объединение различных типов математических моделей в единые ансамбли [Akbarian et al., 2022; Karim et al., 2023].

Методология системно-аналитического моделирования сложноорганизованных природных систем [Кирста, Кирста, 2014] отличается от других методов анализа данных, в том числе от «intelligence methods» [Jayalakshmi, Mantha, 2021]. Она позволяет выявить и количественно охарактеризовать реальную динамику взаимосвязанных физических, биогеохимических и других процессов в изучаемых системах. При этом количественно описывается даже слабое влияние факторов среды на исследуемые процессы, в нашем случае на формирование половодий. Методология разрабатывалась около двадцати лет и в англоязычных публикациях авторов называлась как «system-analytical modeling» и «deep process-data mining» [Kirsta, 2006; Kirsta, Troshkova, 2023a]. Ее эффективность многократно проверена при разработке адек-

ватных математических моделей, описывающих многолетнюю динамику водного и гидрохимического стоков с горных водосборов под воздействием климатических факторов и условий среды [Kirsta et al., 2020; Kirsta, Troshkova, 2023a, b; Кирста, Трошкова, 2023].

Материалы и методы

Системно-аналитическое моделирование формирования весенних половодий с построением математической модели их максимального стока выполняется нами на основе многолетних рядов гидрометеорологических наблюдений. В ходе исследований рассчитывается пространственно обобщенная межгодовая динамика нормированных среднемесячных температур воздуха и месячных осадков, используемая затем при количественной оценке влияния факторов среды на указанный сток. Методология моделирования включает пять основных этапов.

На первом этапе определяются иерархически подчиненные природные системы, в которых должны анализироваться нужные процессы. В нашем случае наиболее крупной системой является Алтае-Саянская горная страна с общими для нее масштабными атмосферными процессами, метеорологические данные о которых используются в качестве входных переменных разрабатываемой модели. Подчиненными гидрологическими системами являются водосборные бассейны отдельных рек. Еще меньшие природные системы представлены отдельными ландшафтами как достаточно автономными компонентами бассейновых гидрологических систем.

На втором этапе анализа осуществляется подготовка гидрологических, метеорологических и других данных, ассоциированных со стоком рассматриваемых рек. Согласуются шаги описания исследуемых процессов по времени и пространству. Выбранный нами шаг описания гидрометеорологических процессов равняется одному месяцу, а для выделения ландшафтов и расчета их площадей применяются топографические карты масштаба 1:200000. При обработке картографических данных о рельефе и ландшафтной структуре речных бассейнов используется геоинформационная платформа ArcGIS 10.2. Для перехода от измеряемых на метеостанциях точечных метеорологических характеристик к требующимся площадным выполняется нормировка среднемесячных температур воздуха и месячных осадков на их среднееголетние значения “in situ” с последующим обобщением (усреднением) нормированных данных по пространству (метеостанциям). Полученная многолетняя динамика обобщенных таким образом характеристик принимается одинаковой для всей Алтае-Саянской горной страны. Дальнейшее использование обобщенных нормированных метеорологических данных требует нормировки и стока рек. Это выполняется делением ежегодно наблюдаемых весной максимальных расходов воды у каждой реки на их среднееголетнее значение для этой же реки. Далее вместо термина «расход воды» будет использоваться «сток», так как нами анализируются водосборные бассейны и их ландшафты, для которых словосочетания «расход воды с бассейна» или «расход воды с ландшафта» использо-

вать не принято. В результате сток всех рек выражается в единых нормированных единицах (подобны модульному коэффициенту стока), что обеспечивает последующую разработку общей системно-аналитической модели стока рек вне зависимости от его исходно большой или малой величины. Обратный переход к обычным единицам измерений метеорологических характеристик (°C, мм) и речного стока (м³/с) осуществляется простейшим умножением на их среднееголетние значения.

При выполнении третьего этапа создается сама системно-аналитическая модель, описывающая исследуемые сложноорганизованные системы – у нас это ежегодное формирование максимумов весеннего стока с речных бассейнов и их ландшафтов. Данный этап осуществляется в программной среде MATLAB. Идентификация и верификация создаваемых вариантов модели реализуются через решение обратной математической задачи по имеющимся гидрометеорологическим данным. Вариант с наименьшим расхождением между рассчитываемыми и наблюдаемыми значениями стока рек принимается в качестве окончательной модели.

Четвертый этап предназначен для оценки адекватности (точности) модели и ее чувствительности к вариациям факторов среды. Адекватность рассчитывается согласно уравнению [Kirsta, Troshkova, 2023a; Кирста, Трошкова, 2023]:

$$A = S_{dif} / \sqrt{2} S_{obs}, \quad (1)$$

где A – критерий адекватности модели; S_{dif} – стандартное (среднеквадратичное) отклонение для ее невязки (у нас это разности между нормированными рассчитываемыми

мыми и наблюдаемыми значениями стока рек); S_{obs} – стандартное отклонение у наблюдаемых данных (нормированного стока); $1\sqrt{2}$ – множитель. Критерий A связан с широко используемыми для оценки точности моделей показателями RSR и Нэша-Сатклифа NSE [Moriassi et al., 2007; Koch, Cherie, 2013] как $RSR = A\sqrt{2}$ и $NSE = 1 - RSR^2 = 1 - 2A^2$ и удобен для расчета

$$FS = (A')^2 - (A)^2 = \frac{(S'_{dif})^2 - (S_{dif})^2}{2(S_{obs})^2} = \frac{2(S_{fac})^2}{2(S_{obs})^2} = \frac{(S_{fac})^2}{(S_{obs})^2}, \quad (2)$$

где FS – чувствительность к естественным вариациям фактора среды; A' – значение A , полученное из (1) путем подстановки в модель случайным образом переставленных значений входного фактора вместо первоначально упорядоченных; $(S_{dif})^2$ – дисперсия разностей (невязки) между рассчитываемыми и наблюдаемыми величинами стока; $(S'_{dif})^2$ – эта же дисперсия, рассчитанная для случайно переставленных значений входного фактора; $(S_{obs})^2$ – дисперсия наблюдаемых величин стока; $(S_{fac})^2$ – вклад (доля) реальных вариаций этого фактора в $(S_{obs})^2$. Согласно (2) дисперсия от ошибок наблюдений за фактором входит одновременно в $(S'_{dif})^2$ и в $(S_{dif})^2$. Она вычитается в числителе (2) и не влияет на FS . При этом FS характеризует чувствительность речного стока только к реальным вариациям фактора, то есть степень его влияния на сток.

На пятом этапе создается прикладная версия разработанной математической модели, описывающая один конкретный гидрологический объект. Для этого из модели убираются все зависимости от факторов среды, изменения которых у выбранного объекта отсутствуют. Например, это изменения ландшафтной структуры выбранно-

чувствительности моделей FS к факторам среды.

Чувствительности модели к факторам среды оценивается как вклад (доля) реальных вариаций каждого фактора в дисперсию наблюдаемых максимальных значений стока. Расчет чувствительности/вкладов выполняется по уравнению [Kirsta, Troshkova, 2023b]:

го речного бассейна. Значения параметров для оставшихся факторов определяются заново через повторное решение обратной математической задачи. При этом сокращение числа параметров, очевидно, способствует повышению точности прикладной версии модели.

Регион исследований и исходные данные

Исследования выполнены на примере 34 средних и малых рек Алтае-Саянской горной страны, которая расположена в центре Азии в пределах 50–56° с.ш., 83–100° в.д. и занимает площадь около 2000000 км². Климат страны характеризуется длительной холодной зимой и коротким прохладным летом (табл.). Количество выпадающих осадков значительно меняется с высотой. На высотах 2500–3000 м северных склонов гор выпадает 1200–2500 мм осадков в год, на средних частях – до 600 мм, у подножия – около 200 мм [Гвоздецкий, Михайлов, 1987]. Контрастность климатической мозаики страны отражена в существовании на ее территории различных ландшафтно-климатических зон: ледников, гольцов, горных тундр и альпийских лугов на высокогорьях, хвойных лесов, степей и полупустынь на склонах и межгорных котловинах [Физико-географическое..., 1968].

Таблица

Среднемноголетние значения температур воздуха и осадков для Алтае-Саянской горной страны (по данным 11 реперных метеостанций за 1951–2023 гг.)

Table

Long-term average air temperatures and precipitation for the Altai-Sayan mountain country (according to 11 reference weather stations for 1951–2023)

Климатическая характеристика	Месяцы												Год
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Температуры, °C	-16.0	-14.6	-7.4	2.7	10.6	15.9	17.8	15.4	9.7	2.2	-7.2	-13.3	1.3
Осадки, мм	22.1	19.8	23.7	40.1	58.3	70.2	83.1	72.1	50.0	50.8	41.2	30.5	561.9

Средние и малые реки Алтае-Саянской горной страны представляют особую сложность для системно-аналитического моделирования, так как их водосборы отличаются сложным горно-котловинным рельефом, значительными вариациями температур и неравномерным выпадением осадков. Питание рек является смешанным снегово-дождевым и ледниковым, причем снеговое питание составляет более 50% их годового стока. Согласно данным наблюдений за расходами воды на анализируемых речных створах весенние половодья растянуты по времени и длятся с апреля по июнь при максимуме расходов воды в апреле в подавляющем большинстве случаев.

В ходе исследований использовались электронные базы гидрометеорологических наблюдений и другие связанные с ними данные (координаты речных створов, сроки наблюдений, переносы метеостанций и т.д.) открытого доступа. Непосредственно гидрологические данные были взяты с сайта Автоматизированной информационной системы государственного мониторинга водных объектов [Федеральное..., 2025], а также выбраны из материалов наблюдений Госкомгидромета СССР и

Росгидромета, опубликованных в Гидрологических ежегодниках (1955–1979) и более поздних справочниках «Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши».

Методология системно-аналитического моделирования нами реализована на примере наблюдаемых в 1951–2023 гг. максимальных расходов воды ($\text{м}^3/\text{с}$) в весенние половодья на 34 реках Алтае-Саянской горной страны. Из-за пропуска данных общий объем гидрологической выборки составил около 300 ежегодно наблюдаемых на реках в апреле максимальных расходов, что было достаточно для разработки их математической модели.

Гидрологические данные были дополнены среднемесячными температурами воздуха и месячными осадками по 11 реперным метеостанциям за 1951–2023 гг., информацией ГИС о ландшафтной структуре, площади и высоте ландшафтов в каждом речном бассейне [Kirsta, Troshkova, 2023b]. При этом ландшафты были разделены на 13 типологических групп [Кирста и др., 2011; Kirsta et al., 2020]. Большое количество одновременно анализируемых бассейнов позволило нивелировать их индивидуальные

особенности и определить общие закономерности гидрологических процессов для всей территории горной страны.

Результаты и обсуждение

Нормировка среднемесячных температур воздуха и месячных осадков на среднемноголетние значения “in situ” и их усреднение по Алтае-Саянской горной стране позволили получить единую для всей страны динамику этих метеорологических факторов, не зависящую от высоты местности [Kirsta et al., 2020]. Влияние температур воздуха, осадков, ландшафт-

ной структуры речных бассейнов и высоты самих ландшафтов найдено путем решения обратной математической задачи для системы из 300 уравнений. Каждое уравнение рассчитывало максимальное значение апрельского стока конкретной реки в конкретный год. При решении обратной задачи рассчитываемое значение стока заменялось на наблюдаемое, а неизвестными являлись параметры модели. После проверки различных вариантов зависимости стока рек от факторов среды, получена окончательная модель для максимумов весеннего стока [Kirsta, 2020]:

$$MRR^i = \sum_k \{a_k S_k^i P_1 H(c_1, c_1, 1, 1, c_2, c_3, T_1) H(c_4, c_4, 1, 1, c_5, c_6, h_k^i)\} + \sum_k \{b_k S_k^i P_2 H(c_7, c_7, 1, 1, c_8, c_9, T_2) H(c_4, c_4, 1, 1, c_5, c_6, h_k^i)\} + c_{10}, \quad (3)$$

где MRR^i – максимальный речной сток конкретного года, нормированный на свою среднемноголетнюю величину в бассейне i , $i=1-34$; первое и второе слагаемые в (3) характеризуют вклад в MRR^i от осадков за декабрь-март и апрель соответственно; параметры a_k , b_k определяют ту часть речного стока, которая формируется ландшафтом k , $k=1-13$; S_k^i – площадь ландшафта k , нормированная на площадь бассейна i ; h_k^i – средняя высота этого ландшафта, м БС;

P_1 , P_2 – отклонения нормированных месячных осадков за декабрь-март и апрель от своего среднего соответственно; T_1 , T_2 – аналогичные отклонения для температур воздуха за декабрь-март и апрель; $c_1, \dots, c_9$ – параметры, характеризующие влияние T_1 , T_2 и h_k^i на MRR^i ; c_{10} – увеличение ($c_{10} > 0$) или уменьшение ($c_{10} < 0$) MRR^i за счет подземных вод и вод трещиноватых пород; H – непрерывная кусочно-линейная функция:

$$H(X1, X2, Y1, Y2, Z1, Z2, X) = \begin{cases} Y1 + Z1(X - X1), & \text{if } X < X1 \\ \frac{Y2 - Y1}{X2 - X1}(X - X1) + Y1, & \text{if } \begin{cases} X \leq X < X2 \\ X1 \neq X2 \end{cases} \\ Y2 + Z2(X - X2), & \text{if } X \geq X2 \end{cases}, \quad (4)$$

где $X1$, $X2$, $Y1$, $Y2$, $Z1$, $Z2$ – параметры, определяемые в ходе решения обратной математической задачи; X – какая-либо переменная модели. Функция H с меняющимися значениями параметров позволяет аппроксимировать широкий спектр зависимостей между процессами и факторами среды.

На рисунке представлена полученная зависимость ежегодных максимумов весенних половодий MRR от метеорологических факторов. Мы видим естественное возрастание MRR с зимними осадками P_1 . Зависимость MRR от зимних температур воздуха T_1 более сложна.

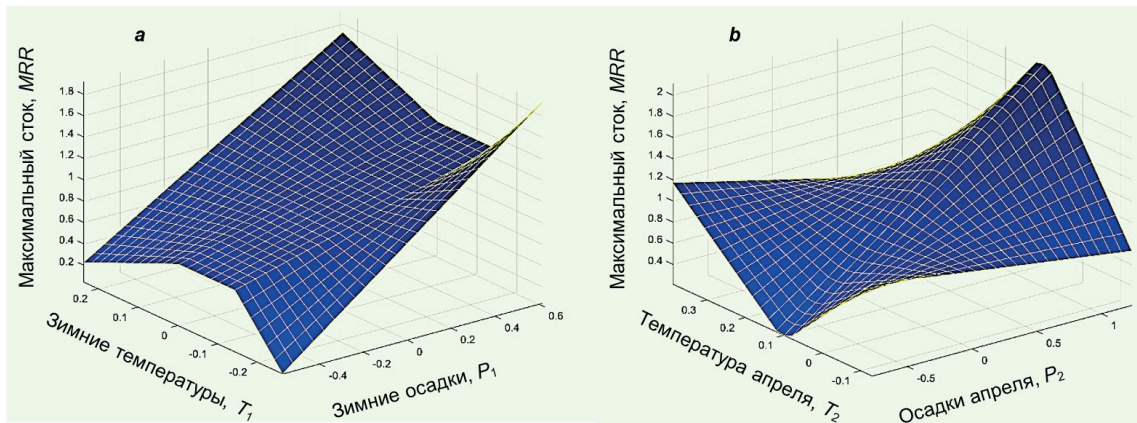


Рис. Зависимость ежегодных максимумов весенних половодий (MRR в (3)) от температур воздуха T_1 , T_2 и осадков P_1 , P_2 .

a – влияние метеоусловий декабря-марта, *b* – влияние метеоусловий апреля

Fig. Dependence of the annual maxima of spring runoff (MRR in (3)) on air temperatures T_1 , T_2 and precipitation P_1 , P_2 .

a – influence of December-March meteorological conditions, *b* – influence of April meteorological conditions

После холодных зим ($-0.25 < T_1 < 0$) и малых осадков $P_1 < 0$ величина MRR растет с температурами T_1 за счет более быстрого таяния снежного покрова под действием весенней солнечной радиации и «скатывания» талых вод с промерзших почв в реки. После теплых зим ($0 < T_1 < 0.25$) и $P_1 < 0$ величина MRR уменьшается с ростом T_1 из-за потерь талых вод на инфильтрацию в почвы, быстро оттаивающие весной. Этот же эффект имеет место после холодных зим ($-0.25 < T_1 < 0$) и $P_1 > 0$, когда значительный снежный покров препятствует глубокому промерзанию почв. В теплые зимы ($0 < T_1 < 0.25$) и $P_1 > 0$ значение MRR увеличивается с ростом T_1 из-за «скатывания» талых вод с увлажненных за зиму почв в реки.

Влияние весенних метеоусловий на ежегодные максимумы весенних половодий MRR также оказалось достаточно сложным (рис.). При невысоких весенних температурах $-0.1 < T_2 < 0.1$ и малых осадках $P_2 < 0$ (в горах выпадают в виде снега) MRR падает с увеличением T_2 из-за потерь талых вод на инфильтрацию в оттаивающие по-

чвы. При высоких температурах $0.1 < T_2 < 0.4$ и $P_2 < 0$ величина MRR увеличивается с T_2 в результате более активного таяния снежного покрова, преобладающего над промачиванием почв. Увеличение MRR с T_2 мы также видим при $-0.1 < T_2 < 0.1$ и больших осадках $P_2 > 0$, которые препятствуют оттаиванию почв, а значит, и потере талых вод на инфильтрацию. При высоких температурах $0.1 < T_2 < 0.4$ и больших осадках $P_2 > 0$ величина MRR падает с ростом T_2 из-за активного оттаивания почв и их промачивания талыми водами.

Рассмотрим значимость факторов среды, формирующих максимумы весенних половодий MRR в (3). Значимость фактора (иначе чувствительность модели) характеризуется нами как рассчитываемый по уравнениям (1) и (2) вклад (в процентах) его естественных вариаций в наблюдаемую дисперсию значений MRR . Вклады в дисперсию MRR составили:

- ✓ 34.7% от осадков P_1 за декабрь-март,
- ✓ 21.9% от осадков P_2 за апрель,
- ✓ 7.8% от температур воздуха T_1 за декабрь-март,

✓ 6.1% от температур воздуха T_2 за апрель,

✓ 0.2% от высоты местности (расчет выполнялся путем случайной перестановки высот ландшафтов h_k^i в каждом бассейне).

Таким образом, основными факторами, определяющими максимумы весенних половодий MRR в (3), оказались зимние и весенние (апрельские) осадки. Высота местности, значительно влияющая на количество выпадающих осадков в мм [Селегей, Селегей, 1978], показала себя наименее значимым фактором. Это еще раз подтвердило адекватность описания динамики метеорологических факторов через их нормированные значения.

Разработанная модель (3) для максимумов весенних половодий MRR объясняет $34.7+21.9+7.8+6.1+0.2=71\%$ наблюдаемой дисперсии MRR . Оценка её адекватности (точности) по уравнению (1) дает $A=0.41$, что соответствует критерию Нэша-Сатклиффа $NSE=1-2A^2=1-2\times 0.41^2\approx 0.66$ [Kirsta, Troshkova, 2023b]. В нашем случае $NSE\approx 0.66$ попадает в диапазон его “good” значений $0.65<NSE\leq 0.75$ [Koch, Cherie, 2013]. Полученные резуль-

таты полностью подтверждают эффективность методологии системно-аналитической обработки гидрометеорологических данных, обеспечившей построение адекватной модели формирования максимумов весенних половодий на реках Алтае-Саянской горной страны. Эта модель выгодно отличается, например от линейных регрессионных моделей, своей универсальностью и точностью, так как разработка последних для горных рек требует большой объем гидрометеорологических наблюдений и дает значительную погрешность расчетов.

В качестве пояснения рассмотрим регрессионную модель для прогноза максимумов весенних половодий MRR на конкретной горной реке. Пусть в ней используются осадки P_1 за декабрь-март или аналогичные P_1 запасы воды в снежном покрове, накопленные на речном водосборе к концу марта. Пусть также учитывается температура воздуха T_1 за декабрь-март, влияющая на испарение влаги с поверхности снега в атмосферу зимой. Связь критериев NSE , A и FS [Kirsta, Troshkova, 2023a, b], позволяет записать:

$$NSE_0 = 1 - 2A_0^2 = 1 - (S_{dif})^2 / (S_{obs})^2 \approx FS_{P_1} + FS_{T_1}, \quad (5)$$

где $2A_0^2$ – дисперсия $(S_{dif})^2/(S_{obs})^2$ для характеризуемой модели прогноза MRR с адекватностью A_0 по уравнению (1); FS_{P_1} – чувствительность MRR к естественным вариациям осадков P_1 , FS_{T_1} – чувствительность MRR к естественным вариациям температур T_1 . Подставляя в (5) указанные выше значения $FS_{P_1}=0.347$ и $FS_{T_1}=0.078$, имеем:

$$NSE_0 \approx 0.347 + 0.078 \approx 0.42.$$

Полученный для характеризуемой прогнозной регрессионной модели критерий Нэша-Сатклиффа $NSE_0\approx 0.42$ попадает в диапазон его “unsatisfactory” значений $NSE<0.50$ [Koch, Cherie, 2013]. При этом прогнозы с $NSE_0=0.42$ все равно лучше, чем простейший прогноз, осуществляемый по среднемуголетнему значению MRR и характеризующийся $NSE = 0$.

Заключение

С помощью предлагаемой методологии системно-аналитического моделирования сложноорганизованных природных систем проанализировано формирование максимумов весенних (апрельских) половодий на 34 различных реках Алтае-Саянской горной страны в 1951–2023 гг. Количественно охарактеризовано влияние на половодья среднемесячных температур воздуха, месячных осадков, ландшафтной структуры речных бассейнов, площадей и высот расположения ландшафтов. Большое число одновременно анализируемых рек позволило исключить индивидуальные особенности водосборных бассейнов и обеспечить универсальность описания характеризующих гидрологических процессов.

Методология системно-аналитического моделирования основана на ряде объединенных в одно целое методов. Это нормирование и пространственное обобщение среднемесячных температур воздуха и месячных осадков, что обеспечило единообразное описание многолетней динамики метеорологических факторов на

больших пространствах. По имеющимся гидрологическим и метеорологическим данным выполнено решение обратной математической задачи для больших систем имитационных гидрологических уравнений с неизвестными параметрами. При этом неизвестные зависимости половодий от факторов среды описаны в уравнениях (3) через функцию H в (4) со значениями параметров, изменяемыми в процессе решения обратной задачи. Наилучший по невязке вариант уравнений принят за исковую математическую модель. По предложенным простым формулам оценено качество модели, включая расчет ее точности и чувствительности к реальным вариациям факторов среды.

Хорошая точность и универсальность разработанной модели максимумов весенних половодий обеспечивают возможность ее использования для рек как Алтае-Саянской горной страны, так и других горных территорий. Высокая точность расчетов для горных рек, характеризуемая критерием Нэша-Сатклиффа $NSE \approx 0.66$, позволяет использовать модель при среднесрочных прогнозах половодий.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare that they have no conflict of interests.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант 22-27-00058), а в части применения системно-аналитического моделирования – согласно государственному заданию ИВЭП СО РАН по проекту FUFZ-2021-0003 «Оценка эколого-биогеохимической обстановки в речных бассейнах Сибири в условиях изменения климата и антропогенного воздействия».

Список литературы

Гвоздецкий Н.А., Михайлов Н.И. Физическая география СССР. Азиатская часть. М.: Высшая школа, 1987. 447 с.

Кирста Ю.Б., Кирста Б.Ю. Информационно-физический закон построения эволюционных систем. Системно-аналитическое моделирование экосистем. Барнаул: Изд-во Алтайского гос. ун-та, 2014. 283 с.

Кирста Ю.Б., Лубенец Л.Ф., Черных Д.В. Типизация ландшафтов для оценки речного стока в Алтае-Саянской горной стране // Устойчивое развитие горных территорий. 2011. № 2 (8). С. 51–56.

Кирста Ю.Б., Трошкова И.А. Влияние метеорологических факторов на весенние половодья горных рек // Известия Алтайского отделения Русского географического общества. 2023. № 4. С. 25–39. doi: 10.24412/2410-1192-2023-17103

Медведков К.С., Штриплинг Л.О. Ухудшение ситуации с подтоплением, связанное с антропогенным влиянием на примере города Тюкалинска // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329, № 9. С. 143–152.

Селегей В.В., Селегей Т.С. Телецкое озеро. Л.: Гидрометеиздат. 1978. 143 с.

Федеральное агентство водных ресурсов [Электронный ресурс]. URL: <https://gmvo.skniihv.ru> (дата обращения: 12.05.2025).

Физико-географическое районирование СССР. Характеристика региональных единиц / Ред. Н.А. Гвоздецкий. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1968. 576 с.

Akbarian H., Gheibi M., Hajiaghahi-Keshteli M., Rahmani M. A hybrid novel framework for flood disaster risk control in developing countries based on smart prediction systems and prioritized scenarios // Journal of Environmental Management. 2022. Vol. 312. P. 114939. doi: 10.1016/j.jenvman.2022.114939

Bentivoglio R., Isufi E., Jonkman S.N., Taormina R. Deep Learning Methods for Flood Mapping: A Review of Existing Applications and Future Research Directions // Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss. 2022. Vol. 26. P. 4345–4378. doi: 10.5194/hess-26-4345-2022

Brinkerhoff C.B., Gleason C.J., Feng D., Lin P. Constraining remote river discharge estimation using reach-scale geomorphology // Water Resources Research. 2020. Vol. 56 (11). P. e2020WR027949. doi: 10.1029/2020WR027949

Dibike Y.B., Shrestha R.R., Johnson C., Bonsal B., Coulibaly P. Assessing climatic drivers of spring mean and annual maximum flows in Western Canadian river basins // Water. 2021. Vol. 13 (12). 1617. doi.org/10.3390/w13121617

Dikshit A., Pradhan B., Matin S.S., Beydoun G., Santosh M., Park H.J., Maulud K.N.A. Artificial Intelligence: A new era for spatial modelling and interpreting climate-induced hazard assessment // Geoscience Frontiers. 2024. Vol. 15 (4). P. 101815. doi: 10.1016/j.gsf.2024.101815

Fleming S.W., Garen D.C., Goodbody A.G., McCarthy C.S., Landers L.C. Assessing the new Natural Resources Conservation Service water supply forecast model for the American West: A challenging test of explainable, automated, ensemble artificial intelligence // Journal of Hydrology. 2021. Vol. 602. P. 126782. doi: 10.1016/j.jhydrol.2021.126782

Jayalakshmi N., Mantha S. 2 – Intelligence methods for data mining task // Artificial Intelligence in Data Mining / Eds. D. Binu, B.R. Rajakumar. Academic Press, 2021. P. 21–39. doi: 10.1016/B978-0-12-820601-0.00007-0

Karim F., Armin M.A., Ahmedt-Aristizabal D., Tychsen-Smith L., Petersson L. A review of hydrodynamic and machine learning approaches for flood inundation modeling // Water. 2023. Vol. 15 (3). P. 566. doi: 10.3390/w15030566

Kirsta Y.B. System-analytical modelling – Part I: General principles and theoretically

best accuracies of ecological models. Soil moisture exchange in agroecosystems // *Ecological Modelling*. 2006. Vol. 191 (3–4). P. 315–330. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2005.05.028

Kirsta Y.B. System-analytical modelling: 2. Assessment of runoff model sensitivity to environmental factor variations // *Eurasian Journal of Mathematical and Computer Applications*. 2020. Vol. 8 (3). P. 67–77. doi: 10.32523/2306-6172-2020-8-3-67-77

Kirsta Y., Puzanov A., Rozhdestvenskaya T. Models for Describing Landscape Hydrochemical Discharge in Mountain Countries // *Landscape Modelling and Decision Support. Innovations in Landscape Research* / Eds. W. Mirschel, V. Terleev, K.O. Wenkel. Springer, Cham, 2020. P. 163–178. doi: 10.1007/978-3-030-37421-1_9

Kirsta Y.B., Troshkova I.A. Deep process-data mining for building of analytical models: 1. Medium-term forecast of spring flood extremes for mountain rivers // *Eurasian Journal of Mathematical and Computer Applications*. 2023a. Vol. 11 (3). P. 76–97. doi: 10.32523/2306-6172-2023-11-3-76-97

Kirsta Y.B., Troshkova I.A. High-performance forecasting of spring flood in mountain river basins with complex landscape structure // *Water*. 2023b. Vol. 15 (6). 1080. doi: 10.3390/w15061080

Koch M., Cherie N. SWAT-modeling of the impact of future climate change on the hydrology and the water resources in the upper Blue Nile river basin, Ethiopia // *Proceedings of the 6th International Conference on Water Resources and Environment Research* (June 3–7, 2013). Koblenz, Germany, 2013. P. 428–523.

Langhammer J., Bernsteinova J. Which aspects of hydrological regime in mid-latitude montane basins are affected by climate change? // *Water*. 2020. Vol. 12 (8). P. 2279. doi: 10.3390/w12082279

Moriasi D.N., Arnold J.G., Van Liew M.W., Bingner R.L., Harmel R.D., Veith T.L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulation // *Trans. ASABE*. 2007. Vol. 50 (3). P. 885–900. doi: 10.13031/2013.23153

Palchevsky E., Antonov V., Enikeev R.R., Breikin T. A system based on an artificial neural network of the second generation for decision support in especially significant situations // *Journal of Hydrology*. 2023. Vol. 616. P. 128844. doi: 10.1016/j.jhydrol.2022.128844

References

Gvozdetskiy N.A. *Fizicheskaya geografiya SSSR. Aziatskaya chast'* [Physical Geography of the USSR. The Asian part]. Moscow: Vysshaya shkola, 1987. 447 p. (in Russian).

Kirsta Y.B., Kirsta B.Y. *Informatsionno-fizicheskiy zakon postroyeniya evolyutsionnykh sistem. Sistemno-analiticheskoye modelirovaniye ekosistem* [The Information-Physical Principle of Evolutionary Systems Formation. System-Analytical Modelling of Ecosystems]. Barnaul: Izd-vo Alt. gos. un-ta, 2014. 283 p. (in Russian).

Kirsta Y.B., Lubenets L.F., Chernykh D.V. Tipizatsiya landshaftov dlya otsenki rechnogo stoka v Altaye-Sayanskoy gornoy strane [Typological classification of landscapes for river flow estimation in Altai-Sayan mountainous country] // *Ustoychivoye razvitiye gornykh territoriy* [Sustainable Development of the Mountain Territories]. 2011. Vol. 2 (8). P. 51–56. (in Russian).

Kirsta Y.B., Troshkova I.A. Vliyaniye meteorologicheskikh faktorov na vesenniye polovod'ya gornyykh rek [Influencing meteorological factors on spring floods of mountain rivers] // *Izvestiya Altayskogo otdeleniya Russkogo geograficheskogo obshchestva* [Bulletin of the Altai Branch of the Russian Geographical Society]. 2023. No 4. P. 25–39. (in Russian). doi: 10.24412/2410-1192-2023-17103

Medvedkov K.S., Shtripling L.O. Ukhudsheniye situatsii s podtopleniyem, svyazannoye s antropogennym vliyaniyem na primere goroda Tyukalinska [Degradation of flooding situation related to anthropogenic effects on the example of Tyukalinsk] // *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering]. 2018. Vol. 329, no. 9. P. 143–152. (in Russian).

Selegey V.V., Selegey T.S. Teletskoye ozero [Teletskoye Lake] // Leningrad: Gidrometeoizdat. 1978. 143 p. (in Russian).

Federal'noe agentstvo vodnykh resursov [Federal Agency for Water Resources]. URL: <https://gmvo.skniivh.ru> (accessed: 12.05.2025).

Fiziko-geograficheskoye rayonirovaniye SSSR. Kharakteristika regional'nykh yedinit [Physical-geographical zoning of the USSR. Characteristics of regional units] / Ed. N.A. Gvozdetskiy. Moscow: MSU Publishing house, 1968. 576 p. (in Russian).

Akbarian H., Gheibi M., Hajiaghahi-Keshteli M., Rahmani M. A hybrid novel framework for flood disaster risk control in developing countries based on smart prediction systems and prioritized scenarios // *Journal of Environmental Management*. 2022. Vol. 312. P. 114939. doi: 10.1016/j.jenvman.2022.114939

Bentivoglio R., Isufi E., Jonkman S.N., Taormina R. Deep Learning Methods for Flood Mapping: A Review of Existing Applications and Future Research Directions // *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 2022. Vol. 26. P. 4345–4378. doi: 10.5194/hess-26-4345-2022

Brinkerhoff C.B., Gleason C.J., Feng D., Lin P. Constraining remote river discharge estimation using reach-scale geomorphology // *Water Resources Research*. 2020. Vol. 56 (11). P. e2020WR027949. doi: 10.1029/2020WR027949

Dibike Y.B., Shrestha R.R., Johnson C., Bonsal B., Coulibaly P. Assessing climatic drivers of spring mean and annual maximum flows in Western Canadian river basins // *Water*. 2021. Vol. 13 (12). 1617. doi.org/10.3390/w13121617

Dikshit A., Pradhan B., Matin S.S., Beydoun G., Santosh M., Park H.J., Maulud K.N.A. Artificial Intelligence: A new era for spatial modelling and interpreting climate-induced hazard assessment // *Geoscience Frontiers*. 2024. Vol. 15 (4). P. 101815. doi: 10.1016/j.gsf.2024.101815

Fleming S.W., Garen D.C., Goodbody A.G., McCarthy C.S., Landers L.C. Assessing the new Natural Resources Conservation Service water supply forecast model for the American West: A challenging test of explainable, automated, ensemble artificial intelligence // *Journal of Hydrology*. 2021. Vol. 602. P. 126782. doi: 10.1016/j.jhydrol.2021.126782

Jayalakshmi N., Mantha S. 2 – Intelligence methods for data mining task // *Artificial Intelligence in Data Mining* / Eds. D. Binu, B.R. Rajakumar. Academic Press, 2021. P. 21–39. doi: 10.1016/B978-0-12-820601-0.00007-0

Karim F., Armin M.A., Ahmedt-Aristizabal D., Tyghsen-Smith L., Petersson L. A review of

hydrodynamic and machine learning approaches for flood inundation modeling // *Water*. 2023. Vol. 15 (3). P. 566. doi: 10.3390/w15030566

Kirsta Y.B. System-analytical modelling – Part I: General principles and theoretically best accuracies of ecological models. Soil moisture exchange in agroecosystems // *Ecological Modelling*. 2006. Vol. 191 (3–4). P. 315–330. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2005.05.028

Kirsta Y.B. System-analytical modelling: 2. Assessment of runoff model sensitivity to environmental factor variations // *Eurasian Journal of Mathematical and Computer Applications*. 2020. Vol. 8 (3). P. 67–77. doi: 10.32523/2306-6172-2020-8-3-67-77

Kirsta Y., Puzanov A., Rozhdestvenskaya T. Models for Describing Landscape Hydrochemical Discharge in Mountain Countries // *Landscape Modelling and Decision Support. Innovations in Landscape Research* / Eds. W. Mirschel, V. Terleev, K.O. Wenkel. Springer, Cham, 2020. P. 163–178. doi: 10.1007/978-3-030-37421-1_9

Kirsta Y.B., Troshkova I.A. Deep process-data mining for building of analytical models: 1. Medium-term forecast of spring flood extremes for mountain rivers // *Eurasian Journal of Mathematical and Computer Applications*. 2023a. Vol. 11 (3). P. 76–97. doi: 10.32523/2306-6172-2023-11-3-76-97

Kirsta Y.B., Troshkova I.A. High-performance forecasting of spring flood in mountain river basins with complex landscape structure // *Water*. 2023b. Vol. 15 (6). 1080. doi: 10.3390/w15061080

Koch M., Cherie N. SWAT-modeling of the impact of future climate change on the hydrology and the water resources in the upper Blue Nile river basin, Ethiopia // *Proceedings of the 6th International Conference on Water Resources and Environment Research* (June 3–7, 2013). Koblenz, Germany, 2013. P. 428–523.

Langhammer J, Bernsteinova J. Which aspects of hydrological regime in mid-latitude montane basins are affected by climate change? // *Water*. 2020. Vol. 12 (8). P. 2279. doi: 10.3390/w12082279

Moriasi D.N., Arnold J.G., Van Liew M.W., Bingner R.L., Harmel R.D., Veith T.L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulation // *Trans. ASABE*. 2007. Vol. 50 (3). P. 885–900. doi: 10.13031/2013.23153

Palchevsky E., Antonov V., Enikeev R.R., Breikin T. A system based on an artificial neural network of the second generation for decision support in especially significant situations // *Journal of Hydrology*. 2023. Vol. 616. P. 128844. doi: 10.1016/j.jhydrol.2022.128844

SYSTEM-ANALYTICAL MODELING OF ANNUAL SPRING FLOOD MAXIMA IN MOUNTAIN RIVERS

Y.B. Kirsta, A.V. Puzanov, I.A. Troshkova

Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul,

E-mail: kirsta@iwep.ru, puzanov@iwep.ru, egorka_iren@mail.ru

Spring floods on mountain rivers pose a serious threat to the economic activities of the local population. They are characterized by maximum values of river flow and the greatest,

albeit short-term, flooding of areas near rivers. Using the methodology of systems-analytical processing of large samples of hydrometeorological data, we analyzed the formation of floods on 34 rivers of the Altai-Sayan mountain country for the period 1951–2023. A mathematical model of their spring runoff maxima was developed and its sensitivity to environmental factors was assessed. The model was used to quantitatively characterize the influence of landscapes, winter-spring air temperatures and precipitation on the annual maximum runoff values for each river. For this purpose, the contributions of natural variations in environmental factors to the variance of the specified maximum values were calculated. The contributions of winter precipitation, April precipitation, winter air temperatures and April temperature to this variance were 34.7, 21.9, 7.8, and 6.1%, correspondingly. An explanation is given for the obtained complex dependencies of the annual maxima of spring runoff on meteorological factors and incoming solar radiation.

Key words: system-analytical modeling; mountain rivers; spring flood; meteorological factors; landscapes; Altai; Sayan.

Received November 14, 2025. Accepted: November 27, 2025

Сведения об авторах

Кирста Юрий Богданович – доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории биогеохимии Института водных и экологических проблем СО РАН. Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, д. 1. ORCID: 0000-0001-8990-3190. E-mail: kirsta2007@mail.ru.

Пузанов Александр Васильевич – доктор биологических наук, профессор, заведующий лабораторией биогеохимии Института водных и экологических проблем СО РАН. Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, д. 1. ORCID: 0000-0002-1340-486X. E-mail: puzanov@iwep.ru.

Трошкова Ирина Александровна – младший научный сотрудник лаборатории биогеохимии Института водных и экологических проблем СО РАН. Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, д. 1. ORCID: 0000-0003-2809-8022. E-mail: egorka_iren@mail.ru.

Information about the authors

Kirsta Yuri Bogdanovich – Dr. Sc. in Biology, Professor, principal researcher at the Laboratory of Biogeochemistry of the Institute for Water and Environmental Problems SB RAS. 1, Molodezhnaya St., 656038 Barnaul, Russia. ORCID: 0000-0001-8990-3190. E-mail: kirsta2007@mail.ru.

Puzanov Alexander Vasilyevich – Dr. Sc. in Biology, Professor, head of the Laboratory of Biogeochemistry of the Institute for Water and Environmental Problems SB RAS. 1, Molodezhnaya St., 656038 Barnaul, Russia. ORCID: 0000-0002-1340-486X. E-mail: puzanov@iwep.ru.

Troshkova Irina Aleksandrovna – Junior researcher at the Laboratory of Biogeochemistry of the Institute for Water and Environmental Problems SB RAS. 1, Molodezhnaya St., 656038 Barnaul, Russia. ORCID: 0000-0003-2809-8022. E-mail: egorka_iren@mail.ru.

УДК 550.461

МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОТЛОЖЕНИЙ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ ГОРНОГО АЛТАЯ В УСЛОВИЯХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

О.Г. Савичев, В.А. Домаренко, А.М. Надеева

*Томский политехнический университет, Томск,**E-mail: osavichev@mail.ru, viktor_domarenko@mail.ru, prezident.2001n@mail.ru*

Выполнено исследование минералого-геохимического состояния водных объектов в Горном Алтае (бассейн Актру и участок плоскогорья Укок) в 2020-е гг. Получена оценка минерального состава фракции донных отложений с диаметром частиц менее 1 мм, химического состава поверхностных вод и вытяжек из донных отложений. Выявлены основные черты механизма формирования их состояния, связанные с интенсивным растворением первичных алюмосиликатов в зоне взаимодействия талых ледниковых вод с горными породами, насыщением вод на участках верхнего течения рек (11–20 км) и последующим осаждением и переотложением наносов. Сделано предположение о возможных изменениях геохимического состояния водных объектов при потеплении климата.

Ключевые слова: минералого-геохимическое состояние; пространственные изменения; поверхностные водные объекты; Горный Алтай.

DOI: 10.24412/2410-1192-2025-17906

Дата поступления: 11.11.2025. Принята к печати: 11.12.2025

Горный Алтай характеризуется чрезвычайно разнообразными природными условиями – от горностепных до горно-ледниковых районов, причем все компоненты соответствующих природно-территориальных комплексов (ПТК) достаточно сильно реагируют на изменения климата. Это определяет актуальность исследований состояний тех компонентов ПТК, условий и механизмов их формирования в рамках общей проблемы изучения, прогнозирования и управления климатическими изменениями природных и социально-экономических систем. Особый интерес вызывают вопросы, связанные с изучением последствий деградации ледников. Обычно подобные работы связаны с оценкой фактических и/или прогнозных значений показателей рельефа, растительного покрова, водного стока

и химического состава поверхностных вод [Галахов и др., 1987; Оледенение..., 2006; Тимошок и др., 2008; Окишев, 2011; Пузанов и др., 2022].

Нами рассмотрен минералого-геохимический аспект указанной выше проблемы, что и определило цель исследования – оценка состояния отложений поверхностных водных объектов в условиях климатических изменений на примере горно-ледникового бассейна Актру (элемент речной системы «Актру – Чуя – Катунь – Обь») и участка плоскогорья Укок (болото в долине р. Аргамджи – элемента речной системы «Аргамджи – Калгуты – Ак-Аллаха (Аргут после впадения р. Жасатер) – Катунь – Обь») в Кош-Агачском районе республики Алтай. Задачи исследования:

1) предварительная оценка минерального

и химического состава донных и болотных отложений в разных условиях, которые ранее (в пределах голоцена) предположительно наблюдались в регионе; 2) выявление взаимосвязей между минеральным и химическим составом донных (болотных) отложений и химическим составом поверхностных вод.

Предварительный характер оценок обусловлен общим дефицитом актуальной информации, полученной комплексно (в составе изучения различных сред) с использованием современных методов, и направлен на планирование дальнейших, более масштабных минералого-геохимических исследований горного Алтая. Выбор объектов связан со следующими обстоятельствами.

1. Горно-ледниковый бассейн Актуру площадью более 160 км² расположен в восточной части горного узла Биш-Иирду северного склона Северо-Чуйского хребта (интервал высот 1470–4044 м над уровнем моря). Бассейн включает в себя ряд горных ледников: долинные ледники Левый, Правый и Малый Актуру, ледники плоских вершин Водопадный и кар Малого Актуру, висячий ледник на вершине Кара-Таш и карово-висячий ледник Стажер [Галахов и др., 1987; Тимошок и др., 2008] и является, видимо, наиболее изученным горно-ледниковым бассейном в Северной Азии [Галахов и др., 1987; Оледенение..., 2006]. В его пределах выявлено общее сокращение ледников, в том числе – ледников Левый и, особенно, Малый Актуру [Оледенение..., 2006; Тимошок и др., 2008; Паромов и др., 2018]. В геологическом отношении эта территория сложена вулканогенно-терригенными и карбонатными отложениями

девонского возраста, прорванными диоритами, гранодиоритами, гранитами Актуринского интрузивного массива, в процессе становления которого сформировалась сложная полихронная магмо-рудно-метасоматическая система с полиметалльно-благороднометалльной специализацией (Zn, Pb, Cu, Hg, Au, Pt, Pd, Ag) [Гидрогеология СССР..., 1972; Государственная геологическая..., 2011; Гусев и др., 2014; Недра России..., 2001];

2. При отступлении ледников ожидается интенсификация взаимодействия в системе «вода – порода». Соответственно, территория, формирующаяся в процессе деградации ледника, представляет собой «природную лабораторию» для изучения подобных взаимодействий. Это определяет целесообразность отбора и последующего изучения проб грунтов и воды на участках ледников и на различном удалении от них в предположении определенной пропорциональности расстояния от ледника и времени взаимодействий [Savichev, Paromov, 2013; Савичев и др., 2018; Савичев и др., 2024];

3. Изучение болотных экосистем в разных регионах мира, включая бассейн р. Обь, показало, что в торфах может аккумулироваться значительное количество минеральных веществ и органо-минеральных комплексов. Однако большая часть соответствующих исследований выполнена на равнинных, гораздо реже – в горных районах. Если предположить, что горные болота являются «фильтром», остававливающим значительную часть стока взвешенных минеральных веществ, то комплекс пунктов пробоотбора в бассейне Актуру целесообразно дополнить пунктом отбора проб болотных вод и торфа.

В бассейне Актру подобный объект пока не выявлен, но обнаружено болото в долине р. Аргамджи на плоскогорье Укок, расположенном в географическом отношении между хребтами Южного Алтая и Южно-Чуйским, а в геологическом – в пределах Талицко-Монголо-Алтайской геоантисклинального поднятия; его составной частью является Калгутинский рудный район, приуроченный к крупной разрывной структуре и характеризующийся комплексным вольфрам-молибден-висмутовым оруденением со свинцом и медью [Гидрогеология СССР..., 1972; Недра России..., 2001; Поцелуев и др., 2008]. Несмотря на различия геологических условий, общие черты механизмов формирования геостока все же имеются (примерно одинаковые условия формирования и деградации оледенения в четвертичном периоде [Окишев, 2011]), что на данном этапе исследования определяет возможность сопоставления данных по бассейну Актру и Ак-Аллаха, включая водосбор р. Аргамджи.

Материалы и методы

В течение 1997–2023 гг. нами выполнен комплекс исследований поверхностных и подземных водных объектов Горного Алтая, что позволило накопить определенный объем гидрогеохимической информации [Savichev, Paromov, 2013; Савичев и др., 2024]. В том числе, в 2022 г. в бассейне Актру были отобраны пробы воды и грунта в следующих объектах (рис. 1): А1) ручей Водопадный (здесь и далее для водотоков и озера: вода из интервала глубин 0.1–0.3 м от поверхности; донные отложения – в 0.2–1.0 м от уреза воды в слое 0.2 м от поверхности дна, смешанные пробы из точеч-

ных проб в вершинах в виде равнобедренного треугольника со стороной 1 м; для определения химического и минерального состава отбиралась фракция с диаметром частиц ≤ 1 мм); А2) река Актру в районе альплагеря Актру (вода и донные отложения), 20.4 км; А3) озеро Голубое, расположенное на границе ледника Левый Актру (вода и донные отложения); А4) река Актру при выходе с ледника Левый Актру, в 22.4 км от устья (вода и донные отложения); А5) ледник Левый Актру, краевой участок, прилегающий к озеру Голубое (проба льда с глубины 0.2–0.5 м и твердый материал на поверхности ледника, также смешанная проба из трех точечных проб); А6) ручей, вытекающий из ледника Малый Актру на участке, ранее (в 1989 г.) находившемся под ледником (вода и донные отложения). В 2023 г. выполнен отбор проб U7 болотных вод и торфяных отложений в долине р. Аргамджи на плоскогорье Укок: проба вода – также из слоя 0.1–0.3 м от поверхности, проба торфа – в слое 0.1–0.5 м.

Схема размещения пунктов отбора проб в 2022 и 2023 гг. приведена на рис. 1, их географические координаты – в табл. 1. При выполнении отбора проб с учетом требований [Требования..., 2002; Manual..., 2010; ГОСТ Р 59024-2020] проводились измерения pH, Eh, удельной электропроводности ЕС, температуры воды и фильтрация воды через мембранный фильтр с диаметром пор 0.45 мкм для изучения соотношения коллоидной и взвешенно-коллоидной форм миграции химических элементов. В пробе торфяных отложений выделены фракция твердых веществ с диаметром частиц менее 1 мм и 0.002 мм (глинистый грунт [ГОСТ 25100-2020]).

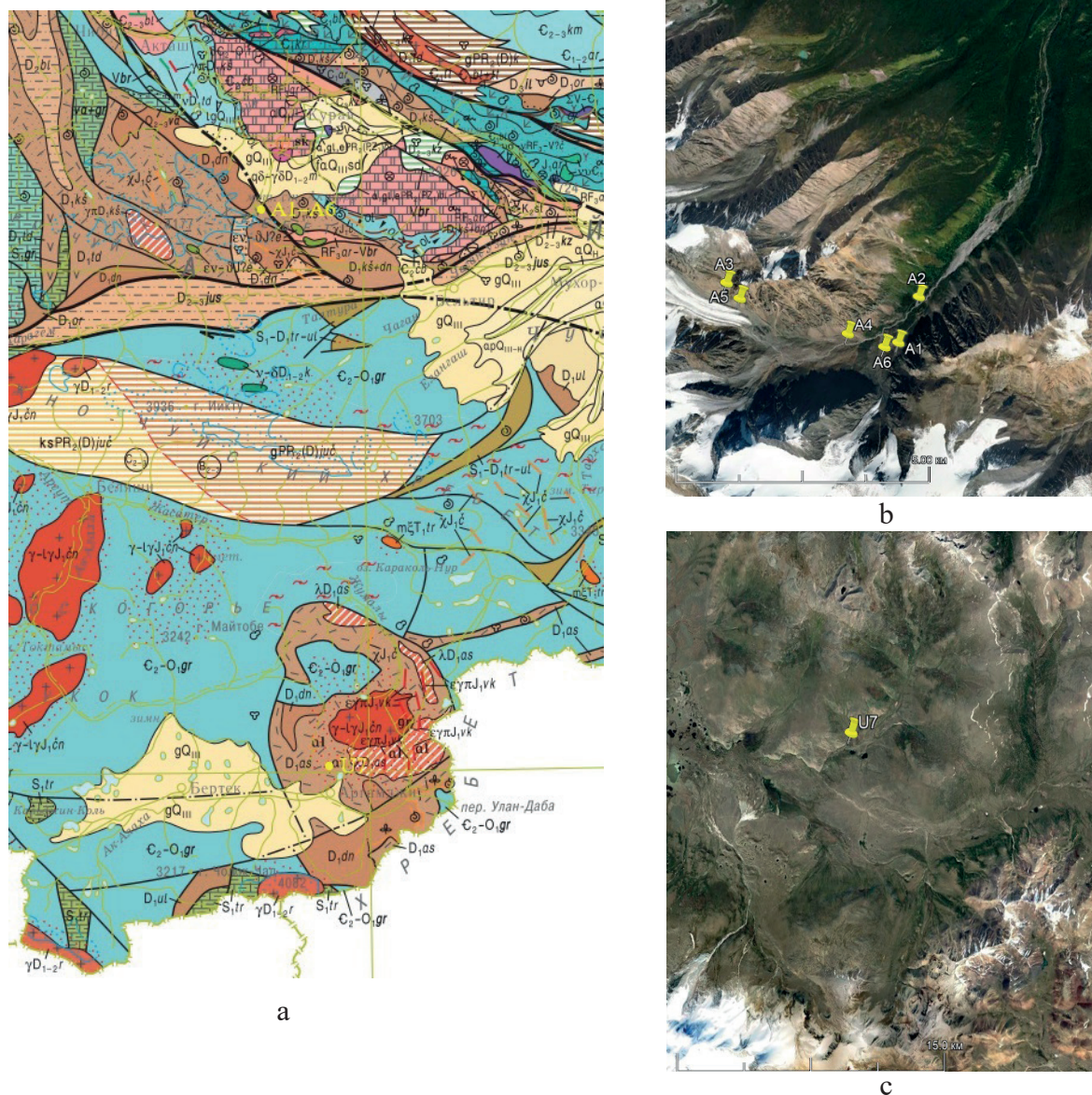


Рис. 1. Схема расположения пунктов отбора проб воды и грунтов в Горном Алтае в 2022–2023 гг.:
 а) фрагмент геологической карты масштаба 1: 1000000, Алтай-Саянская серия, М-45 [Государственная геологическая..., 2011]; на снимке Google Earth: б) участок верхнего течения р. Актру; пункты А1, А2, А3, А4, А5, А6; в) долина р. Аргамджи, пункт U7 (табл. 1)

Fig. 1. Layout of water and soil sampling points in the Altai Mountains in 2022–2023:
 а) fragment of the geological map at a scale of 1:1000000, Altai-Sayan series, M-45 [State Geological..., 2011]; in the Google Earth image: б) section of the upper reaches of the Aktru River; points A1, A2, A3, A4, A5, A6; в) the Argamdzhi River valley, point U7 (table 1)

Лабораторные работы по определению химического состава поверхностных вод в бассейне Актру (валовое содержание и фильтрат) и болотных вод (валовое содержание), водных вытяжек из донных отложений в бассейне Актру и кислотной вытяжки (с азотной кислотой) из торфяных

отложений в долине р. Аргамджи выполнены в аккредитованной гидрогеохимической лаборатории ТПУ с использованием следующих методов: рН, F^- – потенциометрический метод; перманганатная окисляемость ПО, содержания Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , Cl^- , CO_2 – титриметрический; Na^+ , K^+ –

атомно-эмиссионная спектрометрия с пламенной атомизацией; SO_4^{2-} – турбидиметрический; фосфаты – фотометрический; более 30 микроэлементов – масс-спектрометрический метод с индуктивно-связанной плазмой (МС-ИСП) с использованием масс-спектрометра NexION 300D. Также в пробах донных отложений (фракция менее 1 мм) выполнен рентгенофазовый анализ. В пробах торфяных отложений в долине р. Аргамджи (фракции частиц менее 1 мм и 0.002 мм) в лабораториях ТПУ были проведены: 1) в ООО «Химико-аналитический центр «Плазма» (г. Томск) с использованием МС ИСП (МВИ № 001-ХМС-2007; ФР.1.31.2007.04107) – определение химического состава кислотных вытяжек (с использованием плавиковой кислоты); 2) в ТПУ – электронная микроскопия 20 проб минеральных включений в торф с использованием сканирующего электронного микроскопа HITACHI S-3400N с энерго-дисперсионной приставкой Bruker X Flash 4010. Более подробная информация о методах анализа приведена в [Savichev, Paromov, 2013; Савичев и др., 2018; Савичев и др., 2024].

Анализ полученных данных включал оценку среднего арифметического A , коэффициентов корреляции r и погрешностей их определения δ_A и δ_r (1, 2), а также выявление регрессионных зависимостей при условии (3):

$$\delta_A \approx \frac{\sigma}{\sqrt{N}}, \quad (1)$$

$$\delta_r \approx \frac{1-r^2}{\sqrt{N-1}}, \quad (2)$$

$$|k_i| \geq 2 \cdot \delta_{k_i}, |r| \geq 2 \cdot \delta_r, |r| \geq 0.7, R^2 \geq 0.36, \quad (3)$$

где N и σ – объем и стандартное отклонение; k_i и δ_{k_i} – коэффициенты регрессии и погрешности их определения; R^2 – квадрат корреляционного отношения.

Результаты и обсуждение

Анализ полученных результатов показал, что, согласно классификациям О.А. Алекина [Алекин, 1970], изученные водные объекты в целом за период наблюдений с 1997 по 2023 гг. характеризуются:

1) по минерализации – от пресных с очень малой минерализацией в случае талых ледниковых вод до пресных со средней минерализации в случае болотных вод; речные воды – пресные с очень малой и малой минерализацией;

2) по химическому составу:

- талые ледниковые воды – чаще гидрокарбонатные кальциевые первого или третьего типов (более 50%), реже – C^{Mg}_1 (более 30%, в том числе – в пункте А5 19.07.2022 г.) и C^{Na}_1 ;
- речные (и озерные) воды – в основном гидрокарбонатные кальциевые, преимущественно второго типа (65% случаев);
- болотные воды в долине р. Аргамджи (U7, 27.07.2023 г.) – гидрокарбонатные кальциевые первого типа.

По величине pH [Гидрохимические показатели..., 2007] талые ледниковые воды – слабокислые, прочие воды – нейтральные или слабощелочные; для болота в долине р. Аргамджи отмечена переходная окислительно-восстановительная обстановка (Eh 62 мВ) и самое высокое значение перманганатной окисляемости ПО (34 мгО/дм³), в остальных случаях – окислительная обстановка (Eh > 100 мВ) и ПО в среднем менее 5 мгО/дм³ (табл. 1).

Таблица 1

Химический состав природных вод в горно-ледниковом бассейне Актру (2022 г.)
и болотных вод на плато Укок (2023 г.), химический и минеральный состав
донных и торфяных отложений

Table 1

Chemical composition of natural waters in the Aktru mountain-glacial basin (2022)
and swamp waters on the Ukok plateau (2023), chemical and mineral composition
of bottom and peat sediments

Показатель	Единицы измерения	Пункты отбора проб						
		A1	A2	A3	A4	A5	A6	U7
		руч. Водопадный	р. Актру, 20.4 км от устья	ледниковое озеро	р. Актру, 22.4 км от устья	ледник Левый Актру	руч. у ледника Малый Актру	болото в долине р. Аргамджи
Дата отбора		18.07.22	18.07.22	19.07.22	19.07.22	19.07.22	21.07.22	27.07.23
Широта	°	50.071	50.080	50.079	50.072	50.077	50.070	49.322
Долгота	°	87.772	87.776	87.724	87.758	87.728	87.768	87.911
Высота	м	2290	2147	2840	2334	2722	2234	2249
ПО	мгО/дм³	0.5	0.6	0.5	0.3	1.6	0.7	34.0
pH	ед. pH	7.43	7.89	7.61	8.04	6.40	7.74	7.40
Σ _{mi}	мг/дм³	54.5	95.7	108.5	90.7	15.5	101.4	432.3
HCO ₃ ⁻	мг/дм³	38.0	59.0	64.0	53.0	8.5	63.0	322.0
SO ₄ ²⁻	мг/дм³	2.3	12.5	18.0	13.0	<1.0	14.0	<1.0
Cl ⁻	мг/дм³	0.9	1.0	0.9	0.8	2.3	0.9	2.4
Ca ²⁺ (в)	мг/дм³	11.5	18.2	18.0	18.0	1.2	16.4	79.0
Ca (дв)	мг/кг	57.7	43.2	46.6	40.6	39.8	45.8	–
Mg ²⁺ (в)	мг/дм³	1.4	3.7	6.3	3.1	0.9	6.1	9.0
Mg (дв)	мг/кг	4.2	5.0	2.2	4.0	1.4	7.4	–
Na ⁺ (в)	мг/дм³	0.3	0.5	0.3	0.4	1.3	0.4	12.9
Na(дв)	мг/кг	1.7	2.6	0.9	1.2	1.3	1.2	–
K ⁺ (в)	мг/дм³	0.2	0.8	1.0	1.1	0.9	0.6	5.4
K(дв)	мг/кг	3.3	5.8	7.6	6.1	5.1	3.7	–
Si(в)	мг/дм³	0.800	10.620	0.480	4.210	4.380	0.230	8.62
Si(дв)	мг/кг	1.861	3.807	1.854	2.839	5.922	5.688	–
P(в)	мг/дм³	0.069	1.309	0.018	0.446	4.977	0.001	0.247
P(дв)	мг/кг	0.098	0.407	0.089	0.029	1.571	0.092	–
Fe(в)	мг/дм³	1.287	24.560	0.383	5.955	6.980	0.059	2.576
Fe(дв)	мг/кг	0.800	1.231	1.272	0.630	3.459	2.701	–
Li(в)	мкг/дм³	0.94	13.04	0.70	5.12	5.45	0.42	60.34
Li(дв)	мкг/кг	2.88	5.49	8.09	4.92	2.39	10.90	–
Al(в)	мкг/дм³	780	11929	202	3688	3519	35	14
Al(дв)	мкг/кг	2344	3082	3946	2669	3419	3553	–
Ti(в)	мкг/дм³	8.60	143.26	7.03	83.01	178.44	0.37	1.41
Ti(дв)	мкг/кг	11.66	33.88	45.72	13.48	133.52	111.30	–

Показатель	Единицы измерения	Пункты отбора проб						
		A1	A2	A3	A4	A5	A6	U7
		руч. Водопадный	р. Актру, 20.4 км от устья	ледниковое озеро	р. Актру, 22.4 км от устья	ледник Левый Актру	руч. у ледника Малый Актру	болото в долине р. Аргамджи
Со(в)	мкг/дм ³	0.94	20.66	0.36	5.77	8.40	0.02	0.84
Со(дв)	мкг/кг	0.60	1.53	1.88	0.69	7.16	2.18	–
Си(в)	мкг/дм ³	2.97	42.46	0.71	11.28	30.04	0.09	0.50
Си(дв)	мкг/кг	18.02	23.25	24.37	12.03	178.97	14.51	–
Zn(в)	мкг/дм ³	6.84	80.48	3.05	26.02	141.63	0.03	1.12
Zn(дв)	мкг/кг	0.73	45.17	10.00	2.53	27.81	6.93	–
Ва(в)	мкг/дм ³	17.31	177.08	2.57	47.96	59.87	0.94	25.79
Ва(дв)	мкг/кг	34.11	37.57	16.99	23.60	21.46	21.25	–
La(в)	мкг/дм ³	2.61	18.09	0.08	4.35	4.17	0.02	0.06
La(дв)	мкг/кг	0.36	0.49	0.92	0.23	2.96	0.87	–
Се(в)	мкг/дм ³	5.40	43.80	0.13	9.34	8.57	0.03	0.14
Се(дв)	мкг/кг	0.92	1.02	1.27	0.34	5.15	2.27	–
Au(v)	мкг/дм ³	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	<0.01
Au(дв)	мкг/кг	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.22	<0.01	–
U(в)	мкг/дм ³	0.20	1.89	0.13	1.02	0.30	0.20	9.15
U(дв)	мкг/кг	0.73	1.24	0.42	1.30	1.41	0.58	–
Содержание минерала в твердой фракции с диаметром частиц ≤1мм								
Альбит	%	20.9	24.2	22.6	17.2	16.9	12.8	23.3
Микроклин	%	0.0	7.4	7.5	8.4	5.5	2.6	10.8
Ортоклаз	%	3.2	3.2	5.1	7.2	4.1	2.1	0.0
Амфибол	%	0.0	0.0	1.4	0.0	2.0	0.0	0.0
Мусковит	%	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	15.9
Клинохлор	%	7.3	9.4	28.2	12.7	20.6	10.6	2.2
Иллит	%	35.5	22.5	17.1	21.9	34.2	42.0	0.0
Каолинит	%	0.0	0.7	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Цеолит	%	0.9	0.6	0.9	2.0	1.4	0.0	0.0
Кальцит	%	1.6	1.8	4.9	3.1	0.0	3.8	0.0
Кварц	%	30.6	30.2	11.3	27.5	15.3	26.1	47.8

Примечание: рН – водородный показатель; $\Sigma_{\text{ми}}$ – сумма главных ионов (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , CO_3^{2-} , Cl^- , SO_4^{2-}); ПО – перманганатная окисляемость; «в» – валовое содержание в воде; «дв» – содержание в водной вытяжке из донных отложений

Главные ионы находятся в по- в меньшей степени (менее 50%, но бо-
верхностных водах преимущественно лее 30% от валового содержания) – U.
(>50% от валового содержания) в рас- Прочие микроэлементы, а также крем-
творенной форме (возможно, частич- ний, фосфор, железо мигрируют в по-
но в виде коллоидов). Высокая доля верхностных водах в основном (<30%
содержания в фильтрате (после мембран- от валового содержания) во взвешен-
ного фильтра 0.45 мкм) отмечена и для Au, ном и коллоидном состоянии (табл. 2).

Таблица 2

Характеристика форм миграции в водной среде и аккумуляции
в донных (болотных) отложениях в Горном Алтае

Table 2

Characteristics of migration forms in the aquatic environment and accumulation
in bottom (swamp) sediments in the Altai Mountains

Элемент	Отношение концентрации в фильтрате к валовому содержанию в водах горно- ледникового бассейна Актру в 2022 г.				Концентрации в вытяжках из донных (болотных) отложений в долине р. Аргамджи в 2023 г. с использованием азотной (N) и плавиковой кислот (F), включая вытяжку из глинистой фракции (F*)				
	A	δ_A	min	max	(N)	(F)	(F*)	(N)/(F)	(F*)/(F)
	% от валового содержания в водной среде				мг/кг			% от валового содер- жания с использо- ванием плавиковой кислоты	
Ca	60.5	17.1	16.3	99.9	7199	36939	17002	19.5	46.0
Mg	53.2	16.6	3.4	99.9	—	—	—	—	—
Na	77.6	9.2	46.4	98.8	129	14076	9370	0.9	66.6
K	59.9	13.1	15.0	95.3	—	—	—	—	—
Si	28.9	13.5	1.9	87.0	—	—	—	—	—
P	14.0	3.8	1.1	20.0	—	—	—	—	—
Fe	12.6	10.4	0.2	64.0	2692	23072	11189	11.7	48.5
Li	13.5	7.2	2.2	47.2	—	—	—	—	—
Al	14.3	12.7	0.4	77.7	—	—	—	—	—
Ti	10.6	9.0	0.4	55.6	—	—	—	—	—
Co	3.6	1.3	0.2	7.6	1.53	8.14	3.95	18.7	48.6
Cu	16.2	8.3	0.4	53.2	—	—	—	—	—
Zn	11.1	5.8	0.8	36.4	14.42	53.92	35.20	26.7	65.3
Ba	7.3	3.8	0.4	25.1	21.97	343.96	225.2	6.4	65.5
La	12.7	10.9	0.1	67.0	2.56	28.55	22.62	9.0	79.2
Ce	11.1	9.7	0.1	59.3	6.11	70.02	43.39	8.7	62.0
Au	62.1	12.8	10.7	97.7	<0.001	0.389	0.002	0.01	0.59
U	35.4	9.7	2.2	65.3	8.45	20.01	12.68	42.2	63.4

При этом отметим, что в июле 2022 г. отмечено статистически значимое снижение от ледников вниз по течению доли растворенной формы калия (коэффициент корреляции между концентрацией в фильтрате и расстоянием от истока р. Актру для: калия – $r = -0.75 \pm 0.19$, кобальта – $r = -0.89 \pm 0.10$, а для урана, напротив, – увеличение ($r = 0.71 \pm 0.22$).

В целом для поверхностных вод наблюдается общее увеличение содержа-

ний растворенных солей от ледников до горно-таежных и горно-степных участков (примерно в 11–17 км от нижней границы зоны абляции ледника Левый Актру), связанное с: 1) выщелачиванием горных пород при таянии ледового материала на границе ледников; 2) выносом глинистых частиц на участке от нижнего конца открытой поймы до выхода из горно-лесного в горно-степной участок и последующей аккумуляцией речных наносов и сорбцией на глинистых

частицах ряда микроэлементов [Savichev, Paromov, 2013; Савичев и др., 2018; Савичев и др., 2024]. При этом, вследствие русловых процессов и внутригодовых изменений водного стока, может происходить переотложение наносов и, соответственно, изменение взаимодействия их с водами. С учетом этого закономерности пространственно-временного распределения геохимических показателей водных и кислотных вытяжек не столь очевидны, как в случае речных вод.

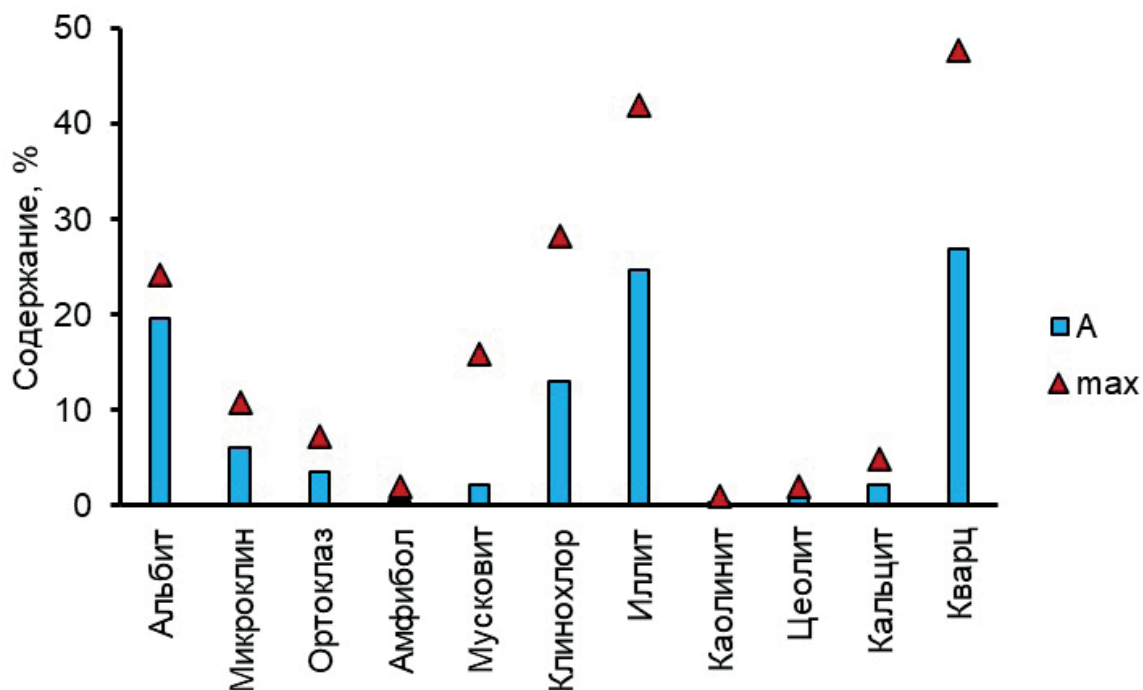
Полученные данные в целом подтверждают указанные выше предположения, а именно: 1) абсолютное и относительное содержание целого ряда химических элементов в растворенной (молекулярно-дисперсной) форме снижается по мере движения водных масс от ледников к участкам горной степи; 2) минеральный состав фракции с диаметром частиц ≤ 1 мм, наиболее подвижных в горных потоках [Савичев и др., 2018], представлен в основном плагиоклазами, кварцем, хлоритами и глинистыми минералами (каждая группа – более 10% от содержания, рис. 2а); вместе с тем, от ледников до горной степи уменьшается содержание хлоритов и увеличивается доля кварца во фракции донных отложений с диаметром частиц до 1 мм; амфиболы обнаружены только в отложениях на леднике Левый Актру и в озере Голубое, а мусковит – только в минеральных включениях в торфа болота в долине р. Аргамджи (табл. 1, рис. 2б).

Из этого следует, что, как и в случае других рек бассейна р. Обь (Томь, малые реки Киргизка, Омутная, Правая Сарала), а также р. Красной/Хонг в юго-восточной Азии (рр. Бан Тхи, Ченгу, Дай, Намду, Фодай), основные закономерности изменения минерального состава донных отложений

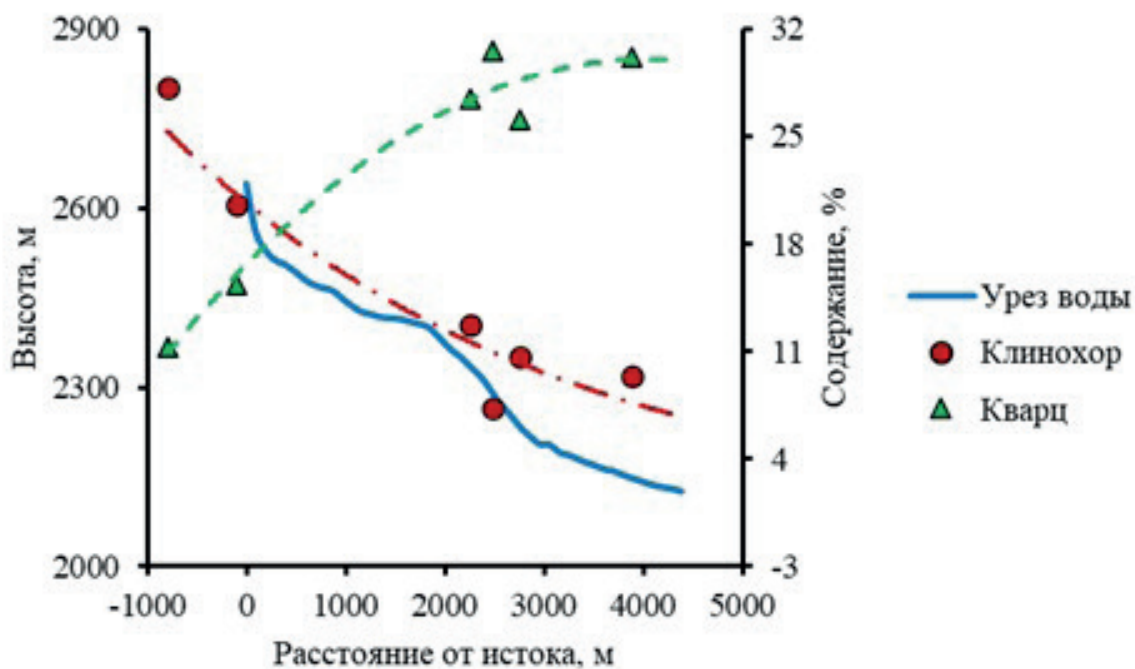
связаны с возрастанием доли кварца от истоков к устьям рек протяженностью более 11–20 км при одновременном снижении вклада минералов с показателем гипергенной устойчивости (логарифм произведения плотности и твердости) менее 1.26–1.27 [Савичев и др., 2018]. Кроме того, при формировании химического состава вод имеет значение соотношение форм миграции, способность к сорбции и образованию устойчивых органо-минеральных комплексов (с учетом гидрологических условий).

Так, доля предположительно растворенной формы миграции U, как указано выше, возрастает от ледников к горной степи, а максимальная концентрация (валовая) отмечена в болотных водах (табл. 1). Причем более 40% содержания этого элемента в минеральных включениях в торф приходится предположительно на органические соединения, а более 60% – на глинистую фракцию (в предположении, что анализ вытяжки с использованием азотной кислоты позволяет достоверно оценить содержание в органо-минеральных отложениях, а с плавиковой кислотой – полное содержание в минеральных частицах; табл. 2).

Другой пример – взаимосвязанное уменьшение в направлении от ледников к горно-степным участкам содержания клинохлора в донных отложениях и концентраций калия в вытяжках из них (табл. 3). Причем коэффициенты корреляции с валовой концентрацией K^+ и долей его растворенной формы менее 0.7 связаны не с отсутствием связей, а с их существенно нелинейным характером, обусловленным резким увеличением концентраций в болотных водах (рис. 3) и весьма неравномерным распределением в минеральных микровключениях (табл. 4).



a



b

Рис. 2. Основные минеральные ассоциации во фракции донных отложений в бассейнах Актру и Аргамджи с диаметром частиц ≤ 1 мм (а: А и max – среднее арифметическое и максимум)

и изменение содержаний клинохлора и кварца в отложениях бассейна Актру (b)

Fig. 2. Major mineral associations in the fraction of bottom sediments in the Aktru and Argamdzhi basins with a particle diameter of ≤ 1 mm (a: A and max are the arithmetic mean and maximum) and changes in the contents of clinochlore and quartz in the sediments of the Aktru basin (b)

Таблица 3

Статистически значимые коэффициенты корреляции между показателями химического и минерального состава донных и торфяных отложений

Table 3

Statistically significant correlation coefficients between the chemical and mineral composition of bottom and peat sediments

Показатель	Альбит	Микроклин	Ортоклаз	Амфибол	Клинохлор	Иллит	Каолинит	Цеолит
Высота	–	–	–	0.92	0.91	–	–	–
pH	–	–	–	-0.75	–	–	–	–
Cl ⁻ (в)	–	–	–	(0.79)	-	–	–	–
Ca(дв)	–	(-0.79)	–	-	-	–	–	–
Mg(дв)	–	-	–	(-0.82)	(-0.71)	–	–	–
Na ⁺ (в)	–	-	–	(0.71)	-	–	–	–
Na(ф)	–	(-0.79)	–	-	-	–	–	–
K ⁺ (в)	–	(0.95)	(0.71)	-	-	–	–	–
K(ф)	–	–	–	(0.72)	-	–	–	–
K(дв)	–	(0.88)	–	–	(0.74)	(-0.92)	(0.76)	-
Si(ф)	–	–	–	–	-	-	-	(-0.73)
PO ₄ ³⁻ (в)	–	–	–	(0.81)	–	–	–	–
P(дв)	–	–	–	(0.73)	–	–	–	–
Fe(ф)	–	–	–	–	–	–	–	(-0.71)
Al(ф)	(-0.72)	–	–	–	–	–	–	–
Al(дв)	–	–	–	–	(0.76)	–	–	–
Co(ф)	–	–	–	(0.9)	(0.86)	–	–	–
Co(дв)	–	–	–	(0.82)	–	–	–	–
Cu(дв)	–	–	–	(0.81)	–	–	–	–
Zn(ф)	–	(-0.95)	–	–	–	–	–	–
Ba(дв)	–	–	–	–	(-0.75)	–	–	–
La(ф)	(-0.71)	–	–	–	-	–	–	(-0.7)
La(дв)	–	–	–	(0.86)	-	–	–	–
Ce(ф)	(-0.71)	–	–	–	-	–	–	(-0.7)
Ce(дв)	–	–	–	(0.75)	-	–	–	–
Au(дв)	–	–	–	(0.78)	-	-	-	-
U(ф)	–	–	–	(-0.83)	-	-	-	-
Альбит	1.00	–	–	–	–	-	(0.74)	-
Микроклин	–	1.00	-	–	–	-0.87	-	-
Ортоклаз	–	–	1.00	–	–	-	-	0.90
Амфибол	–	–	–	1.00	0.82	-	-	-
Клинохлор	–	–	–	–	1.00	-	-	-
Иллит	–	–	–	–	–	1.00	(-0.74)	-

Примечания: в скобках приведены значимые коэффициенты корреляции, полученных по 6 пробам в горно-ледниковом бассейне Актру; в прочих случаях приведены значимые коэффициенты для валовых содержаний в воде, полученные и для бассейна Актру (6 проб) и для выборки с добавлением болотных вод в долине р. Аргамджи на плато Укок (7 проб)

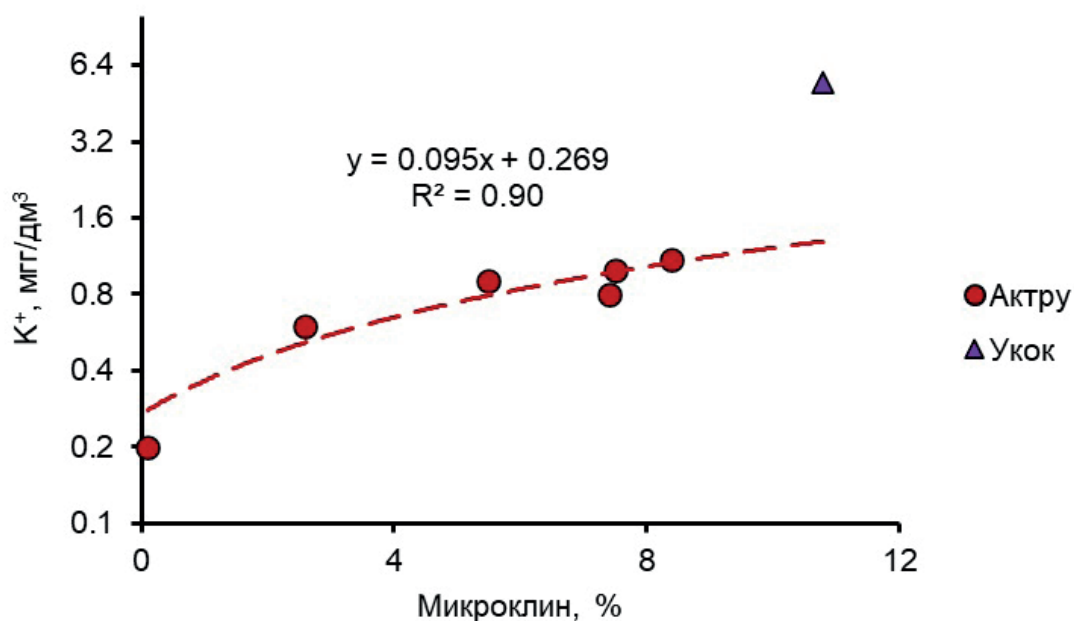


Рис. 3. Зависимость между содержанием микроклина в донных отложениях с диаметром частиц до 1 мм и валовыми концентрациями K⁺ в поверхностных водах Горного Алтая

Fig. 3. The relationship between the microcline content in bottom sediments with particle diameters up to 1 mm and total K⁺ concentrations in surface waters of the Altai Mountains

Таблица 4

Химический состав минеральных включений в торфяные отложения в долине р. Аргамджи (плато Укок) в 2023 г., % от веса (20 проб)

Table 4

Chemical composition of mineral inclusions in peat deposits in the Argamdzhī River valley (Ukok plateau) in 2023, % by weight (20 samples)

Элемент	Среднее арифметическое $\bar{A}$	Погрешность определения среднего $\delta_{\bar{A}}$	Максимум
Al	5.5	1.0	16.7
Ca	4.3	1.8	30.8
Ce	4.2	1.8	22.8
Eu	0.4	0.2	1.8
Fe	2.9	0.9	11.8
La	1.8	0.7	9.1
Mg	0.4	0.2	4.0
Nd	1.8	0.8	13.8
P	2.2	1.0	14.3
K	1.2	0.5	7.4
Pr	0.2	0.2	2.3
Sm	0.3	0.1	2.3
Si	15.1	2.3	38.3
Na	0.4	0.3	6.9
S	0.1	0.1	2.2
Ti	3.2	2.4	46.1
Zr	3.4	2.4	37.7

С учетом этого эффекта целесообразно предусматривать больше внимания изучению заболоченных участков на границе различных ландшафтов, а также их использованию для снижения нагрузки на водные экосистемы при разработке месторождений полезных ископаемых, в том числе путем создания природно-технических систем со свойствами болот. Один из подходов к проектированию подобных комплексов изложен в [Савичев, 2008].

Заключение

Полученные данные о пространственном распределении химических элементов в поверхностных водах и вытяжках из фракции донных отложений с диаметром частиц менее 1 мм, а также их минеральном составе имеют предварительный характер. Тем не менее, их анализ позволяет, во-первых, уточнить методику геохимических поисков полезных ископаемых (акцент на поиск и изучение болотных отложений на границе горно-таежных и горностепных участков как в настоящее время, так и в ретроспективе) и предположить возможность снижения негативных последствий разработки месторождений твердых полезных ископаемых в горных районах путем создания искусственных или «доработки» естественных заболоченных участков или болот.

Во-вторых, общие закономерности формирования химического состава поверхностных вод и донных отложений в

горно-ледниковых бассейнах определяются интенсивным растворением первичных алюмосиликатов в зоне взаимодействия талых ледниковых вод с горными породами, в том числе (и особенно) мелкой фракцией продуктов их механического разрушения. При этом значительная часть ряда химических элементов находится в водном растворе в виде молекулярно-дисперсном и коллоидном состояниях. Затем, по мере перемещения водных масс от зоны абляции ледников к горно-таежным участкам (11–20 км от истоков рек) происходит насыщение и даже пересыщение вод относительно ряда минералов и органо-минеральных соединений, осаждение части наносов, их перераспределение по потоку и сорбция некоторых микроэлементов на частицах наносов. На выходе потоков на горностепные участки, особенно с малыми уклонами водной поверхности и благоприятными условиями для заболачивания долин, наблюдается дополнительная аккумуляция веществ всех форм миграции.

В-третьих, при дальнейшем потеплении климата и деградации ледников следует ожидать дополнительную аккумуляцию ряда химических элементов (в том числе, редкоземельных и урана) именно на границе горно-таежных и горностепных участков. Возможно, что при достаточно длительной устойчивой деградации ледников при общей аридизации климата могут формироваться значительные геохимические аномалии.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interests.

Список литературы

- Алекин О.А. Основы гидрохимии. Ленинград: Гидрометеиздат, 1970. 444 с.
- Галахов В.П., Нарожнев Ю.К., Никитин С.А., Окишев П.А., Севастьянов В.В., Севастьянова Л.М., Шантыкова Л.Н., Шуров В.И. Ледники Актру (Алтай). Водно-ледовый и тепловой баланс горно-ледниковых бассейнов. Ленинград: Гидрометеиздат, 1987. 120 с.
- Гидрогеология СССР. Т. 17. Кемеровская область и Алтайский край. Москва: Недра, 1972. 398 с.
- Гидрохимические показатели состояния окружающей среды / Ред. Т.В. Гусева. Москва: ФОРУМ, ИНФРА-М, 2007. 192 с.
- ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация. Soils. Classification. Москва: Стандартинформ, 2020. 49 с.
- ГОСТ Р 59024-2020. Вода. Общие требования к отбору проб. Water. General requirements for sampling. Москва: Стандартинформ, 2020. 35 с.
- Государственная геологическая карта масштаба 1: 1000000. Алтае-Саянская серия, лист М-45. Москва: ФГУП «ВСЕГЕИ», 2011. 5 с.
- Гусев А.И., А.Ф. Коробейников, Пшеничкин А.Я., Домаренко В.А. Магмо-рудно-метасоматическая система Актуру в Горном Алтае // Успехи современного естествознания. 2014. № 7. С. 75–79.
- Недра России. В 2 т. Т.1. Полезные ископаемые / Ред. Н.В. Межеловский, А.А. Смыслов. Санкт-Петербург: ВСЕГЕИ, 2001. 547 с.
- Окишев П.А. Рельеф и оледенение Русского Алтая. Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та, 2011. 382 с.
- Оледенение Северной и Центральной Евразии в современную эпоху / Ред. В.М. Котляков. Москва: Наука, 2006. 482 с.
- Паромов В.В., Нарожный Ю.К., Шантыкова Л.Н. Оценка современной динамики и прогноз гляциологических характеристик ледника Малый Актру (Центральный Алтай) // Лёд и снег. 2018. Т. 58, № 2. С. 171–182. doi: 10.15356/2076-6734-2018-2-171-182
- Поцелуев А.А., Рихванов Л.П., Владимиров А.Г., Анникова И.Ю., Бабкин Д.И., Никифоров А.Ю., Котеков В.И. Калгутинское редкометалльное месторождение (Горный Алтай): магматизм и рудогенез. Томск, 2008. 226 с.
- Пузанов А.В., Безматерных Д.М., Ермолаева Н.И., Зиновьев А.Т., Кошелева Е.Д., Краснороева Б.А., Ловцкая О.В., Папина Т.С., Рыбкина И.Д., Трошкин Д.Н., Шарабарина С.Н., Яныгина Л.В. Современные водохозяйственные и экологические проблемы бассейна Оби и прогноз состояния до 2030 года // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2022. № 6. С. 45–58. doi: 10.35567/19994508_2022_6_3
- Савичев О.Г. Биологическая очистка сточных вод с использованием болотных био-геоценозов // Известия Томского политехнического университета. 2008. Т. 312, № 1. С. 69–74.
- Савичев О.Г., Домаренко В.А., Перегудина Е.В., Лепокурова О.Е. Трансформация минерального состава донных отложений от истоков к устьям рек // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329, № 7. С. 43–56.

Савичев О.Г., Хващевская А.А., Паромов В.В. Пространственно-временные изменения химического состава компонентов водных объектов в горно-ледниковом бассейне Актру (Горный Алтай) и на прилегающих территориях // Геосферные исследования. 2024. № 2. С. 143–155. doi: 10.17223/25421379/31/9

Тимошок Е.Е., Нарожный Ю.К., Диркс М.Н., Скороходов С.Н., Березов А.А. Динамика ледников и формирование растительности на молодых моренах Центрального Алтая. Томск: Изд-во НТЛ, 2008. 208 с.

Требования к производству и результатам многоцелевого геохимического картирования масштаба 1:200000 / Ред. Э.К. Буренков. Москва.: ИМГРЭ, 2002. 92 с.

Manual on Stream Gauging. V.I. Fieldwork. WMO. No. 1044. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2010. 252 p.

Savichev O.G., Paromov V.V. Chemical composition of glacial meltwaters and river waters within the Aktru river basin (Gornyi Altai) // Geography and Natural Resources. 2013. Vol. 34, no. 4. С. 364–370. doi: 10.1134/S1875372813040100

References

Alekin O.A. Osnovy gidrokhimii [Fundamentals of Hydrochemistry]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1970. 444 p. (in Russian).

Galakhov V.P., Narozhnev Yu.K., Nikitin S.A., Okishev P.A., Syevast'yanov V.V., Sevast'yanova L.M., Shantykova L.N., Shurov V.I. Ledniki Aktru (Altai). Vodnoledovyy i teplovoy balans gorno-lednikovyykh basseynov [Aktru Glaciers (Altai). Waterice and heat balance of mountain-glacier basins]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1987. 120 p. (in Russian).

Gidrogeologiya SSSR. T. 17. Kemerovskaya oblast' i Altayskiy kray [Hydrogeology of the USSR. Vol. 17. Kemerovo Region and Altai Krai]. Moscow: Nedra, 1972. 398 p. (in Russian).

Gidrokhimicheskiye pokazateli sostoyaniya okruzhayushchey sredy [Hydrochemical indicators of the state of the environment] / Ed. T.V. Guseva. Moscow: FORUM, INFRA-M. 2007. 192 p. (in Russian).

GOST 25100-2020. Soils. Classification. Moscow: Standartinform, 2020. 49 p. (in Russian).

GOST R 59024-2020. Water. General requirements for sampling. Moscow: Standartinform, 2020. 35 p. (in Russian).

Gosudarstvennaya geologicheskaya karta masshtaba 1: 1000000. Altaye-Sayanskaya seriya, list M-45 [State Geological Map, scale 1:1,000,000. Altai-Sayan Series, sheet M-45]. Moscow: VSEGEI, 2011. 5 p. (in Russian).

Gusev A.I., Korobeynikov A.F., Pshenichkin A.Ya., Domarenko V.A. Magmo-rudno-metasomaticheskaya sistema Akturu v Gornom Altaye [Magma-ore-metasomatic system Akturu in the Altai Mountains] // Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya [Advances in modern natural science]. 2014. No. 7. P. 75–79. (in Russian).

Nedra Rossii. Poleznyye iskopayemyye [Subsoil of Russia]. In 2 volumes. Vol. 1. Useful minerals / Eds. N.V. Mezhelovsky, A.A. Smyslov. St. Petersburg: VSEGEI, 2001. 547 p. (in Russian).

Okishev P.A. Rel'yef i oledeneniye Russkogo Altaya [Relief and glaciation of the Russian Altai]. Tomsk: Publishing house of Tomsk. state University, 2011. 382 p. (in Russian).

Oledeneniye Severnoy i Tsentral'noy Yevrazii v sovremennuyu epokhu [Glaciation of Northern and Central Eurasia in the Modern Era] / Ed.V.M. Kotlyakov. Moscow: Nauka, 2006. 482 p. (in Russian).

Paromov V.V., Narozhny Yu.K., Shantykh L.N. Assessment of modern dynamics and forecast of glaciological characteristics of the Maly Aktru glacier (Central Altai) // Ice and Snow. 2018. Vol. 58, no. 2. P. 171–182. doi: 10.15356/2076-6734-2018-2-171-182

Potseluyev A.A., Rikhvanov L.P., Vladimirov A.G., Annikova I.Yu., Babkin D.I., Nikiforov A.Yu., Kotegov V.I. Kalgutinskoye redkometall'noye mestorozhdeniye (Gornyy Altay): magmatizm i rudogenez [Kalgutinskoe rare metal deposit (Altai Mountains): magmatism and ore genesis]. Tomsk, 2008. 226 p. (in Russian).

Puzanov A.V., Bezmaternykh D.M., Ermolaeva N.I., Zinoviev A.T., Kosheleva E.D., Krasnoyarova B.A., Lovtskaya O.V., Papina T.S., Rybkina I.D., Troshkin D.N., Sharabarina S.N., Yanygina L.V. Sovremennyye vodokhozyaystvennyye i ekologicheskiye problemy basseyna Obi i prognoz sostoyaniya do 2030 goda [Modern Water Management and Environmental Problems of the Ob Basin and the Forecast of the State until 2030] // Vodnoye khozyaystvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravleniye [Water Management of Russia: Problems, Technologies, Management]. 2022. No. 6. P. 45–58. (in Russian). doi: 10.35567/19994508_2022_6_3

Savichev O.G. Biologicheskaya ochistka stochnykh vod s ispol'zovaniyem bolotnykh bio-geotsenozov [Biological treatment of wastewater using marsh biogeocenoses] // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University]. 2008. Vol. 312, no. 1. P. 69–74. (in Russian).

Savichev O.G., Domarenko V.A., Perehudina E.V., Lepokurova O.E. Transformation of mineral composition of river sediments from sources to mouth of rivers // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2018. Vol. 329, no. 7. P. 43–56.

Savichev O.G., Khvaschevskaya A.A., Paromov V.V. Spatial and long-term changes in the chemical composition of water objects components in the Aktru mountain-glacier basin (Gorny Altai) and in the adjacent territories // Geosphere Research. 2024. No. 2. P. 143–155. doi: 10.17223/25421379/31/9

Timoshok Ye.Ye., Narozhny Yu.K., Dirks M.N., Skorokhodov S.N., Berezov A.A. Dinamika lednikov i formirovaniye rastitel'nosti na molodykh morenakh Tsentral'nogo Altaya [Dynamics of glaciers and formation of vegetation on young moraines of Central Altai]. Tomsk: NTL Publishing House, 2008. 208 p.

Trebovaniya k proizvodstvu i rezul'tatam mnogotselevogo geokhimicheskogo kartirovaniya masshtaba 1:200000 [Requirements for the production and results of multipurpose geochemical mapping at a scale of 1:200000] / Ed. E.K. Burenkov. Moscow: IMGRE, 2002. 92 p.

Manual on Stream Gauging. V.I. Fieldwork. WMO. No. 1044. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2010. 252 p.

Savichev O.G., Paromov V.V. Chemical composition of glacial meltwaters and river waters within the Aktru river basin (Gornyy Altai) // Geography and Natural Resources. 2013. Vol. 34, no. 4. C. 364–370. doi: 10.1134/S1875372813040100

MINERALOGICAL-GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF SEDIMENTS OF SURFACE WATER BODIES OF THE ALTAI MOUNTAIN UNDER CLIMATE CHANGES

O.G. Savichev, V.A. Domarenko, A.M. Nadeeva

Tomsk polytechnic university, Tomsk,

E-mail: osavichev@mail.ru, viktor_domarenko@mail.ru, prezident.2001n@mail.ru

A study of the mineralogical and geochemical state of water bodies in the Altai Mountains (the Aktru Basin and a section of the Ukok Plateau) was conducted in the 2020s. An assessment was made of the mineral composition of the fraction of bottom sediments with a particle diameter of less than 1 mm, the chemical composition of surface waters, and extracts from bottom sediments. The main features of the mechanism underlying their formation were identified, related to the intensive dissolution of primary aluminosilicates in the zone of interaction between glacial meltwater and rocks, water saturation in upstream river reaches (11–20 km), and subsequent sediment deposition and redeposition. A hypothesis was made regarding possible changes due to climate warming.

Keywords: mineralogical and geochemical state; spatial changes; surface water bodies; Gorny Altai.

Received November 11, 2025. Accepted: December 11, 2025

Сведения об авторах

Савичев Олег Геннадьевич – доктор географических наук, профессор отделения геологии Томского политехнического университета. Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. ORCID: 0000-0002-9561-953X. E-mail: osavichev@mail.ru.

Домаренко Виктор Алексеевич – кандидат геолого-минералогических наук, член-корреспондент РАН, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: viktor_domarenko@mail.ru.

Надеева Анастасия Михайловна – аспирант отделения геологии Томского политехнического университета. Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30. E-mail: prezident.2001n@mail.ru.

Information about the authors

Savichev Oleg Gennadievich – Dr Sc. of Geographical Sciences, Professor of the Geology Department of Tomsk Polytechnic University. 30, Lenin Ave., 634050 Tomsk, Russia. ORCID: 0000-0002-9561-953X. E-mail: osavichev@mail.ru.

Domarenko Viktor Alekseevich – PhD of Geological and Mineralogical Sciences, corresponding member of the Russian Academy of Natural Sciences. 30, Lenin Ave., 634050 Tomsk, Russia. E-mail: viktor_domarenko@mail.ru.

Nadeeva Anastasia Mikhailovna – Postgraduate student of the Geology Department of Tomsk Polytechnic University. 30, Lenin Ave., 634050 Tomsk, Russia. E-mail: prezident.2001n@mail.ru.

Журнал
Известия Алтайского отделения
Русского географического общества

№ 4 (79) 2025

Регистрационный номер СМИ от 31.08.2021

ПИ № ТУ22-00790

Зарегистрирован Управлением Федеральной службы по надзору в сфере
связи, информационных технологий и массовых коммуникаций
по Алтайскому краю и Республике Алтай

Подписано в печать 27.12.2025. Дата выхода в свет 30.12.2025.

Формат 60x84 1/8. Печать – цифровая. П.л. 12.5

Тираж 300 экз.

Отпечатано в типографии ООО «Пять плюс»
656049, Алтайский край, г. Барнаул, ул. Крупской, 97,
Тел.: +7(385-2) 62-32-07,
e-mail: fiveplus07@mail.ru
www.five-plus.ru

Цена свободная

Возрастная категория – 12+