ISSN 1999-4508 (Print)
ISSN 2686-8253 (Online)

ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО РОССИИ:

ПРОБЛЕМЫ, ТЕХНОЛОГИИ, УПРАВЛЕНИЕ

научно-практический журнал

№ 4, 2026

WATER SECTOR OF RUSSIA:

PROBLEMS, TECHNOLOGIES, MANAGEMENT

scietific | practical journal

No. 4, 2026

РОСВОДРЕСУРСЫ
ИЗДАНИЕ ЖУРНАЛА ВЫПОЛНЯЕТСЯ В РАМКАХ ГОСУДАРСТВЕННОГО (МУНИЦИПАЛЬНОГО) ЗАДАНИЯ

УЧРЕДИТЕЛЬ ЖУРНАЛА "ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО РОССИИ: ПРОБЛЕМЫ, ТЕХНОЛОГИИ, УПРАВЛЕНИЕ
РОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ КОМПЛЕКСНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ И ОХРАНЫ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ (ФГБУ РосНИИВХ)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР
Косолапов А. Е., д-р техн. наук, профессор, Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов (Ростов-на-Дону, Россия)

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА
Болгов М. В., д-р техн. наук, профессор, Институт водных проблем Российской академии наук (Москва, Россия)

РЕДКОЛЛЕГИЯ
Беляев С. Д., д-р геогр. наук, Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов (Екатеринбург, Россия)
Борисова Г. Г., д-р геогр. наук, профессор, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (Екатеринбург, Россия)
Веницианов Е. В., д-р физ.-мат. наук, профессор, Институт водных проблем РАН (Москва, Россия)
Гареев А. М., д-р геогр. наук, профессор, Башкирский государственный университет (Уфа, Россия)
Гармаев Е. Ж., д-р геогр. наук, академик РАН, Байкальский институт природопользования Сибирского отделения РАН (Улан-Удэ, Россия)
Зиновьев А. Т., д-р техн. наук, Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения РАН (Барнаул, Россия)
Козлов Д. В., д-р техн. наук, профессор, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (Москва, Россия)
Никифоров А. Ф., д-р хим. наук, профессор, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина (Екатеринбург, Россия)
Румянцев В. А., д-р геогр. наук, академик РАН, профессор, Институт озероведения РАН (Санкт-Петербург, Россия)
Селезнёв В. А., д-р техн. наук, профессор, Институт экологии Волжского бассейна РАН (Тольятти, Россия)
Федоров Ю. А., д-р геогр. наук, профессор, Южный федеральный университет (Ростов-на-Дону, Россия)
Хафизов А. Р., профессор, Башкирский государственный аграрный университет (Уфа, Россия)
Чалов С. Р., д-р геогр. наук, профессор, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (Москва, Россия)
Шевчук А. В., д-р экон. наук, профессор, Совет по изучению производительных сил Всероссийской академии внешней торговли Минэкономразвития России (Москва, Россия)
Шмакова М. В., д-р геогр. наук, Институт озероведения РАН (Санкт-Петербург, Россия)
Ясинский С. В., д-р геогр. наук, Институт географии РАН (Москва, Россия)

МЕЖДУНАРОДНЫЙ СОВЕТ
Габриелян Б. К., д-р биол. наук, профессор, Национальная академия наук Республики Армения (Ереван, Республика Армения)
Гюнтер Блешль, профессор, Институт гидротехники и управления водными ресурсами (Вена, Австрия)
Драган А. Савич, профессор, Центр водных систем Университета Эксетера (Эксетер, Великобритания)
Карло Гуальтери, профессор, Университет Неаполя им. Фридриха II (Неаполь, Италия)
Кью Джи Ванг, профессор, Университет Мельбурна (Мельбурн, Австралия)
Слободан П. Симонович, профессор, Университет Западного Онтарио (Онтарио, Канада)

ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЙ РЕДАКТОР
Валек Н. А., канд. филол. наук, Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов (Екатеринбург, Россия)

ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО РОССИИ:

ПРОБЛЕМЫ, ТЕХНОЛОГИИ, УПРАВЛЕНИЕ

научно-практический журнал

WATER SECTOR OF RUSSIA:

PROBLEMS, TECHNOLOGIES, MANAGEMENT

scientific/practical journal

№ 4, 2026

Журнал входит в список ВАК,

Белый список научных журналов, RSCI, ядро РИНЦ

РОСВОДРЕСУРСЫ
THE PUBLICATION OF THE JOURNAL
IS CARRIED OUT WITHIN THE FRAMEWORK
OF THE STATE (MUNICIPAL) ASSIGNMENT

FOUNDER OF THE JOURNAL "WATER SECTOR
OF RUSSIA: PROBLEMS, TECHNOLOGIES, MANAGEMENT"
RUSSIAN RESEARCH INSTITUTE
FOR INTEGRATED WATER MDNDGEMENT
AND PROTECTION (RosNIIVKh)

EDITORIAL BOARD

CHIEF EDITOR
Aleksey E. Kosolapov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection (Rostov-on-Don, Russia)

DEPUTY CHIEF EDITOR
Mikhail V. Bolgov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Russian Academy of Sciences Water Problems Institute (Moscow, Russia)

MEMBERS OF THE EDITORIAL BOARD
Sergey D. Belayev, Dr. Sc. (Geographical), Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection (Ekaterinburg, Russia)
Galina G. Borisova, Dr. Sc. (Geographical), Professor, Ural Federal University (Ekaterinburg, Russia)
Evgeniy V. Venitsianov, Dr. Sc. (Physical/mathematical), Professor, Russian Academy of Sciences Institute of Water Problems (Moscow, Russia)
Aufar M. Gareyev, Dr. Sc. (Geographical), Professor, Bashkir State University, Chair of Hydrology and Geo/ecology (Ufa, Russia)
Endon Z. Garmaev, Dr. Sc. (Geographical), Academician of RAS, Baykal Institute of Nature Management of the Siberian branch of Russian Academy of Sciences (Ulan-Ude, Russia)
Aleksandr T. Zinovyev, Dr. Sc. (Technical), Russian Academy of Sciences Siberian Branch Institute of Water and Environmental Problems (Barnaul, Russia)
Dmitriy V. Kozlov, Dr. Sc. (Technical), Professor, National Research Moscow State University of Civil Engineering (Moscow, Russia)
Aleksandr F. Nikiforov, Dr. Sc. (Chemical), Professor, Ural Federal University (Ekaterinburg, Russia)
Vladislav A. Rumyantsev, Dr. Sc. (Geographical), Professor, Russian Academy of Sciences Institute of Limnology, (St. Petersburg, Russia)
Vladimir A. Seleznyev, Dr. Sc. (Technical), Professor, Russian Academy of Sciences Institute of the Volga Basin Ecology Laboratory for Water Bodies Monitoring (Togliatti, Russia)
Yuri A. Fedorov, Dr. Sc. (Geographical), Professor, Southern Federal University (Rostov-na-Donu, Russia)
Airat R. Khafizov, Professor, Bashkir State Agrarian University (Ufa, Russia)
Sergey R. Chalov, Dr. Sc. (Geographical), Professor, Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia)
Anatoliy V. Shevchuk, Dr. Sc. (Economic), Professor, Ministry of Economic Development of the Russian Federation Russian Academy of External Trade Board for Studying Productive Forces (Moscow, Russia)
Marina V. Shmakova, Dr. Sc. (Geographical), Russian Academy of Sciences Institute of Limnology (St. Petersburg, Russia)
Sergey V. Yasinskiy, Dr. Sc. (Geographical), Russian Academy of Sciences Institute of Geography (Moscow, Russia)

INTERNATIONAL BOARD
Bardukh K. Gabrielyan, Dr. Sc. (Biological), Professor, National Academy of Sciences of the Republic of Armenia (Yerevan, Armenia)
Günter Blöschl, Professor, Institute of Hydraulic Engineering and Water Resources Management (Vienna, Austria)
Dragan A. Savić, Professor, Centre for Water Systems University of Exeter (Exeter, Great Britain)
Carlo Gualteri, Professor, Federico II University (Napoli, Italy)
QJ Wang, Professor, University of Melbourne (Melbourne, Australia)
Slobodan P. Simonovic, Ph.D, University of Western Ontario (Ontario, Canada)

EXECUTIVE EDITOR
Nataliya A. Valek, Cand. Sc. (Philological), Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection (Ekaterinburg, Russia)

СОДЕРЖАНИЕ

УПРАВЛЕНИЕ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫМ КОМПЛЕКСОМ

Переход региональных гидроэнергетических систем
к новым индустриальным моделям на основе циркулярности
Л. Г. Матвеева, Е. В. Каплюк, Д. С. Гриднев 5

Особенности краткосрочного прогнозирования мутности
на примере рек Амур, Ангара, Уссури
О. М. Розенталь, Т. Н. Синцова 28

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

Оценка параметров экологического стока трансграничного бассейна
реки Иртыш для учета экосистемных потребностей при распределении
водных ресурсов
О. И. Никитина, А. Е. Косолапов, Д. В. Савостицкий, М. В. Болгов 45

Пространственно-временная изменчивость внутригодового
распределения стока рек бассейна Верхней Оби
С. Ю. Самойлова, А. Б. Голубева, В. А. Казанцева 64

Рекогносцировочные гидрологические исследования
Питьевого канала на Большом Соловецком острове
К. В. Титова, Н. М. Кокрятская, Т. А. Жибарева, О. Ю. Морева 81

Оценка вклада различных сил в начало движения донного грунта в речном потоке
М. В. Шмакова 98

CONTENT

WATER/ECONOMIC SECTOR MANAGEMENT

Transition of regional hydropower systems to new industrial models based on circularity
L. G. Matveyeva, E. V. Kaplyuk, D. S. Gridnev 5

Features of short-term turbidity forecasting using the Amur, Angara, and Ussuri rivers as examples
O. M. Rozental, T. N. Sintsova 28

WATER RESOURCES STUDIES

Assessment of environmental flow requirements in the transboundary Irtysh River basin for water resources allocation considering ecosystem needs
O. I. Nikitina, A. E. Kosolapov, D. V. Savostitskiy , M. V. Bolgov..... 45

Spatiotemporal Variability of Intra-Annual River Runoff Distribution in the Upper Ob Basin
S. Y. Samoilova, A. B. Golubeva, V. A. Kazantseva 64

Reconnaissance hydrological studies of the Pityevoy Canal on Bolshoy Solovetsky Island
K. V. Titova, N. M. Kokryatskaya, T. A. Zhibareva, O. Yu. Moreva 81

Assessment of the various forces contribution to commencing of bottom soil movement in river flow
M. V. Shmakova..... 98

УДК 332.122

https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-4-5-27

Оригинальная статья/Original paper

Переход региональных гидроэнергетических систем к новым индустриальным моделям на основе циркулярности

Л. Г. Матвеева[1], Е. В. Каплюк[2], Д. С. Гриднев[1]

lmatveeva@sfedu.ru

[1] *Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия*
[2] *Южный федеральный университет, г. Таганрог, Россия*

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Поддержание экономической устойчивости и конкурентоспособности предприятий индустриальных сегментов регионов и их водохозяйственных комплексов (ВХК) в современных условиях напрямую зависит от способности субъектов ВХК внедрять новые бизнес-модели циркулярного типа путем наращивания цифрового потенциала. Поскольку указанные бизнес-модели в значительной степени определяются спецификой региона и его водохозяйственной сферы (ограниченностью водных ресурсов бассейна, нормативами водопотребления, оборотным использованием воды, противоречивостью интересов участников ВХК и др.), их изучение важно для определения способов модификации бизнес-моделей на базе цифровизации и концептов циркулярности, а также разработки практических механизмов адаптации и внедрения данных моделей в управление ВХК региона. **Методы.** Для разработки концепции и прикладного инструментария управления переходом к инновационным бизнес-моделям замкнутого цикла в гидроэнергетике методологическая база исследования сформирована путем конвергенции ряда теорий и подходов: системно-синергетического, динамического и ресурсно-целевого, адаптированных к специфике водного хозяйства. Для разработки модельно-методического инструментария оценки потенциала перехода региональной гидроэнергетической системы к новым индустриальным моделям замкнутого цикла задействовано комплиментарное использование совокупности методов, в числе которых: модели каузального машинного обучения, деревья решений, математическое моделирование, алгоритмы COMAC, многоагентное обучение с подкреплением. **Результаты.** Построена теоретическая рамка исследования и проведена систематизация цифровых бизнес-моделей компаний ВХК; уточнены теоретико-концептуальные представления о сущности и механизмах развития новых бизнес-моделей ВХК на базе цифровизации; осуществлено развитие теории цифровых бизнес-моделей применительно к ВХК региона; определены ключевые элементы моделей в логике их адаптивного развития, обусловленного цифровыми технологиями. Разработана математическая модель многоагентного обучения с подкреплением, выполняющая функцию поиска компромиссных стратегий взаимодействия агентов ВХК в условиях циркулярности с учетом конфликтов их интересов, которая является адаптивным инструментом поддержки принятия управленческих решений в рамках ВХК региона.

© Матвеева Л. Г., Каплюк Е. В., Гриднев Д. С., 2026.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: гидроэнергетические системы, водохозяйственный комплекс, водные ресурсы, циркулярные бизнес-модели, цифровизация, многоагентные модели, регион, компромиссные стратегии взаимодействия акторов водного хозяйства

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-78-10044, https://rscf.ru/project/25-78-10044/ в Южном федеральном университете.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Матвеева Л. Г., Каплюк Е. В., Гриднев Д. С. Переход региональных гидроэнергетических систем к новым индустриальным моделям на основе циркулярности // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2026. № 4. С. 5–27. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-4-5-27; EDN: AZHLVM

Transition of regional hydropower systems to new industrial models based on circularity

Lyudmila G. Matveyeva[1], Ekaterina V. Kaplyuk[2], Danil S. Gridnev[1]

lmatveeva@sfedu.ru

[1] *Southern Federal university, Taganrog, Russia*
[2] *Southern Federal university, Rostov-on-Don, Russia*

ABSTRACT

Relevance. Maintaining the stability and competitiveness of enterprises in industrial segments of regions and their water management complexes (VHK) in modern conditions is directly determined by the ability of VHK entities to introduce new circular business models by building up digital potential. Since these business models are largely determined by the specifics of the region and its water sector (limited water resources of the basin, water consumption standards, water recycling, conflicting interests of VHK participants, etc.), their study is important to determine ways to modify business models based on digitalization and concepts circularity, as well as the development of practical mechanisms for adapting and introducing these models into the management of the VHK region. **Methods.** To develop a concept and applied tools for managing the transition to innovative business models of a closed cycle in hydropower, the methodological base of the study was formed by the convergence of a number of theories and approaches: system-synergistic, dynamic and resource-target, adapted to the specifics of water management. To develop a model and methodological toolkit for assessing the potential for the transition of the regional hydropower system to new industrial closed-loop models, a complementary use of a set of methods was used, including causal machine learning models, decision trees, mathematical modeling, COMAC algorithms, multi-agent reinforcement learning. **Results.** A theoretical research framework was built and the digital business models of VHK companies were systematized; clarified theoretical and conceptual ideas about the essence and mechanisms of development of new business models of VHK subjects based on digitalization; the theory of digital business models was developed in relation to the subjects of the VHK region; key elements of models are identified in the logic of their adaptive development due to digital technologies. A mathematical model of multi-agent training with reinforcement has been developed, which per-

forms the function of searching for compromise strategies for the interaction of VHK agents in a circular environment, taking into account conflicts of their interests, which is an adaptive tool for supporting management decision-making within the VHK region.

KEYWORDS: Hydropower systems, water management complex, water resources, circular business models, digitalization, multi-agent models, region, compromise strategies for the interaction of water management actors

FINANCING: The research was supported by a grant from the Russian Science Foundation № 25-78-10044, https://rscf.ru/project/25-78-10044/ at Southern Federal University.

FOR CITATION: Matveyeva L. G., Kaplyuk E. V., Gridnev D. S. Transition of regional hydropower systems to new industrial models based on circularity. Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management. 2026. No. 4. P. 5–27; https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-4-5-27; EDN: AZHLVM

ВВЕДЕНИЕ

В отечественной экономике системообразующая роль гидроэнергетических систем, в числе которых особые производственные и ресурсообеспечивающие функции выполняют водохозяйственные комплексы (ВХК) регионов, определяет возросшую интенсивность их последовательного перехода к новым индустриальным моделям на базе циркулярности и цифровизации. В координатах региона индустриальная модель понимается как «конкретный и определенный набор элементов организации труда, капитала и информации для создания и распределения ценности на некоторой территории» [1]. В парадигме общеэкономических тенденций масштабирования моделей экономики замкнутого цикла процесс указанного перехода в рамках ВХК детерминируется содержательно заложенными в самой природе и функционале водохозяйственного комплекса свойствами циркулярности и цикличности, включая оборотное водопользование [2, 3].

В условиях объективно существующего дефицита воды ее очистка, переработка и вовлечение в производство становятся дополнительным решением для удовлетворения спроса в этом ресурсе, что усиливает практическую значимость циркулярных бизнес-моделей, обладающих потенциалом обеспечения повторного использования вод при дренажном сбросе на ирригационных системах, на объектах электроэнергетики, нефтепереработки, химического производства, угольной промышленности и др. Тестируемое реальной практикой недостаточное инвестиционное стимулирование потребителей к повторной эксплуатации водных ресурсов, а также сопряженные с этим экологические проблемы [4, 5] и износ основных фондов имеют следствием некачественную очистку воды и ее потери при транспортировке. Решение этих и других вопросов лежит в плоскости партнерских взаимодействий всех субъектов ВХК (производителей, потребителей воды и государства), что является движущим фактором формирования уникальных инновационных бизнес-моделей на

цифровой базе как основной стратегии эффективного управления ВХК. Примером успешной реализации такого рода циркулярных бизнес-моделей в гидроэнергетике является совместный проект государства и частного бизнеса «Вода Ростова»[1].

Реализация перехода ВХК к новым индустриальным формам на основе инновационного развития устойчивых бизнес-моделей циркулярного типа приобретает особое значение в современных реалиях, когда гидроэнергетика, выступая компонентом и динамическим профилем индустриального ландшафта региона [6–8], обладает ключевой ролью в пространственно-экономической трансформации и структурной модернизации региональных экономик, определяет и в значительной степени формирует потенциал указанного перехода [9–13] в рамках стратегического вектора на достижение технологического лидерства и технологического суверенитета. Важной особенностью такого рода бизнес-моделей, реализуемых в ВХК региона, является их ориентированность на рациональное распределение ограниченных водных ресурсов территории между потребителями в целях, с одной стороны, полного удовлетворения их потребностей в воде, с другой – достижения сбалансированного инновационного развития промышленного комплекса. Успешность проводимых реформ в водном хозяйстве страны и ее регионов во многом определяется качеством принимаемых на цифровой платформе управленческих решений, обеспечивающих генерирование значимых позитивных эффектов на всех уровнях управления. В настоящее время именно концепция «цифровой достаточности» процессов принятия управленческих решений обеспечивает основу для понимания того, как информационные технологии могут быть частью значительных достижений в экономике замкнутого цикла, особенно когда они используются бизнес-компаниями. Более того, эффективная реализация ресурсов замкнутого цикла стала возможной с развитием цифровых технологий производства [14, 15].

При этом данные решения должны учитывать разнонаправленные интересы (экономические, политические, социальные) субъектов рынка водных ресурсов, которые находятся в постоянном взаимодействии между собой и с внешней средой (рис. 1).

Сложность задачи обеспечения баланса интересов субъектов гидроэнергетики как инфраструктуры, стимулирующей инновационные процессы в индустриальном секторе региона, объясняется, помимо их противоречивости и разнонаправленности, тем, что сложные нелинейные связи между акторами водохозяйственного комплекса региона продуцируют уникальные статистические паттерны взаимодействий между ними, которые, как показывает прак-

1 Водоканал. Ростов-на-Дону. [Электр. ресурс]. URL: https://vodokanalrnd.ru/press-tsentr/news/rostovskiy-vodokanal-stroit-vazhnyy-dlya-ekologii-regiona-obekt-kompleks-sooruzheniy-povtornogo-ispo/ (дата обращения: 16.01.2025).

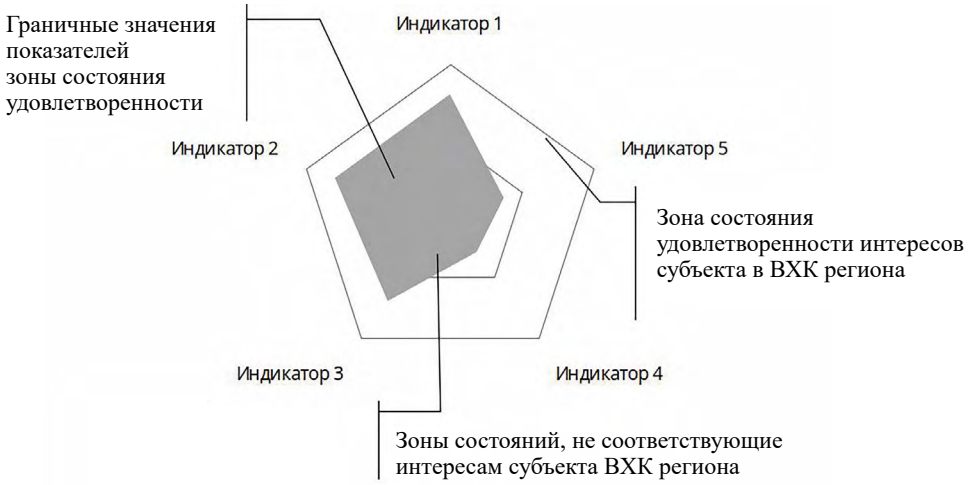


Рис. 1. Паутинообразная модель зонирования профиля интересов субъектов водохозяйственного комплекса региона [13]

Fig. 1. Web-like model of zoning the profile of interests of stakeholders of the regional water management complex [13]

тика, могут быть установлены с использованием современного адаптивного инструментария, в частности методов машинного обучения. Принимаемые на этой основе решения могут способствовать формулированию уникальных управленческих предложений, результативность которых в существенной мере зависит от качества и квалификации лиц, осуществляющих эти действия.

На заседании Государственного совета 25 декабря 2025 года, посвященном вопросам подготовки кадров для экономики РФ, Президент России В. В. Путин отметил, что мы переходим ко времени колоссальной экономической трансформации; ближайшие несколько лет станут временем технологического прорыва, который важен для страны[2], поскольку необходимо значительное повышение доли высокотехнологичной и наукоемкой продукции в общем объеме производства, которая сейчас составляет в целом по России около 17 % (в Москве – 27 %, в Ростовской области – менее 19 %, в большой части регионов – менее 10 %). Так, по результатам аналитических исследований последних лет, «Южный федеральный округ по большинству показателей (за исключением уровня инновационной активности организаций) отстает от других макрорегионов страны. В большей степени это связано с тем, что позитивные значения и тренды ряда показателей Ростовской области и Краснодарского края, лидирующих по инновационному развитию в ЮФО, нивелируются низкими значениями других регионов, занимающих замыкающие позиции в РФ. Это свидетельствует о том, что, во-первых, для отстающих регионов требуется поиск новых механизмов активизации инноваций, поскольку действую-

2 Из выступления В.В. Путина на заседании Государственного совета 25 декабря 2025 года [Электр. ресурс]. URL: http://kremlin.ru/events/president/news/78860/videos.

щая система инструментов и институтов поддержки не дала существенных позитивных результатов; во-вторых, инновационную политику в целом целесообразно адаптировать к специфике инновационного развития регионов юга России, учитывая достигнутые результаты» [16].

В то же время, как правило, каждая программа направлена на решение отдельных текущих проблем (ликвидацию «узких мест») инновационного развития отрасли или региона, тогда как основная задача заключается в том, чтобы совокупность реализуемых программ обеспечивала изменение всей системы отношений в гидроэнергетике (как внутренних, так и внешних), позволяя способствовать эффективной реализации целей и задач, поставленных в новой модели ускоренного высокотехнологичного развития российской экономики. Решение перечисленных проблем видится в формировании комплекса целевых программ, взаимоувязанных, согласованных и структурированных по стратегическим целям и задачам развития региона, его индустриального ландшафта и водохозяйственного комплекса. При этом важным принципом должна быть «возможность формирования набора программ развития водного хозяйства региона в соответствии с региональными особенностями и потенциалом водного бассейна» [16].

По мнению авторов, в данном контексте методологический и практический интерес представляет в том числе региональная структура производства в разрезе уровней технологичности преобладающих видов экономической деятельности, определяющих скорость индустриальных изменений в регионе и в его ВХК.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Присущая гидроэнергетике сложная иерархия взаимодействий между субъектами водного хозяйства региона, отражающих не только специфику самого ВХК как важного элемента индустриального ландшафта, но также применяемых механизмов и инструментов управления (рис. 2), формирует специфические совокупности характеристик субъектов ВХК, позволяющие идентифицировать уникальные свойства используемого для принятия решений инструментария, в составе которого большое распространение получают сквозные цифровые технологии.

Исследование этих и других сопряженных с рассматриваемой проблематикой вопросов базируется на совокупности и совместном использовании ряда общеметодологических и специфических методов и приемов. Базовым методологическим приемом выступает системно-синергетический подход, в соответствии с которым индустриальный ландшафт региона идентифицируется как сложная система, в состав которой входит, наряду с другими промышленными сферами, гидроэнергетика и ее структурно-функциональные подсисте-

мы, в т. ч. ВХК, а связи между этими элементами синергетическим образом продуцируют эффекты во внутренней и внешней среде ландшафта и региона в целом как суперсистемы. При изучении вложенности понятий «индустриальный ландшафт», «гидроэнергетика» и «водохозяйственный комплекс» региона использовались основные положения новой экономической географии, ландшафтоведения и эволюционной экономики, адаптированные к условиям высокой экономической нестабильности.

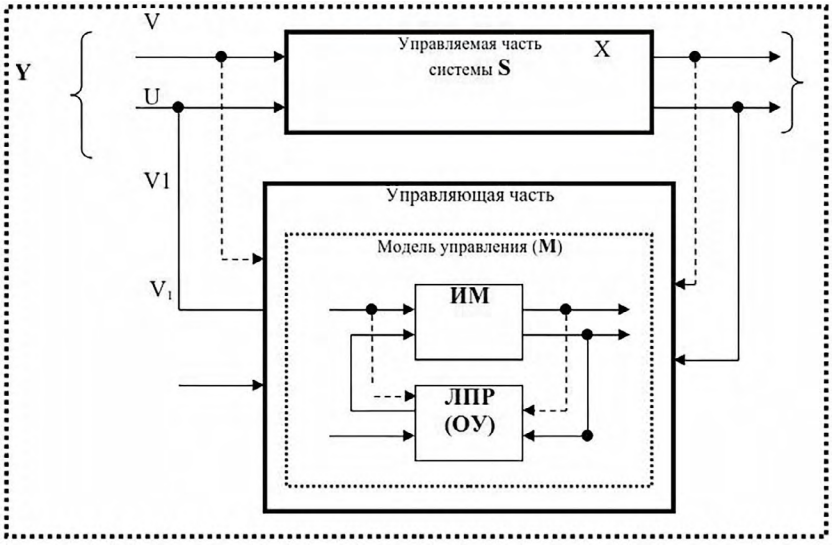


Рис. 2. Примерная модель системы управления ВХК региона [13]

Fig. 2. Approximate model of the region's WMC (water management complex) control system [13]

Примечание: S – система управления ВХК, X – водные ресурсы региона (вход), Y – распределенные водные ресурсы региона после реализации инкрементальной модели управления (выход), ИМ – инкрементальная модель управления; часть системы – управляемая часть – подлежит управлению U, а часть системы является управляющей, которая вырабатывает это управление (ЛПР – лицо, принимающее решение (или ОУ – орган управления)) в условиях, когда могут быть неконтролируемые воздействия на систему V и V_1. В общей схеме управления отображены прямые и обратные связи.

Note: S – WMC control system; X – region's water resources (input); Y – distributed regional water resources after implementation of the incremental management model (output); IM – incremental management model; part of the system – the controlled part – is subject to control U, and part of the system is the controlling part, which generates that control (DMP – decision-making person or OM – governing body) under conditions when there may be uncontrollable impacts on the system V and V1. The overall control scheme shows both forward and feedback links.

Для разработки модельно-методического инструментария оценки потенциала перехода региональной гидроэнергетической системы к новым индустриальным моделям и бизнес-моделям замкнутого цикла задействовано комплиментарное использование совокупности традиционных и относительно новых методов, в числе которых машинное обучение, деревья решений (ансамблевый бустинг), экономико-математическое моделирование, алгоритм COMAC, нейронные сети, модели каузального машинного обучения, многоагентное обу-

чение с подкреплением. Эти группы инструментов имеют достаточно общий характер и применимы для анализа региональных пространственных данных. Деревья решений также помогают проследить каузальные связи между региональными факторами и экономическими результатами.

В основе концепции данного исследования лежит идея о том, что последовательный, целеориентированный на более рациональное использование водных ресурсов региона переход гидроэнергетических систем к новым индустриальным моделям возможен на базе цифровизации и при использовании инновационных бизнес-моделей замкнутого цикла.

Бизнес-модели замкнутого цикла (БМЗЦ) в гидроэнергетике, как и в других сферах, представляют собой модели ведения хозяйственной деятельности, основанные на принципах циркулярной экономики [17–19]. В отличие от традиционной линейной модели «взял – произвел – использовал – выбросил», циркулярная модель в системе водного хозяйства региона предполагает многооборотное использование водных ресурсов и их производных. Основная идея – максимальное продление жизненного цикла водных ресурсов, повторное использование воды и минимизация отходов. Такая «безотходная» экономика в гидроэнергетике нацелена на сокращение потребности в первичных водных ресурсах, что одновременно снижает издержки производства и частично решает проблему объективно существующего дефицита данного вида ресурсов. По сути, отходы одного процесса должны становиться сырьем для другого, формируя замкнутые циклы производства и потребления. Подобный подход не только снижает нагрузку на окружающую среду, но и способствует появлению новых экономических возможностей: например, локальные циклы переработки использованной воды создают рабочие места и стимулируют развитие малого и среднего бизнеса.

Механизмы перехода к БМЗЦ в гидроэнергетике включают преобразование цепочек поставок водных ресурсов, технологий их переработки (в т. ч. очистки) и оборота, а также бизнес-процессов таким образом, чтобы обеспечить замкнутость потоков воды и энергии. В рамках стратегии перехода обычно реализуется принцип «3R» (reduce, reuse, recycle – сокращение потребления, повторное использование, переработка). На практике это требует внедрения целого ряда инноваций: от обратной логистики (возврата и переработки отработанной воды) до создания промышленных экосистем в рамках индустриального ландшафта региона, где предприятия обмениваются побочными продуктами производства. Например, промышленный симбиоз позволяет одному предприятию использовать те водные ресурсы, которые для другого являются отходами, – таким образом формируется межотраслевая замкнутая цепочка. Инновационные БМЗЦ предполагают и новые подходы к дизайну продуктов переработки воды, и внедрение обратных каналов сбора и утилизации, и переосмысление отношения потребителей к проблеме рационального водопользования.

Цифровизация как общесистемная парадигма БМЗЦ и современные технологии играют особую роль в становлении инновационных бизнес-моделей замкнутого цикла в гидроэнергетике [20, 21]. Концепция Индустрии 4.0 – интернет вещей, большие данные, искусственный интеллект, блокчейн и др. – предоставляет лицам, принимающим решения, инструменты для оптимизации материальных потоков и замыкания циклов. Зарубежный опыт показывает тесную связь между цифровыми технологиями и циркулярными моделями бизнеса. Например, с помощью датчиков и IoT можно отслеживать движение воды по всей цепочке – от добычи водных ресурсов до утилизации – и тем самым эффективно организовать их возврат в производство. Цифровая трансформация применяемых в гидроэнергетике бизнес-моделей способствует переходу от массового (зачастую неэффективного) потребления воды к более рациональным моделям: развитию совместного пользования водными ресурсами, сервисных моделей и пр. Отдельно следует отметить большой потенциал искусственного интеллекта в управлении сложными энергосистемами: AI может прогнозировать спрос и оптимизировать генерацию и хранение воды, снижая как ее потери, так и излишки. Уже сегодня умные сети и аналитические системы позволяют, например, сокращать потери воды в коммунальном хозяйстве на 25–30 % за счет более точного учета и управления потоками. Таким образом, цифровизация выступает мощным драйвером для реализации принципов замкнутого цикла в гидроэнергетике на практике, хотя ее потенциал еще не использован полностью и требует дальнейших исследований.

В контексте исследования проблематики применения замкнутых бизнес-моделей на этапах производства, распределения, потребления и утилизации воды следует дополнительно отметить, что гидроэнергетика – одна из ключевых отраслей для внедрения принципов циркулярной экономики, поскольку именно в энергетических цепочках циркуляция воды и замкнутые циклы могут существенно повысить общую эффективность водохозяйственных систем и их экологичность. Рассмотрим, как принципы БМЗЦ находят применение на разных стадиях – от производства воды необходимого качества до ее потребления и утилизации.

На стадии *генерации* водных ресурсов переход к замкнутым моделям выражается прежде всего в замене невозобновляемых видов ресурсов возобновляемыми и в вовлечении вторичных водных ресурсов в производственный оборот. Вместо переработки воды, извлекаемой из исчерпаемых источников водных ресурсов, циркулярная модель предполагает опору на повторное вовлечение в производственный процесс использованной воды. В российских условиях именно развитие возобновляемых источников (в частности, гидроэнергетики) рассматривается как один из перспективных векторов циркулярной экономики, поскольку эти источники возобновляются естественным путем и фактически образуют замкнутый цикл в масштабе биосферы (кру-

говорот воды). Использование возобновляемых источников сокращает «вход» невозобновляемых ресурсов в производственный цикл и снижает образование вредных отходов при использовании воды.

Помимо возобновляемых источников водных ресурсов, замкнутая модель поощряет использование побочных продуктов и отходов от потребления воды в других отраслях. В результате решаются три задачи: утилизируются отходы, происходит уменьшение нагрузки на экологию и одновременно генерируется полезная энергия (принцип waste-to-energy).

Еще один аспект – вторичные водные ресурсы в промышленности. Многие промышленные отрасли используют воду в своем производстве, что в циркулярной модели рассматривается как ценный вторичный ресурс. Примером является создание замкнутых циклов водоснабжения, где сточные воды проходят очистку и возвращаются в производство для охлаждения, промывки или технологических нужд. Это минимизирует забор пресной воды и сброс отходов, используя методы механической, биологической и мембранной очистки[3].

К числу основных способов вторичного использования воды относятся следующие:

1. Оборотные системы охлаждения, в которых вода постоянно циркулирует, проходя через градирни, что является наиболее часто применяемым на практике методом охлаждения воды и используется на электростанциях, нефтеперерабатывающих заводах и на других предприятиях, где требуется охлажденная вода.

2. Различные технологические циклы, где необходима очищенная вода, которая используется для промывки сырья, деталей, промежуточных изделий, а также для очистки газов и в красильных цехах, где требуется чистая вода.

3. Так называемые промышленные бани. В соответствии с этим способом вторичного использования вода после очистки возвращается в ванны для обработки различных изделий (например, при катафорезе).

4. Бессточные системы (ZLD), реализующие технологию «нулевого жидкого сброса», в которой используется испарение и осуществляется кристаллизация для возврата 100 % воды.

Для повторного использования воды применяются различные технологии очистки, в числе которых: механические (решетки, песколовки, ультрафильтрация); химические и физико-химические (коагуляция, флокуляция); мембранные (обратный осмос, нанофильтрация); биологические (аэротенки и мембранные биореакторы).

Применение циркулярных бизнес-моделей или замкнутых систем (например, сгустителей) позволяет возвращать до 90 % технической воды, снижая

3 Пять идей для повторного использования воды для бизнеса. [Электр. ресурс]. URL: https://rudesignshop.ru/blog/5-idey-dlya-povtornoe-ispolzovanie-vody-dlya-biznesa.

экологическую нагрузку на внешнюю среду и экономические затраты предприятий. Примером эффективного повторного использования воды в промышленности является производство синтетического каучука, а также готовой продукции на целлюлозно-бумажных производственных объектах, где активно внедряются современные системы очистки. Таким образом, в промышленных процессах множество операций требует повторного использования воды, в т. ч. на базе цифровизации, в результате вторичного вовлечения сточных вод посредством применения термических методов обработки жидких отходов до чистой воды (дистиллята) и твердого отхода[3].

Этап *распределения водных ресурсов* (транспортировка, хранение воды) также претерпевает изменения под влиянием циркулярных подходов. Традиционные системы транспортировки воды были ориентированы на однонаправленный поток «от производителя к потребителю», при котором избыточная вода теряется, а потребители пассивны. Инновационные бизнес-модели предполагают гибкие интеллектуальные сети с двусторонним движением воды и информационными потоками.

Интеллектуальные сети доставки воды потребителям оснащены датчиками, смарт-счетчиками и системами управления в реальном времени, что позволяет значительно снизить потери при ее транспортировке и распределении. Например, утечки в сетях водоснабжения удается сократить на 25–30 % благодаря интеллектуальному учету и анализу данных. Цифровые системы управления оптимизируют нагрузку на транспортные сети, переключают потоки так, чтобы минимизировать перегрузки и холостые потери. Благодаря этому вода циркулирует без излишних потерь, что является реализацией принципа ресурсной эффективности циркулярной экономики. Кроме того, развиваются системы накопления воды (фермы, гидроаккумулирующие станции и др.), которые позволяют аккумулировать избыточную воду в период низкого спроса и возвращать ее в сеть в часы пик. Это создает замкнутый цикл внутрисуточного или сезонного баланса: вода возвращается в оборот при необходимости.

На этапе *потребления воды* принципы замкнутого цикла проявляются через изменение поведения потребителей и появление новых моделей удовлетворения потребностей в воде. Цель – рациональное водопотребление с минимальными потерями и отходами, что подразумевает бóльшую эффективность и многократное использование воды, т. е. соответствие стратегии общеэкономической ресурсоэффективности.

Один из ключевых подходов – повышение эффективности конечного использования водных ресурсов. Это своего рода «невидимый» замкнутый цикл: сэкономленная вода эквивалентна произведенной. За счет внедрения инновационных бизнес-моделей и технологий умного производства удается высвободить часть воды, которая возвращается в промышленный оборот (в виде сниженной потребности в генерации). Такие бизнес-модели совмещают интересы

потребителя (уменьшение расходов на воду) и поставщика воды, стимулируя бережливое отношение к ней.

Стадия *утилизации* в гидроэнергетике охватывает утилизацию отходов, возникающих в процессе производства и потребления воды, а также вывод из эксплуатации устаревшего оборудования. В линейной модели на этом этапе ценный водный потенциал часто терялся: отходы воды отправлялись на свалку, старые установки демонтировались на металлолом. В замкнутой модели есть возможность максимальной переработки и повторного использования воды на этом завершающем этапе циркулярной бизнес-модели, чтобы замкнуть цикл полностью. Иными словами, циркулярный подход подразумевает, что все остаточные продукты промышленного водопользования должны становиться вторичным ресурсом для новых циклов.

Таким образом, переход к инновационным бизнес-моделям замкнутого цикла в гидроэнергетике является важным направлением прогресса в условиях цифровой экономики и ориентации на устойчивое развитие. Бизнес-модели замкнутого цикла предлагают системный подход к ведению энергетического бизнеса, при котором достигается многократное использование водных ресурсов, минимизация отходов и синергия между участниками экономической деятельности. По мнению Yan Zh. «...благодаря инновациям в бизнес-моделях цифровизация способствует интеграции существующих ресурсов, оптимизации бизнес-процессов, повышению эффективности деятельности и устранению отраслевых барьеров. Это позволяет компаниям формировать дифференцированные конкурентные преимущества и потенциально изменять конкурентный ландшафт в условиях усиливающейся рыночной конкуренции в цифровую эпоху» [22]. Такие модели отвечают глобальным целям – обеспечению доступной чистой воды, ответственному потреблению и борьбе с климатическими изменениями – и одновременно способны повысить конкурентоспособность и инновационность компаний – субъектов водохозяйственных комплексов регионов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В предыдущем разделе были рассмотрены важнейшие физические элементы инфраструктуры ВХК, обеспечивающие его переход к новым индустриальным моделям. В данном разделе описывается цифровой уровень указанного перехода: алгоритмы ИИ и машинного обучения, которые обеспечивают успешное принятие решений в управлении ВХК региона.

Для координации экономической деятельности агентов регионального ВХК требуется поиск оптимальных параметров сразу по двум уровням: каждый автономный агент ВХК региона должен оптимизировать свои локальные процессы (сброс и забор воды, ее очистку, переработку, повторное использо-

вание и пр.). В то же время для достижения устойчивости всей системы ВХК региона требуется нахождение глобального оптимума (минимизация энергопотребления, общего количества отходов, эксплуатационных расходов). Таким образом, устойчивая работа ВХК региона подразумевает решение экономической оптимизационной задачи в условиях экстерналий.

Одним из перспективных решений данной проблемы является многоагентное обучение с подкреплением – Multi-Agent Reinforcement Learning, или MARL [23]. Каждое предприятие ВХК становится в данной модели автономным агентом, который имеет свою локальную функцию оптимизации в условиях некоторых ограничений (например, минимизация затрат на очистку воды при соблюдении строгих экологических нормативов). Вместе с тем модель должна определять глобальную цель всей системы ВХК региона. К такой цели может относиться минимизация общего сброса отходов в регионе. Спайкой между двумя задачами оптимизации выступает особая структура вознаграждения множества автономных агентов ВХК. К примеру, нарушение общерегиональных экологических норм может иметь для агента больший штрафной вес, чем неэффективности локального уровня. Таким образом, на основе балансировки интересов предприятий и всей системы методом проб и ошибок после множества итераций модели достигается общее оптимальное состояние регионального ВХК.

В реальных инженерных системах целесообразно строить MARL-архитектуру на основе федеративного обучения, в котором каждое предприятие обучает только часть модели на основе локальных данных, а с внешней средой обменивается лишь результатами обучения. В рамках индустриального симбиоза предприятий региона данная архитектура позволяет оптимизировать поток ресурсов между ними, соблюдая при этом конфиденциальность их данных.

Если моделирование MARL касалось симуляционных и «калибровочных» процессов в управлении ВХК региона, то интерпретируемый ИИ (XAI) является иной формой поддержки управленческих решений. Используя наблюдения о хозяйственных процессах на местных предприятиях ВХК, управленцы могут задействовать модели XAI для более детального анализа предиктивных моделей водопользования [24–26]. В частности, использование SHAP вместе с регрессионными моделями позволяет объяснить прогноз как по любой точке данных, так и глобально, по признакам всего набора данных. К примеру, модельный ансамбль SHAP + XGBoost позволяет количественно установить вклад климата, структуры промышленности, демографии и других факторов в предсказание «выхода» модели (например, дефицит водных ресурсов региона). Нужно помнить о том, что ни SHAP (или его аналоги), ни регрессии деревьями решений не позволяют установить причинно-следственные связи. Данные методы сильно зависят от вариации признаков в наборе данных, что

обеспечивает крайне эффективный способ анализа предиктивной, но не каузальной силы факторов модели.

Каузальные оценки могут быть получены благодаря моделям каузального машинного обучения [27]. Благодаря особой структуре данных моделей, которая ортогонализирует получаемые оценки (это релевантно в отношении, например, двойного машинного обучения), становится возможным выделить чистый эффект влияния того или иного фактора на целевую переменную. Каузальное машинное обучение превосходит традиционные эконометрические методы за счет возможности точной оценки нелинейных взаимодействий между факторами. Таким образом, становится возможным оценить на самом мельчайшем, гранулированном уровне эффективность субсидий для предприятий ВХК, критические точки в потоках внутри индустриального симбиоза, причины и следствия внутри цифровых двойников предприятий ВХК. Каузальные модели машинного обучения обеспечивают информированную поддержку управленческих решений, которая основывается не на корреляциях, а на реальных причинно-следственных связях.

Далее предлагается формальная математическая модель многоагентного обучения с подкреплением, которая выполняет функцию поиска компромиссных стратегий взаимодействия агентов ВХК в условиях необходимости развития циркулярных моделей и учета конфликтов интересов хозяйствующих субъектов региона. Представленная формализация выполняет роль прототипа для дальнейшей апробации на реальных данных.

Формализация модели начинается с описания пространства состояний глобальной среды, в которой действуют разнородные агенты, входящие в состав водохозяйственного комплекса региона.

Глобальная среда. Пусть имеется пространство состояний водного бассейна региона S. В данном пространстве конкретное состояние моделируемой среды на момент t описывается кортежем гидрологических параметров:

$$s_t = (h_t, c_t, p_t) \in S,$$

где h_t – вектор уровней воды в бассейне региона;

c_t – вектор мощностей по обработке воды в системе ВХК;

p_t – вектор цен на воду.

Пусть общее количество водных ресурсов региона в момент t характеризуется переменной W_t.

Представленные параметры обновляются каждый шаг итерации модели по определенным предзаданным гидрологическим (f_h) и экономическим (f_d) траекториям с поправкой на стохастические экзогенные шоки случайного характера. Вектор мощностей по обработке воды также изменяется на каждом шаге модели в момент t в зависимости от инвестиций c_{inv} агента i в прошлом

периоде $t - 1$, т. е. общие мощности по обработке находятся в зависимости от инвестиций агентов в циркулярную инфраструктуру ВХК.

Агенты и их действия. В составе ВХК региона существует множество агентов $A = \{1, \ldots, N\}$. Каждый агент представляет определенного участника ВХК (предприятия-производители водных ресурсов, предприятия-потребители воды (промышленность, сельское хозяйство, организации ЖКХ и другие), а также государство как макрорегулятора).

Агент i в момент t делает некоторый выбор a_{ti} из множества доступных для него альтернатив U_i. Выбор a_{ti} представляет из себя кортеж:

$$a_{ti} = (u_{ti}^{ex}, u_{ti}^{recyc}, p_{ti}, c_{ti}),$$

где u^{ex}_{ti} – забор воды агента i в момент t (определяется экзогенно по отношению к модели как доля α_i от общих водных ресурсов региона W);

u^{recyc}_{ti} – сброс очищенной воды агента i в момент t;

p_{ti} – цена единицы воды, по которой агент i может покупать или продавать воду (определяется экзогенно по отношению к модели);

c_{ti} – инвестиции в циркулярную инфраструктуру ВХК региона.

О состояниях S агенты имеют свои наблюдения o_{ti}, которые являются частичным «срезом» векторов s_{ti}.

Структура вознаграждения. Каждый агент i в момент t балансирует свою необходимость зарабатывать прибыль, соответствовать экологическим нормам и переходить к циркулярным моделям.

Функция вознаграждения r_{ti} описывается тогда следующим образом:

$$r_{ti} = \Pi_{ti} - \lambda_i^{env} * \varphi_{ti} + \lambda_i^{cir} * \psi_{ti},$$

причем λ^{env} и λ^{cir} представляют собой поправочные весовые коэффициенты штрафов и вознаграждений для каждого агента i.

Необходимы следующие пояснения относительно функции вознаграждения:

- Π_{ti} – функция прибыли (или убытка) организации – агента ВХК, которая определяется как разница между выручкой агента в составе ВХК (если он продает излишки воды на региональном рынке) и его операционными расходами C^{op}, которые представляют собой функцию от u^{ex} и u^{recyc} агентов, а именно:

$$\Pi_{ti} = p_{ti} * u_{ti}^{ex} - C_{ti}^{op}(u_{ti}^{ex}, u_{ti}^{recyc});$$

- функция штрафа за нарушение экологических регуляторных норм (L^{reg} выступает константой допустимого забора воды в регионе) представляет собой оператор максимум из нуля и разницы между забором и нормой забора и рассчитывается следующим образом:

$$\phi_{ti} = \max (0, \sum_{j \in N} u_{tj}^{ex} - L_t^{reg});$$

- функция бонуса за циркулярность с индивидуальным для агента *i* весовым коэффициентом β_i можно представить так:

$$\psi_{ti} = \beta_i * u_{ti}^{recyc}.$$

Целевая функция модели. Агенты максимизируют дисконтированную функцию кумулятивных выигрышей:

$$\max_{\Xi} = E [\sum_{t=0}^{\infty} \gamma^t r_{ti} \mid \Xi_i], \gamma \in (0,1),$$

где Ξ – функция, ставящая в соответствие наблюдения актора *i* и его действий;

r_{ti} – функция вознаграждения агента *i*;

γ – коэффициент дисконтирования.

Обучение модели. Пусть имеется сеть акторов $\mu_{\theta i}(o_{ti})$, которая ставит в соответствие наблюдения акторов и непрерывные векторы действий a_{ti}. Также имеется сеть критики $Q_{\varphi i}(s_t, a_t, a_t^{-i})$, которая для каждого агента оценивает пары (действия – состояния среды) с учетом действий других акторов a_{t-i} и полной информации о глобальной среде. Акторы, имея неполную информацию о внешней среде, предпринимают свои действия. Критик, имея полную информацию о текущем состоянии среды, выдает числовую оценку будущего состояния среды (*Q*-value), после чего агенты корректируют свои действия на следующем этапе, чтобы минимизировать ошибку между оценкой критика и реальным значением таргета. Цикличная корректировка параметров действий агентов с целью максимизации оценки критика и есть обучение модели по алгоритму COMAC [28].

Отметим, что в данной модели вода рассматривается как обмениваемый на региональном рынке товар, а агенты – как максимизирующие свою прибыль автономные субъекты. Отсюда следует, что модель абстрагируется от логики конечного производства и концентрируется не на конечном производстве, а конкретно на рынке водных ресурсов, т. е. на выручке от реализации собственно забранной воды за вычетом операционных издержек на очистку, транспортировку и пр.

Используя алгоритм COMAC (Cooperative-Competitive Multi-Agent Actor-Critic) и алгоритм градиентного спуска, можно путем оптимизации целевой функции модели установить для акторов:

1) точные параметры их перехода от ограниченной информации к конкретным индивидуальным управленческим действиям;

2) оптимальные гиперпараметры структуры штрафов региональной системы (λ^{env} и λ^{cir}) для каждого агента ВХК;

3) политические рекомендации (индивидуальные бонусы за циркулярность или экологические штрафы);

4) общее благосостояние ВХК региональной системы (сумма функций вознаграждений агентов в оптимальном состоянии).

Таким образом, разработанная авторами модель является адаптивным инструментом поддержки принятия оптимальных управленческих решений в рамках регионального ВХК по целому спектру специфических, свойственных именно водохозяйственной системе, направлений.

ВЫВОДЫ

Результаты анализа широкого спектра современных публикаций об основных и хорошо известных в научном дискурсе факторах перехода системообразующих отраслей региона (в числе которых гидроэнергетика и ее часть – ВХК) к новым индустриальным моделям подтвердили ключевую роль в этих процессах циркулярности на базе цифровизации. Исходя из того, что для компаний ВХК является ключевой задачей обеспечение полного удовлетворения потребностей в водных ресурсах с одновременным решением проблемы их эффективного использования, в проведенном исследовании осуществлено обоснование того, что нацеленный на рациональное водопотребление переход гидроэнергетических систем к новым индустриальным моделям возможен исключительно на базе цифровизации и применения инновационных бизнес-моделей замкнутого цикла, поскольку это означает реальную возможность согласованного решения указанных вопросов. То есть не только предложение потребителям воды требуемого качества и предоставление соответствующих услуг за счет применения цифровых технологий, но и оптимизацию процесса управления всем жизненным циклом водных ресурсов.

Построенная теоретическая рамка и концептуализация основных положений механизма поиска компромиссных стратегий взаимодействия агентов ВХК и учета конфликтов их интересов в рамках моделей замкнутого цикла позволили получить целый ряд теоретических и практико-прикладных результатов:

– проведена систематизация цифровых бизнес-моделей замкнутого типа компаний ВХК, учитывающих их специфику;

– уточнены концептуальные представления о сущности и механизмах развития новых бизнес-моделей субъектов ВХК на базе цифровизации;

– осуществлено развитие теории цифровых бизнес-моделей применительно к субъектам ВХК региона на основе интегрированной концепции, сочетающей теорию динамических способностей, теорию цифрового потенциала, теорию циркулярности и теорию диффузии инноваций, что позволило разработать оригинальный методологический подход для оценки влияния цифровизации на устойчивость бизнес-модели;

– определены ключевые элементы новых циркулярных бизнес-моделей применительно ко всем этапам жизненного цикла водных ресурсов в логике адаптивного развития данных моделей, обусловленного цифровыми технологиями;

– обосновано, что механизмы перехода к бизнес-моделям замкнутого цикла в гидроэнергетике в условиях современных турбулентностей внешней среды включают не только преобразование цепочек поставок водных ресурсов, но и технологий их переработки (в том числе очистки) и оборота, а также собственно бизнес-процессов таким образом, чтобы обеспечить замкнутость потоков воды и энергии, что во многом достигается благодаря высокому качеству партнерских взаимодействий участников ВХК;

– бизнес-модели замкнутого цикла предлагают системный подход к ведению энергетического бизнеса, при котором достигаются многократное использование водных ресурсов, минимизация отходов и синергия между участниками экономической деятельности.

В соответствии с этим получен вывод, что переход к инновационным бизнес-моделям замкнутого цикла в гидроэнергетике является важным направлением развития в условиях цифровой экономики и ориентации на ее устойчивое и резильентное развитие. Такие модели отвечают глобальным целям – обеспечению доступности чистой воды, ее ответственному потреблению и борьбе с климатическими изменениями – и одновременно способны повысить конкурентоспособность и инновационность компаний – субъектов ВХК регионов.

В исследовании показано, что гармонизация интересов разнородных агентов индустриального ландшафта региона, в т. ч. водохозяйственных систем, может быть осуществлена с помощью передовых методов машинного обучения. В частности, предложенная в статье модель многоагентного обучения с подкреплением (MARL) является прототипом для построения более сложных моделей, которые могут быть использованы для принятия не только экономических, экологических, но и политических решений.

Более детализированное (гранулированное) моделирование процесса столкновения интересов участников ВХК и разрешения конфликтов между ними позволит точнее калибровать систему штрафов и вознаграждений, которая стимулировала бы переход к новым индустриальным моделям. Однако результаты моделирования MARL должны дополнительно подтверждаться эмпирическими каузальными исследованиями (например, с помощью каузального машинного обучения) для формирования многоуровневой системы кросс-валидации моделей, что может стать направлением дальнейших исследований в данной области. В таком случае эмпирические оценки направляли бы логику симуляционного моделирования, а сложные симуляции становились полигоном апробации сложных политических программ циркуляризации ВХК региона. Такой сложный модельный комплекс (ансамбль) стал бы важным поддерживающим элементом процесса перехода ВХК регионов к новым индустриальным моделям.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
CONFLICT OF INTERESTS
The authors declare no relevant conflict of interests.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гриднев Д. С. От «глобализирующихся регионов» к региональным производственным системам: теория множественных индустриальных моделей // Экономическая наука современной России. 2026. № 2. [В печати].
2. Митрофанова И. В., Чернова О. А. Проблемы и перспективы развития циркулярной экономики на основе повторного водопользования в регионах Южного федерального округа РФ // Теория и практика общественного развития. 2022. № 4 (170). С. 55–61. https://doi.org/10.24158/tipor.2022.4.8
3. Матвеева Л. Г. Цифровые и циркулярные меридианы развития водного хозяйства региона: монография. Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета, 2024. 155 с. https://doi.org/10.18522/801332158
4. Колпоносова В. С., Матвеева Л. Г. Циркулярный концепт развития индустриального сектора регионов юга России в условиях новой глобализации (пример водных экосистем) // Естественно-гуманитарные исследования. 2025. № 2 (58). С. 296–300.
5. Кузьмичев А. А., Рыжаков А. Н., Мартынов Д. В. Анализ дефицита водных ресурсов и использования мелиорированных земель в Южном федеральном округе // Мелиорация и гидротехника. 2021. Т. 11. № 3. С. 19–35. https://doi.org/10.31774/2712-9357-2021-11-3-19-35
6. Косолапова Н. А., Матвеева Л. Г., Каплюк Е. В. Стратегические фронтиры индустриального ландшафта макрорегиона: кейс водных ресурсов // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 6. С. 5–25. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-6-5-25
7. Krupina N. N. Water intensity of the social product as a target landmark of the Russian water strategy (regional aspect) // Regional Economy. Theory and Practice. 2017. Vol. 15. Iss. 6. P. 1016–1033. https://doi.org/10.24891/re.15.6.1016
8. Висмет Х. Системные преобразования для бизнеса в контексте перехода к экономике замкнутого цикла // Форсайт. 2020. № 4. С. 47–50. https://doi.org/10.17323/2500-2597.2020.4.47.60
9. Давиденко Л. М., Беспалый С. В., Бекниязова Д. С. Ресурсная парадигма построения промышленной экосистемы цифрового формата // Вестник Белгородского университета кооперации, экономики и права. 2020. № 1 (80). С. 58–68. https://doi.org/10.21295/2223-5639-2020-1-58-68
10. Каплюк Е. В., Низов Н. В. Бизнес-модели циркулярной экономики и цифровые технологии в инновационном развитии промышленности // Вестник академии знаний. 2022. № 50 (3). С. 127–134.
11. Косолапова Н. А. и др. Модели циркулярной экономики в ресурсообеспечении индустриального развития регионов // Terra Economicus. 2022. Т. 20. № 3. С. 116–132. https://doi.org/10.18522/2073-6606-2022-20-3-116-132
12. Bacovis M. M. C., Borchardt M. Assessing the Influence of Circular Economy Practices in Companies that Orchestrate an Ecosystem of a Brazilian Industrial Cluster // Industrial Engineering and Operations Management. 2021. [Электр. ресурс]. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-78570-3_2
13. Assessment of water resources use efficiency based on the Russian Federation's gross regional product water intensity indicator / L. G. Matveyeva, O. A. Chernova, N. A. Kosolapova, A. E. Kosolapov // Regional Statistics. 2018. Vol. 8. No. 2. P. 154–169. https://doi.org/10.15196/RS080201

14. Akberdina V., Strielkowski W., Linder N., Kashirin S., Shmeleva L. Information Technology and Digital Sufficiency for Building the Sustainable Circular Economy // Energies. 2023. No. 16. Art. 1399. https://doi.org/10.3390/en16031399
15. Никитаева А. Ю., Чернова О. А., Долгова О. И. Концептуализация принятия решений по развитию циркулярной экономики в регионах российского Причерноморья // Региональная экономика. Юг России. 2022. Т. 10. № 4. С. 162–175. https://doi.org/10.15688/re.volsu.2022.4.15
16. Никитаева А. Ю., Новикова А. Е. Эмпирический анализ инновационного развития регионов Юга России // Региональная экономика. Юг России. 2025. Т. 13. № 4. С. 143–156. https://doi.org/10.15688/re.volsu.2025.4.13
17. Евдокимова А. А., Коновалов А. М., Батурова Г. В. Финансирование «синей» экономики: мировая и российская практика // Океанологические исследования. 2024. Т. 52. № 2. С. 22–39. https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2024.52(2).2
18. Рыбасова М. В., Серова Е. И. Цифровизация как движущая сила бизнес-моделей экономики замкнутого цикла // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2024. № 6. С. 134–138. https://doi.org/10.37493/2307-907X.2023.6.16
19. Дроздова А. П., Молчанова С. М., Самойлов А. В. Бизнес-модели замкнутого цикла как современный подход к проблеме устойчивого развития экономики // Экономика и управление: проблемы, решения. 2020. Т. 2. № 11. С. 133–139. https://doi.org/10.36871/ek.up.p.r.2020.11.02.018
20. Макаренко Е. Д. Формирование инновационных бизнес-моделей в рамках перехода к экономике замкнутого цикла // Седьмой международный экономический симпозиум. Материалы. 2023. С. 197–201.
21. Калякина И. М. и др. Инновационное развитие бизнес-моделей в условиях круговой экономики с применением инструментов цифровизации // Альманах «Крым». 2021. № 25. С. 33–41.
22. Yan Zh. Research status and implementation path of digital business model innovation for industrial enterprises / Zh. Yan // Bulletin of the South-Russian State Technical University (NPI). Series: Socio-Economic Sciences. 2025. Vol. 18. No. 4. P. 103–112. https://doi.org/10.17213/2075-2067-2025-4-103-112
23. Jia L. & Pei Y. Recent Advances in Multi-Agent Reinforcement Learning for Intelligent Automation and Control of Water Environment Systems // Machines. 2025. Vol. No. 13 (6). Art. 503. https://doi.org/10.3390/machines13060503
24. Wagan S. M., Sidra S. Interpreting Irrigation Decisions: Explainable AI Using SHAP and LIME in Agricultural Water Management Models // Water Resources Management. 2026. Vol. 40. Art. 52. https://doi.org/10.1007/s11269-025-04468-0
25. Mallick J., Alqadh, S., Alsubih M. et al. Automated interpretation of deep learning-based water quality assessment system for enhanced environmental management decisions // Applied Water Science. 2025. Vol. 15. Art. 110. https://doi.org/10.1007/s13201-025-02452-y
26. Zounemat-Kermani M., Kheimi M. Explainable Artificial Intelligence in Hydrology: A Review // Water Resources Management. 2026. Vol. 40. Art. 106. https://doi.org/10.1007/s11269-025-04435-9
27. Chernozhukov V., Hansen C., Kallu N., Spindler M., Syrgkanis V. Applied Causal Inference Powered by ML and AI. 2024. https://doi.org/10.48550/arXiv.2403.02467
28. Lowe R. Wu, Y. I., Tamar A., Harb J., Pieter Abbeel O. & Mordatch I. Multi-agent actor-critic for mixed cooperative-competitive environments // Advances in neural information processing systems. 2017. No. 30. https://doi.org/10.48550/arXiv.1706.02275

REFERENCES

1. Gridnev D. S. From “globalizing regions” to regional production systems: the theory of multiple industrial models. *Economic science of modern Russia.* 2026. No. 2. [In press].

2. Mitrofanova I. V., Chernova O. A. Problems and prospects for the development of a circular economy based on repeated water use in the regions of the Southern Federal District of the Russian Federation. *Theory and practice of social development*. 2022. No. 4 (170). P. 55–61. https://doi.org/10.24158/tipor.2022.4.8
3. Matveyeva L. G. Digital and circular meridians of the development of water management in the region: monograph. Rostov-on-Don: Publishing House of the Southern Federal University, 2024. 155 p. https://doi.org/10.18522/801332158
4. Kolponosova V. S., Matveyeva L. G. Circular concept for the development of the industrial sector of the regions of southern Russia in the context of new globalization (an example of aquatic ecosystems). *Natural and humanitarian research*. 2025. No. 2 (58). P. 296–300.
5. Kuzmichev A. A., Ryzhakov A. N., Martynov D. V. Analysis of water scarcity and the use of reclaimed land in the Southern Federal District. *Reclamation and hydraulic engineering*. 2021. Vol. 11. No. 3. P. 19–35. https://doi.org/10.31774/2712-9357-2021-11-3-19-35
6. Kosolapova N. A., Matveyeva L. G., Kaplyuk E. V. Strategic frontiers of the industrial landscape of the macroregion: case of water resources. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2025. No 6. P. 5–25. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-6-5-25
7. Krupina N. N. Water intensity of the social product as a target landmark of the Russian water strategy (regional aspect). *Regional Economy. Theory and Practice*. 2017. Vol. 15. Iss. 6. P. 1016–1033. https://doi.org/10.24891/re.15.6.1016
8. Wismet H. Systemic transformations for business in the context of the transition to a circular economy. *Forsythe*. 2020. No. 4. P. 47–50. https://doi.org/10.17323/2500-2597.2020.4.47.60
9. Davidenko L. M., Bespaly S. V., Bekniyazova D. S. Resource paradigm for building an industrial ecosystem of the digital format. *Bulletin of the Belgorod University of Cooperation, Economics and Law*. 2020. No. 1 (80). P. 58–68. https://doi.org/10.21295/2223-5639-2020-1-58-68
10. Kaplyuk E. V., Nizov N. V. Business models of the circular economy and digital technologies in the innovative development of industry. *Bulletin of the Academy of Knowledge*. 2022. No. 50 (3). P. 127–134.
11. Kosolapova N. A. et al. Models of a circular economy in resource supply of industrial development of regions. *Terra Economicus*. 2022. Vol. 20. No. 3. P. 116–132. https://doi.org/10.18522/2073-6606-2022-20-3-116-132
12. Bacovis M. M. C., Borchardt M. Assessing the Influence of Circular Economy Practices in Companies that Orchestrate an Ecosystem of a Brazilian Industrial Cluster. *Industrial Engineering and Operations Managemen*t. 2021. [Electronic resource]. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-78570-3_2
13. Assessment of water resources use efficiency based on the Russian Federation's gross regional product water intensity indicator / L. G. Matveyeva, O. A. Chernova, N. A. Kosolapova, A. E. Kosolapov. *Regional Statistics*. 2018. Vol. 8. No. 2. P. 154–169. https://doi.org/10.15196/RS080201. EDN: ZDGLYH
14. Akberdina V., Strielkowski W., Linder N., Kashirin S., Shmeleva L. Information Technology and Digital Sufficiency for Building the Sustainable Circular Economy *Energies*. 2023. No. 16. Art. 1399. https://doi.org/10.3390/en16031399
15. Nikitaeva A. Yu., Chernova O. A., Dolgova O. I. Conceptualization of decision-making on the development of a circular economy in the regions of the Russian Black Sea region. *Regional economy. South of Russia*. 2022. T. 10. No. 4. P. 162–175. https://doi.org/10.15688/re.volsu.2022.4.15
16. Nikitaeva A. Yu., Novikova A. E. Empirical analysis of the innovative development of regions of the South of Russia. *Regional economy. South of Russia*. 2025. Vol. 13. No. 4. P. 143–156. https://doi.org/10.15688/re.volsu.2025.4.13

17. Evdokimova A. A., Konovalov A. M., Baturova G. V. Financing of the “blue” economy: world and Russian practice. *Oceanologic research*. 2024. Vol. 52. No. 2. P. 22–39. https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2024.52(2).2
18. Rybasova M. V., Serova E. I. Digitalization as a driving force of business models of a closed cycle economy. *Bulletin of the North Caucasus Federal University*. 2024. No. 6. P. 134–138. https://doi.org/10.37493/2307-907X.2023.6.16
19. Drozdova A. P., Molchanova S. M., Samoilov A. V. Business models of a closed cycle as a modern approach to the problem of sustainable economic development. *Economics and management: problems, solutions*. 2020. Vol. 2. No. 11. P. 133–139. https://doi.org/10.36871/ek.up.p.r.2020.11.02.018
20. Makarenko E. D. Formation of innovative business models in the framework of the transition to a circular economy. *Seventh International Economic Symposium*. *Proceedings*. 2023. P. 197–201.
21. Kalyakina I. M. *et al*. Innovative development of business models in a circular economy using digitalization tools. *Almanac “Crimea*”. 2021. No. 25. P. 33–41.
22. Yan Zh. Research status and implementation path of digital business model innovation for industrial enterprises / Zh. Yan. *Bulletin of the South-Russian State Technical University (NPI). Series: Socio-Economic Sciences.* 2025. Vol. 18. No. 4. P. 103–112. https://doi.org/10.17213/2075-2067-2025-4-103-112
23. Jia L., Pei Y. Recent Advances in Multi-Agent Reinforcement Learning for Intelligent Automation and Control of Water Environment Systems. *Machines.* 2025. No. 13 (6). Art. 503. https://doi.org/10.3390/machines13060503
24. Wagan S. M., Sidra S. Interpreting Irrigation Decisions: Explainable AI Using SHAP and LIME in Agricultural Water Management Models. *Water Resources Management.* 2026. Vol. 40. Art. 52. https://doi.org/10.1007/s11269-025-04468-0
25. Mallick J., Alqadh S., Alsubih M. *et al*. Automated interpretation of deep learning-based water quality assessment system for enhanced environmental management decisions. *Applied Water Science.* 2025. Vol. 15 No. 110. https://doi.org/10.1007/s13201-025-02452-y
26. Zounemat-Kermani M., Kheimi M. Explainable Artificial Intelligence in Hydrology: A Review. *Water Resources Management.* 2026. Vol. 40. Art. 106. https://doi.org/10.1007/s11269-025-04435-9
27. Chernozhukov V., Hansen C., Kallu N., Spindler M., Syrgkanis V. Applied Causal Inference Powered by ML and AI. ArXiv. 2024. https://doi.org/10.48550/arXiv.2403.02467
28. Lowe R. Wu, Y. I., Tamar A., Harb J., Pieter Abbeel O. & Mordatch I. Multi-agent actor-critic for mixed cooperative-competitive environments. *Advances in neural information processing systems.* 2017. No. 30. https://doi.org/10.48550/arXiv.1706.02275

Сведения об авторах:

Матвеева Людмила Григорьевна, д-р экон. наук, ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», Россия, 344002, г. Ростов-на-Дону, ул. Максима Горького, 88; https://orcid.org/0000-0002-7156-5856; e-mail: lmatveeva@sfedu.ru

Каплюк Екатерина Валерьевна, канд. экон. наук, ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», Россия, 347922, г. Таганрог, ул. Чехова, 22; https://orcid.org/0000-0001-5768-6486; e-mail: ekapluk@sfedu.ru

Гриднев Данил Сергеевич, канд. экон. наук, ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», Россия, 344002, г. Ростов-на-Дону, ул. Максима Горького, 88; https://orcid.org/0009-0004-1481-1258; e-mail: dgridnev14@gmail.com

About the authors:

Lyudmila G. Matveyeva, Doctor of Economic Sciences, Southern Federal University, ul. Maksima Gorkogo, 88, Rostov-on-Don, 344002, Russia; https://orcid.org/0000-0002-7156-5856; e-mail: lmatveeva@sfedu.ru

Ekaterina V. Kaplyuk, Candidate of Economic Sciences, Southern Federal University, ul. Chekhova, 22, Taganrog, 347922, Russia; https://orcid.org/0000-0001-5768-6486; e-mail: ekapluk@sfedu.ru

Danil S. Gridnev, Candidate of Economic Sciences, Southern Federal University, ul. Maksima Gorkogo, 88, Rostov-on-Don, 344002, Russia; https://orcid.org: 0009-0004-1481-1258; e-mail: dgridnev14@gmail.com

Поступила в редакцию / Received 11.03.2026.
Поступила после рецензирования / Revised 22.04.2026.
Принята к публикации / Accepted 18.05.2026.

УДК 556.18 *https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-4-28-44*

Оригинальная статья/Original paper

Особенности краткосрочного прогнозирования мутности на примере рек Амур, Ангара, Уссури

О. М. Розенталь[1], Т. Н. Синцова[2]

tanya_sinzova@mail.ru

[1] *Институт водных проблем Российской академии наук, Москва, Россия*
[2] *Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь, Россия*

АННОТАЦИЯ

Актуальность. В настоящее время при решении задач краткосрочного прогнозирования мутности воды широко используются методы машинного обучения и ансамблевые подходы. Надежность оценок мутности воды на основе этих методов позволяет решать такие актуальные задачи, как планирование хозяйственной деятельности, обеспечение эффективного функционирования водоканалов, оптимизация дозировки коагулянтов, снижение риска нарушения санитарных норм в системах водоснабжения. **Методы.** Для краткосрочного прогнозирования мутности использованы классические статистические методы, методы машинного обучения и ансамблевые подходы: ARIMA, SARIMA, ARFIMA, Holt – Winters, Prophet, Bagging, Boosting, Stacking. Данные наблюдений за мутностью воды взяты в пунктах районов головных водоочистных сооружений городов Хабаровска, Уссурийска и Ангарска в реках Амур, Уссури и Ангара с частотой измерения используемого прибора 1 раз в 45 минут. **Результаты.** Показано, что ансамблевые подходы Stacking и Boosting превосходят другие модели ввиду применения комплекса различных источников информации. Выявлено, что эффективность методов зависит от характеристик конкретного временного ряда мутности: при сильной сезонности для р. Амур лучше работает Holt – Winters, при умеренной и стабильной динамике для р. Ангары – ARIMA или Stacking, а при высокой изменчивости для р. Уссури – Boosting. Установлено, что для выбора модели следует учитывать точность и доступность данных, особенности гидрологического режима водного объекта и цели прогноза. В дальнейших исследованиях рекомендовано использовать гибридные модели на основе физических факторов (осадков, расхода воды) для улучшения качества прогноза.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: краткосрочное прогнозирование, мутность воды, река Амур, река Ангара, река Уссури, ансамблевый подход, метод машинного обучения, ARIMA, Holt – Winters, Prophet, Bagging, Stacking, Boosting

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания Горного института УрО РАН «Исследование закономерностей эволюции гидросферы в районах интенсивного недропользования с целью минимизации экологического риска и обеспечения устойчивости водопользования» (рег. номер НИОКТР: 124020500053-6), в рамках темы № FMWZ-2025-0002 государственного задания Института водных проблем Российской академии наук (номер государственной регистрации 125030703344-8).

© Розенталь О. М., Синцова Т. Н., 2026

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Розенталь О. М., Синцова Т. Н., Особенности краткосрочного прогнозирования мутности на примере рек Амур, Ангара, Уссури // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2026. № 4. С. 28–44. https://doi.org/10.35567/19994508-2026-4-28-44; EDN: OAVXUX

Features of short-term turbidity forecasting using the Amur, Angara, and Ussuri rivers as examples

Oleg M. Rozental[1], **Tatyana N. Sintsova**[2]

tanya_sinzova@mail.ru

[1] *Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*
[2] *Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia*

ABSTRACT

Relevance. Currently, machine learning methods and ensemble approaches are widely used. Reliable turbidity estimates based on these methods will help solve such pressing problems as planning economic activities, ensuring the reliable operation of water utilities, optimizing coagulant dosages, preventing system overload, and reducing the risk of violating sanitary standards within the water supply systems. **Methods.** Classic statistical methods, machine learning methods, and ensemble approaches, including ARIMA, SARIMA, ARFIMA, Holt – Winters, Prophet, Bagging, Boosting, and Stacking, were used in this study for short-term turbidity forecasting. Water turbidity observation data were collected from three observation points located near the main water treatment plants in the cities of Khabarovsk, Ussuriysk, and Angarsk in the Amur, Ussuri, and Angara rivers with a measurement frequency of once every 45 minutes. **Results.** Stacking and Boosting ensemble approaches are shown to outperform other models due to the use of a combination of different data sources. The effectiveness of the methods is revealed to depend on the characteristics of a specific turbidity time series: Holt – Winters performs better with strong seasonality for the Amur River, ARIMA or Stacking performs better with moderate and stable dynamics for the Angara River, and Boosting performs better with high variability for the Ussuri River. It is established that model selection requires consideration of data accuracy and availability, special features of the water body hydrological regime, and the forecast objectives. It appears necessary to use hybrid models based on physical factors (precipitation, water discharge) in future studies to improve forecast quality.

KEYWORDS: short-term forecasting, water turbidity, Amur, Angara, Ussuri rivers, ensemble approach, machine learning method, ARIMA, Holt – Winters, Prophet, Bagging, Stacking, Boosting

FINANCING: This research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as part of the state assignment of the Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences “Study of the Evolutionary Patterns of the Hydrosphere in Areas of Intensive Subsoil Use to Minimize Environmental Risk and Ensure Sustainable Water Use” (Registration No. 124020500053-6), also within the framework of topic No. FMWZ-2025-0002 of the state assignment of the Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences (state registration number 125030703344-8).

FOR CITATION: Rozental O. M., Sintsova T. N. Features of short-term turbidity forecasting using the Amur, Angara, and Ussuri rivers as examples. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2026. No. 4. P. 28–44. https://doi.org/10.35567/19994508-2026-4-28-44; EDN: OAVXUX

ВВЕДЕНИЕ

Колебания мутности воды имеют существенную межгодовую, сезонную и внутрисуточную изменчивость, т. к. определяются сложной совокупностью гидрологических и гидродинамических процессов в водных объектах, что подтверждается исследованиями физических и химических показателей качества воды [1–3]. Долгопериодные колебания мутности в водных объектах обусловлены в первую очередь их гидрологическим режимом, поэтому довольно сложно их прогнозировать. Решить эту задачу можно с применением физико-математических моделей.

Действующая система государственного мониторинга за мутностью воды не обеспечивает в полной мере количество натурных данных ввиду ограниченного числа пунктов наблюдений, нерегулярного и редкого отбора проб. В этой ситуации сложно оценить экстремальные значения мутности воды редкой обеспеченности и выявить с заданной надежностью отличающиеся от естественного генезиса выбросы. Актуальной задачей является оценка прогностических значений мутности на основе статистических методов, методов машинного обучения и ансамблевых подходов там, где особо важны результаты выполненных исследований: в условиях хозяйственной деятельности на водосборе и в пределах водного объекта с учетом климатических изменений для эффективного функционирования водозаборов и обеспечения территорий чистой питьевой водой.

Целью представленной в статье работы стало исследование технологии получения прогноза мутности воды при наличии минимальных исходных данных на примере рек Амур, Ангара и Уссури. Мутность воды – важный показатель качества водных ресурсов, т. к. концентрация взвешенных частиц тесно связана с эрозионными процессами в бассейне, гидрологическим режимом и антропогенной нагрузкой на водный объект. Повышенная мутность ухудшает условия для рыб и других организмов и может быть индикатором загрязнения водного объекта.

В краткосрочном прогнозе определяющую роль играет стохастика рассматриваемых колебаний мутности воды, обусловленная турбулентными пульсациями и когерентными структурами, определяющимися макротурбулентными процессами внутрисуточных колебаний. Ввиду того что их короткопериодные колебания связаны с внутриводоемными процессами (разбавления и миграции) и влиянием гидродинамических параметров, необходимо исследовать механизмы формирования внутрисуточных колебаний мутности воды с уче-

том дисперсий их естественного изменения, а также природу этих колебаний – ошибки это измерений или влияние внутриводоемных процессов.

Кратковременный прогноз мутности природной воды необходим для обеспечения эффективной и стабильной работы систем водоподготовки водоканалов, минимизации рисков нарушения качества очистки и снижения эксплуатационных затрат. Такой прогноз позволяет оптимизировать дозировки коагулянтов, предотвращать перегрузку системы из-за резких скачков мутности воды (например, во время паводков, обильных осадков или техногенных сбоев), а также скорректировать режим работы оборудования, спрогнозировать потенциальные нештатные ситуации и снизить риски нарушения санитарных норм.

Для прогнозирования мутности применяются методы регрессии, нейронные сети, гауссовские процессы и другие алгоритмы машинного обучения [4–13]. В настоящее время в ряде работ рассматривается целесообразность использования краткосрочных прогнозов мутности в технологическом цикле для водоканалов [14–22]. Краткосрочные прогнозы демонстрируют большой потенциал в обработке больших массивов данных, ускорении решения задач прогнозирования и выявлении нелинейных закономерностей колебаний мутности воды. Эти подходы особенно эффективны, когда эмпирические или полевые данные ограниченны или неоднородны [19, 20]. Так, вопросы необходимости учета значительно более короткопериодных внутрисуточных колебаний физических показателей качества воды, в т. ч. мутности воды р. Уссури, на основе применения современных автоматических измерительных комплексов рассмотрены в работе [3]. В исследовании [1] выявлена значимость внутрисуточных колебаний физических показателей качества воды на водозаборе Камского водохранилища в районе г. Березники. В г. Якутске в мае 2026 г. на АО «Водоканал», согласно данным официального сайта https://vodokanal-ykt.ru, увеличили кратность отбора проб определяемых показателей, в т. ч. мутности воды: исследования воды в р. Лене проводили каждые два часа ввиду повышенных значений показателей (мутность составляла 6,52 мг/дм^3, после очистки – 0,21 мг/дм^3).

Согласно действующим нормативным документам[1], предельно допустимая концентрация мутности в питьевой воде составляет 1,5 мг/дм^3. Однако за рубежом, в соответствии с требованиями Агентства по охране окружающей среды США (US EPA)[2], 95 % питьевой воды в течение месяца должны иметь показатель мутности менее 0,5 NTU (нефелометрические единицы мутности), при этом ни один отдельно взятый образец этой воды не должен превышать 5 NTU в любой момент времени.

Актуальна необходимость краткосрочного прогноза мутности на р. Амур, что подтверждается исследованием авторов в 2024 г. [21]. Проблема связана

1 СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания.

2 EPA's Budget and Spending Planning Budget Results (англ.). US EPA. Агентство по охране окружающей среды США (12 января 2017 г.).

с наличием существенных изменений в больших диапазонах содержания растворенных веществ в водах Амура из-за значительных отличий химического состава вод рек Сунгари, Уссури и Бурея на всех этапах формирования паводка, а также с превышениями нормативов качества воды в районе водозабора г. Хабаровска в период паводка 2020 г. Поэтому для водоканалов очень важно краткосрочное прогнозирование мутности (на 12 ч), т. к. этот временной период связан с технологической возможностью произвести необходимые действия для предотвращения повышения мутности воды, подаваемой в системы питьевого водоснабжения.

В статье [22] рассматривается еще один аспект практической значимости краткосрочного прогнозирования мутности. Речь идет о планировании работ по расширению гавани Ле-Авра на северо-западе Франции, включающих строительство новой дамбы, чтобы обеспечить прямой доступ речных судов к контейнерным терминалам при любых погодных условиях и в полной безопасности, для чего предлагается установить две мониторинговые станции по определению мутности воды. Опорная станция будет расположена вне масштаба смоделированного шлейфа мутности, создаваемого работами, вторая – внутри смоделированного шлейфа. Мутность воды планируется измерять непрерывно: если показатели начнут расходиться на обеих станциях, это означает, что текущие работы создают значительно больше мутности, чем ожидалось, что может повлиять на близлежащие экосистемы. Однако, поскольку при определенных условиях значения измеряемой в обоих точках мутности могут естественным образом расходиться, краткосрочная система прогнозирования может помочь обнаружить наблюдаемые расхождения и способствовать принятию оптимальных управленческих решений.

Рассмотренные статьи как отечественных, так и зарубежных авторов [4–22] подтверждают практическую значимость применения методик краткосрочной системы прогнозирования мутности на основе методов ансамблевого подхода и машинного обучения для управления водными ресурсами, особенно в регионах с ограниченными сетями мониторинга. При этом точные прогнозные оценки мутности воды способствуют раннему выявлению всплеска загрязнения и позволяют обеспечить устойчивое планирование использования водных ресурсов при недостаточности данных наблюдений.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исходные данные

Для обеспечения надежности водоснабжения необходима подача населению воды, потребительские свойства которой соответствуют санитарно-гигиеническим требованиям. Принципиальное значение для эффективной работы систем водоснабжения имеет мониторинг качества и количества воды,

поступающей на водопроводные очистные сооружения. Поэтому в данной работе акцентированы вопросы обеспечения достаточной частоты измерений (45 мин) за качеством воды, а именно – мутностью. Изменение колебаний мутности воды в значительной мере зависит от водности рек: например, в период больших расходов воды наблюдаются более частые, а в межень – редкие изменения.

В условиях высокой антропогенной нагрузки на реки Амур, Уссури и Ангара на рассматриваемых головных водоочистных сооружениях Хабаровска, Уссурийска и Ангарска осуществляется непрерывный высокочастотный мониторинг мутности воды с 45-минутной дискретностью на основе автоматизированного измерительного комплекса «КИМ».

Исходные данные рядов наблюдений мутности воды взяты на основе материалов, представленных НВЦ УНИТОК, за период 2021–2022 гг. с объемом выборки 100 значений для каждой из рассматриваемых рек в течение соответствующего сезона. При этом временные ряды были разделены на обучающую часть и тестовый период длиной до 16 наблюдений. Сопоставлялись также сезонные результаты для оценки краткосрочного прогнозирования мутности воды, имеющей существенную межсезонную и внутрисуточную изменчивость.

Методы прогнозирования

В рамках проведенной работы использованы как классические статистические модели, так и методы машинного обучения и ансамблевые подходы:

- **ARIMA** – авторегрессионная интегрированная скользящая средняя;
- **SARIMA** – сезонная версия ARIMA, дополнительно учитывающая сезонную периодичность (регулярные циклы в данных, например, годовые, недельные и т. п.);
- **ARFIMA** – обобщение ARIMA, допускающее дробный порядок интегрирования;
- **Holt – Winters** – метод экспоненциального сглаживания с компонентами уровня, тренда и сезонности;
- **Prophet** – реализует аддитивную модель, также способную разлагать ряд на тренд, сезонность и шум;
- **Bagging** – ансамблевый метод, в котором множество моделей обучаются на разных бутстрэп-выборках, а результаты усредняются;
- **Boosting** – метод последовательного обучения, где каждая последующая модель фокусируется на ошибках предыдущих;
- **Stacking** – ансамбль, в котором несколько базовых моделей обучаются параллельно, затем их прогнозы используются в качестве признаков для метамодели.

Лучшие результаты, полученные на основе вышеприведенных методов прогнозирования для 16 временных интервалов на примере рек Амур, Уссури и Ангара, представлены на рис. 1.

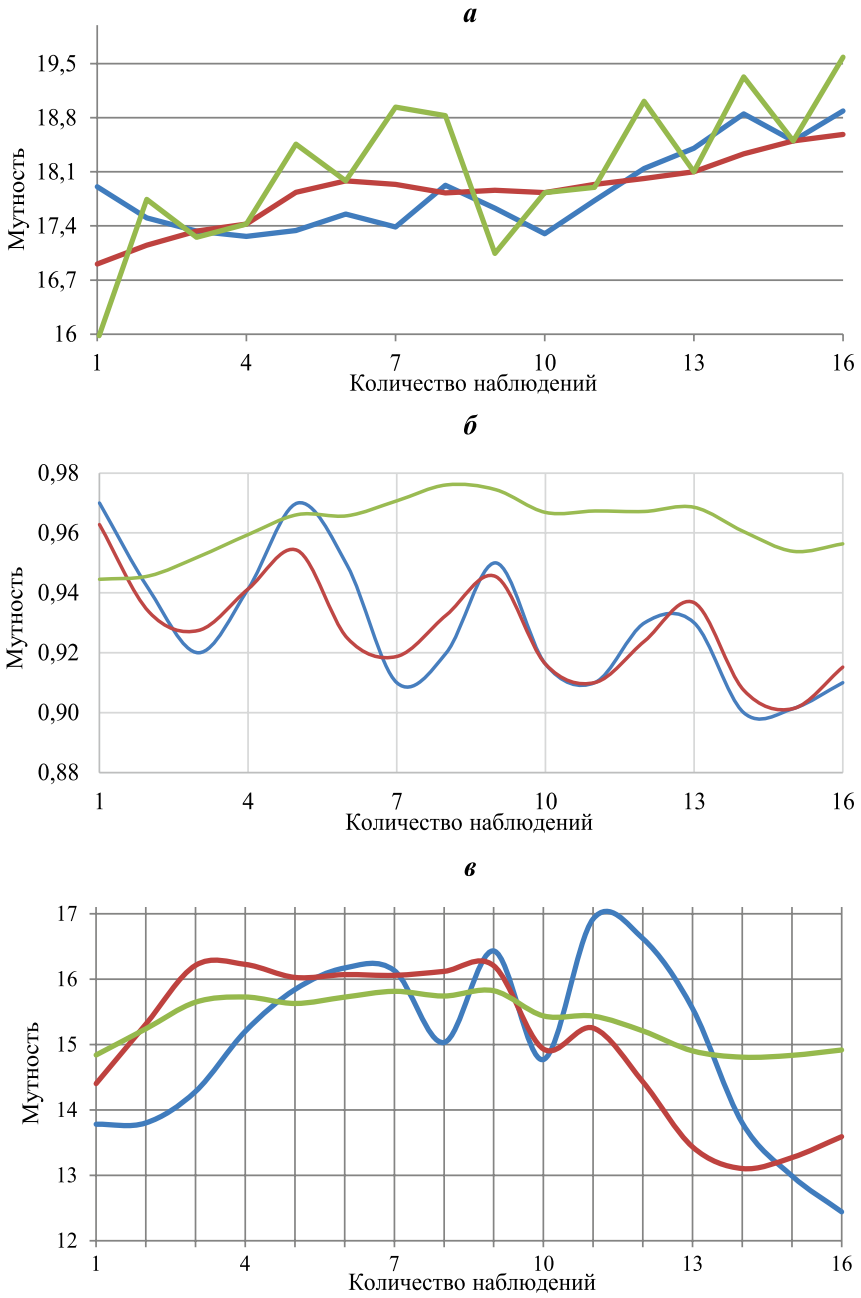


Рис. 1. Фактическая мутность воды (синяя линия), лучший прогнозный результат (красная) и следующий после лучшего (зеленая) на примере рек Амур (*а*), Ангара (*б*) и Уссури (*в*)

Fig. 1. Actual water turbidity (blue line), best forecast result (red), and next-to-best result (green) for the Amur (*a*), Angara (*b*), and Ussuri (*c*) rivers

В результате анализа лучшими прогностическими методами признаны: для Амура – Holt – Winters и Stacking, для Ангары – Stacking и ARIMA, для Уссури – Boosting и Bagging.

Для оценки качества прогнозов использовались: средняя абсолютная ошибка (MAE), среднеквадратическая ошибка (MSE) и корень из MSE (RMSE), что позволило оценивать стандартное отклонение остатка. Определялись также средний абсолютный процент ошибки (MAPE), симметричная MAPE (sMAPE) – взвешенная относительная ошибка, ограниченная от 0 до 200 %, и коэффициент детерминации (R^2) – доля дисперсии наблюдений, объясняемая моделью.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Как известно, чем меньше значения MAE, MSE, MAPE, тем выше качество прогноза. Из данных табл. 1 можно сделать вывод, что в среднем по горизонтам 2, 4, 8 и 16 качество прогноза для разных рек ухудшается неодинаково. Аналогичные различия наблюдаются и в том, насколько хорошо модели улавливают характерные особенности каждой реки.

Таблица 1. Средние метрики для прогнозов мутности воды
Table 1. Average metrics for turbidity forecasts

р. Амур								
Модель	Holt – Winters	Stacking	ARIMA	Boosting	SARIMA	ARFIMA	Prophet-like	Bagging
MAE	1,225	1,520	1,694	1,694	1,773	3,984	4,428	3,983
MAPE, %	10,87	13,46	15,20	15,20	15,91	35,19	39,51	35,97
R^2	0,978	0,965	0,932	0,932	0,923	0,745	0,424	0,252
р. Ангара								
Модель	Stacking	ARFIMA	Prophet	ARIMA	Bagging	SARIMA	Boosting	Holt – Winters
MAE	0,044	0,054	0,054	0,054	0,068	0,081	0,08	0,086
MAPE, %	5,11	6,03	6,03	6,03	7,35	8,67	8,92	9,09
R^2	0,607	0,546	0,546	0,546	0,329	0,239	0,31	0,137
р. Уссури								
Модель	Boosting	Bagging	Stacking	Prophet	Holt – Winters	ARIMA	ARFIMA	SARIMA
MAE	0,534	1,017	1,445	1,577	1,641	1,75	1,75	1,75
MAPE, %	3,67	7,51	10,65	11,25	11,92	13,06	13,06	13,06
R^2	0,882	0,739	0,462	0,37	0,461	0,295	0,295	0,295

Установлено, что на Амуре лучшие результаты по абсолютным и относительным ошибкам имеет метод Holt – Winters: средний MAPE ≈ 10,87 %. Метод Ensemble Stacking также продемонстрировал высокую точность (RMSE ≈ 1,68, R^2 ≈ 0,978). Классические ARIMA и Boosting показали схожие результаты, немного уступая Stacking. Самыми слабыми оказались Prophet-like и Bagging, у которых RMSE превышал 4 г/л. Высокие значения MAPE и низкий R^2 у ARFIMA, Bagging и Prophet-like объясняются плохой адаптацией к длинным горизонтам и сезонности: дробное интегрирование ARFIMA ока-

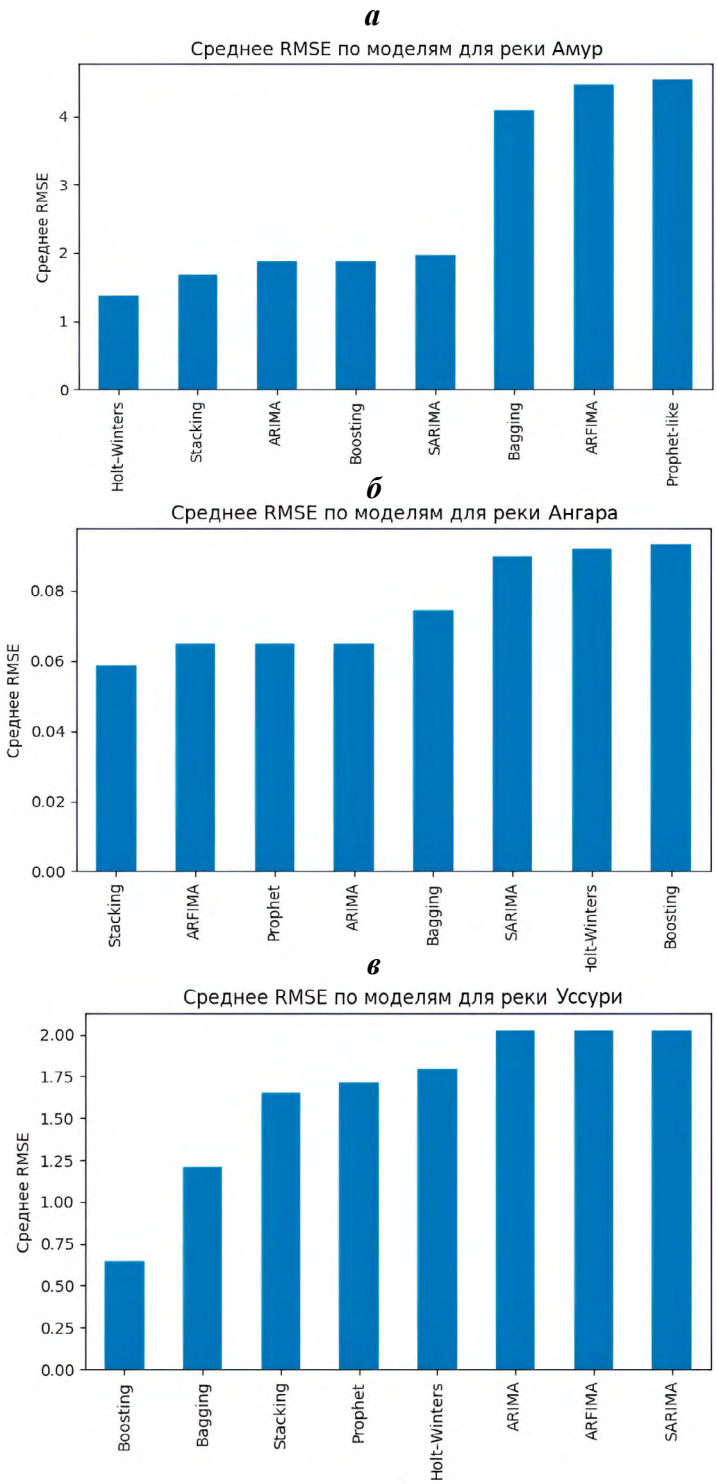


Рис. 2. График RMSE по моделям для рек: Амур (а), Ангара (б) и Уссури (в)
Fig. 2. RMSE graph for the Amur (a), Angara (b), and Ussuri (c) rivers

залось неэффективным для этой реки, а агрегационный ансамбль Bagging не смог снизить дисперсию из-за высокой вариабельности мутности.

Вода р. Ангары характеризуется меньшими значениями мутности, что отражается в низких ошибках. Совокупный ансамбль Stacking лидирует по метрике MAPE ≈ 5,11 % (такой же вывод следует и судя по величине симметричной средней абсолютной процентной ошибки sMAPE ≈ 4,8 %). Модели ARIMA, ARFIMA и Prophet показали одинаковые результаты, что связано с идентичными настройками и влиянием малого уровня шума. Метод Holt – Winters оказался менее эффективным на Ангаре, поскольку сезонность здесь выражена слабее, при этом Boosting и SARIMA дали более высокие ошибки, что отражает чувствительность этих методов к небольшой выборке.

Река Уссури отличается наиболее нерегулярной мутностью. Лучший результат здесь показал Boosting: MAPE ≈ 3,7 %, R^2 ≈ 0,88. Bagging занял второе место, Stacking был менее успешным, поскольку метамодель не смогла «выучить» закономерности, а классические ARIMA, SARIMA и ARFIMA оказались самыми слабыми, показывая более чем двукратную ошибку по сравнению с Boosting. Методы Holt – Winters и Prophet дали средние результаты, их сезонные и трендовые компоненты не смогли адекватно отразить сложную динамику р. Уссури.

Подтверждают сделанные выводы столбчатые графики среднего RMSE по моделям (рис. 2). Для Амура результат наглядно показывает превосходство методов Holt – Winters и Stacking (RMSE ≈ 1,37 г/л), для Ангары лидирующим снова оказывается совокупный ансамбль Stacking (средний RMSE меньше 0,06 г/л), а для Уссури полученный средний RMSE ≈ 0,65 г/л подтверждает лучший результат для Boosting.

Сравнение методов краткосрочного прогнозирования мутности воды на примере рек Амур, Уссури и Ангара

При исследовании качества воды р. Амур самым эффективным оказался метод Holt – Winters, что объясняется выраженной сезонностью мутности. В работе сезонность мутности Амура проявлена в 75-часовом цикле замеров в виде дневной составляющей. При компонентном анализе временного ряда и сезонности на основе базового обучения рассматриваемых моделей и построения прогнозов сезонная составляющая автоматически обнаруживается и моделируется с помощью рядов Фурье, что особенно полезно для данных с ежедневными закономерностями. Ансамбль Stacking также показал высокую точность, но немного уступил Holt – Winters, а классические ARIMA и Boosting дали схожие результаты. ARFIMA, Prophet и Bagging показали значительно худшие результаты: высокая доля ошибок и низкий R^2 свидетельствуют о том, что эти методы плохо учитывают сложную сезонную структуру Амура.

Все модели, примененные к данным по р. Ангаре, показали очень низкие значения ошибок, что обусловлено стабильным характером ее гидрологического режима. При этом наилучшие результаты продемонстрировали ансамблевый метод Stacking и простые ARIMA-подобные подходы (ARIMA, ARFIMA, Prophet). Эффект ансамбля Bagging был заметно хуже, а методы Boosting и SARIMA иногда переобучались. Holt – Winters показал худшие результаты, поскольку сезонность Ангары слабо выражена и сглаживание лишь увеличивает лаг прогноза.

Река Уссури характеризуется высокой изменчивостью, поэтому для нее метод Boosting оказался наиболее адаптивным, последовательно уменьшая смещение за счет последовательного обучения, он также лучше справлялся с резкими скачками. Bagging хорошо себя проявил, снижая дисперсию, при этом Stacking, напротив, не смог объединить прогнозы так же удачно, возможно, из-за недостатка данных для обучения метамодели. Классические ARIMA-методы и Holt – Winters оказались слишком жесткими для сложной динамики Уссури.

Из данных табл. 1 можно сделать вывод, что абсолютные ошибки краткосрочных прогнозов мутности воды на р. Ангаре в несколько раз меньше, чем на Амуре и Уссури, поскольку мутность Ангары обычно низкая. При этом на Амуре и Уссури диапазон значений выше, поэтому ошибки выглядят большими. Относительные ошибки (MAPE, sMAPE) позволяют сравнить показатели рек: самая низкая MAPE наблюдается у Boosting на Уссури (≈ 3,7 %), что свидетельствует о хорошей предсказуемости при грамотной настройке модели; на Амуре лучшая MAPE (≈ 10,9 %) у Holt – Winters, а на р. Ангаре – у Stacking (≈ 5,1 %).

Сравнение R^2 показывает, насколько примененные модели объясняют вариацию мутности относительно самой худшей модели для каждого горизонта. На Амуре лидирует Holt – Winters ($R^2 \approx 0{,}98$), на Ангаре – Stacking ($R^2 \approx 0{,}61$), на Уссури – Boosting ($R^2 \approx 0{,}88$). В целом ансамблевые методы (Stacking и Boosting) зачастую занимают первые места, однако на Амуре классический Holt – Winters за счет сильной сезонности показал лучшие результаты.

Оценка сложности и применимости методов краткосрочного прогнозирования мутности воды

Классические модели (ARIMA, SARIMA, ARFIMA, Holt – Winters). Эти методы просты в реализации, имеют небольшие вычислительные затраты и хорошо интерпретируемы. Они подходят для серий с регулярной структурой (как у р. Амур) и позволяют легко включать сезонность. Однако метод ARFIMA требует оценки дробного порядка и оказался малоэффективен на изученных рядах.

Prophet. Модель автоматизирует выбор трендов и сезонностей, допускает пропуски и работу с неравномерными наблюдениями. Она проста в применении и интерпретируема, но требует настройки. Модель показала среднюю точность на Амуре и Уссури. На р. Ангаре данные Prophet совпали с ARIMA, что указывает на схожесть структур.

Bagging. Этот метод уменьшает дисперсию прогнозов за счет обучения на разных подвыборках. На реках Амур и Уссури Bagging улучшил стабильность, но не достиг лучших результатов, вычислительные затраты возрастают из-за необходимости обучать множество моделей.

Boosting последовательно уменьшает смещение, уделяя больше внимания трудным наблюдениям. При оценке краткосрочного прогноза мутности на р. Уссури Boosting оказался наилучшим благодаря способности отражать резкие изменения. Однако этот метод чувствителен к выбросам и требует тщательной настройки скорости обучения, что усложняет его применение.

Stacking. Использует метамодель для оптимального объединения прогнозов. На реках Амур и Ангара Stacking заметно улучшил результаты, но на Уссури был менее успешен. Метод требует достаточного объема данных для обучения метамодели и более сложен в реализации.

Таким образом, в ходе проведенного исследования выработаны следующие рекомендации.

Для прогнозирования мутности воды в р. Амур рекомендуется использовать метод Holt – Winters, который наилучшим образом учитывает сезонный характер временного ряда мутности и обеспечивает наименьшие значения ошибок прогноза (MAE ≈ 1,23 г/л, MAPE ≈ 10,9 %, R^2 ≈ 0,98). В качестве альтернативы можно применять ансамбль Stacking, который также показал высокую точность (R^2 ≈ 0,97) и может быть полезен при наличии достаточного объема данных наблюдений для метамодели. Ансамблевые методы Bagging и Prophet на Амуре показали слабые результаты и не рекомендуются.

Из-за малой амплитуды колебаний мутности р. Ангары практически все модели дают приемлемую точность. Наилучшие результаты демонстрирует Stacking (MAPE ≈ 5,1 %, sMAPE ≈ 4,8 %, R^2 ≈ 0,61). При ограниченных ресурсах и в случаях, когда построения сложного ансамбля не требуется, целесообразно использовать простые модели – ARIMA или Prophet. Они обеспечивают уровень ошибки MAPE около 6 % и отличаются сравнительно низкими вычислительными затратами. Метод Holt – Winters не рекомендуется для р. Ангары, поскольку ее сезонная составляющая слабая.

Для нерегулярного и изменчивого ряда р. Уссури следует выбирать Boosting, обеспечивающий минимальные ошибки (MAE ≈ 0,53 г/л, MAPE ≈ 3,7 %, R^2 ≈ 0,88); Bagging может быть запасным вариантом, хотя его точность ниже, Stacking и классические модели дают более высокие ошибки и не рекомендуются без дополнительной оптимизации.

В целом, ансамблевые подходы, особенно Stacking и Boosting, часто превосходят отдельные модели за счет комбинирования различных источников информации, однако их эффективность зависит от характеристик конкретного временного ряда: при сильной сезонности (р. Амур) лучше работает Holt – Winters, при умеренной и стабильной динамике (р. Ангара) – достаточно

ARIMA или Stacking, а при высокой изменчивости (р. Уссури) лучшим становится Boosting. Выбор модели должен учитывать не только точность, но и доступность данных, вычислительные ресурсы, устойчивость к выбросам и необходимость интерпретируемости.

ВЫВОДЫ

В настоящее время принципиальное практическое значение имеет надежность и качество прогнозов, особенно когда представлено множество временных рядов, а специалисты с опытом моделирования временных рядов встречаются относительно редко. В представленной статье описывается практический подход к прогнозированию мутности воды, который сочетает настраиваемые статистические модели краткосрочного прогноза для совершенствования контроля качества воды в районах водозаборов водных объектов. Предложен комплекс ансамблевых методов с интерпретируемыми параметрами, который показал высокую эффективность по сравнению с другими моделями для рек Амур и Уссури.

На основе 45-минутных измерений мутности воды проведена настройка восьми моделей, включающих классические статистические модели, методы машинного обучения и ансамблевые подходы, для прогнозирования 16 наблюдений (лагов прогноза с шагом 45 мин). Наилучшие результаты продемонстрировали ансамблевые методы Stacking и Boosting на примере рек Амур и Уссури. Показана высокая точность прогноза с заблаговременностью 12 ч (16 наблюдений) для р. Амур (Stacking, $R^2 \approx 0{,}97$) и р. Уссури (Boosting, $R^2 \approx 0{,}88$), подтверждающая, что получены хорошие регрессионные модели с достаточно полной системой факторов. Они могут быть адаптированы для других крупных водных объектов, характеризующихся существенной внутрисуточной изменчивостью мутности воды, на основе использования автоматических систем с 45-минутной дискретностью измерения, что открывает возможные перспективы их применения в региональных исследованиях. Полученные результаты на основе модели Stacking для р. Ангары при $R^2 \approx 0{,}61$ показывают, что эта модель неполная и требует введения для увеличения точности прогноза дополнительных физических факторов, например расхода воды и осадков на основе гибридных моделей.

Таким образом, в рамках проведенного исследования обоснована необходимость использования прогнозных ансамблевых методов с учетом современных автоматических систем измерений мутности в реальном времени на водозаборах, т. к. даже в комплексе используемые методы, подтверждающие хорошую сходимость прогнозной кривой с натурными наблюдениями на основе RMSE, не представляют в полном объеме процессы формирования колебаний мутности воды.

Благодарности. *Авторы выражают благодарность главному научному сотруднику лаборатории проблем гидрологии суши Горного института УрО РАН д-ру геогр. наук, профессору Анатолию Павловичу Лепихину за полезные рекомендации, которые помогли в работе над статьей.*

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTERESTS

The authors declare no relevant conflict of interests.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лепихин А. П., Любимова Т. П., Богомолов А. В., Опутин М. А., Синцова Т. Н. Особенности внутрисуточных колебаний показателей качества воды, наблюдаемых в Камском водохранилище // Географический вестник. 2024. № 3 (70). С. 70–82.
2. Синцова Т. Н., Лепихин А. П., Розенталь О. М., Левин Л. Ю., Богомолов А. В. Статистические аспекты внутрисуточных колебаний показателей качества воды (на примере Камского водохранилища) // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. 2025. № 4. С. 17–35.
3. Розенталь О. М., Синцова Т. Н. Динамика физических показателей качества воды (на примере исследования р. Уссури) // Экологические системы и приборы. 2024. № 3. С. 3–13.
4. Чалов С. Р., Морейдо В. М., Денисова И. С., Солоников И. А. Высокочастотный мониторинг и модели машинного обучения для оценки синоптической изменчивости стока взвешенных наносов малой городской реки // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2023. Т. 5. № 1. С. 59–74.
5. Troin M., Arsenault R., Wood A.W., Brissette F., Martel J.-L. Generating Ensemble Streamflow Forecasts: A Review of Methods and Approaches Over the Past 40 Years // Water Resources Research. 2021. Vol. 57. No. 7. https://doi.org/10.1029/2020WR028392
6. Dion P., Martel J.-L., Arsenault R. Hydrological ensemble forecasting using a multi-model framework // Journal of Hydrology. 2021. Vol. 600. Art. 126537. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126537
7. Tanguy M., Eastman M., Chevuturi A., Magee E., Cooper E., Johnson R. H. B., Facer-Childs K., Hannaford J. Optimising ensemble streamflow predictions with bias correction and data assimilation techniques // Hydrology and Earth System Sciences. 2025. Vol. 29. No. 6. P. 1587–1614. https://doi.org/10.5194/hess-29-1587-2025
8. Smith K. A., Barker L. J., Tanguy M., Parry S., Harrigan S., Legg T. P., Prudhomme C., Hannaford J. A multi-objective ensemble approach to hydrological modelling in the UK: an application to historic drought reconstruction // Hydrology and Earth System Sciences. 2019. Vol. 23. No. 8. P. 3247–3268. https://doi.org/10.5194/hess-23-3247-2019
9. Rele B., Hogan C., Kandanaarachchi S., Leigh C. Short-term prediction of stream turbidity using surrogate data and a meta-model approach // arXiv. 2022. arXiv:2210.05821
10. Khosravi K., Farooуqe A. A., Shahvaran A. R. Daggupati P., Heddam S. Hatamiafkoueieh Ja. Beyond conventional modeling: A cutting-edge hybrid IAER-AMT decision-tree-based algorithm for high-resolution river turbidity prediction // Ain Shams Engineering Journal. 2025. Vol. 16. No. 9. Art. 103511. https://doi.org/10.1016/j.asej.2025.103511
11. Santos V. S., Rocha P. A. C., Thé J. V. G. Gharabaghi B. Evaluation of machine learning methods for forecasting turbidity in river networks using Sentinel-2 remote sensing data // Ecological Informatics. 2025. Vol. 90. Art. 103313. https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2025.103313

12. Feng Y., Li Yu, Zhang B., Zhang Sh., Zhao T., and Zhang Chi. Naturalized and human-influenced streamflow of the Amur River for century-scale hydrological assessment // Scientific Data. 2026. Vol. 13. Art. 346. https://doi.org/10.1038/s41597-026-06685-7
13. Дударев О. В., Чаркин А. Н., Черных Д. В., Рубан А. С., Пипко И. И., Пугач С. П., Дубина В. А., Семилетов И. П. Изменчивость биогеохимического сигнала терригенного материала в нижнем течении и эстуарии реки Амур в годы с различными условиями формирования весеннего половодья // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. 2025. № 2. P. 57–75. https://doi.org/10.31857/S0869769825020051
14. Vient J. M., Fablet R., Jourdin F. and Delacourt C. End-to-End Neural Interpolation of Satellite-Derived Sea Surface Suspended Sediment Concentrations // Remote Sensing. 2022. Vol. 14 (16). Art. 4024. https://doi.org/10.3390/rs14164024
15. Ezzaouini M. A., Mahé G., Kacimi I., El Bilali A., Zerouali A., Nafii A. Predicting Daily Suspended Sediment Load Using Machine Learning and NARX Hydro-Climatic Inputs in Semi-Arid Environment // Water. 2022. Vol. 14. Iss. 6. Art. 862. https://doi.org/10.3390/w14060862
16. Saulquin B., Fablet R., Ailliot P., Mercier G., Doxaran D., Mangin A., and Fanton D'Andon O. H. Characterization of time-varying regimes in remote sensing time series: Application to the forecasting of satellite-derived suspended matter concentrations // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2015. Vol. 8. Iss. 1. https://doi.org/10.1109/JSTARS.2014.2360239
17. Fazel Mojtahedi F., Yousefpour N., Chow S. H., Cassidy M. Offshore turbidity currents forecasting (part I): Integrating deep learning and computational fluid dynamics // Ocean Engineering. 2025. Vol. 331. Art. 121360. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.121360
18. Huang W., Zhang C., Zhong H. et al. Advances in numerical and AI approaches for turbidity current research: a brief review // GeoEnergy Communications. 2025. Vol. 1. Art. 9. https://doi.org/10.1007/s44421-025-00009-y
19. Subramaniyan U., Rengasamy I., and Chellappa R. S. R. Sustainable Development in Reservoir Sedimentation Load Estimation from Statistical Analysis of Datasets to Deep Learning Algorithms // Global Nest Journal. 2024. Vol. 27. Iss. 1. Art. 05971. https://doi.org/10.30955/gnj.05971
20. Roushangar K, Alirezazadeh Sadaghiani A. Innovative deep learning and signal decomposition approaches for enhanced spatial and temporal suspended sediment concentration prediction // Environment Science Pollution Research International. 2025. Vol. 32. P. 15851–15876. https://doi.org/10.1007/s11356-025-36581-3
21. Шестеркин В. П., Шестеркина Н. М. Сток растворенных веществ в реке Амур у Хабаровска в многоводные 2020–2021 годы // Региональные проблемы. 2024. Т. 27. № 2. С. 53–55.
22. Regniers O., Beguet B., Débonnaire N., Budin R., Soula B., Briges A., Kervella S., Brasselet S., Lafon V. High Resolution Data-Driven Short-Term Forecast of Turbidity in a Real Case Water Quality Monitoring Application // IGARSS 2024–2024 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Athens, Greece. 2024. P. 5860–5864. https://doi.org/10.1109/IGARSS53475.2024.10640943

REFERENCES

1. Lepikhin A. P., Lyubimova T. P., Bogomolov A. V., Oputin M. A., Sintsova T. N. Features of intra-diurnal fluctuations in water quality indicators observed in the Kama Reservoir. *Geographical Bulletin*. 2024. No. 3 (70). P. 70–82.
2. Sintsova T. N., Lepikhin A. P., Rozental O. M., Levin L. Yu., Bogomolov A. V. Statistical Aspects of Intraday Fluctuations of Water Quality Indicators (on the Example of the Kama Reservoir). *Bulletin of the Perm Federal Research Center*. 2025. No. 4. P. 17–35.
3. Rosental O. M., Sintsova T. N. Dynamics of physical indicators of water quality (using the Ussuri River as an example). *Ecological systems and devices*. 2024. No. 3. P. 3–13.

4. Chalov S. R., Moreido V. M., Denisova I. S., Solonikov I. A. High-frequency monitoring and machine learning models for assessing synoptic variability of suspended sediment runoff of a small urban river. *Hydrosphere. Hazardous Processes and Phenomena*. Publishing NPO "Gidrotekhproekt" (Valdai). 2023. Vol. 5. No. 1. P. 59–74.
5. Troin M., Arsenault R., Wood A.W., Brissette F., Martel J.-L. Generating Ensemble Streamflow Forecasts: A Review of Methods and Approaches Over the Past 40 Years. *Water Resources Research*, 2021. Vol. 57. No. 7. https://doi.org/doi 10.1029/2020WR028392
6. Dion P., Martel J.-L., Arsenault R. Hydrological ensemble forecasting using a multi-model framework. *Journal of Hydrology*. 2021. Vol. 600. Art. 126537. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126537
7. Tanguy M., Eastman M., Chevuturi A., Magee E., Cooper E., Johnson R.H.B., Facer-Childs K., Hannaford J. Optimising ensemble streamflow predictions with bias correction and data assimilation techniques. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2025. Vol. 29. No. 6. P. 1587–1614. https://doi.org/10.5194/hess-29-1587-2025
8. Smith K.A., Barker L.J., Tanguy M., Parry S., Harrigan S., Legg T.P., Prudhomme C., Hannaford J. A multi-objective ensemble approach to hydrological modelling in the UK: an application to historic drought reconstruction. *Hydrology and Earth System Sciences.* 2019. Vol. 23. No. 8. P. 3247–3268. https://doi.org/10.5194/hess-23-3247-2019
9. Rele B., Hogan C., Kandanaarachchi S., Leigh C. Short-term prediction of stream turbidity using surrogate data and a meta-model approach. arXiv, 2022. arXiv:2210.05821
10. Khosravi K., Farooуqe A.A., Shahvaran A.R., Daggupati P., Heddam S., Hatamiafkoueieh Ja. Beyond conventional modeling: A cutting-edge hybrid IAER-AMT decision-tree-based algorithm for high-resolution river turbidity prediction. *Ain Shams Engineering Journal.* 2025. Vol. 16. No. 9. Art. 103511. https://doi.org/10.1016/j.asej.2025.103511
11. Santos V.S., Rocha P.A.C., Thé J.V.G., Gharabaghi B. Evaluation of machine learning methods for forecasting turbidity in river networks using Sentinel-2 remote sensing data. *Ecological Informatics*, 2025. Vol. 90. Art. 103313. https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2025.103313
12. Feng Y., Li Yu, Zhang B., Zhang Sh., Zhao T. and Zhang Chi Naturalized and human-influenced streamflow of the Amur River for century-scale hydrological assessment. *Scientific Data*. 2026. Vol. 13. Art. 346. https://doi.org/10.1038/s41597-026-06685-7
13. Dudarev O. V., Charkin A. N., Chernykh D. V., Ruban A. S., Pipko I. I., Pugach S. P., Dubina V. A., and Semiletov I. P. Variability of the Biogeochemical Signal of Terrigenous Material in the Lower Reach and Estuary of the Amur River in Years with Different Conditions for the Formation of Spring Floods. *Bulletin of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences*. 2025. No. 2. P. 57–75. https://doi.org/10.31857/S0869769825020051
14. Vient J. M., Fablet R., Jourdin F., and Delacourt C. End-to-End Neural Interpolation of Satellite-Derived Sea Surface Suspended Sediment Concentrations. *Remote Sensing.* 2022. Vol. 14 (16). Art. 4024. https://doi.org/10.3390/rs14164024
15. Ezzaouini M. A., Mahé G., Kacimi I., El Bilali A., Zerouali A., Nafii A. Predicting Daily Suspended Sediment Load Using Machine Learning and NARX Hydro-Climatic Inputs in Semi-Arid Environment. *Water.* 2022. Vol. 14. Iss. 6. Art. 862. https://doi.org/10.3390/w14060862
16. Saulquin B., Fablet R., Ailliot P., Mercier G., Doxaran D., Mangin A. and Fanton D'Andon O. H. Characterization of time-varying regimes in remote sensing time series: Application to the forecasting of satellite-derived suspended matter concentrations. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2015. Vol.* 8. Iss. 1. https://doi.org/10.1109/JSTARS.2014.2360239
17. Fazel Mojtahedi F., Yousefpour N., Chow S.H., Cassidy M. Offshore turbidity currents forecasting (part I): Integrating deep learning and computational fluid dynamics. *Ocean Engineering*. 2025. Vol. 331. Art. 121360. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.121360

18. Huang, W., Zhang, C., Zhong, H. et al. Advances in numerical and AI approaches for turbidity current research: a brief review. *GeoEnergy Communications*. 2025. Vol. 1. Art. 9. https://doi.org/10.1007/s44421-025-00009-y
19. Subramaniyan U., Rengasamy I., and Chellappa R. S. R. Sustainable Development in Reservoir Sedimentation Load Estimation from Statistical Analysis of Datasets to Deep Learning Algorithms. *Global Nest Journal*. 2024. Vol. 27. Iss. 1. Art. 05971. https://doi.org/10.30955/gnj.05971
20. Roushangar K, Alirezazadeh Sadaghiani A. Innovative deep learning and signal decomposition approaches for enhanced spatial and temporal suspended sediment concentration prediction. Environment Science Pollution Research International. 2025. Vol. 32. P. 15851–15876. https://doi.org/10.1007/s11356-025-36581-3
21. Shesterkin V. P., Shesterkina N. M. Dissolved solids discharge in the Amur River near Khabarovsk during the high-water years of 2020-2021. *Regional problems*. 2024. Vol. 27. No. 2. P. 53–55.
22. Regniers O., Beguet B., Débonnaire N., Budin R., Soula B., Briges A., Kervella S., Brasselet S., Lafon V. High Resolution Data-Driven Short-Term Forecast of Turbidity in a Real Case Water Quality Monitoring Application. *IGARSS 2024-2024 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Athens, Greece. 2024. P. 5860–5864. https://doi.org/10.1109/IGARSS53475.2024.10640943

Сведения об авторах:

Розенталь Олег Моисеевич, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории управления водными ресурсами, Институт водных проблем Российской академии наук, Россия, 119333, Москва, ул. Губкина, д. 3; https://orcid.org/0000-0001-6261-6060; e-mail: omro3@yandex.ru

Синцова Татьяна Николаевна, ведущий инженер лаборатории проблем гидрологии суши, Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, Россия, 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78А; https://orcid.org/0000-0003-0327-4894; e-mail: tanya_sinzova@mail.ru

About the authors:

Oleg M. Rozental, Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher of the Laboratory of Water Resources Management, Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences; ul. Gubkina, 3; Moscow, 119333, Russia; https://orcid.org/0000-0001-6261-6060; e-mail: omro3@yandex.ru

Tatyana N. Sintsova, Lead Engineer of the Laboratory of Land Hydrology Problems, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; ul. Siberskaya, 78A; Perm, 614007, Russia; https://orcid.org/0000-0003-0327-4894; email: tanya_sinzova@mail.ru

Поступила в редакцию / Received 24.03.2026.
Поступила после рецензирования / Revised 29.05.2026.
Принята к публикации / Accepted 15.06.2026.

УДК 556.18; 556.5; 502.51 *https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-4-45-63*

Оригинальная статья/Original paper

Оценка параметров экологического стока трансграничного бассейна реки Иртыш для учета экосистемных потребностей при распределении водных ресурсов

О. И. Никитина[1], А. Е. Косолапов[1], Д. В. Савостицкий[2], М. В. Болгов[1,3]

oxana.niki@yandex.ru

[1] *Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов, г. Ростов-на-Дону, Россия*
[2] *Федеральное агентство водных ресурсов, Москва, Россия*
[3] *Институт водных проблем Российской академии наук, Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Трансграничный бассейн р. Иртыш характеризуется высокой хозяйственной освоенностью, трансформацией природного водного режима и ростом водопотребления, что обусловливает необходимость разработки научно обоснованных рекомендаций по распределению водных ресурсов между странами. При этом в бассейне отсутствуют согласованные механизмы распределения стока, в т. ч. учитывающие экосистемные потребности. В мировой практике учет таких потребностей при управлении водными ресурсами реализуется через концепцию экологического стока. Настоящая работа посвящена оценке и обоснованию параметров экологического стока р. Иртыш для возможности их учета при разработке рекомендаций по распределению стока. **Методы.** Работа основана на анализе водопользования и состояния экосистем трансграничного бассейна Иртыша, анализе многолетних гидрологических наблюдений, включая данные восстановленных рядов условно-естественного стока. Для обоснования параметров экологического стока использован метод критических гидрологических условий, в качестве ключевого индикатора принят показатель обводнения поймы. Расчеты выполнены для расположенного вблизи границы России и Казахстана створа р. Иртыш – с. Татарка с учетом особенностей формирования стока на рассматриваемом участке. **Результаты.** Определены функции и оценочные параметры экологического стока. Предварительное значение экологического стока составляет около 80 % объема условно-естественного годового стока. Подчеркивается особая важность поддержания экологического стока в весенне-летний период; обеспечение стока в мае свыше 4 км³ рассматривается как гидрологическое условие, обеспечивающее выход воды на пойму. Результаты могут служить основой для учета экосистемных потребностей при разработке механизмов распределения водных ресурсов в трансграничном бассейне р. Иртыш.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: река Иртыш, трансграничный бассейн, механизмы распределения стока, экологический сток, водные экосистемы, пойма

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Никитина О. И., Косолапов А. Е., Савостицкий Д. В., Болгов М. В. Оценка параметров экологического стока трансграничного бассейна реки Ир-

© Никитина О. И., Косолапов А. Е., Савостицкий Д. В., Болгов М. В., 2026

тыш для учета экосистемных потребностей при распределении водных ресурсов // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2026. № 4. С. 45–63. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-4-45-63; EDN: RGDQZI

Assessment of environmental flow requirements in the transboundary Irtysh River basin for water resources allocation considering ecosystem needs

Oxana I. Nikitina[1], **Alexey E. Kosolapov**[1], **Dmitry V. Savostitskiy**[2], **Mikhail V. Bolgov**[1,3]

oxana.niki@yandex.ru

[1] *Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection, Rostov-on-Don, Russia*
[2] *Federal Agency for Water Resources, Moscow, Russia*
[3] *Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

ABSTRACT

Relevance. The transboundary Irtysh River basin is characterized by intensive economic development, transformation of the natural water regime, and increasing water demand. This creates a need for scientifically grounded recommendations on water resources allocation among the riparian countries. At the same time, there are no agreed water allocation mechanisms in the basin that take ecosystem requirements into account. In global water resources management practice, such requirements are taken into account through the concept of environmental flow. This study presents an assessment and justification of environmental flow parameters for the Irtysh River to enable taking them into account in developing recommendations on the water allocation. **Methods.** The study is based on the analysis of water use and the state of the Irtysh transboundary basin ecosystems, analysis of the long-term hydrological observations, including the data of the reconstructed naturalized flow series. The method of critical hydrological conditions was used to substantiate the environmental flow parameters; floodplain inundation was adopted as the key indicator. Calculations were performed for the Irtysh-Tatarka gauging station located near the Russia-Kazakhstan boundary considering the specific features of flow formation in the study reach. **Results.** The functions and indicative parameters of environmental flow were identified. The preliminary environmental flow value is about 80 % of the annual naturalized runoff volume. The importance of maintaining environmental flow during the spring–summer period was highlighted. Maintaining May runoff volumes above 4 km³ is considered a hydrological condition necessary for floodplain inundation. These results may provide a basis for incorporating ecosystem requirements into water allocation mechanisms in the transboundary Irtysh River basin.

KEYWORDS: Irtysh River, transboundary basin, water allocation mechanisms, environmental flow, aquatic ecosystems, floodplain

FOR CITATION: Nikitina O. I., Kosolapov A. E., Savostitskiy D. V., Bolgov M. V. Assessment of environmental flow requirements in the transboundary Irtysh River basin for water resources allocation considering ecosystem needs. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management.* 2026. No. 4. P. 45–63; https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-4-45-63; EDN: RGDQZI

ВВЕДЕНИЕ

Река Иртыш протекает через Китай, Казахстан и Россию и является важным источником для систем водоснабжения, промышленности, гидроэнергетики и сельского хозяйства трех стран. Водные ресурсы трансграничного бассейна распределены неравномерно, а интенсивная хозяйственная деятельность, включающая регулирование стока крупным каскадом гидроузлов в Казахстане, водозабор и каналы по переброске стока в Казахстане и Китае, значительно трансформировала природный водный режим. Одновременно с этим ухудшение качества воды дополнительно влияет на пригодность водных ресурсов для использования и снижает устойчивость водных экосистем. В связи с этим проблема согласованного распределения стока р. Иртыш приобретает принципиальное значение. Рост водопотребления на территории Китая и Казахстана, прогнозируемое увеличение объемов сточных вод вместе с уменьшением стока на отдельных участках Иртыша и климатические изменения усиливают необходимость разработки обоснованных рекомендаций по его распределению.

В трансграничном бассейне Иртыша отсутствуют согласованные механизмы распределения стока между странами. Действующее Соглашение между Правительствами Республики Казахстан и Российской Федерации о совместном использовании и охране трансграничных водных объектов (2010 г.) не устанавливает количественных параметров распределения стока, что в том числе ограничивает возможности учета экосистемных потребностей при управлении водными ресурсами.

В международной практике учет экосистемных потребностей при управлении водными ресурсами обеспечивается через концепцию экологического стока (environmental flow) [1–6]. Он определяется как часть водных ресурсов, сохраняемая в водном объекте для поддержания структурной и функциональной целостности водных и прибрежных экосистем, а также связанных с ними экосистемных услуг, имеющих социально-экономическое значение [3, 4]. Цель установления и реализации экологического стока, как правило, не заключается в сохранении водных экосистем в их природном состоянии. В мировой практике он рассматривается как инструмент для определения конкретных для каждого водного объекта правил использования воды, основанных на балансе между экосистемными и социально-экономическими потребностями. Несмотря на существенный прогресс в развитии методов оценки экологического стока, его практическое внедрение остается сложной задачей во многих странах мира [1, 5, 6].

В бассейне р. Иртыш экологический сток пока не используется при решении задач трансграничного распределения стока.

Цель представленной в статье работы – оценка параметров экологического стока р. Иртыш для учета экосистемных потребностей при разработке рекомендаций по распределению стока. Задачи включают рассмотрение экоси-

стемных функций реки и их связи с гидрологическим режимом, обоснование целей и параметров экологического стока, а также оценку соответствия современного водного режима р. Иртыш предложенным рекомендациям по режиму экологического стока. Особенностью работы является анализ экологического стока с позиции управления водными ресурсами трансграничного бассейна. Рассмотрена водохозяйственная система р. Иртыш в ее среднем течении – трансграничный участок между Казахстаном и Россией, играющий ключевую роль в формировании стока, поступающего на территорию России.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Работа основана на анализе материалов о водопользовании и состоянии экосистем в трансграничном бассейне р. Иртыш, а также на обработке многолетних гидрологических наблюдений. Для характеристики водного режима использовались среднемесячные, сезонные и годовые значения стока по гидрологическим постам р. Иртыш – с. Татарка и г. Омск на территории России. Особенности обводнения поймы оценивались по материалам наблюдений в г. Павлодаре на территории Казахстана. Створом для определения экологического стока выбран пограничный створ р. Иртыш – с. Татарка.

Работа включала восстановление рядов условно-естественного стока и приведение наблюдений к пограничному створу. При восстановлении условно-естественного стока учитывались особенности формирования стока как на участке от Шульбинской ГЭС до с. Татарка, так и на расположенном ниже по течению участке с. Татарка – г. Омск; вклад боковой приточности на этих участках в отдельные годы может быть существенным. Величина боковой приточности между рассматриваемыми створами устанавливалась по данным совместного периода наблюдений при условно-естественном режиме стока.

Для определения функций экологического стока выполнен анализ современного состояния экосистем трансграничного участка р. Иртыш с учетом абиотических и биотических характеристик, отражающих степень трансформации гидрологического режима и особенности функционирования водных и пойменных экосистем. Также рассмотрены особенности водохозяйственного комплекса среднего течения р. Иртыш.

Расчет экологического стока проведен с применением метода критических гидрологических условий [7], который позволяет определить минимально допустимый (критический) объем стока, обеспечивающий поддержание продуктивности русловых и пойменных экосистем. В качестве индикатора критических условий использован показатель обводнения поймы; его применение обусловлено высокой значимостью и развитостью пойменных экосистем в Павлодарской области Казахстана в пределах рассматриваемого участка. Согласно методическим положениям, расчеты экологического стока должны выполняться по замыкающему створу бассейна. Однако в данной работе в каче-

стве расчетного створа принят створ р. Иртыш – с. Татарка. Отсутствие крупных притоков на участке от створа Шульбинской ГЭС до с. Татарка позволяет исключить искажение оценок, связанное с вкладом крупных притоков, впадающих ниже по течению. Применение метода в данной адаптации позволяет получить обоснованную оценку экологического стока в замыкающем створе участка Шульбинская ГЭС – с. Татарка.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Обоснование целей экологического стока на основе оценки состояния экосистем бассейна Иртыша

Рассматриваемый участок р. Иртыш характеризуется малой боковой приточностью, значительными потерями стока на испарение и водозабор и высокой зависимостью от притока из вышерасположенных территорий. Сток этого участка обеспечивает водоснабжение южных засушливых регионов российской части бассейна, включая г. Омск и Омскую область.

Современное состояние Иртыша определяется значительной антропогенной трансформацией гидрологического режима. В Казахстане функционирует каскад крупных водохранилищ – Бухтарминское, Усть-Каменогорское и Шульбинское, которые с 1960-х годов существенно изменили сезонную динамику стока. Дополнительное влияние оказывают водозаборы в Китае и Казахстане, а также отвод части стока по каналу Иртыш – Караганда (около 1,1 км³/год при проектной пропускной способности 2 км³/год) (рис. 1). Регулирование стока ограничивает возможности формирования экологически значимых половодий и связанных с ними процессов обводнения поймы.



Рис. 1. Схема расположения Верхне-Иртышского каскада водохранилищ и постов на р. Иртыш

Fig. 1. Location of the Upper Irtysh reservoir cascade and gauging stations on the Irtysh River

Сокращение объемов половодья ограничивает частоту и продолжительность затопления поймы, что оказывает существенное воздействие на ценные пойменные экосистемы среднего течения Иртыша, значительная часть которых (около 90 %) расположена в Павлодарской области Казах-

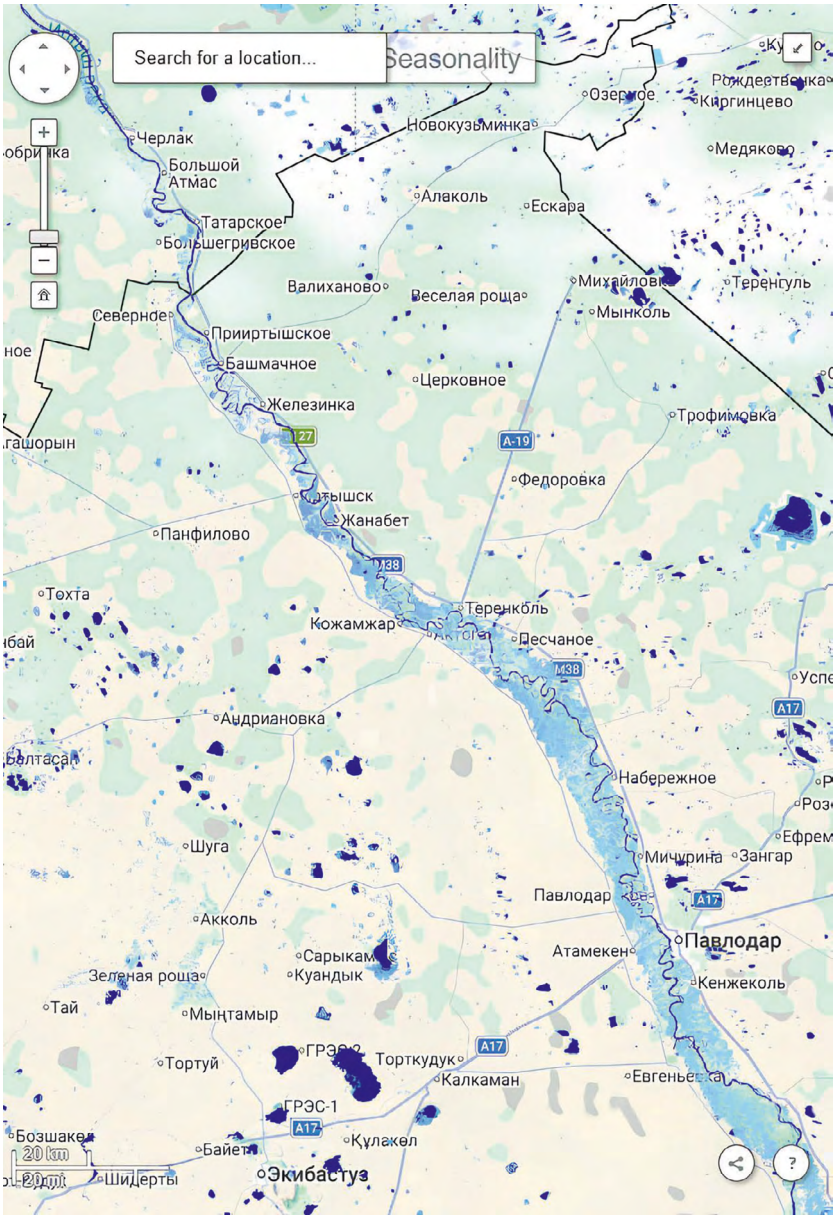


Рис. 2. Развитые пойменные экосистемы среднего течения р. Иртыш в Павлодарской области Казахстана[1]

Fig. 2. Well-developed floodplain ecosystems of the middle reach of the Irtysh River in the Pavlodar Region, Kazakhstan

стана (рис. 2) [8]. Несмотря на предусмотренные природоохранные попуски из Шульбинского водохранилища, их параметры нередко не соответствуют экосистемным требованиям, что приводит к деградации пойменных территорий, снижению площади их затопления и падению биопродуктивности [8, 9].

1 Источник: https://global-surface-water.appspot.com/map

Одной из важных проблем данного участка, определяющих состояние и функционирование водных экосистем, является низкое качество воды р. Иртыш. На территории России в последние годы оно оценивается как «умеренно загрязненное» или «загрязненное», а в районе г. Омска – как «загрязненное» [10]. Существенной проблемой остается трансграничное загрязнение тяжелыми металлами [11]. Поддержание способности реки к самоочищению тесно связано с объемом и режимом стока.

Несмотря на высокую антропогенную нагрузку и последствия трансформации режима, экосистема среднего Иртыша сохраняет сложную структуру. В фитопланктоне российского участка выявлено 575 видовых и внутривидовых таксонов, включая 127 редких, что свидетельствует о высоком уровне биоразнообразия. Одновременно таксономическая структура фитопланктона отражает усиление процессов эвтрофирования, а состав зоопланктона и зообентоса существенно обеднен (сокращение с 74 до 17 видов зоопланктона; зообентос представлен преимущественно хирономидами) [12]. Это указывает на упрощение структуры водных экосистем и, соответственно, снижение их устойчивости.

Ихтиофауна Иртыша в пределах Омской области представлена 19 видами и подвидами рыб, включая ценные и охраняемые. В Красную книгу Российской Федерации включен осетр, а в Красную книгу Омской области – осетр, нельма, щиповка, подкаменщик сибирский и два вида миног [12, 13]. Наличие охраняемых и уязвимых видов подчеркивает важность гидрологического режима, обеспечивающего условия для воспроизводства и миграций рыб.

В перспективе прогнозируется рост водопользования и водопотребления в бассейне Иртыша в Казахстане и возможное увеличение водозабора в верховьях реки на территории Китая[2] [14]. Совокупность этих факторов усиливает нагрузку на трансграничный участок и повышает экологические риски водопользования.

Таким образом, для рассматриваемого приграничного участка р. Иртыш характерны трансформация сезонного режима стока, деградация пойменных экосистем, ухудшение качества воды, снижение устойчивости водных экосистем при наличии охраняемых видов. В условиях прогнозируемого роста водопользования в Китае и Казахстане, а также высокой социально-экономической значимости реки в странах бассейна режим экологического стока приобретает особое значение для ограничения чрезмерного изъятия водных ресурсов и поддержания устойчивости экосистем.

В обстановке интенсивного хозяйственного освоения и существенного измененного гидрологического режима р. Иртыш [15] экологический сток направлен на поддержание функционирования водных экосистем в трансформированных условиях, а не на восстановление их естественного состояния.

2 Концепция развития системы управления водными ресурсами Республики Казахстан на 2024–2030 годы // Юридический сборник / Международный фонд спасения Арала, Межгосударственная координационная водохозяйственная комиссия Центральной Азии, Научно-информационный центр. Ташкент: НИЦ МКВК, 2024. № 59.

С учетом выявленных особенностей основными функциями экологического стока для рассматриваемого участка р. Иртыш являются:

– сохранение доли стока, обеспечивающей экосистемные потребности и ограничивающей чрезмерное изъятие водных ресурсов;

– поддержание устойчивого функционирования ценных пойменных экосистем среднего течения реки.

Обеспечение режима экологического стока также может способствовать поддержанию процессов самоочищения и улучшения качества воды, однако данные эффекты рассматриваются как сопутствующие результаты и не относятся к прямым функциям экологического стока.

РАСЧЕТ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СТОКА

Определение критических и лимитирующих условий

Метод критических условий [7] основан на выявлении параметров водного режима, определяющих предельно допустимые (критические) условия функционирования водных и пойменных экосистем, включая процессы воспроизводства рыб, существование околоводной биоты и процессы руслоформирования. Критический годовой сток ($W_{кр}$) определяется по годам минимального затопления поймы и характеризует нижний предел гидрологических условий, при котором экосистема сохраняет способность к функционированию. Такие условия, как правило, формируются в маловодные годы.

Рассматриваемый приграничный участок Иртыша характеризуется малой боковой приточностью, что обеспечивает высокую согласованность стока между расположенными на нем гидрологическими створами. Коэффициент корреляции максимальных уровней воды между створами г. Павлодар и с. Иртышское достигает 0,90 [8]. Поскольку створ с. Татарка расположен в тех же гидрологических условиях, данные указанных постов могут совместно использоваться для оценки параметров экологического стока (см. рис. 1).

Анализ наблюдений показал, что при регулировании стока в маловодные 1983 и 2012 гг. пойма в районе Павлодара практически не затапливалась. Так, при годовом стоке 18,9 км³ в 1983 г. (с. Татарка) затопление продолжалось лишь два дня при глубине 23 см (г. Павлодар), а в 2012 г. при годовом стоке около 20,0 км³ затопление поймы фактически отсутствовало [8]. На основании этих данных критический годовой сток ($W_{кр}$) оценивается в 19,5 км³, что соответствует обеспеченности 92 % по условно-естественному ряду (1923–1961 гг.) и может рассматриваться как пороговое значение возникновения критических условий обводнения поймы.

Помимо критических выделены годы лимитирующих условий – периоды, когда затопление поймы происходило, но носило кратковременный характер и ограничивало функционирование экосистем. К таким годам отнесены 1984-

й и 2011-й. При близких значениях годового стока различия в длительности и глубине затопления показали, что определяющее значение имеют не только годовые объемы, но и величина стока многоводного периода и его распределение. В 1984 г. при годовом стоке 22,8 км³ и объеме половодья 11,9 км³ майский сток составил 3,94 км³, что обеспечило лишь кратковременное затопление поймы продолжительностью около 8 дней при глубине воды до 41 см. В 2011 г., несмотря на сопоставимый годовой сток (22,6 км³), несколько больший майский сток (4,04 км³) и иное распределение расходов в период половодья обеспечили более продолжительное и глубокое затопление – до 20 дней при глубине до 136 см [8].

Анализ лет лимитирующих условий и лет со сходными объемами половодья (1992, 1999 гг.) показал, что вероятность выхода воды на пойму определяется прежде всего величиной стока в мае (табл. 1). Дополнительным подтверждением служат сведения по 2011 г., показавшие, что при объеме стока мая свыше 4 км³ обводнение поймы носит более глубокий и продолжительный характер. Это позволяет рассматривать данный показатель как гидрологический индикатор ее обводнения. Полученные оценки согласуются с рекомендациями по попускам Верхне-Иртышского каскада ГЭС[3], где обеспеченность обводнительного попуска составляет 75 % по числу бесперебойных лет при объеме около 4,8 км³ с его снижением в маловодные годы.

Установленные критические и лимитирующие объемы стока служат основой для определения экологического стока и уточнения его режима в условиях регулирования.

Таблица 1. Характеристики стока в годы лимитирующих условий
Table 1. Flow characteristics during years with limiting conditions

Характеристика	Год	Объем стока, км³						
		Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Половодье (май – август)	Годовой сток
Годы лимитирующих условий	1984	1,52	3,94	2,57	1,93	1,93	11,9	22,8
	2011	2,25	4,04	1,89	1,87	1,78	11,9	22,6
Годы для проверки лимитирующих условий	1992	1,85	3,99	2,33	1,81	1,79	11,8	22,4
	1999	1,95	3,91	2,20	1,70	1,47	11,2	22,0

3 Правила использования водных ресурсов Верхне-Иртышского каскада водохранилищ / Министерство энергетики и минеральных ресурсов Республики Казахстан, Казгидропроект, Казгидро. Алматы: 2001. 63 с.

Определение экологически допустимого безвозвратного изъятия стока

На основе критического стока определено экологически допустимое безвозвратное изъятие ($W_{ДИ}$) – максимальный объем безвозвратного водопотребления, не приводящий к нарушению устойчивого функционирования водных и околоводных экосистем. Оно рассчитывается как разность между критическим ($W_{кр}$) и историческим минимальным годовым стоком ($W_{ист}$):

$$W_{ДИ} = W_{кр} – W_{ист}.$$

В качестве исторически минимального стока ($W_{ист}$) в данном случае принята величина, близкая к стоку 97,4%-ной обеспеченности по условно-естественному ряду, что отражает реальные минимальные значения стока за период условно-естественного водного режима 1923–1961 гг.

Для участка р. Иртыш на границе России и Казахстана (пост с. Татарка) среднее допустимое безвозвратное изъятие ($W_{ДИ}$) составляет:

$$W_{ДИ} = 19{,}5 – 14{,}5 = 5{,}0 \text{ км}^3,$$

где $W_{кр} = W_{92\%}$ – критический сток, а $W_{ист} = W_{97{,}4\%}$ – исторически минимальный сток, определенные по ряду условно-естественного стока.

Таким образом, для участка р. Иртыш на границе России и Казахстана среднегодовое экологически допустимое безвозвратное изъятие оценивается в 5 км³, что составляет 19 % от среднемноголетнего стока.

Величина допустимого безвозвратного изъятия в годы различной водности *j* ($W_{ДИj}$) определяется по формуле:

$$W_{ЭСj} = W_{j} – W_{ДИj},$$

где W_j и $W_{ср}$ – соответственно естественный (восстановленный) сток в *j*-й год и среднемноголетний естественный (восстановленный) сток в створе.

Определение объемов экологического стока для лет разной водности

Исходя из установленной величины $W^{1}_{ДИj}$ рассчитывается экологический сток ($W_{ЭСj}$) для лет разной водности. Он определяется как как разность между годовым стоком (W_j) и допустимым изъятием ($W_{ДИj}$) года заданной обеспеченности *j*:

$$W_{ЭСj} = W_{j} – W_{ДИj}.$$

В табл. 2 представлены значения годового стока и соответствующие объемы экологически допустимого безвозвратного изъятия и экологического стока для р. Иртыш – с. Татарка в годы различной обеспеченности.

Таблица 2. Экологически допустимое изъятие и экологический сток р. Иртыш на границе России и Казахстана

Table 2. Environmentally acceptable water withdrawal and environmental flow of the Irtysh River at the Russia – Kazakhstan border

Обеспеченность стока, %	Годовой сток, км³	Допустимое безвозвратное изъятие, км³	Доля допустимого безвозвратного изъятия от годового стока, %	Экологический сток, км³	Доля экологического стока от годового, %
25	27,2	5,2	19	22,0	81
50	25,5	4,9	19	20,6	81
75	23,9	4,6	19	19,3	81
95	16,7	3,2	19	13,5	81

На основе полученных данных предварительно объем экологического стока для р. Иртыш в с. Татарка должен составлять около 80 % от естественного стока, в долгосрочной перспективе обеспечивая приемлемые условия функционирования водных и околоводных экосистем.

Сравнительный анализ условно-естественного и зарегулированного режимов стока

Для обоснования величины годового объема и внутригодового режима экологического стока выполнено сопоставление характеристик водного режима р. Иртыш у с. Татарка для двух периодов: условно-естественного (1923–1961 гг., 39 лет) и периода регулирования стока Верхне-Иртышским каскадом ГЭС (1968–2022 гг., 55 лет).

Несмотря на многолетнее регулирование стока, среднегодовой сток р. Иртыш – с. Татарка снизился незначительно – с 26,2 до 25,0 км³ (около 5 %), что указывает на сохранение общего объема водных ресурсов. Аналогичный ха-

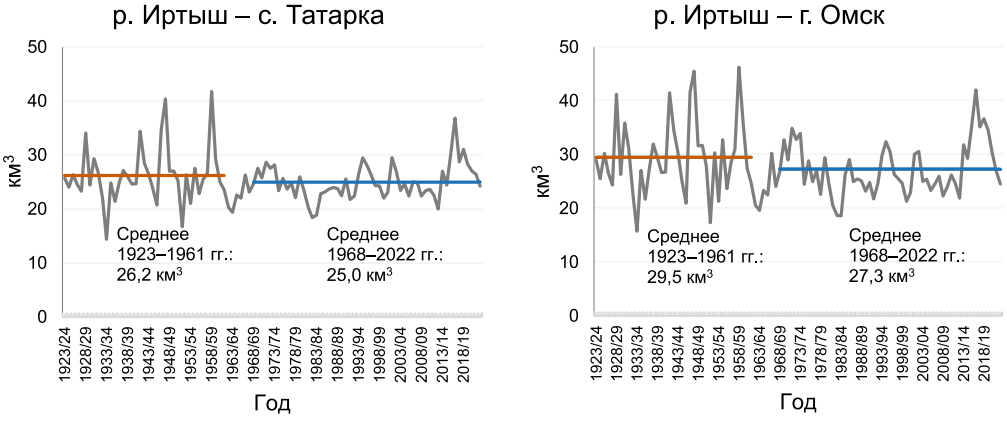


Рис. 3. Изменение и среднее значение годового стока на рассматриваемом приграничном участке за периоды условно-естественного водного режима и режима в условиях зарегулированного стока

Fig. 3. Changes in annual flow and its mean values for the transboundary study reach during the naturalized and regulated flow periods

рактер изменений наблюдается и ниже по течению, в районе г. Омска (рис. 3). Это позволяет при оценке актуальной годовой величины экологического стока опираться на годовые значения, характерные для условно-естественного режима.

Вместе с тем регулирование стока привело к сглаживанию межгодовой (см. рис. 3) и внутригодовой изменчивости, выраженному в повышении минимальных и снижении максимальных значений стока (табл. 3). Наиболее существенные изменения выявлены во внутригодовом распределении стока. Средний объем многоводного периода (апрель – август) сократился с 18,3 до 14,6 км³, а его доля в годовом стоке уменьшилась с 70 до 58 %. Одновременно зимний сток (декабрь – март) увеличился почти вдвое – с 3,0 до 5,3 км³, что привело к росту его доли с 12 до 21 %. Осенний сток (сентябрь – ноябрь) изменился незначительно и сохраняется на уровне около 5 км³ (см. табл. 3).

Таблица 3. Сезонное распределение стока в период до регулирования и после регулирования стока, р. Иртыш – с. Татарка

Table 3. Seasonal flow distribution before and after flow regulation at the Irtysh River – Tatarka gauging station

Период, показатель	Годовой сток, км³	Многоводный период (апрель – август), км³	Осень (сентябрь – ноябрь), км³	Зима (декабрь – март), км³
До 1961 г., среднее	26,2	18,3	4,9	3,0
До 1961 г., мин.	14,4	9,8	2,6	1,8
До 1961 г., макс.	41,8	29,1	9,9	5,5
С 1968 г., среднее	25,0	14,6	5,1	5,3
С 1968 г., мин.	18,4	10,4	3,4	2,8
С 1968 г., макс.	36,9	23,9	6,8	7,4

Полученные результаты показывают, что ключевые гидроэкологические последствия регулирования связаны прежде всего с сокращением весенне-летнего многоводного периода. Уменьшение объемов половодья ограничивает частоту и продолжительность затопления поймы, ухудшает условия воспроизводства гидробионтов и функционирования пойменных экосистем. Следовательно, режим экологического стока должен быть ориентирован на поддержание экологически значимых характеристик весенне-летнего водного режима.

Рекомендации по режиму экологического стока

При существующей степени антропогенного воздействия достижение «эталонного» режима экологического стока невозможно. Вместе с тем адаптированный к современным условиям режим экологического стока способен обеспечить поддержание базовых экосистемных процессов и служить основой для разработки рекомендаций по распределению стока с учетом экосистемных потребностей.

Учет выявленных изменений позволяет уточнить область практического применения экологического стока. Поскольку зимний сток в современных условиях регулирования уже существенно превышает естественные значения и его дополнительное регулирование ограничено эксплуатационными требованиями водохранилищ, установление специальных экологических требований для зимнего периода представляется нецелесообразным. Аналогично минимальные изменения осеннего стока не требуют введения дополнительных экологических требований.

На основании выявленных изменений гидрологического режима, а также установленных критических и лимитирующих условий функционирования пойменных экосистем предложены параметры режима экологического стока для приграничного российско-казахстанского участка р. Иртыш.

Годовой объем экологического стока. Его рекомендуется устанавливать на уровне не менее 80 % фактического годового стока. Поскольку регулирование не привело к существенному изменению среднегодовой водности, сохранение 80 % годового объема обосновано как базовая величина для поддержания экосистемных функций.

Многоводный период (апрель – август). В условиях сокращения половодья экологический сток должен быть ориентирован на восстановление параметров весенне-летнего периода. Рекомендуется обеспечивать объем стока не ниже 80 % условно-естественного режима, что позволяет приблизить гидрологические условия к естественной сезонной структуре и повысить вероятность затопления поймы.

Пиковый период половодья (май). Анализ критических и лимитирующих условий показал, что величина майского стока является ключевым гидрологическим индикатором выхода воды на пойму. Рекомендуется поддерживать объем стока в мае свыше 4 км³ для обеспечения выхода воды на пойму и превышения лимитирующих условий функционирования пойменных экосистем.

Предварительные параметры режима экологического стока (табл. 4) направлены на восстановление экологически значимых характеристик половодья при сохранении существующих условий регулирования стока и могут рассматриваться как практическая основа для согласования водохозяйственных режимов в приграничном участке р. Иртыш.

Таблица 4. Основные параметры предлагаемого режима экологического стока для приграничного российско-казахстанского участка р. Иртыш
Table 4. Main parameters of the proposed environmental flow regime for the Russian – Kazakh transboundary reach of the Irtysh River

Параметр режима экологического стока	Предлагаемый объем	Экологическое значение
Годовой сток	80 % от годового объема	Устойчивое функционирование речных экосистем
Многоводный период (апрель – август)	> 80 % условно-естественного стока	Приближение к естественному режиму многоводного периода, ключевого для функционирования экосистем
Минимальный сток мая (пик половодья)	> 4 км³	Выход воды на пойму, превышение лимитирующих условий функционирования экосистемы

ОБСУЖДЕНИЕ

Для оценки соответствия современного водного режима р. Иртыш предлагаемому режиму экологического стока проведено сравнение разработанных рекомендаций с фактическим режимом стока при регулировании. Для этого выбраны годы характерной водности (25, 50, 75, 95 %) из условно-естественного ряда и подобраны годы из ряда зарегулированного стока с близкими значениями годового стока (табл. 5). Такой подход правомерен, поскольку регулирование стока незначительно изменило суммарные годовые объемы, делая ряды сопоставимыми.

Анализ показал, что в многоводный год (2020 г., сопоставимый по годовому объему с условно-естественным стоком 1937 г., P = 25 %) при регулировании стока его объем за многоводный период оказался ниже установленного режима экологического стока: 15 426 млн м³ против требуемых 16 578 млн м³; в то же время критический сток мая был обеспечен: 5785 млн м³ при требуемых 4000 млн м³. В очень маловодный год при регулировании стока (1983 г., сопоставимый по объему с условно-естественным стоком 1951 г., обеспеченность 95 %) объемы стока за многоводный период и май оказались меньше требований режима экологического стока. В остальные сравниваемые годы – среднемноговодные (1975 и 1956 гг., обеспеченность 50 %), маловодные (1988 и 1927 гг., обеспеченность 75 %), – показатели фактического стока соответствовали установленным значениям экологического стока. Таким образом, в большинстве рассмотренных случаев требования режима экологического стока выполняются. Однако в современных условиях регулирования стока особое внимание следует уделять обеспечению режима экологического стока

Таблица 5. Сравнение условно-естественного, экологического и фактического стока в разные по водности годы

Table 5. Comparison of naturalized, environmental, and observed runoff for years with different hydrological conditions

Характеристика стока (водохозяйственный год)	Водохозяйственный год, млн м³	Многоводный период (апрель – август), млн м³	Май, млн м³
Условно-естественный 25 % (1937)	28 334	20 723	4604
Экологический 25 % (1937)	22 667	16 578	4000*
Фактический (2020)	27 065	**15 426**	5785
Условно-естественный 50 % (1956)	26 016	17 622	4659
Экологический 50 % (1956)	20 813	14 098	4000*
Фактический (1975)	26 296	15 857	4370
Условно-естественный 75 % (1927)	23 372	14 827	5732
Экологический 75 % (1927)	18 698	11 862	4000*
Фактический (1988)	23 874	15 101	5055
Условно-естественный 95 % (1951)	18 813	13 220	5083
Экологический 95 % (1951)	15 050	10 576	4000*
Фактический (1983)	18 856	**10 395**	**3027**

Примечание: * – объем 4000 млн м³ является лимитирующей величиной и при режиме экологического стока должен быть превышен для обводнения поймы.

в очень маловодные годы, поскольку именно в такие годы могут формироваться наиболее критические экологические условия.

Представленные в настоящей работе оценки носят предварительный характер. Для более точной оценки экологических условий необходимо учитывать режим максимальных уровней воды и особенности затопления пойменных территорий. В дальнейшем также требуется уточнение связи между объемами стока, динамикой уровней воды и характеристиками обводнения поймы, а также учет потерь воды, включая испарение с поверхности расположенных выше крупных водохранилищ.

Полученные в работе оценки параметров экологического стока могут служить научной основой для разработки экосистемно ориентированных механизмов распределения стока в трансграничном бассейне р. Иртыш. Дополнительную актуальность данная задача приобретает в связи с принятием нового Водного кодекса Республики Казахстан (2025 г.), который закрепляет понятие экологического стока и необходимость его поддержания с учетом специфики речных бассейнов. Такая нормативная база создает возможность сопоставления научных оценок экологического стока России и Казахстана и их дальнейшей интеграции в практику водохозяйственного управления.

ВЫВОДЫ

В работе предложен подход к определению параметров экологического стока для трансграничного участка р. Иртыш, основанный на применении восстановленных рядов условно-естественного стока, анализе характеристик зарегулированного водного режима и характеристик обводнения пойменных экосистем.

Установлены функции экологического стока, включающие сохранение доли стока для обеспечения экосистемных потребностей и поддержания функционирования пойменных экосистем.

Предложен адаптированный режим экологического стока, позволяющий учитывать ключевые экосистемные потребности при дальнейшем развитии хозяйственного использования водных ресурсов в трансграничном бассейне р. Иртыш. Для приграничного участка в створе р. Иртыш – с. Татарка предложено предварительное значение экологического стока на уровне около 80 % от объема условно-естественного годового стока при особой значимости весенне-летнего периода (апрель – август) в поддержании условий функционирования поймы. Для мая обосновано обеспечение объема стока свыше 4 км³, необходимого для обводнения пойменных экосистем.

Результаты создают научную основу для интеграции экологического стока в механизмы распределения трансграничных водных ресурсов р. Иртыш. Предложенный подход может быть применен и в других трансграничных бас-

сейнах с высокой степенью хозяйственного освоения, где восстановление природного состояния маловероятно и требуется поиск решений для поддержания ключевых экосистемных функций.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTERESTS

The authors declare no relevant conflict of interests.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Harwood A. J., Tickner D., Richter B. D., Locke A., Johnson S., and Yu X. Critical factors for water policy to enable effective environmental flow implementation // Frontiers in Environmental Science. 2018. Vol. 6. Art. 37. https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00037
2. King A. J., Gawne B., Beesley L., Koehn J. D., Nielsen D. L., and Price A. Improving ecological response monitoring of environmental flows. Journal of Environment Management. 2015. Vol. 55. P. 991–1005. https://doi.org/10.1007/s00267-015-0456-6
3. Arthington A. H., Bhaduri A., Bunn S. E., Jackson S. E., Tharme R. E., Tickner D., Young B., Acreman M., Baker N., Capon S., Horne A. C., Kendy E., McClain M. E., Poff N. L. R., Richter B. D., Ward S. The Brisbane Declaration and Global Action Agenda on Environmental Flows // Frontiers in Environmental Science. 2018. Vol. 6. Art. 45. https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00045
4. Dyson M., Bergkamp G., and Scanlon J., (eds.). Flow. The Essentials of Environmental Flows, 2nd Edn. Gland: IUCN, 2008.
5. Tickner D., Kaushal N., Speed R., Tharme R. Implementing Environmental Flows: Lessons for Policy and Practice // Frontiers in Environmental Science. 2020. Vol. 8. Art. 106. https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.00106
6. Horne A. C., Webb J. A., Stewardson M. J., Richter B. D., and Acreman M., (eds.). Water for the Environment: from Policy and Science to Implementation and Management. Cambridge, MA: Elsevier, 2017.
7. Дубинина В. Г., Косолапов А. Е., Коронкевич Н. И., Чебанов М. С., Скачедуб Е. А. Методические подходы к экологическому нормированию безвозвратного изъятия речного стока и установлению экологического стока (попуска) // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2009. № 3. С. 26–61.
8. Бейсембаева М. А., Дубровская Л. И., Земцов В. А. Антропогенные изменения водных ресурсов и максимальных уровней реки Иртыш в равнинной части бассейна в Республике Казахстан // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329. № 3. С. 6–15.
9. Бурлибаев М. Ж., Куц С. И., Шенбергер И. В., Бурлибаева Д. М. Анализ влияния весенних попусков реки Ертис (Иртыш) на обводнение ее поймы // Гидрометеорология и экология. 2013. № 4 (71). С. 68–80.
10. Пузанов А. В., Безматерных Д. М., Рыбкина И. Д., Зиновьев А. Т., Кошелева Е. Д., Ловцкая О. В. Трансграничные проблемы реки Иртыш: современное состояние и прогноз до 2030 года // Трансграничные водные объекты: использование, управление, охрана: сб. материалов Всерос. науч.-практ. конф. с межд. участием, 20–25 сент. 2021, Сочи. Сочи, 2021. С. 299–304.
11. Яковченко С. Г., Жерелина И. В., Рыбкина И. Д., Краморенко С. В. Оценка поступления тяжелых металлов в реку Иртыш и ее притоки с водосборной площади // Географический вестник = Geographical bulletin. 2025. № 1 (72). С. 73–85. https://doi.org/10.17072/2079-7877-2025-1-73-85

12. Баженова О. П., Костерова В. В., Адам А. М. Трансграничная река Иртыш как источник экосистемных услуг // Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture. 2024. Т. 16. № 6. С. 103–126. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2024-16-6-1015
13. Зайцев В. Ф., Ростовцев А. А., Шиповалов Л. А., Цапенков А. В., Прусевич Л. С. Оценка современного состояния запасов водных биоресурсов реки Иртыш на территории Омской области и перспективы их использования // Вестник рыбохозяйственной науки. 2015. Т. 2. № 4 (8). С. 22–33.
14. Винокуров Е., Ахунбаев А., Чуев С., Адахаев А., Сарсембеков Т. Бассейн реки Иртыш: трансграничные вызовы и практические решения. Доклад 25/2. Алматы: Евразийский банк развития, 2025. 57 с.
15. Косолапов А. Е., Болгов М. В., Савостицкий Д. В., Филиппова И. А. Изменение гидрологического режима реки Иртыш на территории Республики Казахстан в условиях функционирования Верхне-Иртышского каскада водохранилищ // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2026. № 3. С. 43–64; https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-3-43-64

REFERENCES

1. Harwood A. J., Tickner D., Richter B. D., Locke A., Johnson S., and Yu X. Critical factors for water policy to enable effective environmental flow implementation. *Frontiers in Environmental Science*. 2018. Vol. 6. Art. 37. https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00037
2. King A. J., Gawne B., Beesley L., Koehn J. D., Nielsen D. L., and Price A. Improving ecological response monitoring of environmental flows. *Journal of Environment Management*. 2015. Vol. 55. P. 991–1005. https://doi.org/10.1007/s00267-015-0456-6
3. Arthington A. H., Bhaduri A., Bunn S. E., Jackson S. E., Tharme R. E., Tickner D., Young B., Acreman M., Baker N., Capon S., Horne A. C., Kendy E., McClain M. E., Poff N. L. R., Richter B. D., Ward S. The Brisbane Declaration and Global Action Agenda on Environmental Flows. *Frontiers in Environmental Science*. 2018. Vol. 6. Art. 45. https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00045
4. Dyson M., Bergkamp G., and Scanlon J., (eds.). Flow. The Essentials of Environmental Flows, 2nd Edn. Gland: IUCN, 2008.
5. Tickner D., Kaushal N., Speed R., Tharme R. Implementing Environmental Flows: Lessons for Policy and Practice. *Frontiers in Environmental Science*. 2020. Vol. 8. Art. 106. https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.00106
6. Horne A. C., Webb J. A., Stewardson M. J., Richter B. D., and Acreman M., (eds.). Water for the Environment: from Policy and Science to Implementation and Management. Cambridge, MA: Elsevier, 2017.
7. Dubinina V.G., Kosolapov A.E., Koronkevich N.I., Chebanov M.S., Skachedub E.A. Methodological approaches to environmental regulation of irreversible river runoff withdrawal and determination of environmental flow (release). *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2009. No. 3. P. 26–61.
8. Beisembaeva M. A., Dubrovskaya L. I., Zemtsov V. A. Anthropogenic changes in water resources and maximum water levels of the Irtysh River in the plain part of the basin within the Republic of Kazakhstan. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2018. Vol. 329. No. 3. P. 6–15.
9. Burlibaev M. Zh., Kuts S. I., Shenberger I. V., Burlibaeva D. M. Analysis of the influence of spring releases of the Ertis (Irtysh) River on the inundation of its floodplain. *Hydrometeorology and Ecology*. 2013. No. 4 (71). P. 68–80.
10. Puzanov A. V., Bezmaternykh D. M., Rybkina I. D., Zinoviev A. T., Kosheleva E. D., Lovtskaya O. V. Transboundary problems of the Irtysh River: current state and forecast until 2030. In: Transboundary

Water Bodies: Use, Management, Protection. *Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation, Sochi, 20–25 September 2021*. Sochi. 2021. P. 299–304.
11. Yakovchenko S. G., Zherelina I. V., Rybkina I. D., Kramorenko S. V. Assessment of heavy metal input into the Irtysh River and its tributaries from the catchment area. *Geographical Bulletin*. 2025. No. 1 (72). P. 73–85. https://doi.org/10.17072/2079-7877-2025-1-73-85
12. Bazhenova O. P., Kosterova V. V., Adam A. M. The transboundary Irtysh River as a source of ecosystem services. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*. 2024. Vol. 16. No. 6. P. 103–126. https://doi.org/10.12731/2658-6649-2024-16-6-1015
13. Zaitsev V. F., Rostovtsev A. A., Shipovalov L. A., Tsapenkov A. V., Prusevich L. S. Assessment of the current state of aquatic biological resources of the Irtysh River in Omsk Oblast and prospects for their use. *Bulletin of Fisheries Science*. 2015. Vol. 2. No. 4 (8). P. 22–33.
14. Vinokurov E., Akhunbaev A., Chuev S., Adakhaev A., Sarsembekov T. The Irtysh River Basin: Transboundary Challenges and Practical Solutions. Report 25/2. Almaty: Eurasian Development Bank. 2025. 57 p.
15. Kosolapov A. E., Bolgov M. V., Savostitsky D. V., Filippova I. A. Changes in the hydrological regime of the Irtysh River within the Republic of Kazakhstan under operation of the Upper Irtysh reservoir cascade. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2026. No. 3. P. 43–64. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-3-43-64

Сведения об авторах:

Никитина Оксана Игоревна, канд. геогр. наук, старший научный сотрудник, Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов (ФГБУ РосНИИВХ), Россия, 344037, г. Ростов-на-Дону, ул. Ченцова, здание 10а; https://orcid.org/0000-0001-6627-3237; e-mail: oxana.niki@yandex.ru.

Косолапов Алексей Евгеньевич, д-р техн. наук, профессор, директор, Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов (ФГБУ РосНИИВХ), Россия, 344037, г. Ростов-на-Дону, ул. Ченцова, здание 10а; https://orcid.org/0000-0002-0440-9036; e-mail: akosol@mail.ru.

Савостицкий Дмитрий Валентинович, начальник Управления ресурсов вод и регулирования водохозяйственной деятельности, Федеральное агентство водных ресурсов, 117292, Москва, ул. Кедрова, дом. 8, корп. 1

Болгов Михаил Васильевич, д-р техн. наук, заведующий лабораторией, главный научный сотрудник, лаборатория моделирования поверхностных вод, отдел поверхностных вод, ФГБУН «Институт водных проблем РАН», 119333, Россия, Москва, ул. Губкина, 3; главный научный сотрудник, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Россия, 344037, г. Ростов-на-Дону, ул. Ченцова, 10а; https://orcid.org/0000-0003-3193-6488; e-mail: bolgovmv@mail.ru

About the authors:

Oxana I. Nikitina, Candidate of Geographical Sciences, Senior Researcher, Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection (RosNIIVKh), 10a Chentsova Street, Rostov-on-Don, Russia, 344037; https://orcid.org/0000-0001-6627-3237; e-mail: oxana.niki@yandex.ru.

Alexey E. Kosolapov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Director, Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection (RosNIIVKh), 10a Chentsova Street, Rostov-on-Don, Russia, 344037; https://orcid.org/0000-0002-0440-9036; e-mail: akosol@mail.ru.

Dmitry V. Savostitskiy, Head, Federal Agency for Water Resources Department of water resources and water/economic activities regulation, ul. Kedrova, 8, build. 1, Moscow, 117292, Russia.

Mikhail V. Bolgov, Principal Researcher (PhD, Doctor of Science (habilitation)), Laboratory of Surface Water Modeling, Department of Surface Waters, Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences, 119333, Russia, Moscow, ul. Gubkina, 3; Principal researcher, Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection (RosNIIVKh), Russia, 344037, Rostov-on-Don, 10a Chentsova Street; https://orcid.org/0000-0003-3193-6488; e-mail: bolgovmv@mail.ru

Поступила в редакцию / Received 27.05.2026.
Поступила после рецензирования / Revised 29.05.2026.
Принята к публикации / Accepted 18.06.2026.

УДК 556.53 *https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-4-64-80*

Оригинальная статья/Original paper

Пространственно-временная изменчивость внутригодового распределения стока рек бассейна Верхней Оби

С. Ю. Самойлова[1], А. Б. Голубева[1], В. А. Казанцева[2]

bastet@iwep.ru

[1] *Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук, г. Барнаул, Россия*
[2] *Алтайский государственный университет, г. Барнаул, Россия*

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Исследование закономерностей внутригодового распределения стока является актуальной научно-практической задачей. В условиях изменяющегося климата и антропогенного воздействия происходят существенные изменения водного режима рек, что затрудняет планирование водохозяйственных мероприятий и прогнозирование притока в водохранилища. В статье представлена оценка многолетней изменчивости естественной зарегулированности стока рек бассейна Верхней Оби (до Новосибирского водохранилища). **Методы.** В качестве показателя, отражающего естественную внутригодовую изменчивость, использован коэффициент естественной зарегулированности стока. Коэффициент рассчитывался как соотношение площади гидрографа, лежащей ниже ординаты среднегодового расхода, к общей площади гидрографа. В качестве исходных данных использованы расходы воды с суточным и месячным разрешением по 13 гидропостам за период с 1960 по 2020 г. **Результаты.** Среднемноголетние коэффициенты естественной зарегулированности стока исследуемых рек изменяются от 0,41 до 0,69 и зависят от средней высоты бассейна и типа водного режима. Для горных рек с алтайским типом водного режима, а также крупных рек с полизональным режимом характерны более высокие и стабильные в многолетнем масштабе значения коэффициентов зарегулированности. За период с 1960 по 2020 г. по всем гидропостам отмечается рост коэффициентов зарегулированности, в большинстве случаев тренд статистически достоверен на 1%-ном уровне. На р. Оби наблюдается рост стока зимней межени на 50 % и снижение половодья на 9 %. Полученные данные свидетельствуют о росте водности рек в период сработки водных ресурсов, что необходимо учитывать при планировании водохозяйственных мероприятий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: бассейн Верхней Оби, водные ресурсы, водный режим, внутригодовое распределение стока, коэффициент естественной зарегулированности, климатические изменения

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование выполнено в рамках базового госбюджетного проекта ИВЭП СО РАН.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Самойлова С. Ю., Голубева А. Б., Казанцева В. А. Пространственно-временная изменчивость внутригодового распределения стока рек бассейна Верхней Оби// Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2026. № 4. С. 64–80; https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-4-64-80; EDN: KFXVTH

© Самойлова С. Ю., Голубева А. Б., Казанцева В. А., 2026

Spatiotemporal Variability of Intra-Annual River Runoff Distribution in the Upper Ob Basin

Svetlana Yu. Samoilova[1], **Anastasia B. Golubeva**[1], **Vasilina A. Kazantseva**[2]

bastet@iwep.ru

[1] *Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Barnaul, Russia*
[2] *Altai State University, Barnaul, Russia*

ABSTRACT

Relevance. Studying the patterns of intra-annual runoff distribution is a pressing scientific and practical issue. Climate change and anthropogenic impacts cause significant alterations in river water regimes that makes the planning of water management measures and forecasting of reservoir inflows more difficult. The aim of this study is to assess the long-term variability of natural runoff regulation parameters in the Upper Ob River basin (up to the Novosibirsk Reservoir). **Methods.** The natural runoff regulation coefficient is used as an indicator reflecting the natural intra-annual variability. The coefficient is calculated as the ratio of the hydrograph area below the ordinate of the average annual discharge to the total hydrograph area. The initial information includes daily and monthly water discharge data for 1960–2020 from 13 gauging stations. **Results.** The average long-term natural flow regulation coefficients for the studied rivers range from 0.41 to 0.69 and depend on the average basin elevation and water regime type. Mountainous rivers with the Altai type of water regime, as well as large rivers with a polyzonal one are characterized by higher and more stable long-term flow regulation coefficients. The period from 1960 to 2020 shows an increase in flow regulation coefficients for all gauging stations; in most cases, the trend is statistically significant at the 1 % level. On the Ob River, a 50 % increase in winter low-water runoff and a 9 % decrease in flood flow are observed. The obtained data are evidence of an increasing river water content during the periods of water resource depletion that should be considered when planning water management measures.

KEYWORDS: Upper Ob basin, water resources, water regime, intra-annual flow distribution, natural flow regulation coefficient, climate change

FOR CITATION: Samoilova S. Yu., Golubeva A. B., Kazantseva V. A. Spatiotemporal Variability of Intra-Annual River Runoff Distribution in the Upper Ob Basin. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2026. No. 4. P. 64–80. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-4-64-80; EDN: KFXVTH

ВВЕДЕНИЕ

Характерной особенностью рек умеренного пояса с длительным устойчивым снежным покровом является значительная внутригодовая и межгодовая изменчивость стока, усложняющая использование водных ресурсов. Наиболее существенное влияние изменения климата на режим рек умеренного пояса проявляется в перераспределении стока между гидрологическими сезонами и смещении дат их наступления, при этом в большинстве случаев зна-

чимых тенденций в среднегодовых расходах не отмечается [1, 2]. В высоких северных широтах (выше 50° с.ш.), в Западной Сибири, отмечается заметное ослабление сезонности речного стока [2, 3]. С ростом зимних температур и сокращением периода залегания снежного покрова связана общая тенденция увеличения зимнего стока рек [4–7]. В то же время региональные исследования водного режима указывают на чрезвычайную неоднородность изменений стока в другие гидрологические сезоны, даже на уровне суббасейнов [1, 4, 8]. Исследование закономерностей этих изменений является важнейшей задачей для принятия решений по управлению водными ресурсами, прогнозирования сезонного стока и наполнения водохранилищ.

В качестве критерия, отражающего естественную внутригодовую изменчивость стока, часто используется коэффициент естественной зарегулированности (КЕЗ) φ, характеризующий долю базисного стока в годовом. Чем равномернее распределен сток в году, тем больше значение φ. КЕЗ может служить показателем устойчивого водообеспечения в период сработки водных ресурсов бассейна [9–12] и является ключевым показателем для решения управленческих задач при строительстве и эксплуатации водохранилищ [13].

Основным фактором, определяющим степень естественной зарегулированности стока рек, выступает климат. В первую очередь, насколько равномерно распределены в году осадки и какова доля твердых осадков, формирующих снеговое половодье. Для рек со значительной долей половодья в годовом стоке характерна высокая внутригодовая и межгодовая изменчивость стока и низкие коэффициенты естественной зарегулированности. Вторым важнейшим фактором является водопоглощающая способность речного бассейна: свойства почвогрунтов, определяющие их водопроницаемость, и, как следствие, долю подземного питания, а также степень заозеренности, заболоченности и залесенности бассейна. Установлено, что значение коэффициента естественной зарегулированности растет с юга на север при переходе от полупустынной зоны к лесной [14]. Значение КЕЗ больше в заболоченных бассейнах [11], в речных бассейнах со значительным озерным регулированием, а также в бассейнах, сложенных преимущественно хорошо проницаемыми для влаги песчаными грунтами [14]. Кроме того, высокие коэффициенты естественной зарегулированности характерны для рек с большой глубиной эрозионного вреза, распространением карста и повышенной долей подземного питания [10]. Большая степень естественной зарегулированности присуща и бассейнам крупных рек с полизональным режимом, расположенным в нескольких географических зонах.

Обобщающая работа по пространственной изменчивости коэффициентов естественной зарегулированности на территории России проведена сотрудниками МГУ [14]. На региональном уровне эти данные дают общее представление о внутригодовой изменчивости стока: так, равнинная часть исследуемо-

го бассейна, расположенная преимущественно в степной и лесостепной зонах (северо-западная часть Алтайского края и запад Новосибирской области) характеризуется значениями КЕЗ, равными 0,25–0,5, а предгорные и горные районы – 0,5–0,75. Исследование закономерностей изменчивости КЕЗ выполнялось также для отдельных рек бассейна Верхней Оби [3, 11, 12], однако детальных оценок на региональном уровне в последние десятилетия не проводилось.

Цель представленного в статье исследования – оценка многолетней изменчивости показателей естественной зарегулированности стока рек бассейна Верхней Оби (до Новосибирского водохранилища).

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования является р. Обь в верхнем течении (до створа в г. Камень-на-Оби) и ее притоки (рис. 1, табл. 1), включая крупные, средние и малые реки. Район исследования – один из наиболее освоенных и населенных в Сибири, ресурсы речного стока играют важную роль в развитии его экономики.

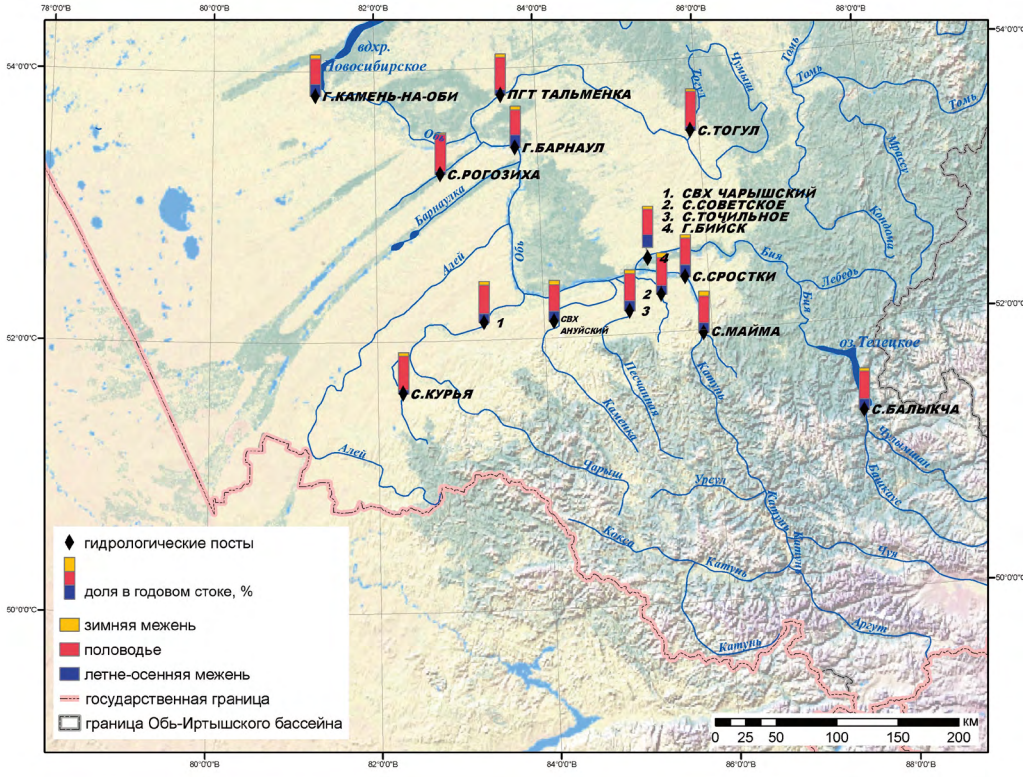


Рис. 1. Объекты исследования
Fig. 1. Study objects

Поверхностный сток р. Оби и ее притоков формирует приток в крупнейшее в Западной Сибири Новосибирское водохранилище, которое является водохранилищем сезонного регулирования. В последние десятилетия из-за особенностей водного режима наблюдается ряд проблем, связанных как с пропуском больших расходов, так и с недостаточным обеспечением водой водопользователей в маловодные периоды [15].

Основной объем притока в верхний бьеф Новосибирского водохранилища (гидропост р. Обь – г. Камень-на-Оби) формируется за счет поверхностного стока реками Катунь, Бия, Чарыш и Чумыш (табл. 1). Их доля в совокупности составляет около 85 %, изменяясь от 52–55 % в зимние месяцы до 92–97 % в половодье (апрель – июнь).

Выше Новосибирского гидроузла на р. Оби и ее притоках, за исключением р. Алей, крупные водохранилища отсутствуют. Из-за влияния подпора Новосибирского водохранилища в створе гидропоста (г/п) г. Камень-на-Оби для анализа внутригодовой изменчивости р. Оби выбран г/п в г. Барнауле.

Таблица 1. Характеристика исследуемых рек и их бассейнов [16, 17]
Table 1. Characteristics of the studied rivers and their basins [16, 17]

Река	Гидропост	Площадь бассейна до створа гидропоста, км^2	Среднегодовой расход воды, м^3/с	Среднегодовой слой стока, мм	Средняя высота бассейна, м	Озерность, %	Заболоченность, %	Лесистость, %
Бия	г. Бийск	36 900	477	407	1370	–	–	–
Чулышман	с. Балыкча	16 600	156	297	2030			
Катунь	с. Сростки	58 400	629	340	1770	–	–	–
Майма	с. Майма	780	8,7	352	670	0	0	45
Каменка	с. Советское	1730	12,0	220	480	0	0	5
Песчаная	с. Точильное	4720	32,4	216	920	0	менее 5	40
Ануй	свх Ануйский	4870	31,1	201	790	0	0	20
Чарыш	свх Чарышский	20 700	194	296	793	0	менее 5	15
Локтевка	с. Курья	1020	8,0	249	430	–	–	30
Касмала	с. Рогозиха	1650	2,07	40	230	1	5	20
Чумыш	пгт Тальменка	20 600	144	220	289	–	–	–
Тогул	с. Тогул	1200	12,8	337	350	–	менее 5	20
Обь	г. Барнаул	169 000	1470	274	–	–	–	–

Характерной чертой бассейна Верхней Оби является разнообразие рельефа. По физико-географическому районированию западная и северо-западная части бассейна относятся к степной и лесостепной зональным областям, южную и юго-восточную часть занимает северный макросклон Алтайской горной области, а северную и северо-восточную – невысокие западные отроги Салаиро-Кузнецко-Алатусской горной области. Реки региона имеют весьма разнообразные условия формирования водного режима, при этом определяющим фактором является абсолютная высота бассейна.

Бассейны стекающих с Алтайской горной области рек имеют сложное геоморфологическое строение и включают несколько высотных зон. По классификации Б. Д. Зайкова, эти реки относятся к алтайскому типу водного режима, для которого характерно многопиковое, растянутое во времени половодье, что связано с неравномерным таянием снега в разных высотных зонах. Начало половодья приходится на конец марта – начало апреля (на Чулышмане – вторая половина апреля). Продолжительность половодья зависит от амплитуды высот в бассейне и составляет от 2–3 месяцев на малых реках в низкогорной зоне (Майма, Каменка) до 3,5–5 месяцев (Чарыш, Бия, Катунь). В летне-осенний период часто наблюдаются дождевые паводки, зимняя межень низкая и устойчивая. Левобережные притоки Оби, бассейны которых располагаются на равнине (Барнаулка, Касмала, Алей), по характеру питания и внутригодовому распределению стока относятся к восточно-европейскому типу водного режима с высоким весенним половодьем, низкой летне-осенней меженью с дождевыми паводками и устойчивой зимней меженью. Схожий тип водного режима имеет р. Чумыш и ее притоки, берущие начало на низкогорном Салаирском хребте и имеющие преимущественно равнинные бассейны.

Бия, Катунь и Обь являются крупными реками полизонального режима с преобладающими чертами алтайского типа.

В качестве исходных данных были использованы ряды среднесуточных (6 г/п) и среднемесячных (13 г/п) расходов воды на реках Верхнеобского бассейна с минимальными пропусками в рядах наблюдений. Для крупных рек (Бия, Катунь, Чарыш, Чумыш) отобраны данные по замыкающим створам, пропуски восстанавливались по бассейнам-аналогам. Источники данных – материалы государственного водного кадастра[1] [16, 17], фонд АИС ГМВО[2] и электронная сеть гидрографических данных для Арктического региона R-ArcticNET[3]. Период – с 1960 по 2020 г.

Традиционно для расчета коэффициента естественной зарегулированности используется кривая продолжительности суточных расходов воды. Расходы воды (ординаты) выражаются в долях от среднего многолетнего расхода, а продолжительность стояния (абсциссы) – в долях от года. Коэффициент естественной зарегулированности φ представляет собой отношение площади графика кривой продолжительности до ординаты, равной единице, к общей площади кривой продолжительности суточных расходов воды [9, 11, 18]. В данной работе расчет КЕЗ выполнен в соответствии с методикой, описанной в [10, 14, 19]. Коэффициент рассчитывался как отношение площади гидрографа, расположенной ниже ординаты среднегодового расхода (базисный сток),

1 Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Ч. 1. Реки и каналы. Т. 1. Российская Федерация. Вып. 10. Бассейны Оби (без бассейна Иртыша), Надыма, Пура, Таза. Новосибирск. 1967–1988.

2 Электронный ресурс: https://gmvo.skniivh.ru (дата обращения: 1.04.2025).

3 Электронный ресурс: https://www.r-arcticnet.sr.unh.edu/v4.0/Tiles/arctic9.html (дата обращения: 1.05.2025).

к общей площади гидрографа (годовой сток) (рис. 2). Расчет выполняли как по среднесуточным (для 6 постов), так и по среднемесячным (для всех постов) данным с последующим сравнительным анализом результатов [10].

Многолетняя изменчивость коэффициентов естественной зарегулированности оценивалась с помощью линейных трендов. Оценка значимости трендов выполнялась по соотношению коэффициента корреляции r и его средней квадратичной ошибке σ_r. Если $r/\sigma_r > 2$, тренд значим при уровне значимости 5 %; при $r/\sigma_r > 3$ тренд значим при уровне значимости 1 %[4].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Выполненный ранее анализ годового и сезонного стока рек бассейна Верхней Оби за период с начала 1960-х до начала 2020-х годов выявил существенные изменения водного режима, связанные с потеплением климата, которые проявляются в повсеместном увеличении расходов зимней межени и их дисперсии. Для отдельных горных водосборов северного макросклона Алтайской горной области отмечен рост расходов половодья и летне-осенней межени, связанный, очевидно, с общим ростом увлажненности территории [20]. Вместе с тем для р. Оби и ее крупного притока р. Чумыш характерно снижение объема и максимальных расходов половодья [21, 22]. Наблюдаемые изменения, несомненно, указывают на увеличение степени естественной зарегулированности стока.

На первом этапе были рассчитаны ежегодные коэффициенты естественной зарегулированности (КЕЗ) стока φ на основании данных среднесуточных и среднемесячных расходов воды за период 1960–2020 гг. по гидрологическим постам, имеющим наиболее полный ряд наблюдений: р. Бия – г. Бийск, р. Обь – г. Барнаул, р. Чумыш – пгт Тальменка, р. Чарыш – свх Чарышский, р. Ануй – свх Ануйский, р. Касмала – с. Рогозиха. На рис. 2 представлены примеры расчетов КЕЗ для рек Чарыш (алтайский тип водного режима) и Чумыш (восточно-европейский тип). Обе относятся к средним рекам, площадь водосборов около 20 тыс. км^2.

Далее был проведен корреляционный анализ коэффициентов φ, рассчитанных разными способами (рис. 3, табл. 2). Установлено, что во всех случаях связь характеризуется коэффициентами корреляции r более 0,90, а ошибка составляет не более 8,4 %, что позволяет использовать для оценки КЕЗ среднемесячные данные о расходах воды. Согласно исследованиям в бассейне Волги [10], при расчете КЕЗ по среднемесячным данным ошибка составляет не более 10 %, для бассейна Припяти – еще ниже, менее 3 % [19], что ожидаемо ввиду относительно малой внутригодовой изменчивости стока р. Припяти и ее притоков (КЕЗ от 0,7 до 0,9).

4 Методические рекомендации по оценке однородности гидрологических характеристик и определению их расчетных значений по неоднородным данным. СПб.: Нестор-История, 2010. 162 с.

При расчете по среднемесячным данным, по сравнению со среднесуточными, значения коэффициентов завышены на 3–7 %. Аналогичные закономерности установлены в [19], причем чем выше значение КЕЗ, тем меньше ошибка.

Таблица 2. Результаты сравнительного анализа КЕЗ, рассчитанных по среднемесячным и суточным данным

Table 2. Results of the comparative analysis of natural regulation coefficients calculated from monthly and daily average data

Пункт наблюдения	Среднемноголетнее значение КЕЗ по среднемесячным данным, φ мес	Среднемноголетнее значение КЕЗ по суточным данным, φ сут	Ошибка, %	R^2	r
Ануй – Ануйский	0,68	0,66	3,5	0,93	0,96
Бия – Бийск	0,62	0,63	5,2	0,84	0,92
Касмала – Рогозиха	0,41	0,38	8,4	0,94	0,97
Обь – Барнаул	0,67	0,65	3,8	0,9	0,95
Чарыш – Чарышский	0,61	0,59	4,3	0,9	0,95
Чумыш – Тальменка	0,54	0,52	5,2	0,95	0,97

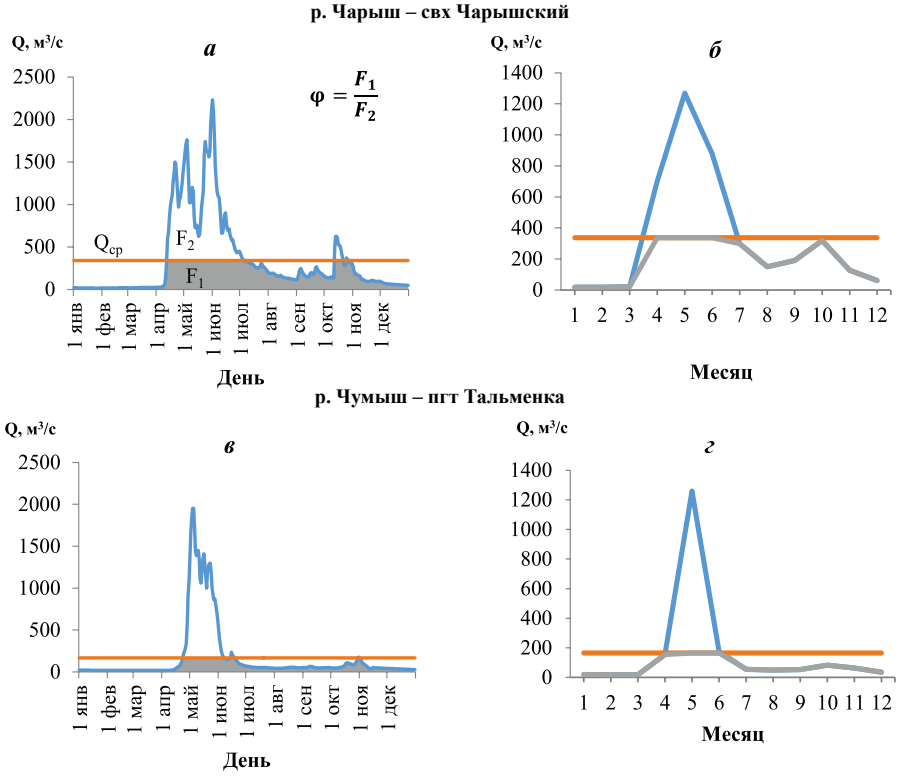


Рис. 2. Коэффициенты естественной зарегулированности стока р. Чарыш – свх Чарышский (вверху) и р. Чумыш – пгт Тальменка (внизу): *а, в* – рассчитанные по суточным данным; *б, г* – рассчитанные по среднемесячным данным. Многоводный 1969 г.

Fig. 2. Natural flow regulation coefficients for the Charysh River – Charyshsky farm (top) and the Chumysh River – Talmenka settlement (bottom): *a, c* – calculated from daily data; *b, d* – calculated from monthly average data in 1969 (high-water year)

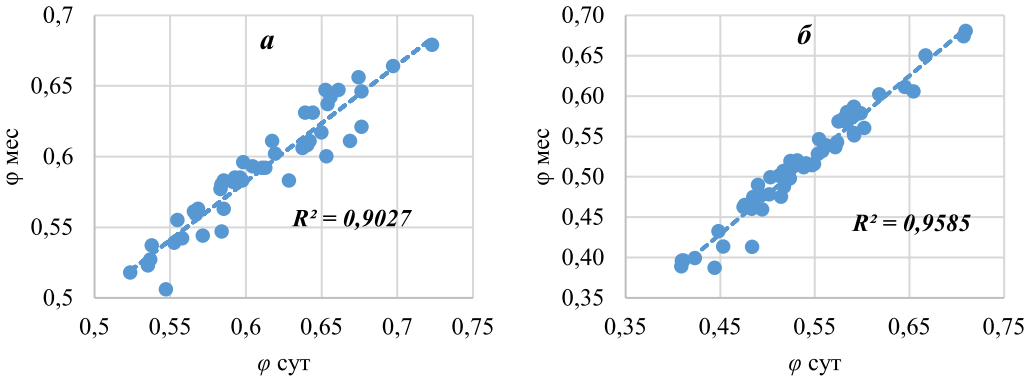


Рис. 3. Связь коэффициентов естественной зарегулированности, рассчитанных по среднесуточным и среднемесячным данным: *а* – р. Чарыш – свх Чарышский; *б* – р. Чумыш – пгт Тальменка

Fig. 3. Relationship between natural flow regulation coefficients calculated based on daily and monthly average data: *a* – the Charysh River – Charyshsky farm; *b* – the Chumysh River – Talmenka settlement

Дальнейший расчет коэффициентов естественной зарегулированности и анализ их временной динамики выполнялся по данным о среднемесячных расходах воды по 13 гидропостам. Среднемноголетние КЕЗ исследуемых рек изменяются от 0,41 до 0,69 (табл. 3). Прослеживается тесная прямая связь КЕЗ и доли подземного питания реки, которую характеризует доля зимней межени в годовом стоке. При этом с увеличением доли половодья КЕЗ снижаются (рис. 4).

Минимальные коэффициенты естественной зарегулированности характерны для равнинных или преимущественно равнинных рек – Касмалы, Локтевки, Тогула, Чумыша. Для них же характерна высокая межгодовая изменчивость КЕЗ: коэффициенты вариации от 12 до 22 %.

На реках Алтайской горной области наблюдается высокая степень естественной зарегулированности: орографическая неоднородность горных бассейнов, большой перепад высот, неравномерность таяния снега способствуют более равномерному распределению стока в безледоставный период. В большинстве случаев (за исключением р. Чулышман) КЕЗ превышают 0,60. Коэффициенты вариации не превышают 9 %, а связь КЕЗ с водностью года не прослеживается, что свидетельствует об относительной стабильности доли базисного стока в многолетнем масштабе. Высокая степень естественной зарегулированности левых притоков Оби (реки Ануй, Песчаная и др.), вероятно, связана со значительным распространением известняков и наличием карста.

В целом для рек Алтайской горной области величина КЕЗ находится в обратной зависимости от средней высоты бассейна (рис. 5). Этот результат можно считать предварительным, т. к. анализ проводился для ограниченного числа гидропостов. Использованы данные только по замыкающим створам рек, формирующим основной приток в Новосибирское водохранилище, а также расположенным в наиболее населенных районах. В анализе не участвовали реки со

значительной долей ледникового питания, что актуально в условиях потепления климата и деградации оледенения. Связь коэффициентов зарегулированности стока с заозеренностью и заболоченностью на данном этапе проанализировать весьма затруднительно по причине их незначительной изменчивости. Значимой связи с лесистостью, площадью водосбора и водоносностью рек не прослеживается.

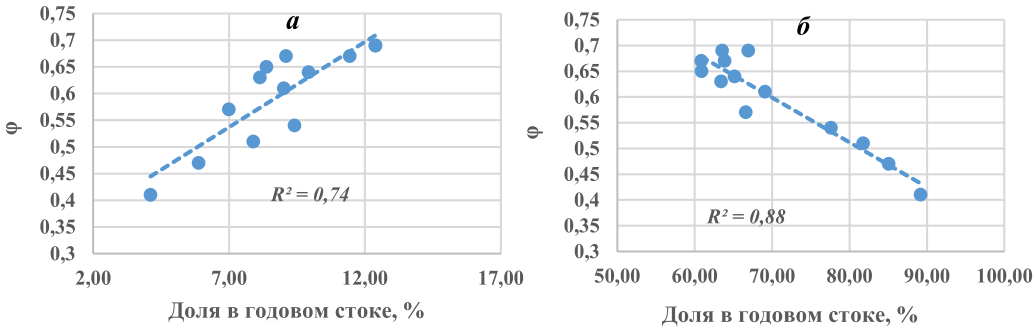


Рис. 4. Связь КЕЗ и доли в годовом стоке: *а* – зимней межени; *б* – половодья

Fig. 4. Relationship between natural regulation coefficients and shares in the annual runoff: *a* – of the winter low water; *b* – of the flood

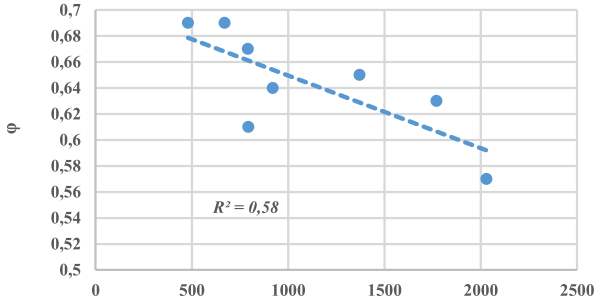


Рис. 5. Связь КЕЗ и средней высоты бассейнов

Fig. 5. Relationship between natural regulation coefficients and average basin elevation

Анализ многолетних (1960–2020 гг.) тенденций показал повсеместный устойчивый рост значений коэффициентов естественной зарегулированности (табл. 3). В большинстве случаев тренды статистически достоверны на 1%-ном уровне. Следует отметить, что по результатам исследований в бассейне р. Волги статистически значимый рост КЕЗ характерен для 25 % случаев [10]. Рост коэффициентов естественной зарегулированности на реках умеренного пояса связан в основном с увеличением меженного стока, преимущественно зимнего, что вызвано ростом температур холодного периода, снижением глубины промерзания почв и, как следствие, ростом доли подземного питания рек [5, 8, 23]. Так, в ранее выполненных исследованиях показано, что на р. Оби вышеописанные изменения водного режима начали проявляться начиная с 1982–1983 гг. [21].

Таблица 3. Параметры изменчивости значений КЕЗ за период 1960–2020 гг.
Table 3. Variability parameters of natural regulation coefficients for the period 1960–2020

Река	Пост	КЕЗ (φ)	Cv	Уравнение тренда	r	r/σ_r
Бия	г. Бийск	0,65	5,9	y = 0,0005x + 0,64	0,25	2,01
Чулышман	с. Балыкча	0,57	6,9	y = 0,0007x + 0,55	0,35	3,04
Катунь	с. Сростки	0,63	6,0	y = 0,0008x + 0,60	0,39	3,48
Майма	с. Майма	0,69	8,6	y = 0,0019x + 0,64	0,55	6,14
Каменка	с. Советское	0,69	9,1	y = 0,0016x + 0,65	0,47	4,56
Обь	г. Барнаул	0,67	5,7	y = 0,0009x + 0,64	0,43	4,00
Песчаная	с. Точильное	0,64	8,8	y = 0,001x + 0,61	0,31	2,58
Ануй	свх Ануйский	0,67	8,1	y = 0,0014x + 0,63	0,44	4,05
Чарыш	свх Чарышский	0,61	8,4	y = 0,0005x + 0,59	0,18	1,40
Локтевка	с. Курья	0,52	17,3	y = 0,0022x + 0,46	0,42	3,89
Касмала	с. Рогозиха	0,41	21,9	y = 0,0012x + 0,37	0,25	1,93
Чумыш	пгт Тальменка	0,54	12,6	y = 0,002x + 0,48	0,53	5,59
Тогул	с. Тогул	0,49	17	y = 0,0024x + 0,42	0,51	5,37

– тренд незначим

– тренд значим на 5 % уровне

– тренд значим на 1 % уровне

Для количественной оценки изменчивости внутригодового распределения стока р. Оби в створе г/п г. Барнаул были построены и проанализированы осредненные гидрографы за периоды, соответствующие полным циклам водности (рис. 6). На протяжении всего периода, с 1960 по 2020 г., отмечено постепенное увеличение зарегулированности стока. Наиболее показательно сравнение циклов 1968–1982 гг. и 2012–2022 гг. Каждый включает годы, близкие к максимальным (1969 г. и 2013 г.) и минимальным (1974 г. и 2012 г.) по водности. Среднемноголетний расход в обоих случаях составляет 1480 $м^3/с$ и соответствует норме стока. Коэффициент естественной зарегулированности вырос на 7 %: с 0,64 до 0,69. При этом средний расход зимней межени увеличился на 50 %: с 300 $м^3/с$ (период 1968–1972 гг.) до 450 $м^3/с$ (период 2012–2022 гг.), а средний расход половодья снизился с 2910 до 2650 $м^3/с$ (на 9 %). Средний расход летне-осенней межени практически не изменился и остался на уровне 1240–1250 $м^3/с$.

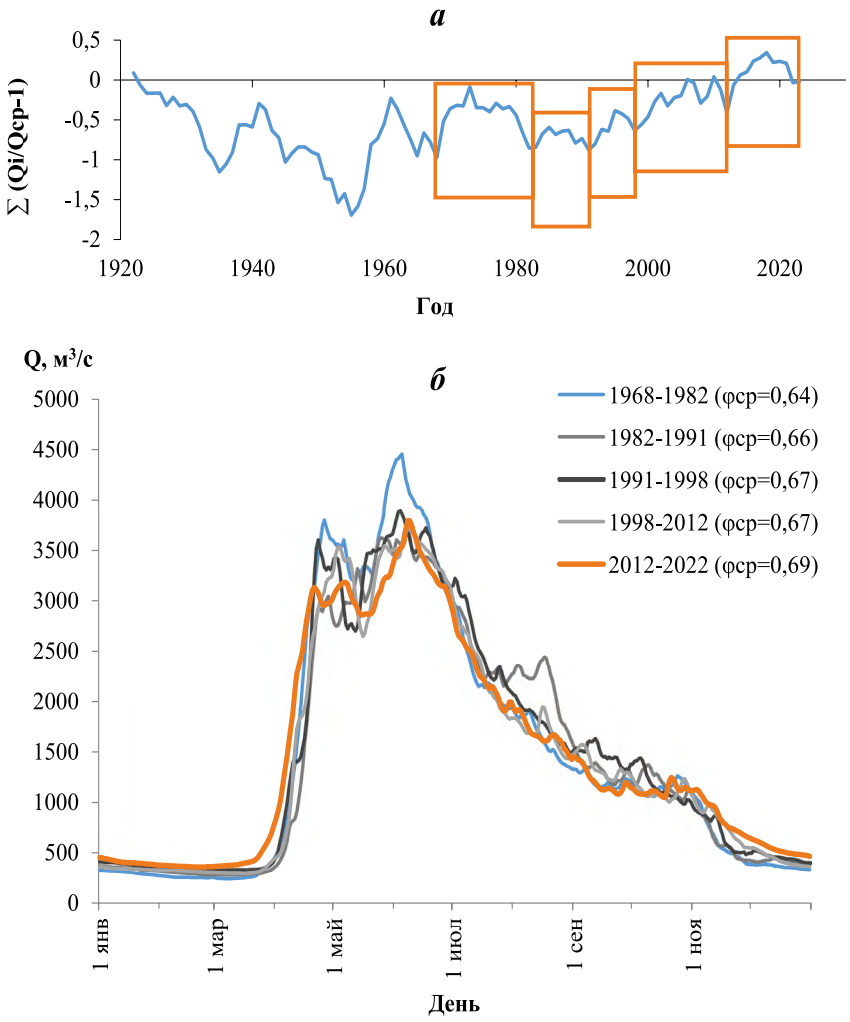


Рис. 6. Разностная интегральная кривая р. Оби у г. Барнаула (*а*); осредненные гидрографы р. Обь – г/п г. Барнаул (*б*)

Fig. 6. Difference integral curve of the Ob River near Barnaul (*a*); Averaged hydrographs of the Ob River – Barnaul (*b*)

Наблюдаемые изменения водного режима р. Оби проявляются в снижении рисков наводнений от снеговых половодий [24] и более устойчивом обеспечении водными ресурсами в маловодный период.

ВЫВОДЫ

Пространственная дифференциация показателей коэффициента естественной зарегулированности стока исследуемых рек определяется преимущественно орографическими условиями их бассейнов и, как следствие, типом водного режима. Для рек, стекающих с северного макросклона Алтайской гор-

ной области (алтайский тип водного режима), как внутригодовая, так и межгодовая изменчивость стока менее выражены: среднемноголетние КЕЗ – от 0,57 до 0,69, а их коэффициенты вариации не превышают 9 %. На равнинных реках (восточно-европейский тип) показатели коэффициентов естественной зарегулированности установлены в диапазоне от 0,41 до 0,54, а их коэффициенты вариации достигают 20 % и более.

По всем гидропостам, независимо от типа водного режима и площади водосбора, за период с 1960 по 2020 г. отмечается рост коэффициента естественной зарегулированности. В большинстве случаев тренд статистически достоверен на 1%-ном уровне. Увеличение степени естественной зарегулированности свидетельствует о росте водности рек в период сработки водных ресурсов и связано преимущественно с климатическими изменениями.

Полученные результаты отражают региональные закономерности внутригодовой изменчивости стока рек Алтая. Расширение перечня исследуемых гидропостов с переходом от интегральных показателей (КЕЗ) к сезонным компонентам (половодье, летне-осенняя и зимняя межень) в перспективе позволит уточнить роль климатических факторов в трансформации водного режима на уровне суббассейнов. Особый интерес, на наш взгляд, представляет анализ водного режима притоков со значительной долей ледникового питания в условиях деградации оледенения.

Снижение внутригодовой изменчивости стока р. Оби в целом благоприятно для гидроэкологической безопасности региона. Рост доли базисного стока свидетельствует о более устойчивом обеспечении водными ресурсами в маловодный период, а сглаживание половодья снижает риски наводнений. В то же время снижение объемов половодий может создавать дефицит водных ресурсов в периоды наполнения Новосибирского водохранилища. Результаты исследования могут быть использованы в качестве обоснования для корректировки правил использования водных ресурсов водохранилища, актуализации схем комплексного использования и охраны водных объектов, а также при разработке адаптационных мер к изменению климата на региональном уровне.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTERESTS

The authors declare no relevant conflict of interests.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hannaford J., Buys G. Trends in seasonal river flow regimes in the UK // Journal of Hydrology. 2012. Vol. 475. P. 158–174. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.09.044
2. Wang H., Liu J., Klaar M., Chen A., Gudmundsson L., Holden J. Anthropogenic climate change has influenced global river flow seasonality // Science. 2024. Vol. 383. No. 6686. P. 1009–1014. https://doi.org/10.1126/science. adi9501

3. Паромов В. В., Савельева Н. И., Василевская Л. Н. Процессы макроциркуляции и изменение речного стока в бассейнах Верхней и Средней Оби // Вестник Томского государственного университета. 2001. № 274. С. 69–77.
4. Chang H., Jung I. W. Spatial and temporal changes in runoff caused by climate change in a complex large river basin in Oregon // Journal of Hydrology. 2010. Vol. 388. No. 3–4. P. 186–207. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.04.040
5. Kalyuzhnyi I. L., Lavrov S. A. Basic physical processes and regularities of winter and spring river runoff formation under climate warming conditions // Russian Meteorology and Hydrology. 2012. Vol. 37. No. 1. P. 47–56. https://doi.org/10.3103/S1068373912010074
6. Rottler E., Francke T., Bürger G., Bronstert A. Long-term changes in central European river discharge for 1869–2016: impact of changing snow covers, reservoir constructions and an intensified hydrological cycle // Hydrology and Earth System Sciences. 2020. Vol. 24. P. 1721–1740. https://doi.org/10.5194/hess-24-1721-2020
7. Sivokhip Z. T., Pavleychik V. M., Chibilev A. A. Changes in River Runoff during Winter Low Water Periods in the Basin of the Ural River // Doklady Earth Sciences. 2021. Vol. 499. No. 2. P. 703–707. https://doi.org/10.1134/S1028334X2108016X
8. Фролова Н. Л., Киреева М. Б., Агафонова С. А., Евстигнеев В. М., Ефремова Н. А., Повалишникова Е. С. Внутригодовое распределение стока равнинных рек Европейской территории России и его изменение // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2015. № 4. С. 4–20. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2015-4-1
9. Ахмедова Н. Р., Валл Е. В., Наумов В. А. Расчет коэффициента естественной зарегулированности стока рек Калининградской области по результатам наблюдений 2020 г. // Известия Иркутского государственного университета. Сер. Науки о Земле. 2023. Т. 45. С. 3–14. https://doi.org/10.26516/2073-3402.2023.45.3
10. Фролова Н. Л., Агафонова С. А., Нестеренко Д. П., Повалишникова Е. Л. Естественная зарегулированность стока рек бассейна Волги в условиях меняющегося климата // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2013. № 6. С. 32–49. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2013-6-3
11. Галахов В. П. Влияние болот бассейна Оби на естественную зарегулированность поверхностного стока // Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии: труды Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 25-летнему юбилею Института водных и экологических проблем СО РАН. Барнаул, 2012. Т. 1. С. 30–33.
12. Юшкина О. А., Земцов В. А. Влияние режима стока рек и степени его естественной зарегулированности на параметры динамических систем речных бассейнов // Вестник Томского государственного университета. 2008. № 316. С. 213–218.
13. Гречушникова М. Г., Самохин М. А., Эдельштейн К. К. Техногенный потенциал регулирования стока рек России // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2017. № 4. С. 18–34. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2017-4-2
14. Фролова Н. Л., Нестеренко Д. П., Шенберг Н. В. Внутригодовое распределение стока рек России // Вестник Московского университета. Сер. 5: География. 2010. № 6. С. 8–16.
15. Савкин В. М. Регулирование экстремального стока Верхней Оби Новосибирским водохранилищем // География и природные ресурсы. 2018. № 4. С. 115–121. https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2018-4(115-11)
16. Ресурсы поверхностных вод. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Ч. 1: Реки и каналы. Т. 1: РСФСР. Вып. 10: Бассейны Оби (без бассейна Иртыша), Надыма, Пура, Таза / под ред. Ж. С. Попова. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. 542 с.
17. Ресурсы поверхностных вод. Т. 15. Основные гидрологические характеристики. Алтай, Западная Сибирь и Северный Казахстан. Вып. 1. Верхняя и Средняя Обь / под ред. Е. П. Шурупа. Л.: Гидрометеоиздат, 1975. 542 с.

18. Наумов В. А. Расчет коэффициента естественной зарегулированности стока река Преголи // Вестник НМС. 2020. № 19. Стр. 55–61. https://doi.org/10.26897/2618-8732-2020-19-55-61
19. Волчек А. А., Парфомук С. И., Сидак С. В. Особенности внутригодового распределения стока рек бассейна Припяти // Вестник Брестского государственного технического университета. Сер.: Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология. 2020. № 2 (120). С. 2–9.
20. Самойлова С. Ю., Ловцкая О. В., Голубева А. Б. Оценка стационарности годового и сезонного стока рек бассейна Верхней Оби // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 5. С. 21–38. https://doi.org/10.35567/19994508-2024-5-21-38
21. Самойлова С. Ю., Мардасова Е. В., Коломейцев А. А. Изменение гидрологических характеристик р. Оби под влиянием климатических изменений в 1922–020 гг. (по данным наблюдений в г. Барнауле) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2025. Т. 336. № 4. С. 75–88. https://doi.org/10.18799/24131830/2025/4/4698
22. Седова Е. Ю., Самойлова С. Ю. Изменение ресурсов речного стока под влиянием природно-климатических и антропогенных факторов (на примере р. Чумыш) // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 4. С. 44–60. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-4-44-60
23. Джамалов Р. Г., Фролова Н. Л., Телегина Е. А. Изменение зимнего стока рек европейской части России // Водные ресурсы. 2015. Т. 42. № 6. С. 581. https://doi.org/ 10.7868/S0321059615060036
24. Самойлова С. Ю., Казанцева В. А. Динамика наводнений на реке Оби в черте города Барнаула // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 3. С. 35–49. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-3-35-49

REFERENCES

1. Hannaford J., Buys G. Trends in seasonal river flow regimes in the UK. *Journal of Hydrology*. 2012. Vol. 475. pp. 158–174. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.09.044
2. Wang H., Liu J., Klaar M., Chen A., Gudmundsson L., Holden J. Anthropogenic climate change has influenced global river flow seasonality. *Science*. 2024. Vol. 383. No. 6686. P. 1009–1014. https://doi.org/10.1126/science.adi9501
3. Paromov V. V., Savelyeva N. I., Vasilevskaya L. N. Macro/circulation processes and changes in river runoff of the Upper and Middle Ob basins. *Bulletin of Tomsk State University*. 2001. No. 274. P. 69–77.
4. Chang H., Jung I. W. Spatial and temporal changes in runoff caused by climate change in a complex large river basin in Oregon. *Journal of Hydrology*. 2010. Vol. 388. No. 3–4. P. 186–207. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.04.040
5. Kalyuzhnyi I. L., Lavrov S. A. Basic physical processes and regularities of winter and spring river runoff formation under climate warming conditions. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2012. Vol. 37. No. 1. P. 47–56. https://doi.org/10.3103/S1068373912010074
6. Rottler E., Francke T., Bürger G., Bronstert A. Long-term changes in central European river discharge for 1869–2016: impact of changing snow covers, reservoir constructions and an intensified hydrological cycle. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2020. Vol. 24. P. 1721–1740. https://doi.org/10.5194/hess-24-1721-2020
7. Sivokhip Z. T., Pavleychik V. M., Chibilev A. A. Changes in River Runoff during Winter Low Water Periods in the Basin of the Ural River. *Doklady Earth Sciences*. 2021. Vol. 499. No. 2. P. 703–707. https://doi.org/10.1134/S1028334X2108016X
8. Frolova N. L., Kireeva M. B., Agafonova S. A., Evstigneev V. M., Efremova N. A., Povalishnikova E. S. Intra-annual distribution of lowland river runoff in European Russia and its change. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2015. No. 4. P. 4–20. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2015-4-1

9. Akhmedova N. R., Vall E. V., Naumov V. A. The calculation of the coefficient of natural river runoff regulation in Kaliningrad oblast based on observation results of 2020. *Bulletin of Irkutsk State University. Series: Earth Sciences*. 2023. Vol. 45. P. 3–14. https://doi.org/10.26516/2073-3402.2023.45.3
10. Frolova N. L., Agafonova S. A., Nesterenko D. P., Povalishnikova E. L. Natural regulation of river runoff in the Volga basin under climate change. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2013. No. 6. P. 32–49. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2013-6-3
11. Galakhov V. P. The Impact of the Ob basin wetlands on natural regulation of surface runoff // Water and Environmental Problems of Siberia and Central Asia: Proceedings of the All-Russian Scientific Conference with International Participation Dedicated to the 25th Anniversary of the Institute for Water and Environmental Problems SB RAS: in 3 volumes. Barnaul, 2012. Vol. 1. P. 30–33.
12. Yushkina O. A., Zemtsov V. A. The influence of river runoff regime and the degree of its natural regulation on the parameters of dynamic systems of river basins. *Bulletin of Tomsk State University*. 2008. No. 316. P. 213–218.
13. Grechushnikova M. G., Samokhin M. A., Edelshtein K. K. Technogenic potential of river flow regulation in Russia. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2017. No. 4. P. 18–34. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2017-4-2
14. Frolova N. L., Nesterenko D. P., Shenberg N. V. Intra-annual distribution of river runoff in Russia. *Bulletin of Moscow University. Series 5: Geography*. 2010. No. 6. P. 8–16.
15. Savkin V. M. Regulation of the Upper Ob extreme flow by the Novosibirsk Reservoir. *Geography and Natural Resources*. 2018. No. 4. P. 115–121. https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2018-4(115-11)
16. Surface Water Resources. Long-term data on the regime and resources of inland surface waters. Part 1: Rivers and canals. Vol. 1: RSFSR, Iss. 10: Ob (excluding the Irtysh basin), Nadym, Pur, Taz basins / edited by Zh. S. Popov. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1984. 542 p.
17. Surface Water Resources. Vol. 15. Main Hydrological Characteristics. Altai, Western Siberia, and Northern Kazakhstan. Part 1. Upper and Middle Ob / Edited by E. P. Shurup. Leningrad: Gidrometoizdat, 1975. 542 p.
18. Naumov V. A. The calculation of the coefficient of natural flow regulation of the Pregola River. *Newsletters of Scientific and Methodological Council in Environmental Engineering and Water Management*. 2020. No. 19. P. 55–61. https://doi.org/10.26897/2618-8732-2020-19-55-61
19. Volchek A. A., Parfomuk S. I., Sidak S. V. Features of the intra-annual distribution of river runoff in the Pripyat basin. *Bulletin of Brest State Technical University. Series: Water Management Construction, Heat Power Engineering and Geo/ecology*. 2020. No. 2 (120). P. 2–9.
20. Samoilova S. Yu., Lovtskaya O. V., Golubeva A. B. Assessment of the stationarity of annual and seasonal river runoff in the Upper Ob basin. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2024. No. 5. P. 21–38. https://doi.org/10.35567/19994508-2024-5-21-38
21. Samoilova S. Yu., Mardasova E. V., Kolomeytsev A. A. Changes in hydrological characteristics of the Ob River caused by climate change in 1922–2020 (based on observations in Barnaul). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo/resources Engineering*. 2025. Vol. 336. No. 4. P. 75–88. https://doi.org/10.18799/24131830/2025/4/4698
22. Sedova E. Yu., Samoilova S. Yu. Changes in river runoff resources under the Influence of natural, climatic, and anthropogenic factors (by the example of the Chumysh River) *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2025. No. 4. P. 44–60. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-4-44-60
23. Dzhamalov R. G., Frolova N. L., Telegina E. A. Changes of winter river runoff in the European part of Russia. *Water Resources*. 2015. Vol. 42, No. 6. P. 581. https://doi.org/10.7868/S0321059615060036
24. Samoilova S. Yu., Kazantseva V. A. Flood dynamics on the Ob River within the city of Barnaul. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2025. No. 3. P. 35–49. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-3-35-49

Сведения об авторах:

Самойлова Светлана Юрьевна, канд. геогр. наук, старший научный сотрудник, Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 656038, Барнаул, ул. Молодежная, 1; https://orcid.org/0000-0002-3365-0048; e-mail: bastet@iwep.ru

Голубева Анастасия Борисовна, младший научный сотрудник, Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 656038, Барнаул, ул. Молодежная, 1; https://orcid.org/0000-0002-3942-1350; e-mail: apticagolub@yandex.ru

Казанцева Василина Александровна, студентка 2-го курса магистратуры, ФГБУ ВО «Алтайский государственный университет», г. Барнаул, пр. Ленина, 69; https://orcid.org/ 0009-0006-4512-4324; e-mail: vol.vasilisa.kaz@gmail.com

About the authors:

Svetlana Yu. Samoilova, Ph.D. in Geography, Senior Researcher, Institute for Water and Environmental Problems (SB RAS), 1, Molodezhnaya St., 656038, Barnaul, Russia; https://orcid.org/0000-0002-3365-0048; e-mail: bastet@iwep.ru

Anastasia B. Golubeva, Junior Researcher, Institute for Water and Environmental Problems (SB RAS), 1, Molodezhnaya St., 656038, Barnaul, Russia; https://orcid.org/0000-0002-3942-1350; e-mail: apticagolub@yandex.ru

Vasilina A. Kazantseva, second-year student of the Master's Studies, Altai State University, 69, Lenin Ave., Barnaul, Russia; https://orcid.org/ 0009-0006-4512-4324; e-mail: vol.vasilisa.kaz@gmail.com

Поступила в редакцию / Received 01.06.2026.
Поступила после рецензирования / Revised 07.07.2026.
Принята к публикации / Accepted 24.07.2026.

УДК 556.114; 579.68

https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-4-81-97

Оригинальная статья/Original paper

Рекогносцировочные гидрологические исследования Питьевого канала на Большом Соловецком острове

К. В. Титова, Н. М. Кокрятская, Т. А. Жибарева, О. Ю. Морева

ksyu_sev@mail.ru

Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н. П. Лаверова Уральского отделения Российской академии наук, г. Архангельск, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Вода относится к основным факторам, влияющим на здоровье человека. В статье представлены результаты исследования гидрохимических и микробиологических показателей Питьевого канала на Большом Соловецком острове. Этот водоток выполняет гидроресурсную функцию, обеспечивая питьевой водой местное население, туристов и паломников. **Методы.** Отбор проб проведен в июле – августе и октябре 2020 г. Определены гидрохимические показатели из перечня обязательных для оценки загрязнения и характеристики воды, общее микробное число, ОКБ, ТКБ, рассчитаны индексы загрязнения вод. **Результаты.** Установлено изменение содержания органического углерода и цветности воды от истока канала к устью, вызванное естественными условиями функционирования водотока, поступлением болотных вод с водосборной территории. Показано, что изменение соотношения главных ионов в устье Питьевого канала и увеличение микробиологических показателей обусловлены антропогенным воздействием. Отмечено влияние температуры окружающей среды на микробиологическую деятельность. Полученные результаты подтверждают необходимость мониторинга состояния Питьевого канала.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: гидрохимические характеристики, микробные показатели, водотоки, Соловецкий архипелаг, питьевая вода

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦКИА Уральского отделения РАН.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Титова К. В., Кокрятская Н. М., Жибарева Т. А., Морева О. Ю. Рекогносцировочные гидрологические исследования Питьевого канала на Большом Соловецком острове // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2026. № 4. С. 81–97; https://doi.org/10.35567/19994508-2026-4-81-97; EDN: LDDYXO

© Титова К. В., Кокрятская Н. М., Жибарева Т. А., Морева О. Ю., 2026

Reconnaissance hydrological studies of the Pityevoy Canal on Bolshoy Solovetsky Island

Ksenia V. Titova ✉, **Natalia M. Kokryatskaya**, **Tatiana A. Zhibareva**, **Olga Yu. Moreva**

✉ksyu_sev@mail.ru

N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research Ural Branch RAS, Arkhangelsk, Russia

ABSTRACT

Relevance. This article presents the results of a study of the hydrochemical and microbiological parameters of the Pityevoy Canal. This watercourse also serves as a hydroresource, supplying water to the local population, tourists, and pilgrims. **Methods.** Sampling was conducted in July-August and October 2020. Among the parameters determined, hydrochemical parameters from the list of mandatory parameters for assessing pollution and water characteristics, including total microbial count (TBC), total bacterial count (TBC), and calculated water pollution indices, were selected. **Results.** Changes in organic carbon content and color (including iron) from the canal's source to its mouth were established, caused by the natural conditions of the watercourse and the influx of marsh waters from the catchment area. It is shown that changes in the ratio of the main ions at the mouth of the Pityevoy Canal and an increase in microbiological parameters are due to anthropogenic impacts. The influence of ambient temperature on microbiological activity is noted. At the drinking water sampling site, prior to water treatment, water quality discrepancies were detected only in terms of color, organic matter, and iron content due to natural factors. These results confirm the need to monitor the condition of the Pityevoy Canal due to the significant variability of its water quality parameters.

KEYWORDS: hydrochemical characteristics, microbial indicators, watercourses, Solovetsky Archipelago

FINANCING: The work was carried out within the framework of the state assignment of the FCIARctic of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

FOR CITATION: Titova K. V., Kokryatskaya N. M., Zhibareva T. A., Moreva O. Yu. Reconnaissance hydrological studies of the Pityevoy Canal on Bolshoy Solovetsky Island. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2026. No. 4. P. 81–97; https://doi.org/10.35567/19994508-2026-4-81-97; EDN: LDDYXO

ВВЕДЕНИЕ

Вода относится к основным факторам, влияющим на здоровье человека. Отрицательное воздействие на организм могут оказывать не только вещества-загрязнители, но и естественные компоненты природных вод, если их концентрация значительно выше или ниже содержания, необходимого для нормальной жизнедеятельности [1].

Проблема качества воды остается актуальной как в России, так и в мировом масштабе[1]. Деградация водных ресурсов – это широко изучаемое явление,

1 Охрана природы. Гидросфера. Использование и охрана вод. Основные термины и определения. ГОСТ 17.1.1.01-77. М.: Изд-во стандартов, 1984. 13 с.

которое может быть вызвано природными процессами (изменением климата, взаимодействием воды и горных пород, геологическими факторами) и деятельностью человека [2, 3]. В современных условиях управление поверхностными и подземными водами как ресурсом жизнедеятельности является сложным процессом и требует соответствующей информации о состоянии водных ресурсов [4]. Кроме того, физико-химические и биологические характеристики, а также качество, количество и доступность водных ресурсов колеблются из-за воздействия природных и антропогенных факторов [5]. Загрязнение водных объектов могут вызывать и физические факторы окружающей среды, например существенное изменение температуры [6].

Развиваются различные направления изучения процессов формирования и трансформации качества воды: геохимическое, биологическое, санитарно-гигиеническое, водохозяйственное и гидрологическое [7]. Целью глобальной системы мониторинга окружающей среды по пресной воде служит устойчивое развитие водных ресурсов[2].

Соловецкий архипелаг, в который входит Большой Соловецкий остров, расположен в юго-западной части Белого моря при входе в Онежский залив, в 165 км южнее Северного полярного круга [8]. Отличительной особенностью гидрографической сети острова является отсутствие рек при большом количестве озер.

В этих условиях выдающимся примером хозяйственной деятельности Соловецкого монастыря стало создание озерно-канальных водохозяйственных систем, относящихся в настоящее время к одному из наиболее значимых элементов природно-культурного наследия на Соловецких островах. Основные водохозяйственные работы монастыря были нацелены на изменение стока в нужном направлении и его регулирование. Кроме водорегулирующей функции монастырские озерно-канальные системы выполняют также гидроресурсную (водоотведение и водоснабжение), водоэнергетическую, транспортную, мелиоративную и экологическую функции [9].

Важнейшим звеном озерно-канальной системы Большого Соловецкого острова является Питьевой канал, в середине которого осуществляется водозабор для нужд жителей и гостей пос. Соловецкий. Канал был искусственно создан в середине XVI в. при игумене Филиппе (Колычеве), чтобы соединить оз. Питьевое (Данилово) с оз. Святым и замкнуть систему озер у стен Соловецкого монастыря.

Озера Большого Соловецкого острова исследовали в середине 1960-х и в начале 2000-х годов специалисты и ученые различных научных институтов [8, 10, 11]. Первые работы по исследованию озер Большого Соловецкого острова были проведены в 1882–1897 гг. сотрудниками биологической станции

2 Интернет-ресурс: https://unece.org/ru/environment-policy/environmental-monitoring-and-assessment/pokazateli-i-politika-v-oblasti (дата обращения: 22.06.2026).

Петербургского общества естествоиспытателей, но в открытом доступе сведений об их результатах не найдено. Дальнейший этап обследования относится к лагерному периоду истории Соловецкого архипелага и связан с открытием Соловецкой биологической станции в 1926 г. [12]. Было установлено, что питание Соловецких озер идет за счет атмосферных осадков, как выпадающих непосредственно на акватории озер, так и стекающих по поверхности острова или через толщу его почв и грунтов, т. е. их солевой режим находится во взаимосвязи с характером водосборной площади. Поэтому озера, питающиеся за счет почв, отличаются большой бедностью солей, особенно биологически важных [13].

В ходе исследований середины XX в. были выявлены особенности гидрографической сети острова, в частности отсутствие рек и ярусное расположение озер. Сток пресных вод в Белое море наиболее четко выражен в трех направлениях: в губу Сосновскую сбрасывает воды система озер Долгого, Лесного Большого и Горелого, в залив Благополучия поступают воды канальной системы озер, а воды озер северо-восточной группы стекают в губу Долгую. Водоемы сообщаются посредством ручьев, проток или искусственных каналов, а иногда вообще не имеют стока.

Создание озерно-канальной системы привело к изменению гидрологического режима озер (водоемов с замедленным водообменом): одни стали проточными, площади водосборов некоторых озер возросли в несколько раз, другие же, наоборот, стали менее проточными. Через основные озера Западной канальной системы транзитом проходят воды, поступающие с начала системы из озер Большого Гремячьего и Красного. Близость значений гидрокарбонатов и перманганатной окисляемости могут свидетельствовать о сравнительной однородности минерального и органического состава вод этой группы озер. По-видимому, малые канальные озера утратили значительные индивидуальные черты гидрохимического режима [8].

Летом 2001–2005 гг. при изучении гидрохимических особенностей внутренних водоемов острова выполнен анализ смешанных проб верхнего слоя озерной воды. Установлена близость гидрохимических показателей для водоемов канальной системы озер [10].

На примере оз. Святое, являющегося замыкающим в озерно-канальной системе, показано различие в минерализации воды по акватории озера в 2020 г., что связано с его проточностью (поступлением из других водных систем и отчасти глубиной места отбора), а также сезонными колебаниями, обусловленными изменением уровня воды в подледный период и во время обильного выпадения осадков, т. е. с естественными факторами. В последующие годы, по сравнению с 2020 г., произошло уменьшение минерализации. Это различие вызвано снижением концентрации гидрокарбонатов, сульфатов и кальция при практически постоянном уровне хлоридов, натрия и магния. Изменилось также и распределение ионов с преобладающих гидрокарбонатов и натрия

на хлоридно-натриевое, которое характерно для всех других исследованных авторами озер Большого Соловецкого острова. Эти изменения связаны как с природными факторами, так и с возможным антропогенным воздействием, более выраженным в 2020 г. [14].

Целью данной работы являлось исследование воды Питьевого канала по химическим и микробиологическим показателям для выявления влияния природных и антропогенных факторов на качество воды.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Естественное течение воды в Питьевом канале обусловлено ярусностью расположения озер Питьевое и Святое, т. е. значительной разностью высот. Вода в него поступает через шлюз-водорегулятор из оз. Питьевого. При сопоставлении фотографий в период с 2005 по 2012 г. можно отметить наличие изменений в работе шлюза: при отсутствии регулирования он не мог пропустить весь объем поступающей воды. Вода из озера шла двумя потоками – через шлюз и сбоку, объединяясь далее в единый поток. В период проведения исследований (июль и октябрь 2020 г.) часть искусственного русла канала была затоплена водами оз. Питьевое. Это связано с разрушением регулирующих



Рис. 1. Исток Питьевого канала, осень 2020 г.
Fig. 1. Source of the Pityevoy Canal, autumn 2020

устройств в Западной озерно-канальной системе (оз. Красное – оз. Валдай – оз. Щучье – оз. Круглое – оз. Орлово – оз. Средний Перт – оз. Питьевое), заиливанием русла соединяющих их каналов, приводящим к значительным колебаниям уровня воды в системе, что особенно заметно в период снеготаяния и интенсивного выпадения осадков. На снимке (рис. 1), выполненном с квадрокоптера (фото С. Яковлева), видны очертания канала под водой, что подтверждает произошедшие изменения.

По берегам Питьевого канала расположены объекты, которые могут оказывать воздействие на свойства воды. В нескольких метрах от будки шлюза около оз. Питьевое над каналом по деревянному мосту проходит дорога к лодочной станции на оз. Средний Перт. Ниже по течению канала с его левого берега переброшена труба с водами другого водотока, далее Питьевой канал проходит по болотистой местности. Воды из болота стекают в канал у его левого берега в виде ручейков.



Рис. 2. Расположение станций отбора проб воды в 2020 г.: Т3/Т28 – акватория оз. Питьевое; Т4/Т24 – исток канала; Т25 – у моста через канал; Т29 – рядом с устьем впадающего в канал ручья; Т30 – в пределах заболоченной территории; Т20/Т23 – середина канала, водозабор пос. Соловецкий; Т31 – около взлетно-посадочной полосы аэропорта Соловки; Т14/Т26 – устье Питьевого канала; Т32 – оз. Банное

Fig. 2. Location of water sampling sites in 2020. T3/T28 is the Lake Pityevoe water area; T4/T24 is the canal source; T25 is near the bridge across the canal; T29 is near the inflowing brook mouth; T30 is within the wetland territory; T20/T23 is the center of the canal, water intake for Solovetskiy community; T31 is near the Solovki Airport runway; T14/T26 is the Pityevoy Canal mouth; T32 is the Lake Bannoye

В среднем течении Питьевого канала осуществляется забор воды для нужд поселка и монастыря. В 300 м ниже водозабора проход по Питьевому каналу ограничен возведенным осенью 2020 г. забором взлетно-посадочной полосы аэродрома пос. Соловецкий, вдоль которой канал протекает около 100 м и далее течет рядом с частными жилыми домами. В 10–15 м от оз. Святое его пересекает интенсивно используемая грунтовая дорога. Оканчивается Питьевой канал в месте впадения в оз. Святое (устье).

Образцы проб поверхностного слоя воды отобраны горизонтальным поликарбонатным батометром на 2 л или непосредственно в пластиковую емкость в конце июля – начале августа и октябре 2020 г. на станциях (рис. 2 и табл. 1). Всего задействовано 4 станции отбора в июле, 9 станций – в октябре. Расположенные близко или идентичные станции отбора в разные сезоны 2020 г. отмечены на схеме в виде дроби: слева от черты – летний отбор, справа – осенний. Канал длиной около 2,5 км, ширина его в период исследования изменялась на разных участках – от 2 до 5 м, глубина – от 0,5 до 0,8 м. Морфометрия, показатели стока Питьевого канала не были определены в ходе данного исследования.

Таблица 1. Станции отбора проб
Table 1. Sampling stations

Шифр	Координаты	Расположение станции
Июль – август		
T3	N 65°02.487’ E 035°41.535’	Заливчик оз. Питьевое у истока Питьевого канала
T4	N 65°02.488’ E 035°41.440’	Начало Питьевого канала
T14	N 65°01.631’ E 035°43.152’	Устье Питьевого канала до впадения в оз. Святое
T20	N 65⁰02.048’ E 035⁰42.165’	Питьевой канал у водозабора
Октябрь		
T23	N 65°02.050’ E 035°42.166’	Питьевой канал у водозабора
T24	N 65°02.480’ E 035°41.535’	Заливчик оз. Питьевого у истока Питьевого канала
T25	N 65°02.481’ E 035°41.540’	Начало Питьевого канала после моста
T26	N 65°01.637’ E 035°43.150’	Оз. Святое, впадение Питьевого канала
T28	N 65°02.532’ E 035°41.625’	Залив оз. Питьевое у бетонированной площадки
T29	N 65°02.417’ E 035°41.758’	Питьевой канал, впадение ручья с левого берега
T30	N 65°02.138’ E 035°42.066’	Питьевой канал у болота на левом берегу
T31	N 65°02.030’ E 035°42.417’	Питьевой канал рядом с взлетно-посадочной полосой
T32	N 65°01.794’ E 035°42.197’	Оз. Банное, вытекающий из него ручей
–	N 65°01.402’ E 035°42.504’	Канал Вешняк, вытекающий из оз. Святое

В случае необходимости применялась консервация образцов, которые доставлялись в стационарную лабораторию в г. Архангельске с соблюдением сроков и способов хранения. Измерения и анализ образцов проводились по апробированным и общепринятым методикам. На месте отбора проб проводили измерения быстро изменяющихся гидрохимических показателей с помощью pH-метра HI 83141 (Hanna), кондуктометра HI 8733 (Hanna) – pH, электропроводность; в экспедиционной лаборатории – цветности, формы растворенного железа, сероводорода (спектрофотометр Unico 1201), уровень щелочности (pH-метр HI 83141). Анализ на содержание биогенных элементов, главных ионов, нефтепродуктов, органического вещества (фотометр «Эксперт-03», жидкостной хроматограф LC-20 Prominence, флюорат-02-2M, TOC-Lcsn) и микробиологических показателей[3] проб воды осуществлялся в стационарных лабораториях по общепринятым методикам с применением консервации и соблюдением сроков и способов хранения.

В рамках исследования определено содержание главных ионов методом ионной хроматографии, гидрокарбоната – объемным титрованием, биогенных элементов – фотометрическим методом, органического углерода – элементным анализом, нефтепродуктов – флуориметрическим методом. Диапазон измерений массовой концентрации нефтепродуктов – от 0,005 до 50 мг/дм^3. Измерение температуры воды в периоды исследования не проводилось, температура воздуха в июле и октябре на Соловецком архипелаге заметно различалась: средняя в июле составляла +12…+16 °C, в октябре – +5…+6 °C с ночными температурами ближе к нулю[4].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно полученным данным (табл. 2), воды Питьевого канала по минерализации (от 22,77 до 40,01 мг/л) отнесены к категории «ультрапресные» (< 100 мг/л). Невысокие значения этого показателя также отмечены в оз. Питьевое – от 33 до 37 мг/л, оз. Святое – 36 мг/л, оз. Банное – 47 мг/л. Воды озер и канала относятся к хлоридно-карбонатному или карбонатно-хлоридному типу натриевой группы.

Жесткость воды в Питьевом канале изменялась от 0,22 до 0,38 мг-экв/л. По этому показателю вода относится к категории «очень мягкая» (< 1,5 мг-экв/л). Воду Питьевого канала по величине pH (от 4,14 до 6,86) можно характеризовать как кислую и слабокислую, наибольшая кислотность отмечена на выходе из болота (Т30). Наибольшие изменения, обусловленные естественными причинами, выявлены для содержания органических веществ от истока до устья Питьевого канала. Цветность воды изменялась от 43 до

3 МУК 4.2.1884–2004. Санитарно-микробиологический и санитарно-паразитологический анализ воды поверхностных водных объектов. 2004. 62 с.

4 Интернет-ресурс: https://world-weather.ru/pogoda/russia/solovki/ (дата обращения: 02.03.2026).

410 градусов цветности. Содержание органического вещества ($C_{орг}$) – от 9,33 до 75 мг/л. Наибольшие значения показателей зафиксированы в точке Т30, где в Питьевой канал впадают болотные воды. Большое количество $C_{орг}$ (и, в частности, веществ гумусовой природы) приводит к снижению pH на 2 единицы и увеличению цветности воды почти в 10 раз. Выявлена значимая корреляция (r = 0,99) между цветностью и содержанием органического вещества, что может служить свидетельством значительного вклада именно гуминовых веществ в уровень содержания органического вещества. Согласно СанПиН[5], по цветности (норматив 30 градусов) и органическому веществу (норматив < 3–5 мг/л) воды Питьевого канала не соответствует требованиям к водам питьевого назначения.

Отметим, что для вод озер Банное и Святое, которые являются замыкающими для Питьевого канала, обнаружено явно выраженное увеличение ряда ионов: сульфатов, кальция и калия. В целом в оз. Банное среди всех водных объектов данного исследования выявлены наибольшие количества этих ионов и самое высокое значение жесткости воды. Показатели воды канала Вешняк, практически единственного функционирующего водотока из оз. Святое, как и следовало ожидать, определяются особенностями водосбора этого озера и имеют малое сходство с водами Питьевого канала, втекающего в озеро.

В осенний период в результате осадков повышается поступление гуминовых веществ, железа, биогенных элементов, главных ионов и других соединений с берегов. Наблюдается увеличение количества поступающего взвешенного вещества с территории взлетно-посадочной полосы. Из глинистых частиц при попадании в воду канала выщелачиваются растворимые компоненты, что отражается на увеличении сульфатов, кальция и калия в воде Питьевого канала (сумма ионов без учета гидрокарбонатов в октябре больше, чем в июле), а также озер Святое и Банное. Немного увеличивается жесткость воды. Незначительно снижается pH воды в Питьевом канале и увеличивается ее цветность (например, у водозабора – на 20 градусов). Различие в количестве поступающего органического вещества влияет и на содержание форм азота (увеличивается почти в два раза количество аммония как продукта деструкции органического вещества). При этом в осенний период по сравнению с летним отмечено увеличение соединений фосфора, которые в основном поступают с водосбора в минеральной форме (фосфаты), а также кремния. Но наблюдается снижение в воде гидрокарбонатов, что связано со снижением микробиологической жизнедеятельности в более холодный период. Содержание нефтепродуктов в воде на всем протяжении Питьевого канала не превышало 0,02 мг/л (табл. 2) и обусловлено прежде всего наличием органических соединений природного происхождения.

5 СанПиН 2.1.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. М, 2021. 988 с.

Таблица 2. Гидрохимические показатели воды системы Питьевого канала
Table 2. Hydrochemical indicators of the Pityevoy Canal system

Показатель	оз. Питьевое (Т3/Т28)	Исток (Т4/ Т24)	У моста (Т25)	У ручья (Т29)	У болота (Т30)	Середина, водозабор (Т20/Т23)	У забора полосы (Т31)	Устье (Т14, Т26)	Из оз. Банное (Т32)	У канала Вешняк из оз. Святое
pH	6,15/6,08	6,22/5,89	– /5,96	–/5,89	–/4,14	6,86/6,28	–/5,67	6,16/5,67	–/5,98	6,87/–
HCO_3^-, мг/л	15,13/14,03	13,24/4,88	– /9,15	–/11,59	–/1,22	16,59/7,32	–/10,98	16,35/13,42	–/21,35	24,9/-
Cl^-, мг/л	8,27/7,89	7,27/7,86	–/7,91	–/7,66	–/7,22	8,18/8,34	–/7,96	8,08/8,03	–/8,76	7,82/–
SO_4^{2-}, мг/л	3,64/3,52	3,22/3,47	–/3,44	–/3,61	–/3,27	3,81/3,61	–/3,43	3,88/5,21	–/16,46	6,04/–
Na^+, мг/л	5,75/5,83	5,98/5,83	–/5,77	–/5,84	–/5,91	6,09/6,12	–/5,84	6,31/5,97	–/7,06	6,09/–
Ca^{2+}, мг/л	1,90/2,61	2,12/2,76	–/2,71	–/2,67	–/2,81	2,71/4,00	–/2,38	2,59/4,66	–/8,96	4,34/–
Mg^{2+}, мг/л	1,50/1,57	1,41/1,63	–/1,6	–/1,68	–/1,86	1,67/2,35	–1,86	1,61/1,75	–/2,98	1,84/–
K^+, мг/л	0,58/0,52	0,50/0,48	–/0,53	–/0,50	–/0,48	0,48/0,87	–/0,53	0,57/0,97	–/2,64	0,95/–
Жесткость, мг-экв/л	0,22/0,26	0,22/0,27	–/0,27	–/0,27	–/0,30	0,28/0,40	–/0,25	0,26/0,38	–/0,69	0,37/–
Минерализация, мг/л	36,77/33,74	31,00/26,91	–/31,11	–/33,55	–/22,77	39,52/32,61	–/32,64	39,39/40,01	–/68,21	36,42/–
$N–NO_3^-$, мкг/л	108,9/93,85	102,1/94,92	–/99,52	–/96,50	–/82,10	108,8/145,7	–/147,6	135,0/64,90	–/123,0	147,6/–
$N–NH_4^+$, мкг/л	11,10/23,97	12,30/23,97	–/3,54	–/11,22	–/7,97	13,61/22,47	–/21,67	16,51/7,34	–/35,69	14,69/–
$N–NO_2^-$, мкг/л	0,20/0,01	0,52/0,01	–/0,02	–/0,01	–/2,81	0,31/0,46	–/0,67	0,62/3,01	–/3,76	1,40/–
$P–PO_4$, мкг/л	3,12/3,11	2,95/11,45	–/2,86	–/4,41	–/6,15	3,32/4,82	–/1,00	3,57/10,79	–/16,59	5,89/–
Si, мкг/л	982/1075	993/989	–/983	–/979	–/3569	942/1168	–/1214	909/1328	–/2230	718/–
$C_{орг}$, мг/л	9,94/9,72	9,45/11,36	–/14,00	–/9,54	–/75,94	11,00/14,33	–/13,25	10,52/16,14	–/15,48	13,35/–
Цветность, град. цветности	43/45	45/46	–/82	–/46	–/410	51/72	–/74	48/114	–/94	82/–
Нефтепродукты, мг/л	0,006/–	0,007/–	–	–	–	–/0,016	–	0,01/–	–	–
Cu, мкг/л	1,2	1,2	–	–	–	1,3	–	1,6	–	–
Ni, мкг/л	1,5	1,5	–	–	–	1,5	–	1,7	–	–
Mn, мкг/л	10	10	–	–	–	11	–	13	–	–

Примечание: лето/осень; «–» – отсутствие данных.

а *б*



Рис. 3. Станции отбора проб: *а* – оз. Святое (Т26); *б* – оз. Банное, (Т32)
Fig. 3. Photographs of sampling stations: *a* – Lake Svyatoe, (T26); *b* – Lake Bannoe, (T32)

Санитарно-микробиологическая оценка качества воды подразумевает определение совокупности санитарных показателей, отражающих соответствие или несоответствие санитарного состояния исследуемого водного объекта требованиям нормативных документов[3,6]. Методы косвенной идентификации предусматривают применение двух критериев, по которым можно косвенно судить о возможном присутствии возбудителя во внешней среде: общее микробное число (ОМЧ) и содержание санитарно-показательных микроорганизмов (СПМ) [15–17]. Показатели фекального загрязнения: БГКП (бактерии группы кишечной палочки), ОКБ (общие колиформные бактерии), ТКБ (термотолерантные колиформные бактерии); энтерококки; сульфитредуцирующие клостридии; бактерии группы протеев (*Proteus mirabilis*) [18]. Согласно МУК[3], в воде должны отсутствовать ОКБ и ТКБ, ОМЧ не должно превышать 50 КОЕ/мл.

По результатам проведенных анализов общее микробное число в июле в воде Питьевого канала изменялось в несколько раз: в истоке его значение составляло 25 КОЕ/мл, в середине – 56 КОЕ/мл, в устье – 118 КОЕ/мл. В октябре пробы были отобраны повторно, ОМЧ в воде Питьевого канала составило: исток – 3 КОЕ/мл, середина – 4 КОЕ/мл, устье – 14 КОЕ/мл. Общие колиформные бактерии в пробах воды были представлены в основном ТКБ. Если также

6 Guidelines for drinking-water quality. World Health Organization incorporating first addendum. Vol. 1. Recommendations. 2006. 595 p.

рассматривать изменение этого показателя в воде Питьевого канала летом, то в истоке его значение составляло 0 КОЕ/100 мл, в середине – 9,1 КОЕ/100 мл, в устье – 23 КОЕ/100 мл. В октябре установлено количество ТКБ в истоке 3,6 КОЕ/100 мл, в середине канала – 3,6 КОЕ/100 мл, в устье – 93 КОЕ/100 мл. Температурный фактор, влияющий на жизнедеятельность этой группы бактерий, не так явно проявился, но наблюдалось увеличение загрязнения воды канала в устье. Ни в одной из отобранных в летний период проб воды не было обнаружено колифагов.

Удельный комбинаторный индекс загрязненности воды (УКИЗВ) – относительный комплексный показатель степени загрязненности поверхностных вод, который условно оценивает в виде безразмерного числа долю загрязняющего эффекта, вносимого в общую степень загрязненности воды, обусловленную одновременным присутствием ряда загрязняющих веществ, в среднем одним из учтенных при расчете комбинаторного индекса ингредиентов и показателей качества воды. К обязательным показателям для расчета комплексных оценок относят: растворенный в воде кислород (содержание кислорода не определялось, но оно не являлось лимитирующим показателем загрязнения для неглубокого быстротекущего водотока), $БПК_5$ (не определялось, но основу органического вещества воды Питьевого канала и озер составляли трудноразлагаемые вещества гумусовой природы), ХПК (оценивалось по содержанию органического углерода $С_{орг}$), фенолы, нефтепродукты, нитрит-ионы, нитрат-ионы, аммоний-ион, железо общее (цветность), медь, цинк, никель, марганец, хлориды, сульфаты. Количество учитываемых показателей регламентируется целями оценки с учетом программы наблюдений, а также наличием данных о химическом составе поверхностных вод. Для сравнения использовались показатели из СанПиН[5].

Превышение нормативов в воде Питьевого канала отмечено по содержанию органического вещества и цветности (как суммарного показателя $С_{орг}$ и Fe). При большой разнице превышения ПДК в сезонном аспекте по этим показателям использовали наибольшую кратность (в основном для осеннего периода). Согласно классификации качества воды водотоков по значению удельного комбинаторного индекса загрязненности воды[7,5], вода Питьевого канала относится к 1-му классу и характеризуется как «условно чистая».

Рассчитан также ПАН[6] (pH, минерализация, содержание углерода, нитратов, аммония, фосфатов) – базовый показатель антропогенной нагрузки[8]. Значение ПАН[6] воды Питьевого канала составило: водозабор (Т20, Т23) 4,4; устье (Т14, Т26) – 9,7. Согласно шкале (табл. 4), по показателю ПАН[6] вода Питьевого канала отнесена к классу качества II – «чистая вода».

7 РД 52.24.643-2022. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям. Ростов-на-Дону. 2002. 24 с.

8 ГОСТ Р 58556-2019. Оценка качества воды водных объектов с экологических позиций. М., 2019. 16 с.

Таблица 4. Шкала значений для базового показателя антропогенной нагрузки природной воды по классам качества[6]

Table 4. Scale of values for the basic indicator of anthropogenic load on natural water by quality classes

Оценочный показатель	Класс качества воды водных объектов с экологических позиций				
	I	II	III	IV	V
	очень чистая	чистая	умеренно загрязненная	загрязненная	грязная
Антропогенная нагрузка по базовым показателям (ПАН[6]), усл. $м^3/м^3$	< 4,2	4,2 ÷ 10,8	10,9 ÷ 24,0	24,1 ÷ 70,0	70,1 ÷ 135,0

Таким образом, при анализе результатов исследования установлено, что вода Питьевого канала в истоке и среднем течении имеет тот же ионный состав и, следовательно, жесткость, что и в озере. Поступление смывов с водосборных площадей в осенний период приводит к увеличению практически всех определяемых компонентов в воде Питьевого канала (особенно сульфатов и кальция), выявлено только уменьшение количества гидрокарбонатов, что связано со снижением микробиологической жизнедеятельности в более холодный период года по сравнению с летним. Снижение температуры осенью отразилось и на изменении общего микробного числа, когда этот показатель не превышает установленного норматива.

ВЫВОДЫ

Проведенные гидрологические исследования Питьевого канала на Большом Соловецком острове (основном источнике водоснабжения пос. Соловецкий) показали, что от его истока к устью наблюдалось изменение химических и микробных показателей, вызванное как естественными условиями функционирования, так и антропогенным воздействием. Колебания содержания органического углерода и цветности от истока Питьевого канала к его устью вызваны прежде всего естественными условиями. Изменение соотношения главных ионов в устье Питьевого канала и микробиологических показателей обусловлено антропогенным воздействием. При этом по индексу загрязненности воды и базовому показателю антропогенной нагрузки воды канала были отнесены к классу «чистые».

Загрязнение устьевой области канала по сравнению с остальными участками наиболее явно отражает группа термотолерантных колиформных бактерий, численность которых увеличивается от 20 до 30 раз по сравнению с истоком канала. Обнаружение этих бактерий в истоке и среднем течении Питьевого канала свидетельствует о некотором несоответствии качества воды установленным критериям.

По основным гидрохимическим показателям вода Питьевого канала от истока до его середины не соответствует нормативам только по цветности, следовательно, по содержанию органического вещества и, вероятно, железа. В нижнем течении канала вода по обобщенным индексам хотя и относится к категории «чистая», но близка по показателям к «умеренно или слабо загрязненной». Обусловлено это естественными причинами, в частности заболоченностью водосбора. Нельзя исключить и влияние общего состояния Питьевого канала (разрушение берегов и т. д.), которое требует проведения определенных восстановительных мероприятий.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTERESTS

The author declare no relevant conflict of interests.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голдовская-Перистая Л. Ф., Перистый В. А., Шапошников А. А. Гигиеническая оценка качества питьевой воды централизованной системы водоснабжения Белгородской области по некоторым химическим показателям // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Сер.: Естественные науки. 2008. № 3 (43). С. 140–146.
2. Nagaraju A., Thejaswi A., Sreedhar Y. Assessment of Groundwater Quality of Udayagiri area, Nellore District, Andhra Pradesh, South India Using Multivariate Statistical Techniques // Earth Journal of Scientific Research. 2016. Vol. 20. No. 4. P. 1–11.
3. Akhtar N., Syakir Ishak M. I., Bhawani S. A., Umar K. Various natural and anthropogenic factors responsible for water quality degradation: a review // Water. 2021. Vol. 13. P. 26–60. https://doi.org/10.3390/w13192660
4. Macdonald A. M., Davies J., Dochartaigh B. E. O. Simple methods for assessing groundwater resources in low permeability areas of Africa. British Geological Survey Commissioned Report, CR/01/168N. South Africa. British Geological Survey. 2002. 71 p.
5. Khatri N., Tyagi S. Influences of natural and anthropogenic factors on surface and groundwater quality in rural and urban areas // Frontiers in Life Science. 2014. No. 8. P. 23–39.
6. Manjunatha S., Bobade K., Kudale M. Pre-cooling technique for a thermal discharge from the coastal thermal power plant // Procedia Engineering. 2015. No. 116. P. 358–365.
7. Алексеевский Н. И., Заславская М. Б., Гончаров А. В. Методические подходы к изучению и параметризации качества воды // Вестник Московского Университета. Сер. 5. География. 2016. № 2. С. 13–21.
8. Грицевская Г. Л., Кябелева Г. К., Николаева Л. А., Семенов В. Н. Гидрология и гидрохимия Соловецких озер // Соловецкие острова. Материалы по комплексному изучению озер. Труды СевНИОРХ. Т. 6. Петрозаводск: Изд-во Карелия, 1972. С. 5–44.
9. Захаров Ю. С. Озерно-канальные системы на островах Соловецкого архипелага // Соловецкий сборник. Вып. 9. Соловецкий гос. историко-архитектурный и природный музей-заповедник. Архангельск, 2013. С. 94–135.
10. Природная среда Соловецкого архипелага в условиях меняющегося климата / под ред. Ю. Г. Шварцмана, И. Н. Болотова, Екатеринбург: УрО РАН, 2007. 184 с.

11. Титова К. В., Жибарева Т. А., Морева О. Ю., Собко Е. И., Слобода А. А., Попов С. С., Прилуцкая Н. С. Гидрохимические и гидробиологические исследования озер Большого Соловецкого острова // Успехи современного естествознания. 2020. № 11. С. 125–131.
12. Захваткин А. А., Сахаров Н., Юрканский В. Материалы Соловецкого общества краеведения. К познанию природы Соловецких островов. Соловки: Бюро печати УСЛОН, 1928. 56 с.
13. Захваткин А. А. Соловецкие озера: краткий гидробиологический очерк. Соловки: Бюро печати УСЛОН, 1927. 142 с.
14. Titova K. V., Zhibareva T. A., Sloboda A. A., Popov S. S., Kokryatskaya N. M., Eliseeva I. S. Formation of the ionic composition of water: case study of small Lake on Bolshoi Solovetsky Island // Water resources. 2023. Vol. 50. No. 3. P. S366–S370. https://doi.org/10.1134/S0097807823700628
15. Liu G., Verbeek J., Van Dijk J. Bacteriology of drinking water distribution systems: an integral and multidimensional review // Applied Microbiology and Biotechnology. 2013. Vol. 97. P. 9265–9276. https://doi.org/10.1007/s00253-013-5217-y
16. Тымчук С. Н., Ларин В. Е., Соколов Д. М. Наиболее значимые санитарно-микробиологические показатели оценки качества питьевой воды // Водоснабжение и санитарная техника. 2013. № 11. С. 8–14.
17. Daley K. Chemical and microbial characteristics of municipal drinking water supply systems in the Canadian Arctic // Environmental Science and Pollution Research, 2018. Vol. 25. No. 33. P. 32926–32937.
18. Сопрунова О. Б. Санитарная микробиология. АГТУ. Астрахань, 2007. 204 с.

REFERENCES

1. Goldovskaya-Peristaya L. F., Peristy V. A., Shaposhnikov A. A. Hygienic assessment of the quality of drinking water of the centralized water supply system of the Belgorod region based on some chemical indicators. *Scientific Bulletin of Belgorod State University. Series: Natural Sciences*. 2008. No. 3 (43). P. 140–146.
2. Nagaraju A., Thejaswi A., Sreedhar Y. Assessment of Groundwater Quality of Udayagiri area, Nellore District, Andhra Pradesh, South India Using Multivariate Statistical Techniques. *Earth Journal of Scientific Research*. 2016. Vol. 20. No. 4. P. 1–11.
3. Akhtar N., Syakir Ishak M.I., Bhawani S.A., Umar K. Various natural and anthropogenic factorsresponsible for water quality degradation: a review. *Water*. 2021. Vol. 13. P. 26–60. https://doi.org/10.3390/w13192660
4. Macdonald A. M., Davies J., Dochartaigh B. E. O. Simple methods for assessing groundwater resources in low permeability areas of Africa. British Geological Survey Commissioned Report, CR/01/168N. South Africa. British Geological Survey. 2002. 71 p.
5. Khatri N., Tyagi S. Influences of natural and anthropogenic factors on surface and groundwater quality in rural and urban areas. *Frontiers in Life Science*. 2014. No. 8. P. 23–39.
6. Manjunatha S., Bobade K., Kudale M. Pre-cooling technique for a thermal discharge from the coastal thermal power plant. *Procedia Engineering*. 2015. No. 116. P. 358–365.
7. Alekseevsky N. I., Zaslavskaya M. B., Goncharov A. V. Methodological approaches to the study and parameterization of water quality. *Bulletin of Moscow University. Series 5. Geography*. 2016. No. 2. P. 13–21.
8. Gritsevskaya G. L., Kyabeleva G. K., Nikolaeva L. A., Semenov V. N. Hydrology and hydrochemistry of the Solovetsky lakes. *Solovetsky Islands. Materials on the comprehensive study of lakes. Proceedings of Northern Research Institute of Lake and River Fisheries*. Vol. 6. Petrozavodsk: Karelia Publishing House, 1972. P. 5–44.

9. Zakharov Yu. S. Lake-canal systems on the islands of the Solovetsky Archipelago. *Solovetsky collection. Issue 9.* Federal state budget cultural institution «Solovets, state hist.-arch. and natural museum-reserve». Arkhangelsk. 2013. P. 94–135.
10. Natural environment of the Solovetsky Archipelago in a changing climate / Edited by Yu. G. Shvartsman, I. N. Bolotov. Ekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2007. 184 p.
11. Titova K. V., Zhibareva T. A., Moreva O. Yu., Sobko E. I., Sloboda A. A., Popov S. S., Prilutskaya N. S. Hydrochemical and hydrobiological studies of the lakes of the Bolshoy Solovetsky Island. *Advances in Modern Natural Science*. 2020. No. 11. P. 125–131.
12. Zakhvatkin A. A., Sakharov N., Yurkansky V. Materials of the Solovetsky Society of Local History. Towards knowledge of the nature of the Solovetsky Islands. Solovki: Print Bureau USLON, 1928. 56 p.
13. Zakhvatkin A. A. Solovetsky Lakes: a brief hydrobiological essay. Solovki: Print Bureau USLON, 1927. 142 p.
14. Titova K. V., Zhibareva T. A., Sloboda A. A., Popov S. S., Kokryatskaya N. M., Eliseeva I. S. Formation of the ionic composition of water: case study of small Lake on Bolshoi Solovetsky Island. *Water resources.* 2023. Vol. 50. No. 3. P. S366–S370. https://doi.org/10.1134/S0097807823700628
15. Liu G., Verbeek J., Van Dijk J. Bacteriology of drinking water distribution systems: an integral and multidimensional review. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2013. Vol. 97. P. 9265–9276. https://doi.org/10.1007/s00253-013-5217-y
16. Tymchuk S. N., Larin V. E., Sokolov D. M. The most significant sanitary and microbiological indicators for assessing the quality of drinking water. *Water supply and sanitary equipment*. 2013. No. 11. P. 8–14.
17. Daley K. Chemical and microbial characteristics of municipal drinking water supply systems in the Canadian Arctic. *Environmental Science and Pollution Research*. 2018. Vol. 25. No. 33. P. 32926–32937. https://doi.org/10.1007/s11356-017-9423-5
18. Soprunova O. B. Sanitary microbiology: textbook / Astrakhan State Technical University. Astrakhan, 2007. 204 p.

Сведения об авторах:

Титова Ксения Владимировна, канд. геогр. наук, старший научный сотрудник, ФГБУН «Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. акад. Н. П. Лаверова УрО РАН», Россия, 163020, г. Архангельск, пр. Никольский, 20; http://orcid.org/0000-0001-7664-7706; e-mail: ksyu_sev@mail.ru

Кокрятская Наталья Михайловна, канд. геолого-минерал. наук, ведущий научный сотрудник, ФГБУН «Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. акад. Н. П. Лаверова УрО РАН», Россия, 163020, г. Архангельск, пр. Никольский, 20; http://orcid.org/0000-0002-0619-7241; e-mail: ksyu_sev@mail.ru

Жибарева Татьяна Александровна, младший научный сотрудник, ФГБУН «Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. акад. Н. П. Лаверова УрО РАН», Россия, 163020, г. Архангельск, пр. Никольский, 20; http://orcid.org/0000-0003-3642-3155; e-mail: ksyu_sev@mail.ru

Морева Ольга Юрьевна, научный сотрудник, ФГБУН «Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. акад. Н. П. Лаверова УрО РАН», Россия, 163020, г. Архангельск, пр. Никольский, 20; http://orcid.org/0000-0002-5114-8481; e-mail: ksyu_sev@mail.ru

About the authors:

Ksenia V. Titova, Candidate of Geographical Sciences, senior researcher, N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research, Ural Branch, Russian Academy of Sciences; Nikolsky prospect, 20, Arkhangelsk, 163020, Russia; http://orcid.org/0000-0001-7664-7706; e-mail: ksyu_sev@mail.ru

Natalia M. Kokryatskaya, Candidate of Geology and Mineralogy, leading researcher, N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research, Ural Branch, Russian Academy of Sciences; Nikolsky prospect, 20, Arkhangelsk, 163020, Russia; http://orcid.org/0000-0002-0619-7241; e-mail: ksyu_sev@mail.ru

Tatiana A. Zhibareva, junior researcher, N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research, Ural Branch, Russian Academy of Sciences; Nikolsky prospect, 20, Arkhangelsk, 163020, Russia; http://orcid.org/0000-0003-3642-3155; e-mail: ksyu_sev@mail.ru

Olga Yu. Moreva, researcher, N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research, Ural Branch, Russian Academy of Sciences; Nikolsky prospect, 20, Arkhangelsk, 163020, Russia; http://orcid.org/0000-0002-5114-8481; e-mail: ksyu_sev@mail.ru

Поступила в редакцию / Received 05.03.2026.
Поступила после рецензирования / Revised 14.04.2026.
Принята к публикации / Accepted 01.06.2026.

УДК 504.453 *https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-4-98-112*

Оригинальная статья/Original paper

Оценка вклада различных сил в начало движения донного грунта в речном потоке

М. В. Шмакова

m-shmakova@yandex.ru

Институт озероведения Российской академии наук – обособленное структурное подразделение ФГБУН «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук», Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Критическая скорость сдвига, характеризующая начало движения отдельных частиц донного грунта, является важным показателем устойчивости речного русла. Определенное соотношение гидравлических переменных состояния потока обусловливает начало качественного перехода из однофазного потока в двухфазный. **Методы.** По данным наблюдений на тридцати створах североамериканских рек для начальных условий движения донных наносов были рассчитаны критические скорости сдвига и дана оценка вклада подъемной силы потока в общий баланс сил, приводящих частицу донного грунта в движение. **Результаты.** Анализ вклада различных сил в инициацию движения отдельных частиц донного грунта на основании данных наблюдений на исследуемых створах показал, что с увеличением крупности донных частиц увеличивается вклад подъемной силы потока.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: гидравлика, речной поток, двухфазный массоперенос, критическая скорость сдвига, донный грунт, подъемная сила, наносы, сопротивление дна, североамериканские реки

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Работа выполнена в рамках государственного задания ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН по теме FFZF-2024-0002 «Современные угрозы водным объектам и инновационные методы их сохранения, восстановления и рационального использования».

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Шмакова М. В. Оценка вклада различных сил в начало движения донного грунта в речном потоке // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2026. № 4. С. 98–112. https://doi.org/10.35567/19994508-2026-4-98-112; EDN: UAYZRC

© Шмакова М. В., 2026

Assessment of the various forces contribution to commencing of bottom soil movement in river flow

Marina V. Shmakova

m-shmakova@yandex.ru

Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences – St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

ABSTRACT

Relevance. The shift critical speed is a significant indicator of a riverbed, as it characterizes commencing of movement of separate bottom soils particles. Certain relation of the flow state hydraulic variables causes beginning of the qualitative transfer from a single-phase flow to a two-phase flow. **Methods.** According to results of observations at thirty ranges of North American rivers, we have calculated critical shift speeds for initial conditions for the bottom sediments movement and have assessed the flow carrying capacity contribution to the general balance of forces that initiate movement of a bottom soil particle. **Results.** Analysis of the separate forces contribution to initiation of the bottom soil separate particles movement based on observation results from the ranges under study has demonstrated that the contribution of the flow carrying capacity is growing with increasing of bottom sediments particle dimensions.

KEYWORDS: hydraulics, river flow, two-phase mass transfer, shift critical speed, bottom soil, carrying capacity, sediments, bottom resistance, North American rivers

FINANCING: The work has been done within the framework of State Assignment of Institute of Limnology RAS – SPB FRC RAS according FFZF-2024-0002 “Contemporary hazards to water objects and innovative methods of the water objects’ preservation, restoration and rational use” theme.

FOR CITATION: Shmakova M. V. Assessment of the various forces contribution to commencing of bottom soil movement in river flow. Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management. 2026. No. 4. P. 98–112. https://doi.org/10.35567/19994508-2026-4-98-112; EDN: UAYZRC

ВВЕДЕНИЕ

Двухфазный массоперенос в речном потоке за счет неравномерности русла и нестационарности притока характеризуется пространственно-временной динамикой гидравлических переменных состояния. При этом пограничные состояния двухфазной системы можно определить такими качественными признаками, как начало осаждения транспортируемых наносов и начало транспорта донного грунта, а также начало сдвига отдельных частиц грунта на дне. Каждое из этих пограничных состояний инициировано определенной скоростью потока, называемой критической скоростью. Критические скоро-

сти обусловливают динамику качественного перехода двухфазного потока в поток, свободный от наносов, и наоборот. Помимо этого, критические скорости косвенно характеризуют степень устойчивости русла, деформируемого в результате размыва дна или осаждения наносов. Последнее определило актуальность изучения критических скоростей потока в таких вопросах инженерного использования рек и каналов, как заиление русла и размыв дна, зарастание малых каналов оросительных систем [1] и т. д. Эти величины являются количественными ориентирами для расчетов пропускной способности канала, его морфометрических характеристик (уклона дна, формы и размера поперечного сечения), укреплений откосов канала и его дна, а также регулирования расхода воды, поступающей в русло канала.

Расчетам критических скоростей потока посвящено большое количество исследований. При этом выделяют методы расчета отдельно для связанных и несвязанных грунтов, что объясняется различным характером сцепления частиц. В середине XVIII в. Брамс предложил следующее выражение для расчета критической скорости срыва для несвязанных грунтов [2]:

$$v_{\text{shear}} = k m'^{\frac{1}{6}}_{\text{part}}, \tag{1}$$

где k – коэффициент пропорциональности;

m'_{part} – вес частицы в воде, кг.

В конце XIX в. в исследованиях Л. Дю Буа и У. Эри показано, что критическая скорость сдвига пропорциональна корню квадратному из диаметра частицы или корню шестой степени из веса частицы [3, 4]. В начале XX в. А. Шильдс [5] выразил зависимость критической скорости сдвига от соотношения безразмерного напряжения сдвига θ (также называемого параметром Шильдса) и отношением между инерционными и вязкими силами окружающей среды, действующими на одну частицу (grain Reynolds number R’):

$$\theta = \frac{\tau}{gd\left(\rho_{\text{part}} - \rho_{\text{w}}\right)},$$

$$R' = d\frac{U'}{\nu},$$

$$U' = \sqrt{\frac{\tau}{\rho_{\text{w}}}}, \tag{2}$$

где τ – напряжение сдвига, кг·м²/с²;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

d – диаметр частиц, м;

ρ_{part} и ρ_w – плотность грунта и воды соответственно, кг/м³;
ν – кинематическая вязкость воды, м²/с.

Позднее В. Н. Гончаровым было показано, что в расчетах критической скорости сдвига придонная скорость может быть заменена средней скоростью потока [6]. В целом, как и многие формулы речной гидравлики, формулы критических скоростей потока разделяются на эмпирические и теоретические. Эмпирические формулы, полученные на основании результатов экспериментов на гидравлических лотках, не являются универсальными и часто для реальных водотоков показывают недостаточно хороший результат, тогда как физически обоснованные теоретические формулы хорошо описывают физику процесса и работают для различных гидравлических условий [7, 8].

Подъемная сила, возникающая из-за разницы давления на верхней и нижней поверхностях частицы, является одним из основных факторов, определяющих начало движения частиц донного грунта и их последующего перемещения в речном потоке. Значение подъемной силы определяется гидравлическими условиями потока, крупностью и формой частиц [9]. Первые исследования по изучению подъемной силы, действующей на донный грунт для потока, проведены Х. А. Эйнштейном и Э. А. Эль-Самни в 1949 г. [10], в результате чего было установлено, что для крупных элементов шероховатости подъемная сила является одним из основных факторов, определяющих устойчивость частицы. Так, при упрощенных расчетах без учета подъемной силы значения критической скорости сдвига занижаются. Несколько позже, в 1958 г., В. С. Чепилом [11] был оценен вклад подъемной силы в аэродинамической трубе. Эксперименты показали, что вклад подъемной силы составил около 80 % от силы лобового сопротивления, что подтвердило тот факт, что для крупных частиц подъемная сила сопоставима по величине с силой лобового сопротивления и является определяющей при расчете начала движения. В более позднем исследовании, на основании безразмерной критической формулы сдвига и данных экспериментов на лотках для разнородных фракций, в работе [12] было установлено существование минимума критической скорости потока в функции радиуса частиц модельной почвы, выраженного в нелинейной одномодальной зависимости указанных переменных состояния. При этом для детального анализа процессов сдвига и вывода формулы критической скорости сдвига в условиях реального речного потока также важно дать количественную оценку вклада отдельных сил, инициирующих начало движения частиц донного грунта, а также оценить зависимость подъемной силы от крупности сдвигаемых частиц.

Целью проведенного исследования является оценка вклада сил, действующих со стороны потока, в начало движения донного грунта в речном потоке на основании данных наблюдений за гидравлическими переменными состояния тридцати североамериканских водотоков.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Многие исследователи ставят критическую скорость сдвига v_{shear}, м/с, в зависимость от глубины потока h, м, крупности донных отложений d, м, гидравлической крупности (скорости осаждения частиц) ω, м/с, коэффициента кинематической вязкости воды v, м^2/с, и параметров трения на границе потока воды и донного грунта (например, коэффициент внутреннего трения f, б/р, сцепление частиц грунта при сдвиге c, кг/(м·с^2), и так далее). Так, в последних исследованиях с использованием современных приборов было показано, что пороговая скорость сдвига донных частиц прямо пропорциональна размеру частиц наносов и глубине воды [13]. Также в исследовании [14] экспериментально установлено, что нестационарность и неравномерность потока влияют на начало сдвига частиц донного грунта, что подтверждает теоретические выкладки И. Ф. Карасева [15]. Исследование влияния однородности крупности частиц донных отложений на порог их трогания показало, что с увеличением однородности устойчивость частиц увеличивается [16].

Рассмотрим несколько формул для расчета начальной скорости сдвига донных частиц. В основном эти формулы построены на условии устойчивости частиц на дне и дополнены уточняющими эмпирическими коэффициентами:

– формула Шамова [17]:

$$v_{shear} = 4{,}4 d^{1/3} h^{1/6}; \quad (3)$$

– формула Богарди [18]:

$$v_{shear} = 22{,}9 d^{4/9} \sqrt{(\gamma_{part} - \gamma_w)}; \quad (4)$$

– формула Мависа [19]:

$$v_{shear} = 0{,}5 d^{4/3} \sqrt{(\gamma_{part} - \gamma_w)}; \quad (5)$$

– формула Ша Юй-Цин [18]:

$$v_{shear} = 24{,}8 \frac{d^{5/8} h^{1/5}}{\omega^{1/4}}; \quad (6)$$

– формула Великанова [20]:

$$v_{shear} = \sqrt{g(15d + 0{,}006)}; \quad (7)$$

– формула Кнороза [21]:

$$v_{shear} = 1{,}3 \lg\left(\frac{14{,}7h}{d^{0{,}75}}\right)\sqrt{gd}; \quad (8)$$

– формула Гончарова [6]:

$$v_{shear} = \sqrt{\frac{2}{3{,}5}\left(\frac{\rho_{part}}{\rho_w} - 1\right) g d_{50}} \left(\lg 8{,}8 \frac{h}{d_{50}}\right), \quad (9)$$

где γ_{part} и γ_w – относительная плотность частицы и воды соответственно, б/р.

Рассмотрим баланс сил, действующих на покоящуюся на дне потока частицу, сдвигающую проекцию силы тяжести потока F_{flow}, подъемную силу потока F_{lift} и удерживающую проекцию силы тяжести, действующую на частицу F_{part}. При этом силу, действующую со стороны потока F_{flow}, будем рассматривать как силу отдельной струи потока с геометрическими масштабами, соответствующими размеру частицы за вычетом сопротивления грунта сдвигу:

$$\begin{aligned} &F_{flow} + F_{lift} = F_{part}, \\ &F_{flow} = F_{grav} - F_{resist}, \\ &F_{resist} = F_{grav} \cdot f + c \cdot S, \end{aligned} \tag{10}$$

где f – коэффициент внутреннего трения, б/р;

c – сцепление частиц грунта при сдвиге, кг/(м·с^2) (для несвязного грунта $c = 0$);

S – площадь приложения силы, м^2.

При равенстве сил в верхнем выражении системы (10) или при значении силы в правой части, превышающем сумму сил в левой части, частица будет неподвижна. Если баланс сил в системе (10) представить в виде отношения, условием неподвижности частицы будет непревышение этого отношения единицы:

$$\frac{F_{flow} + F_{lift}}{F_{part}} = 1. \tag{11}$$

В случае, если отношение (11) превышает единицу, т. е. сила, действующая на частицу со стороны потока, превышает силу, действующую со стороны частиц, имеет место сдвиг. Соответственно, если отношение (11) менее единицы, то частицы неподвижны.

Распишем силу F_{flow}, действующую со стороны потока, с учетом сопротивления донного грунта:

$$F_{flow} = m \cdot g \cdot I \cdot (1 - f) - c \cdot S = \rho_w \cdot v_{shear} \cdot b_{el} \cdot h_{el} \cdot g \cdot I \cdot \Delta t \cdot (1 - f) - c \cdot v_{shear} \cdot b_{el} \cdot \Delta t, \tag{12}$$

где b_{el} и h_{el} – ширина и высота элементарной струи, м;

m – масса элементарного объема воды, кг;

g – ускорение свободного падения, м/с^2;

I – уклон дна, б/р;

$v_{shear} \cdot \Delta t$ – расстояние, которое проходит струя за время Δt (Δt = 1 с).

Тогда выражение (12), записанное для частицы размера d, примет вид:

$$F_{flow} = \rho_w \cdot v_{shear} \cdot d^2 \cdot g \cdot I \cdot \Delta t \cdot (1 - f) - c \cdot v_{shear} \cdot d \cdot \Delta t, \tag{13}$$

где v_{shear} – критическая скорость сдвига, м/с;

d – диаметр частицы, м.

Удерживающая проекция силы тяжести частицы с учетом ее веса в воде записывается как:

$$F_{part} = \frac{\rho_{part} - \rho_w}{\rho_{part}} m_{part} \cdot g = \frac{1}{6} \cdot \frac{\rho_{part} - \rho_w}{\rho_{part}} \cdot \rho_{part} \cdot g \cdot \pi \cdot d^3 = \frac{1}{6} \cdot \left(\rho_{part} - \rho_w\right) \cdot g \cdot \pi \cdot d^3, \quad (14)$$

где m_{part} – масса частицы, кг;

ρ_{part} и ρ_w – плотности грунта и воды соответственно, кг/м^3.

Подъемная сила записывается как [20, 21]:

$$F_{lift} = k_{lift} \cdot \frac{\rho_w \cdot v_{shear}^2}{2} \frac{\pi d^2}{4}, \quad (15)$$

где k_{lift} – коэффициент подъемного усилия, б/р.

Тогда отношение (11) с учетом выражений (13) – (15), полагая $\Delta t = 1$ с, примет вид:

$$\frac{F_{flow} + F_{lift}}{F_{part}} = 6 \cdot \frac{\rho_w \cdot v_{shear} \cdot d^2 \cdot g \cdot I \cdot \left(1 - f\right) - c \cdot v_{shear} \cdot d + \frac{1}{8} k_{lift} \cdot \pi d^2 \cdot \rho_w \cdot v_{shear}^2}{\left(\rho_{part} - \rho_w\right) \cdot g \cdot \pi \cdot d^3}. \quad (16)$$

Или, после некоторых сокращений, критерий сдвига донного грунта крупностью d для условий несвязного грунта ($c = 0$) примет вид:

$$\frac{6 \cdot \rho_w \cdot v_{shear} \cdot g \cdot I \cdot \left(1 - f\right) + \frac{3}{4} k_{lift} \cdot \pi \cdot \rho_w \cdot v_{shear}^2}{\left(\rho_{part} - \rho_w\right) \cdot g \cdot \pi \cdot d} \geq 1. \quad (17)$$

Объекты моделирования

В качестве объектов моделирования определены тридцать североамериканских рек, данные наблюдений о которых опубликованы в отчете [24]. Реки расположены в различных физико-географических зонах и имеют широкий диапазон уклонов, площадей водосбора и, соответственно, водности. Также исследуемые реки характеризуются неоднородным гранулометрическим составом донных отложений и наносов.

В оценке вклада отдельных сил, действующих на неподвижную частицу донного грунта, использовались данные более семисот наблюдений за гидравлическими переменными состояния на этих водотоках. В табл. 1 приведен список расчетных створов и средние значения гидравлических переменных состояния потока для периода с минимальным расходом влекомых наносов $G_{bedload}$, кг/с.

Таблица 1. Средние значения гидравлических переменных состояния потока исследуемых створов

Table 1. The average values of the studied sites flow state hydraulic variables

	River sites	*I*, б/р	*d*, м	*Q*, м³/с	*v*, м/с	$G_{bedload}$, кг/с
1	Susitna River near Talkeetna, Alaska	0.0013	0.0005	282	1.4	0.37
2	Talkeetna River near Talkeetna, Alaska	0.00049	0.0005	90.1	1.0	1.34
3	Chulitua River below Canyon near Talkeetna, Alaska	0.00044	0.0005	253	1.4	37.1
4	Tanana River at Fairbanks, Alaska	0.00044	0.00012	402	1.3	4.18
5	Snake River near Anatone, Wash,	0.00059	0.00025	1117	1.8	0.79
6	Toutle River at Tower Road near Silver Lake, Wash.	0.0013	0.00025	15.42	1.0	2.65
7	Clearwater River at Spalding, Idaho	9.8E-05	0.00025	419	0.9	0.38
8	North Fork of Lick Creek near Yellow Pine, Idaho	0.00571	0.00002	0.235	0.2	5.9E-05
9	Muddy Creek near Pinedale, Wyo.	0.00731	0.00006	0.267	0.3	0.00765
10	East Fork River near Pinedale, Wyo.	0.0007	0.00025	3.64	0.6	0.578
11	Yampa River at Deerlodge Park, Colo.	0.00087	0.00025	37.875	0.6	4.31
12	South Fork of South Platte River above Verniillion Creek, Colo.	0.0004	0.00025	8.32	0.6	0.18063
13	Middle Fork of Boulder Creek at Nederland, Colo.	0.0163	0.0005	3.34	0.8	0.01498
14	Jefferson Creek near Jefferson, Colo.	0.016	0.0005	0.358	0.5	0.00331
15	Craig Creek near Bailey, Colo.	0.025	0.00025	0.273	0.2	0.00354
16	Geneva Creek near Grant, Colo.	0.01	0.00025	0.93	0.6	0.00631
17	Pony Creek near Antero Reservoir, Colo.	0.005	0.00012	0.0258	0.3	0.00053
18	North Fork of South Platte River at Shawnee, Colo.	0.0068	0.0005	3.87	0.8	0.0899
19	North Fork of South Platte River at Crossons, Colo.	0.0047	0.0005	6.3	0.7	0.0574
20	North Fork of South Platte River at Buffalo, Colo.	0.0107	0.0005	6.11	0.8	0.03595
21	Fourmile Creek near Fairplay, Colo.	0.016	0.00025	0.765	0.8	0.00459
22	South Fork of South Platte River at Trumbull, Colo.	0.0035	0.0005	14.65	0.9	0.0378
23	Buffalo Creek at Buffalo, Colo.	0.0009	0.00025	0.62	0.5	0.05792
24	Horse Creek near Westcreek, Colo.	0.0039	0.0005	1.24	0.6	0.01905
25	Blue River below Green Mountan Reservoir, Colo.	0.0026	0.00025	21.5	0.9	0.0291
26	Wisconsin River at Muscoda, Wis.	0.00028	0.00025	116	0.5	3.39
27	Black River near Galesville, Wis.	0.00017	0.00025	28.5	0.5	0.971
28	Chippewa River near Caryville, Wis.	0.00025	0.00025	278	0.7	1.29
29	Chippewa River at Durand, Wis.	0.00029	0.00025	119	0.6	5.50
30	Chippewa River near Pepin, Wis.	0.00029	0.00025	72.3	0.5	4.03

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Оценка вклада отдельных сил, действующих на покоящуюся на дне частицу в речном потоке, проводилась по формулам (13) и (15). Для расчетов одного из аргументов в этих формулах – критической скорости сдвига – были проанализированы несколько формул скорости начала движения (3) – (9). Результаты расчетов по этим формулам сопоставлены с наблюденными скоростями потока, которым соответствует минимальный среди наблюденных расход влекомых наносов. Удовлетворительным полагался результат, при котором рассчитанная скорость сдвига не превышала наблюденную скорость потока. В среднем по всем расчетным створам лучший результат показали формулы Богарди (4) и Ша Юй-Цина (6).

Полученные по формуле Богарди (4) значения критической скорости сдвига легли в основу расчетов по соотношению (15) для калибровки коэффициента подъемного усилия отдельно для каждого створа. Результаты калибровки коэффициента K_{lift} представлены на рис. 1. Как следует из рис. 1, коэффициент K_{lift}, осредненный для створов с одинаковой крупностью донных отложений, прямо пропорционален крупности влекомых наносов обеспеченностью 95 % d_{min}, мм.

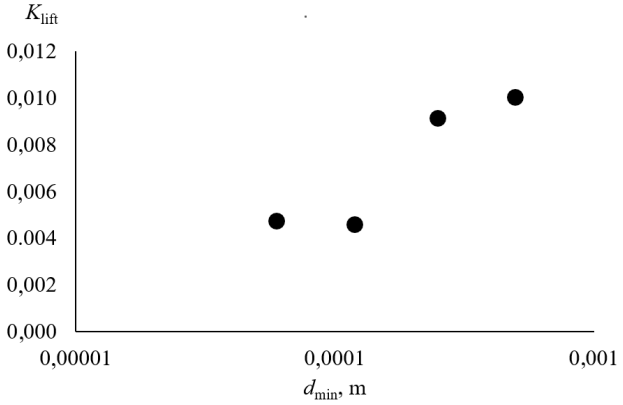


Рис. 1. Зависимость коэффициента K_{lift} от крупности влекомых наносов d_{min}
Fig. 1. Dependence of the K_{lift} coefficient on the minimum size of the bedload sediments d_{min}

Для расчета давления потока на покоящуюся частицу в формуле (13) для каждого водотока был откалиброван коэффициент внутреннего трения f для меженного периода, характеризующегося началом движения донного грунта. Для калибровки коэффициента внутреннего трения f использована формула общего расхода наносов G_{tot} [25]:

$$G_{\text{tot}} = \frac{\rho_{\text{part}}}{\left(\rho_{\text{part}} - \rho_{\text{w}}\right)} \cdot Q\left(\frac{c}{gh} - \rho_{\text{w}} \cdot I \cdot \left(1 - f\right)\right). \qquad (18)$$

Для исследуемых водотоков с общим расходом наносов в диапазоне от $35 \cdot 10^{-5}$ до 232 кг/с среднее относительное отклонение между рассчитанными $G_{\text{tot calc}}$ и наблюденными $G_{\text{tot obs}}$ расходами наносов составило 82 % (рис. 2).

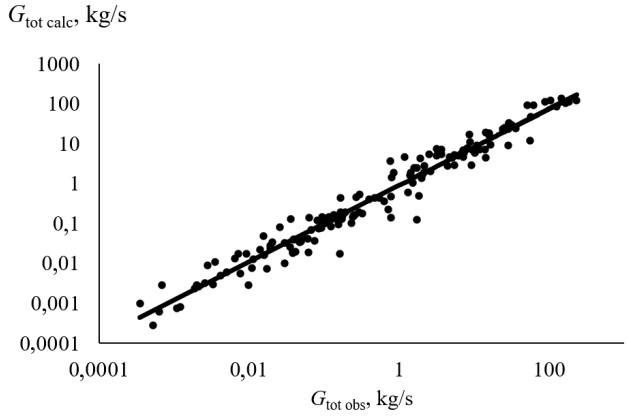


Рис. 2. Зависимость наблюденных $G_{\text{tot obs}}$ и рассчитанных $G_{\text{tot calc}}$ расходов наносов, кг/с
Fig. 2. Dependence of observed $G_{\text{tot obs}}$ and calculated $G_{\text{tot calc}}$ sediment discharges, kg/s

Вклад сдвигающей проекции силы тяжести σ, % в сумму сил, приводящих частицу донного грунта в движение, рассчитывается как отношение:

$$\sigma = 100\% \frac{F_{\text{flow}}}{F_{\text{flow}} + F_{\text{lift}}}. \quad (19)$$

На рис. 3 показана полученная обратная зависимость вклада сдвигающей проекции силы тяжести от крупности частиц донного грунта исследуемых водотоков. Значение σ было осреднено для частиц одной крупности.

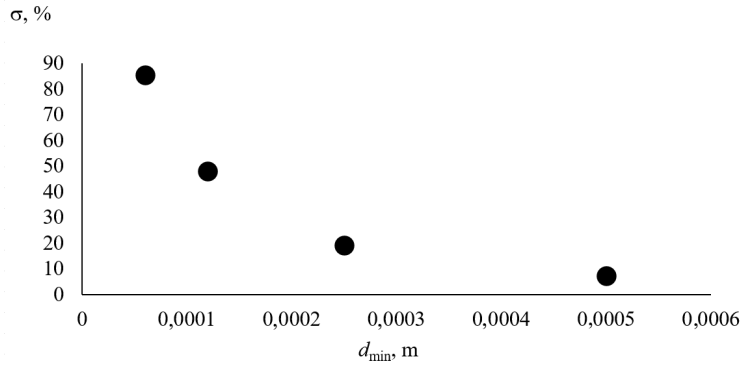


Рис. 3. Зависимость вклада сдвигающей проекции силы тяжести от крупности частиц донного грунта исследуемых водотоков
Fig. 3. Dependence of the contribution of the gravity shifting projection on the size of the studied watercourses bottom soil particles

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что вклад подъемной силы в общей сумме сил, действующих на частицу донного грунта, увеличивается с увеличением ее крупности. Увеличение вклада подъемной силы с ростом крупности частиц является прямым следствием перехода от вязкостного механизма взаимодействия потока с дном к инерционному и турбулентному обтеканию крупных шероховатостей. Полученные результаты хорошо согласуются с лабораторными экспериментами (например, работы Эйнштейна, Эль-Самни, Чепила [10, 11]), которые показали, что для крупного гравия и валунов критическая скорость сдвига, рассчитанная только по силе лобового сопротивления, систематически занижается. Также полученные зависимости коэффициента K_{lift} от крупности влекомых наносов и зависимость вклада сдвигающей проекции силы тяжести от крупности частиц донного грунта исследуемых водотоков подтверждаются и другими исследователями, например [9, 12, 26, 27].

ВЫВОДЫ

Российские реки отличаются исключительным гидравлическим разнообразием – от крупных равнинных водотоков (Волга, Обь, Лена) с песчаным руслом до горных рек Кавказа, Алтая, Камчатки, Байкальского региона с валунно-галечным аллювием. При этом натурные и лабораторные исследования последних десятилетий [28–31] показали, что в условиях крупнозернистого русла и высоких относительных шероховатостей подъемная сила, вызванная градиентом скоростей и эффектом Бернулли, может не только достигать величины силы тяжести, но и превышать ее при отрыве частицы. Так, анализ механизма взаимодействия речного потока с частицами донного грунта различной крупности позволяет заключить, что гидродинамическая подъемная сила, обусловленная перепадом давления при обтекании частицы, играет определяющую роль в инициации движения частиц донного грунта.

Выявленная в настоящей работе тенденция к увеличению относительного вклада подъемной силы с ростом крупности частиц объясняется переходом от вязкостного режима взаимодействия к инерционному и турбулентному обтеканию выступающих элементов дна. Полученные количественные зависимости коэффициента подъемной силы и сдвигающей проекции силы тяжести от диаметра частиц хорошо согласуются как с классическими лабораторными данными, так и с современными представлениями о нелинейном характере критических напряжений. Это подтверждает обоснованность полученных результатов и указывает на необходимость учета подъемной силы при гидравлических расчетах устойчивости русел, сложенных неоднородным крупнозернистым материалом.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTERESTS
The author declares no relevant conflict of interests.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Караушев А. В. Теория и методы расчета речных наносов. Л.: Гидрометеоиздат, 1977. 272 с.
2. Lane E. W. Progress report on studies of the design of the stable channels by the Bureau of reclamation // Proc. ASCE. 1953. Vol. 79 (280). 72 p.
3. Du Buat L. G. Principles d'hydraulique. Paris, 1816. 443 p.
4. Exner F. Zur Theorie der Flussmaander // Sitzungsber. Acad. Wissenschaften. Wien. Math. 1919. Vol. 31. P. 128–155.
5. Shields A. Application of Similarity Principles and Turbulence Research to Bedload Movement. Berlin: Wasserbau Schiffbau, 1936. 47 p.
6. Гончаров В. Н. Основы динамики русловых потоков. Л.: Гидрометеоиздат, 1954. 452 с.
7. Simões Francisco J. M. Shear velocity criterion for incipient motion of sediment // Water Science and Engineering. 2014. Vol. 7 (2). P. 183–193. https://doi.org/10.3882/j.issn.1674-2370.2014.02.006
8. Kulkarni D. R. and Bhalerao A. The experimental analysis of incipient motion condition of nonuniform sediment. In: P. V. Timbadiya et al. (eds.) Fluid Mechanics and Hydraulics. Part of the book series: Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Vol. 314. P. 49–62. https://doi.org/10.1007/978-981-19-9151-6_5
9. National Engineering Handbook Sedimentation. Chapter 4. Transmission of Sediment by Water. United States Department of Agriculture Soil Conservation Service. 43 p.
10. Einstein H. A., El-Samni E. A. Hydrodynamic forces on a rough wall // Reviews of Modern Physics. 1949. No. 21 (3). P. 520–524.
11. Chepil W. S. The use of evenly spaced hemispheres to evaluate aerodynamic forces on a soil surface // Eos, Transactions American Geophysical Union. 1958. No. 39 (3). 397–404.
12. Гендугов В. М., Глазунов Г. П. Подъемная сила в водном потоке, размывающем почву // Вестник Московского университета. Сер. 17. Почвоведение. 2009. № 2. С. 32–36.
13. Shahmohammadi R., Afzalimehr H., Sui J. Assessment of Critical Shear Stress and Threshold Velocity in Shallow Flow with Sand Particles // Water. 2021. Vol. 13. 994 p. https://doi.org/10.3390/w13070994
14. Dodangeh E., Afzalimehr H. Incipient motion of sediment particles in the presence of bed forms under decelerating and accelerating flows // Journal of Hydrology and Hydromechanics. 2022. Vol. 70. Iss. 1. P. 89–102. https://doi.org/10.2478/johh-2022-0002
15. Карасев И. Ф. Русловые процессы при переброске стока. Л.: Гидрометеоиздат, 1975. 288 с.
16. Hossein N. M., Hossein K., and Rasoul M. Laboratory analysis of incipient motion velocity for non-uniform non-cohesive sediments movement in rectangular flumes // Arabian Journal of Geosciences. 2016. Vol. 9. Art. 25. https://doi.org/10.1007/s12517-015-2120-0
17. Шамов Г. И. Речные наносы. Л.: Гидрометеоиздат, 1954. 346 с.
18. Bogardi I. Sediment transport in alluvial stream. Budapest, Askad. KISDO. 1970. 826 p.
19. Mavis F. F., Liu T., Soucek E. The transportation of detritus by flowing water. Univ. Iowa: Stand. Eng. Bull. 1937. 23 p.
20. Великанов М. А. Динамика русловых потоков. М.: Гостехиздат, 1954, т. 1, 322 с.; 1955, т. 2, 323 с.
21. Кнороз В. С. Неразмывающая скорость для несвязных грунтов и факторы, ее определяющие // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 1958. Т. 59. С. 62–81.
22. Гончаров В. Н. Динамика русловых потоков. Л.: Гидрометеоиздат. 1962. 225 с.

23. Мирцхулава Ц. Е. Основы физики и механики эрозии русел. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 303 с.
24. Measured total sediment loads (suspended loads and bedloads) for 93 United States streams. Denver, Colorado: Geological Survey. 1989. 128 p.
25. Shmakova M. V. Sediment transport in river flows: New approaches and formulas. In: D. Pasquali (ed.). Modeling of sediment transport. 2022. https://doi.org/10.5772/intechopen.103942
26. Barati R., Neyshabouri S. A. A. S., Ahmadi G. On the threshold of motion of sediment grains: Hydrodynamic forces effects. Conference: The 6th Jordanian International Civil Engineering Conference. Jordan, 2015.
27. Patel B. S., Patel P. L., Porey P. D. Threshold for initiation of motion of unimodal and bimodal sediments // International Journal of Sediment Research. 2013. No. 28. P. 24–33. https://doi.org/10.1016/S1001-6279(13)60015-3
28. Wiberg P. L., Smith J. D. Calculations of the critical shear stress for motion of uniform and heterogeneous sediments // Water Resources Research. 1987. Vol. 23. No. 8. P. 1471–1480.
29. Schmeeckle M. W., Nelson J. M., Shreve R. L. Forces on stationary particles in near-bed turbulent flows // Journal of Geophysical Research: Earth Surface. 2007. Vol. 112. Iss. F2. Art. F02003. https://doi.org/10.1029/2006JF000536
30. Dietrich W. E. Settling velocity of natural particles // Water Resources Research. 1982. Vol. 18. No. 6. P. 1615–1626.
31. Dietrich W. E., Whiting P. J. Boundary shear stress and sediment transport in river meanders of sand and gravel // River Meandering (Ikeda S., Parker G., eds.). Washington, DC: AGU, 1989. P. 1–50.

REFERENCES

1. Karaushev A. V. Theory and methods of calculating river sediments. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1977. 272 p. (In Russ.).
2. Lane E. W. Progress report on studies of the design of the stable channels by the Bureau of reclamation. *Proc. ASCE*. 1953. Vol. 79 (280). 72 p.
3. Du Buat L. G. Principles d'hydraulique. Paris, 1816. 443 p.
4. Exner F. Zur Theorie der Flussmaander. *Sitzungsber. Acad. Wissenschaften. Wien. Math.* 1919. Vol. 31. P. 128–155.
5. Shields A. Application of Similarity Principles and Turbulence Research to Bedload Movement. Berlin: Wasserbau Schiffbau, 1936. 47 p.
6. Goncharov V. N. Fundamentals of the dynamics of riverbed flows. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1954. 452 p. (In Russ.).
7. Simões Francisco J. M. Shear velocity criterion for incipient motion of sediment. *Water Science and Engineering*. 2014. Vol. 7 (2). P. 183–193. https://doi.org/10.3882/j.issn.1674-2370.2014.02.006
8. Kulkarni D. R., and Bhalerao A. The experimental analysis of incipient motion condition of nonuniform sediment. In: P. V. Timbadiya et al. (eds.) Fluid Mechanics and Hydraulics. Part of the book series: Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Vol. 314. P. 49–62. https://doi.org/10.1007/978-981-19-9151-6_5
9. National Engineering Handbook Sedimentation. Chapter 4. Transmission of Sediment by Water. United States Department of Agriculture Soil Conservation Service. 43 p.
10. Einstein H. A., and El-Samni E. A. Hydrodynamic forces on a rough wall. *Reviews of Modern Physics*. 1949. No. 21 (3), P. 520–524.
11. Chepil W. S. The use of evenly spaced hemispheres to evaluate aerodynamic forces on a soil surface. *Eos, Transactions American Geophysical Union*. 1958. No. 39 (3). 397–404.
12. Gendugov V. M., Glazunov G. P. Carrying capacity in the soil eroding water flow. *Newsletters of Moscow University. Series 17. Soil science.* 2009. No. 2. P. 32–36.

13. Shahmohammadi R., Afzalimehr H., Sui J. Assessment of Critical Shear Stress and Threshold Velocity in Shallow Flow with Sand Particles. *Water*. 2021. Vol. 13. 994 p. https://doi.org/10.3390/w13070994
14. Dodangeh E., Afzalimehr H. Incipient motion of sediment particles in the presence of bed forms under decelerating and accelerating flows. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*. 2022. Vol. 70. Iss. 1. P. 89–102. https://doi.org/10.2478/johh-2022-0002
15. Karasev I. F. Channel processes during the transfer of runoff. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1975. 288 p. (In Russ.).
16. Hossein N. M., Hossein K., and Rasoul M. Laboratory analysis of incipient motion velocity for non-uniform non-cohesive sediments movement in rectangular flumes. *Arabian Journal of Geosciences*. 2016. Vol. 9. Art. 25. https://doi.org/10.1007/s12517-015-2120-0
17. Shamov G. I. River sediments. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1954. 346 p. (In Russ.).
18. Bogardi I. Sediment transport in alluvial stream. Budapest, Askad. KISDO. 1970. 826 p.
19. Mavis F. F., Liu T., Soucek E. The transportation of detritus by flowing water. Univ. Iowa: Stand. Eng. Bull. 1937. 23 p.
20. Velikanov M. A. Dynamics of riverbed flows. Moscow: Gostekhizdat, 1954, vol. 1, 322 p.; 1955, vol. 2, 323 p. (In Russ.).
21. Knoroz V. S. Non-eroding velocity for non-cohesive soils and its determining factors. *Newsletters RSRIH by B. E. Vedeneev*. 1958. Vol. 59. P. 62–81. (In Russ.).
22. Goncharov V. N. Dynamics of riverbed flows. Leningrad: Gidrometeoizdat. 1962. 225 p. (In Russ.).
23. Mirtskhulava Ts. E. Fundamentals of physics and mechanics of riverbed erosion. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1988. 303 p. (In Russ.).
24. Measured total sediment loads (suspended loads and bedloads) for 93 United States streams. Denver, Colorado: Geological Survey. 1989. 128 p.
25. Shmakova M. V. Sediment transport in river flows: New approaches and formulas. In: D. Pasquali (ed.). Modeling of sediment transport. 2022. https://doi.org/10.5772/intechopen.103942
26. Barati R., Neyshabouri S. A. A. S., Ahmadi G. On the threshold of motion of sediment grains: Hydrodynamic forces effects. Conference: The 6th Jordanian International Civil Engineering Conference. Jordan, 2015.
27. Patel B. S., Patel P. L., Porey P. D. Threshold for initiation of motion of unimodal and bimodal sediments. *International Journal of Sediment Research*. 2013. No. 28. P. 24–33. https://doi.org/10.1016/S1001-6279(13)60015-3
28. Wiberg P. L., Smith J. D. Calculations of the critical shear stress for motion of uniform and heterogeneous sediments. *Water Resources Research*. 1987. Vol. 23. No. 8. P. 1471–1480.
29. Schmeeckle M. W., Nelson J. M., Shreve R. L. Forces on stationary particles in near-bed turbulent flows. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. 2007. Vol. 112. Iss. F2. Art. F02003. https://doi.org/10.1029/2006JF000536
30. Dietrich W. E. Settling velocity of natural particles. *Water Resources Research*. 1982. Vol. 18. No. 6. P. 1615–1626.
31. Dietrich W. E., Whiting P. J. Boundary shear stress and sediment transport in river meanders of sand and gravel. *River Meandering* (Ikeda S., Parker G., eds.). Washington, DC: AGU, 1989. P. 1–50.

Сведения об авторе:

Шмакова Марина Валентиновна, д-р геогр. наук, ведущий научный сотрудник, руководитель лаборатории математических методов моделирования, Институт озероведения Российской академии наук – обособленное структурное подразделение ФГБУН «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук», Россия, 196105, Санкт-Петербург, ул. Севастьянова, 9; https://orcid.org/0000-0002-2393-0070; e-mail: m-shmakova@yandex.ru

About the author:

Marina V. Shmakova, Doctor of Sciences in Geography, Leading Researcher, Head, Laboratory of Mathematical Methods of Modelling, Institute of Limnology RAS of Russia, 9, Sevastyanova str., St. Petersburg, 196105, Russia; https://orcid.org/0000-0002-2393-0070; e-mail: m-shmakova@yandex.ru

Поступила в редакцию / Received 22.10.2025
Поступила после рецензирования / Revised 25.05.2026.
Принята к публикации / Accepted 03.07.2026.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ МАТЕРИАЛОВ, ПРИНИМАЕМЫХ К ПУБЛИКАЦИИ В ЖУРНАЛ «ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО РОССИИ»

К публикации принимаются ранее не публиковавшиеся статьи на русском языке. Оптимальный объем статей составляет 0,6–0,8 авторского листа (25–30 тыс. знаков с пробелами, не более 30 с., включая рисунки и таблицы).

Статьи должны иметь индекс УДК, ключевые слова (10–15 слов) и автореферат (аннотацию), объем аннотации – 150–200 слов. Оптимальной является следующая структура статьи: краткая вводная часть с четкой формулировкой и характеристикой обсуждаемой проблемы, содержательная часть, конкретные выводы, вытекающие из изложенного материала, список литературы.

К статье необходимо приложить перевод на английский язык названия, ключевых слов, аннотации и сведений об авторах (ФИО полностью, должность, ученая степень и ученое звание, полное наименование организации, почтовый адрес, телефон, адрес электронной почты).

Текст набирается без переносов с выравниванием по ширине страницы, шрифт Times New Roman, кегль 12, межстрочный интервал 1,5, поля 2,5 см со всех сторон. Римские цифры набираются в английском регистре.

Цифровые данные оформляются в виде таблиц. Каждая таблица должна иметь порядковый номер и название. Нумерация таблиц – сквозная. Сокращения слов в таблицах не допускаются, за исключением единиц измерения. Численные значения величин в таблицах и тексте должны приводиться в единицах измерения СИ (обязательных).

Ссылки на литературные источники следует давать в квадратных скобках (например, [4]), порядок нумерации последовательный – по мере появления ссылок в тексте статьи.

Цитируемая литература приводится списком в конце статьи. Литературные источники должны быть пронумерованы и оформлены в библиографический список в соответствии с ГОСТом Р 7.0.5 2008. Пристатейный список литературы на латинице References в системе транслитерации LC размещается сразу за списком литературы.

Рисунки, чертежи, графики, схемы, диаграммы вставляются в текст статьи как объект. Общее количество рисунков в статье не должно превышать 10–12.

Для публикации представляется электронный вариант статьи в формате текстового редактора Microsoft Word. Фотографии, рисунки, чертежи, графики, схемы, диаграммы дополнительно представляются в виде отдельного файла (рисунки, чертежи, графики, схемы – в формате Corel Draw, tiff, jpg разрешением 300 dpi размером не менее 9×12 см, диаграммы – в формате Excel).

Материалы для публикации необходимо направлять в РосНИИВХ по электронной почте info@waterjournal.ru.

Редакторы: Т. М. Принцева, В. А. Федотов
Дизайн С. Ю. Дорохов
Перевод: А. Б. Кочев, И. А. Софронова
Подписано в печать 07.08.2026. Дата выхода в свет 25.08.2026.
Формат 70x100 1/16. Усл. печ. л. 7,5. Тираж 100 экз. Цена свободная.
Отпечатано в типографии ООО «Принт»,
юридический адрес: 426035, Удмуртская Республика, г. Ижевск, ул. Тимирязева, д. 5, помещ. 5.

REQUIREMENTS TO MATERIALS TO BE ACCEPTED FOR PUBLICATION IN «WATER SECTOR OF RUSSIA» JOURNAL

Papers in Russian, never published anywhere before, can be accepted for publication. The optimal size of an article is to be 25–30 thousand of characters with blanks, not more than 30 pages including figures and tables.

An article is to be accompanied with a paper with information about the authors (complete name, position, academic degree, full name of an institution/company, postal address, telephone number, fax, e-mail address).

A paper should contain a Universal Decimal Classification index, key words and an abstract. The following structure can be optimal: a brief introducing part with clearly defined and characterized problem under discussion, a conceptual part, concrete conclusions from the stated material, and the list of references.

An article is to be accompanied with the English translation of the name of the article, key words, the abstract, short information on the authors (name, full and abbreviated name of the institution/company, postal address).

The text is to be typed without division of words with width alignment, Times New Roman, 12 point type, 1,5 line spacing, 2,5 cm margins from all sides. Roman figures are to be typed in the Roman type.

Numerical data are to be arranged as tables. The tables should not be ponderous. Each table is to have a number and a name. Tables are to be through numbered. Abbreviation of words in the tables are not allowed, units of measurement excluded. Numerical values in the tables and in the text are to be in the CI units.

References are to be presented in a general list in the end of the paper. References are to be numbered and arranged in a bibliographic list in accordance with GOST P 7.0.5 2008 «Bibliographic reference. General requirements and rules of composition».

References in the text are to be given in square brackets (for instance, [4]), in successive order.

Figures, drawings, charts, and diagrams are to be inserted into the text as separate files each. General number of figures is not to exceed 10–12.

An electronic version of an article in Microsoft Word is to be sent with e-mail. Photographs, drawings, figures, charts, diagrams are to be presented additionally as separate files in JPEG and TIFF with resolution at least 300 dpi, 9×12 cm at least, all diagrams in Excel.

Manuscripts are reviewed and edited in RosNIIVKh editorial office.

Materials meant for publication are to be submitted to RosNIIVKh, e-mail address: info@waterjournal.ru.

Editors: T. M. Printseva, V. A. Fedotov
Design S. Y. Dorokhov
Translation: A. B. Kochev, I. A. Sofronova
Signed for publication. 07.08.2026. Data of issue 25.08.2026
Format 70x100 1/16. Conditional printing sheets: 7.5. Edition 100 copies. Price free.
Printed in OOO "Print" printing house,
legal address: ul. Timiryazeva, 5–5, Izhevsk, 426035, Udmurt Republic, Russia

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

Федеральное агентство водных ресурсов является органом исполнительной власти по оказанию государственных услуг и управлению государственным имуществом в сфере водных ресурсов.

Адрес: 117292, Москва, ул. Кедрова, дом. 8, корп. 1
Станции метро: Академическая, Профсоюзная
Телефон: 8 (499) 125-52-79
E-mail: water@favr.ru, http://voda.mnr.gov.ru

ФГБУ РОССИЙСКИЙ НИИ КОМПЛЕКСНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ И ОХРАНЫ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

ФГБУ РосНИИВХ – научное подразделение Федерального агентства водных ресурсов, создан для научного обеспечения государственных функций управления использования и охраны водных ресурсов, разработки нормативно-методической и проектной документации, направленной на устойчивое развитие водного хозяйства России и экономическую безопасность водопользования.
В структуру института входят филиалы в Екатеринбурге, Владивостоке, Чите, Перми, Уфе.

АДРЕС УЧРЕДИТЕЛЯ ЖУРНАЛА:
Россия, 344037, г. Ростов-на-Дону, ул. Ченцова, здание 10а
Тел.: (863) 285-30-24
Сайт: http://wrm.ru, e-mail: rwec@rwec.ru

Издание зарегистрировано в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Рег. номер ПИ № ФС77-82772 от 4 марта 2022 г.

Выходит с 1999 года 6 раз в год.

АДРЕС ИЗДАТЕЛЯ И РЕДАКЦИИ: 620078, г. Екатеринбург, ул. Мира, 23
Тел. главного редактора (343) 287-65-71.
E-mail: info@waterjournal.ru, www.waterjournal.ru

© ФГБУ РосНИИВХ

The title is registered in the State Committee of the Russian Federation for Press on May 21,1999. Registration Number 018825
The journal is issued since 1999 6 times a year.
Address of the Publisher and Editoral Board: Ul. Mira, 23, Ekaterinburg 620078 Russia Chief Editor (343) 287-65-71. E-mail: info@waterjournal.ru, www.waterjournal.ru

© FGBU RosNIIVKh


Индекс / Index 39076