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

ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО РОССИИ:

ПРОБЛЕМЫ, ТЕХНОЛОГИИ, УПРАВЛЕНИЕ

научно-практический журнал

№ 3, 2026

WATER SECTOR OF RUSSIA:

PROBLEMS, TECHNOLOGIES, MANAGEMENT

scietific | practical journal

No. 3, 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

№ 3, 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

Методический подход к идентификации доминирующего способа поступления химических веществ в воду водотоков
Т. С. Папина, О. В. Ловцкая, И. В. Жерелина 5

Обоснование стратегий модернизации оросительных систем на основе сценарного моделирования
В. Д. Гостищев, Т. С. Пономаренко, Н. Рыжаков, А. В. Бреева 26

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

Изменение гидрологического режима реки Иртыш на территории Республики Казахстан в условиях функционирования Верхне-Иртышского каскада водохранилищ
А. Е. Косолапов, М. В. Болгов, Д. В. Савостицкий, И. А. Филиппова 43

Мониторинг химического состава речных вод крупных рек РФ: состояние, перспективы
Чалов С. Р., Крастынь Е. А., Ефимов В. А. и др. 65

Моделирование эмиссии метана из Цимлянского водохранилища с различным набором входных параметров
В. А. Ломов, М. Г. Гречушникова 94

CONTENT

WATER/ECONOMIC SECTOR MANAGEMENT

A methodological approach to identifying the dominant pathway for chemicals entering watercourses
T. S. Papina, O. V. Lovtskaya, I. V. Zherelina 5

Justification of Strategies for Irrigation System Modernization Based on Scenario Modeling
V. D. Gostishchev, T. S. Ponomarenko, A. N. Ryzhakov, A. V. Breeva 26

WATER RESOURCES STUDIES

The Irtysh River hydrological regime changes on the territory of Republic of Kazakhstan in the conditions of the Upper Irtysh reservoir cascade functioning
A. E. Kosolapov, M. V. Bolgov, D. V. Savostitskiy I. A. Filippova 43

Large Russian rivers water chemical composition monitoring: state of research, recent results, and prospects
S. R. Chalov, Ye. A. Krastyn, V. A. Efimov et al. 65

Modeling of methane emission from Tsimlyansk reservoir with various set of input parameters
V. A. Lomov, M. G. Grechushnikova 94

УДК 556.161 *https://doi.org/10.35567/19994508-2026-3-5-25*

Оригинальная статья/Original paper

Методический подход к идентификации доминирующего способа поступления химических веществ в воду водотоков

Т. С. Папина[1], О. В. Ловцкая[1], И. В. Жерелина[2]

papina@iwep.ru

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

[2] *ООО «Центр инженерных технологий», г. Барнаул, Россия*

АННОТАЦИЯ

Актуальность. В последние десятилетия, в связи с увеличением антропогенной нагрузки на водосборы, большое внимание уделяется вопросам идентификации и оценки вклада различных источников в загрязнение вод сопряженных с ними водных объектов. В связи с тем, что сведения об объемах и химическом составе сточных вод водопользователей в большинстве случаев неинформативны, а проведение специальных полевых исследований на водосборе связано с большими организационными и финансовыми проблемами, достоверная оценка вклада различных источников в загрязнение водных объектов остается сложной задачей. Поэтому разработка простых методов идентификации и оценки способа поступления химических веществ от природных (в результате обменных процессов между водным потоком и дренируемыми им незагрязненными почвогрунтами) или антропогенных (диффузных и точечных) источников, определяющих качество воды в водотоке, является актуальной задачей. **Методы.** В работе на примере рек бассейна Иртыша предложено решение обратной задачи, а именно – идентификация по результирующему химическому составу воды доминирующего способа поступления химических веществ в водотоки. Методический подход основан на анализе и сопоставлении значений коэффициентов парной корреляции между данными по концентрации и расходу химических веществ и расходу воды в изучаемых створах. **Результаты**. Предложенный подход косвенной оценки доминирующего способа поступления химических веществ в воду рек может рассматриваться как дополнение к традиционному методу определения конкретных источников загрязнения, особенно на предварительной стадии их идентификации.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: рассредоточенный и сосредоточенный сток, природный фон, концентрация и расход химических веществ, методический подход, реки Иртыш, Ишим, Тобол

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Работа выполнена в рамках государственного контракта с Минприроды России на выполнение научно-исследовательской работы от 11.05.2022 № 0173100011322000004 и госзадания Института водных и экологических проблем СО РАН «Формирование гидрохимического стока в системе атмосферные осадки – поверхностные воды на водосборной площади ключевых участков бассейна Оби в зависимости от сезонных природно-климатических условий».

© Папина Т. С., Ловцкая О. В., Жерелина И. В., 2026

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Папина Т. С., Ловцкая О. В., Жерелина И. В. Методический подход к идентификации доминирующего способа поступления химических веществ в воду водотоков // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2026. № 3. С. 5–25. https://doi.org/10.35567/19994508-2026-3-5-25; EDN: XJUIMM

A methodological approach to identifying the dominant pathway for chemicals entering watercourses

Tatyana S. Papina[1] ✉, **Olga V. Lovtskaya**[1], **Irina V. Zherelina**[2]

✉ papina@iwep.ru

[1] *Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Barnaul, Russia*
[2] *Engineering Technologies Center LLC, Barnaul, Russia*

ABSTRACT

Relevance. In recent decades, due to increasing anthropogenic loads on watersheds, considerable attention has been paid to identifying and assessing the contribution of various sources to water pollution in adjacent water bodies. Since information on the volume and chemical composition of wastewater from water users is generally uninformative, and conducting specialized field studies in the watershed is associated with significant organizational and financial difficulties, reliably assessing the contribution of various sources to water pollution remains a complex task. Therefore, the development of simple methods for identifying and assessing the mode of entry of chemicals from natural (as a result of exchange processes between the water flow and the unpolluted soils it drains) or anthropogenic (diffuse and point) sources that determine water quality in a watercourse is a pressing issue. **Methods.** Using the rivers of the Irtysh River basin as an example, this paper proposes a solution to the inverse problem: namely, identifying the predominant mode of entry of chemicals into watercourses based on the resulting chemical composition of the water. The methodological approach is based on the analysis and comparison of pairwise correlation coefficients between data on chemical concentrations and discharge and water discharge at the studied cross-sections. **Results.** The proposed approach to indirectly assessing the predominant mode of chemical input into river water can be considered as a complement to the traditional approach to identifying specific pollution sources, especially at the preliminary stage of their identification.

KEYWORDS: diffuse and point runoff, natural background, methodological approach, concentration and consumption of chemicals, the Irtysh, Ishim, and Tobol rivers

FINANCING: The work was carried out within the framework of the state contract with the Ministry of Natural Resources of the Russian Federation for the implementation of scientific research work dated 11.05.2022 No. 017310001132200004 and the state assignment of the Institute for Water and Environmental Problems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences «Formation of hydro chemical runoff in the system: atmospheric precipitation – surface water in the catchment area of key sections of the Ob basin depending on seasonal natural and climatic conditions».

FOR CITATION: Papina T. S., Lovtskaya O. V., Zherelina I. V. A methodological approach to identifying the dominant pathway for chemicals entering watercourses. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2026. No. 3. P. 5–25. https://doi.org/10.35567/19994508-2026-3-5-25; EDN: XJUIMM

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия все больше внимания уделяется методам идентификации и оценки вклада различных источников в загрязнение речных вод [1–4]. Это обусловлено тем, что государственная политика, направленная на снижение поступления в водные объекты загрязняющих веществ от точечных (сосредоточенных) источников, несмотря на определенные успехи ее реализации, не принесла ожидаемого эффекта [5]. В проекте Водной стратегии Российской Федерации на период до 2035 года диффузный сток рассматривается как один из серьезных, а в ряде случаев как ключевой источник загрязнения водных объектов, вклад которого в отдельных регионах России оценивается до 50–60 % от суммарного объема поступления загрязняющих веществ в водные объекты[1].

Традиционно при оценке антропогенного воздействия на формирование качества воды поверхностных водных объектов рассматривается вклад конкретных точечных источников (водовыпусков предприятий) и измененных водосборных площадей (урбанизированных, сельскохозяйственных территорий, участков разработки полезных ископаемых и т. п.), расположенных в пределах изучаемых водосборов [1, 6–12]. В связи с тем, что сведения об объемах и химическом составе сточных вод для государственного статистического учета подают водопользователи, а проведение специальных полевых и экспериментальных исследований на водосборе связано с большими организационными и финансовыми проблемами, достоверно оценить вклад различных источников в загрязнение водных объектов достаточно сложно. При этом оценка влияния различных источников на загрязнение водных объектов особенно важна в трансграничных бассейнах, где большую сложность вызывает их идентификация на сопредельных территориях, а вопросы переноса загрязняющих веществ имеют не только экологическое, но и геополитическое значение. В этой связи разработка методов косвенной оценки поступления химических веществ в результате обменных процессов между водным потоком и дренируемыми им почвогрунтами (природный фон), от диффузных и точечных источников (антропогенная составляющая) в формирование качества воды в водотоке является актуальной задачей.

1 Водная стратегия Российской Федерации на период до 2035 года (проект). URL: https://www.mnr.gov.ru/docs/proekty_pravovykh_aktov/vodnaya_strategiya_rossiyskoy_federatsii_na_period_do_2035_goda (дата обращения: 10.02.2025).

Если природный химический фон водных объектов условно постоянен и определяется равновесными процессами обмена веществ между водным потоком и дренируемыми им почвогрунтами, то, согласно [2–4], характерные отличительные признаки антропогенных точечных (сосредоточенных) и диффузных (неточечных или рассредоточенных) источников состоят в следующем:

– точечные источники достаточно стабильны: диапазон изменения объема и концентраций сбрасываемых ими веществ не превышает одного порядка. Загрязненность реки от точечных источников не связана или очень слабо связана с изменением метеорологических факторов. Эти источники загрязнения легко идентифицируются;

– диффузные источники загрязнения, как правило, весьма динамичны – диапазон изменения объема и концентраций поступающих от них веществ может составлять несколько порядков, причем эти изменения происходят через произвольные временные интервалы. Нагрузка от них на реку напрямую связана с метеорологическими условиями, особенно с выпадением осадков. Эти источники загрязнения трудно, а порой и невозможно идентифицировать.

Таким образом, в отличие от диффузных источников, «легкую идентификацию» точечных источников загрязнения речного потока можно объяснить существованием резкого и постоянного контраста в изменении качества воды на небольшом участке реки. В то время как сложность идентификации диффузных источников заключается не только в их пространственном распределении на водосборе, но и в опосредованном поступлении загрязняющих веществ в речную воду через контактную среду (например, атмосферных выпадений через грунтовый сток после взаимодействия с почвогрунтами). Среди диффузных источников значимое прямое влияние на качество воды крупных озер и водохранилищ могут оказывать атмосферные выпадения (за счет большой площади водного зеркала) и вторичное загрязнение из донных отложений (например, эмиссия марганца из донных отложений в воду Новосибирского водохранилища [13]). Но так как вклад этих источников в загрязнение речных вод либо невелик (постоянная ротация и промывка донных отложений), либо проявляется опосредованно через сток с водосборной площади (например, атмосферные выпадения), то в дальнейшем в нашей работе эти источники не рассматриваются.

Кроме идентификации источников загрязнения, для обоснования и организации мероприятий по улучшению качества поверхностных вод особое значение имеет оценка вклада того или иного источника в общее загрязнение речного потока [1]. Вклад сосредоточенных источников можно легко рассчитать на основе разницы в значениях концентраций определяемых химических веществ в воде фонового створа, расположенного выше выпуска сточных вод, и створа полного смешения, расположенного в максимальной близости вниз по

течению от выпуска сточных вод[2]. Органы государственной власти для определения размера вреда, причиненного водному объекту в результате сброса сточных вод, применяют методику, утвержденную Минприроды России[3], которая основана на формальных индексах и таксах и, на наш взгляд, не отражает реального размера вреда водному объекту, т. к. не учитывает фактическую ситуацию на водном объекте после сброса сточных вод. Для количественной оценки влияния и вклада диффузного стока в загрязнение поверхностных вод используют различного уровня оценки и модельные расчеты [6, 10, 11, 14–17].

В связи с постоянным развитием технологий водоочистки можно предположить, что с начала индустриального периода соотношение вклада точечных и диффузных источников в общее загрязнение водных объектов постоянно менялось, особенно в пределах урбанизированных территорий. В последнее время за счет существенного увеличения объектов накопленного экологического вреда на участках водосбора (в первую очередь это городские свалки и складированные промышленные и сельскохозяйственные отходы) увеличиваются как объемы, так и номенклатура поступающих в водные объекты загрязняющих веществ [8, 9, 18]. В этой связи большинство исследователей в России именно с диффузным загрязнением связывают отсутствие кардинального улучшения состояния водных объектов после значительного сокращения поступления загрязняющих веществ в составе сточных вод предприятий [7, 12, 19].

В представленной работе на примере рек бассейна Иртыша предложено решение обратной задачи: обоснован методический подход, позволяющий по изменению химического состава речной воды идентифицировать доминирующий способ поступления химических веществ в водотоки. Методика базируется на использовании данных государственной сети мониторинга (о качестве и расходе воды) и анализе значений коэффициентов парной корреляции между концентрациями химических веществ, их массовым расходом и расходом воды в исследуемых створах.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Река Иртыш и ее два основных притока Ишим и Тобол являются крупнейшими трансграничными реками России. Бассейн Иртыша площадью 1,13 млн км^2 простирается с северо-запада на юго-восток, от гор Алтая и степей Казахстана до заболоченных низменностей Западно-Сибирской равнины более чем на 2,2 тыс. км. Бассейн р. Тобол является наиболее залесенным (более 50 %), однако в верхнем течении до границы Казахстана и России река течет

2 ISO 5667-6-2014. Качество воды. Отбор проб. Часть 6. Руководство по отбору проб из рек и потоков. URL: https://en.gostinfo.ru/catalog/Details/?id=5397359 (дата обращения: 14.02.2025).

3 Приказ Минприроды России от 13.04.2009 № 87 (ред. от 26.08.2015) «Об утверждении Методики исчисления размера вреда, причиненного водным объектам вследствие нарушения водного законодательства» (зарегистрировано в Минюсте России 25.05.2009 № 13989).

по засушливым степным районам Казахстана (рисунок). В бассейне Ишима наибольшие площади (около 63 %) занимают степи. Доля лесопокрытых земель в бассейне Иртыша (без Черного Иртыша) составляет более 48 %.

Неравномерно и хозяйственное использование водосборной площади изучаемых рек. В Китае на водосборе р. Черный Иртыш развиты нефтедобывающая промышленность и орошаемое земледелие, сопровождающиеся значительным забором воды (по экспертным оценкам, более 50 % условно-естественного стока реки). В Казахстане сток Иртыша, Ишима и Тобола зарегулирован каскадами водохранилищ, а водосборная площадь изменена горной добычей. Здесь расположены крупные населенные пункты, предприятия горно-металлургического профиля, химической промышленности и машиностроения, развито орошаемое земледелие. На российской части водосборного бассейна большинство населенных пунктов и промышленных предприятий расположены в бассейне Тобола и приурочены к восточному склону Урала, аграрная специализация характерна только для приграничных районов.

Известно, что загрязненность реки от диффузных источников происходит за счет смыва с водосбора во время выпадения осадков, которые, в свою очередь, влияют на увеличение расхода воды в замыкающем створе, в то время как загрязнение от точечных источников, как правило, не связано или очень слабо



Рисунок. Картосхема района исследования

Figure. Schematic map of the study region

связано с осадками [2–4]. Таким образом, анализ корреляционных связей между концентрацией химических веществ и расходом воды в замыкающем створе может косвенно указывать на характер источника поступления этих веществ, а связь между массовым расходом химических веществ, который характеризует совместное влияние изучаемых факторов, с концентрацией веществ и расходом воды позволяет вычленить доминирующий фактор этого влияния.

Для оценки корреляционных связей между концентрацией загрязняющего вещества, его массовым расходом и расходом воды в створах изучаемых рек использовали ряды данных государственной наблюдательной сети Росгидромета. В качестве исходной информации – суточные значения концентраций химических веществ и гидрохимических показателей, а также расходов воды за 2012 г. (маловодный с вероятностью превышения 85 %), 2014 г. (средней водности с вероятностью превышения 40 %) и 2016 г. (многоводный с вероятностью превышения 5 %). Характерные периоды выбраны на основе статистического анализа ряда данных среднегодовых расходов воды последнего гидрологического цикла (1950–2020 гг.), определенного по посту р. Иртыш – г. Тобольск с длинным рядом наблюдений, и позволяют охватить все возможные сценарии стока веществ с изучаемого водосбора.

Расчеты выполнены в четырех створах: р. Иртыш – с. Татарка и р. Иртыш – г. Ханты-Мансийск (воды низкой минерализации); р. Ишим – с. Ильинка и р. Тобол – с. Звериноголовское (воды повышенной минерализации). Среди выбранных створов три являются трансграничными, один – замыкающим в речной системе Иртыша (рисунок). В табл. 1 приведены сведения о гидрологических постах и пунктах контроля качества воды (гидрохимических пунктах) для этих четырех створов.

Данные по расходам воды на дату отбора проб в изучаемых створах получены из АИС ГВМО[4]. В связи с тем, что в исходных гидрохимических данных в каждой точке отбора за конкретную дату приведено только одно значение концентрации для каждого анализируемого показателя, для дальнейших исследований и расчета массового расхода это значение условно принималось за среднюю концентрацию вещества по сечению реки с погрешностью, равной нулю.

Таблица 1. Створы наблюдений
Table 1. Observation ranges

Наименование створа / поста / пункта	Гидрологический пост		Гидрохимический пункт	
	код поста	расстояние от устья, км	координатный номер вертикали	расстояние от устья, км
р. Иртыш – с. Татарка	11634	2022	35007500	2022
р. Иртыш – г. Ханты-Мансийск	11061	20	605006905	16,6
р. Ишим – с. Ильинка	11411	658	553006911	660,75
р. Тобол – с. Звериноголовское	12010	898	42006440	898

4 Электр. ресурс. URL: https://gmvo.skniivh.ru (дата обращения: 1.02.2025).

Перед началом работы была проведена верификация исходных данных, включающая следующие этапы: для расчетов коэффициентов парной корреляции выбирали ряды, содержащие не менее 20 значений; для значений ниже предела определения, обозначенных в предоставленных Росгидрометом данных как аналитический ноль (т. е. ниже предела определения используемого инструментального метода анализа), это значение заменяли на ½ предела определения данного показателя по методике анализа, входящей в Федеральный перечень методик, допущенных к применению при выполнении работ в области мониторинга загрязнения окружающей среды[5]; не использовали ряды данных, где большинство определяемых значений было ниже аналитического ноля.

Расчет массового расхода веществ через сечение створа проводили по формуле:

$$M_{ig} = C_{ig} Q_g, \quad (1)$$

где M_{ig} – расход i-го вещества через сечение g-го створа, г/с;

C_{ig} – концентрация i-го вещества в g-м створе, г/м^3;

Q_g – расход воды в g-м створе на момент отбора пробы, м^3/с.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 2–5 представлены результаты расчета средних, медианных, максимальных и минимальных значений концентраций и расходов веществ в створах р. Иртыш – с. Татарка, р. Иртыш – г. Ханты-Мансийск, р. Ишим – с. Ильинка, р. Тобол – с. Звериноголовское за три года (2012, 2014, 2016). В таблицах для каждого створа дополнительно приведены отношения максимальных и минимальных значений концентраций и расходов веществ, а также коэффициенты парной корреляции Пирсона между следующими рядами данных: концентрация вещества – расход воды, массовый расход вещества – расход воды, концентрация вещества – массовый расход вещества. Для дальнейшего анализа использовали только коэффициенты корреляции, достоверные по критерию Стьюдента с вероятностью ошибки $\alpha < 0{,}05$.

Результаты расчетов показывают, что по шкале градации силы связи (табл. 6) [20] умеренная положительная связь ($r = 0{,}3 – 0{,}5$) наблюдается между значениями концентраций и расходом воды для взвешенных веществ (ВВ) и фосфатов (PO_4^{3-}) в створе р. Иртыш – с. Татарка (табл. 2); ВВ, органических веществ, определяемых по химическому потреблению кислорода (далее ХПК), и нефтепродуктов в створе р. Иртыш – г. Ханты-Мансийск (табл. 3); Fe в створе р. Ишим – с. Ильинка (табл. 4); значительная положительная связь

5 РД 52.18.595-96. Руководящий документ. Федеральный перечень методик выполнения измерений, допущенных к применению при выполнении работ в области мониторинга загрязнения окружающей среды (утв. Госстандартом России 20.12.1996, Росгидрометом 15.12.1996) (ред. от 12.12.2022).

Таблица 2. Средние, медианные, максимальные (max) и минимальные (min) значения концентраций и расходов веществ в течение трех лет (2012, 2014, 2016 гг.) в створе р. Иртыш – с. Татарка. Изменение расхода воды в створе 210–2830 м³/с (среднее значение 911 м³/с; медиана 680 м³/с; max/min = 13,5)

Table 2. Average, median, maximal (max) and minimal (min) values of substances concentrations and discharge rates over three years (2012, 2014, and 2016) in the Irtysh River – the village of Tatarka range. The change of water consumption in the range is 210–2830 m³/s (average value is 911 m³/s; median is 680 m³/s; max/min = 13.5)

Показатель / n	ВВ	ХПК	$БПК_5$	Минерализация	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	Fe,	Zn	Cu	Mn	NO_3^-	PO_4^{3-}
	108	111	108	108	108	108	108	108	108	111	111	111	111	108	109
Концентрация, г/м³ Массовый расход, г/с															
Среднее значение	34,5	15,4	1,72	179	24,2	8,9	7,1	27	100	0,074	0,0071	0,0028	0,0035	0,148	0,013
	36 864	13 603	1511	15 8408	21 678	7436	6362	24508	87 798	70	6,1	2,6	3,2	115	13,0
Медиана	21,0	14,2	1,60	182	24,7	8,1	7,1	28	101	0,050	0,0058	0,0027	0,0021	0,107	0,012
	19 749	9860	1273	11 9625	16 705	6183	4650	18 445	67 736	40	3,8	2,0	1,6	80	7,9
Max	296,0	92,4	3,80	218	32,5	34,5	12,4	40	122	0,402	0,0621	0,0060	0,0228	0,583	0,048
	488 400	96 356	5125	565 434	77 542	27 985	28 017	99 647	299 980	683	46,2	9,9	29,2	735	106,1
Min	0,5	4,3	0,25	122	6,8	2,7	4,6	12	71	0,005	0,0005	0,0016	0,0005	0,003	0,002
	233	3063	133	42 693	2666	2767	1407	5076	24 570	2,6	0,3	0,53	0,1	2	1,3
Max/min	592	21	15	2	5	13	3	3	2	80	124	4	46	194	24
	2096	31	38	13	29	10	20	20	12	263	136	19	278	337	84
Коэффициент корреляции Пирсона (r)															
C и Q	**0,30**	−0,09	−0,04	0,00	0,11	**−0,24**	0,17	0,08	−0,11	0,09	−0,09	−0,05	−0,02	**−0,13**	**0,31**
M и Q	**0,47**	**0,65**	**0,77**	**0,98**	**0,96**	**0,79**	**0,91**	**0,93**	**0,98**	**0,51**	**0,39**	**0,92**	**0,42**	**0,29**	**0,74**
M и C	**0,94**	**0,61**	**0,54**	0,19	**0,35**	**0,30**	**0,51**	**0,39**	0,06	**0,79**	**0,76**	**0,31**	**0,81**	**0,76**	**0,78**

Примечание: здесь и далее в табл. 3–5: C – концентрация, M – массовый расход, Q – расход воды в створе, n – количество определений показателя (количество данных в выборке). Жирным шрифтом выделены статистически значимые коэффициенты корреляции (уровень значимости $\alpha < 0,05$).

Таблица 3. Средние, медианные, максимальные (max) и минимальные (min) значения концентраций и расходов веществ в течение трех лет (2012, 2014, 2016) в створе р. Иртыш – г. Ханты-Мансийск.
Изменение расхода воды в створе 845–8990 м³/с (среднее значение 3091 м³/с; медиана 1970 м³/с; max/min = 11)

Table 3. Average, median, maximal (max) and minimal (min) values of substances concentrations and discharge rates over three years (2012, 2014, and 2016) in the Irtysh River – the city of Khanty-Mansysk range. The change of water consumption in the range is 845–8999 m³/s (average value is 3091 m³/s; median is 1970 m³/s; max/min = 11)

Показатель / n	ВВ	ХПК	$БПК_5$	Нефтепродукты	Минерализация	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	Fe	Zn	Cu	Mn	NH_4^+	NO_3^-	PO_4^{3-}
n	36	36	36	36	22	22	22	22	22	22	36	32	32	32	36	36	22
Концентрация, г/м³ Массовый расход, г/с																	
Среднее значение	15,0	35,8	1,26	0,044	198	24,0	10,0	15,9	15,7	114	1,37	0,0230	0,0053	0,079	0,36	0,209	0,061
	56 626	122 850	3488	192	700 909	83 240	32 581	58 172	57 168	385 950	3715	83,55	17,1	182	1318	336	159
Медиана	11,4	37,2	0,79	0,031	172	20,8	8,8	15,9	15,6	95	1,39	0,0172	0,0038	0,060	0,20	0,102	0,030
	22 608	71 086	2101	64	443 531	58 682	24 960	45 579	36 464	246 036	2703	46,60	12,0	140	401	276	133
Max	60,4	81,6	9,75	0,381	420	44,1	25,8	25,0	32,3	244	2,88	0,0987	0,0180	0,268	1,55	0,772	0,560
	324 324	449 500	21 255	2633	2 357 322	242 801	98 231	160 312	156 426	1 368 279	10 810	648,50	75,7	704	11672	1469	473
Min	1,2	4,4	0,30	0,010	71	7,6	4,86	6,9	6,2	30,51	0,36	0,0004	0,0021	0,012	0,03	0,004	0,009
	1451	3960	423	12	130 832	19 476	10 682	16 178	11 969	56 444	324	0,64	2,5	44	59	9	17
Max/min	49	19	33	38	6	6	5	4	5	8	8	260	9	21	52	154	62
	224	114	50	219	18	12	9	10	13	24	33	1016	30	16	197	159	28
Коэффициент корреляции Пирсона (r)																	
C и Q	**0,35**	**0,40**	−0,11	**0,38**	**−0,36**	**−0,43**	**−0,50**	**−0,33**	−0,27	**−0,41**	−0,32	0,13	−0,04	**−0,50**	0,23	**−0,59**	−0,27
M и Q	**0,75**	**0,60**	**0,49**	**0,54**	**0,76**	**0,82**	**0,78**	**0,89**	**0,90**	**0,71**	**0,67**	**0,57**	**0,70**	**0,51**	**0,64**	−0,18	**0,49**
M и C	**0,80**	**0,90**	**0,79**	**0,98**	0,25	0,06	−0,02	0,07	0,10	0,24	0,30	**0,73**	**0,55**	**0,38**	**0,76**	**0,67**	**0,57**

Таблица 4. Средние, медианные, максимальные (max) и минимальные (min) значения концентраций и расходов веществ в течение трех лет (2012, 2014, 2016) в створе р. Ишим – с. Ильинка. Изменение расхода воды в створе 9–612 м³/с (среднее значение 84 м³/с; медиана 20 м³/с; max/min = 68)

Table 4. Average, median, maximal (max) and minimal (min) values of substances concentrations and discharge rates over three years (2012, 2014, and 2016) in the Ishym River – the village of Ilyinka range. The change of water consumption in the range is 9–612 m³/s (average value is 84 m³/s; median is 20 m³/s; max/min = 68)

Показатель / n	ВВ	ХПК	$БПК_5$	Нефтепродукты	Минерализация	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	Fe	Zn	Cu	Mn	NH_4^+	NO_3^-	PO_4^{3-}
	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
Концентрация, г/м³ Массовый расход, г/с																	
Среднее значение	16,3	22	2,3	0,056	694	70,2	26,9	152	103	230	0,08	0,0025	0,0026	0,041	0,146	0,147	0,029
	2796	2029	218	3,4	42 037	4507	1602	8401	6244	14 918	11,9	0,222	0,251	2,10	16,68	10,88	2,33
Медиана	12,0	21	1,9	0,040	700	72,5	26,5	149	97	234	0,07	0,0025	0,0024	0,027	0,099	0,074	0,022
	268	445	59	0,9	15 192	1542	597	3425	2154	5171	1,6	0,051	0,065	0,94	1,78	2,27	0,54
Max	64,0	36	7,1	0,410	1190	105	46,7	275	182	367	0,33	0,0065	0,0048	0,2064	0,770	0,636	0,149
	39 168	19 584	2693	19,5	330 847	37 760	12 179	61 812	45 839	126 256	202,0	1,8972	2,387	14,93	257,04	179,93	18,36
Min	0,5	10,9	0,8	0,005	351	39,3	13,4	66	51	98	0,03	0,0006	0,0014	0,007	0,005	0,004	0,005
	4,3	153,6	7,3	0,1	7822	779	232	1751	1059	1688	0,3	0,005	0,014	0,11	0,056	0,06	0,04
Max/min	128	3	8	82	3	3	3	4	4	4	11	11	3	28	154	159	30
	9025	127	369	174	42	48	53	35	43	75	601	364	172	135	4590	2999	423
Коэффициент корреляции Пирсона (r)																	
C и Q	**0,70**	0,19	0,10	−0,12	**−0,57**	**−0,56**	**−0,53**	**−0,55**	**−0,51**	**−0,49**	**0,49**	0,06	0,29	−0,20	0,10	−0,06	−0,02
M и Q	**0,76**	**0,74**	**0,73**	**0,60**	**0,65**	**0,63**	**0,66**	**0,66**	**0,68**	**0,63**	**0,69**	**0,74**	**0,74**	**0,63**	**0,67**	**0,68**	**0,74**
M и C	**0,76**	0,30	0,25	0,21	**−0,50**	**−0,48**	**−0,47**	**−0,49**	**−0,43**	**−0,40**	**0,75**	0,21	**0,37**	0,12	**0,42**	0,29	0,27

Таблица 5. Средние, медианные, максимальные (max) и минимальные (min) значения концентраций и расходов веществ в течение трех лет (2012, 2014, 2016) в створе р. Тобол – с. Звериноголовское. Изменение расход воды в створе 5,2–1150 м³/с (среднее значение 92,5 м³/с; медиана 26,6 м³/с; max/min = 221)

Table 5. Average, median, maximal (max) and minimal (min) values of substances concentrations and discharge rates over three years (2012, 2014, and 2016) in the Tobol River – the village of Zverinogolovskoye range. The change of water consumption in the range is 5.2–1150 m³/s (average value is 92.5 m³/s; median is 26.6 m³/s; max/min = 221)

Показатель / n	ВВ	ХПК	Нефтепродукты	Минерализация	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	Fe	Zn	Cu	Mn	NH_4^+	NO_3^-
	38	39	39	38	38	38	38	38	38	39	38	38	39	39	39
Концентрация, г/м³ Массовый расход, г/с															
Среднее значение	16,1	23,0	0,078	868	69	35	166	220	227	0,21	0,0118	0,0046	0,240	0,27	1,450
	2386	2174	4,3	112 110	7454	4614	24 650	25 906	26 199	27,4	0,845	0,600	8,10	21,1	87,4
Медиана	9,4	20,0	0,060	900	65	35	173	224	199	0,16	0,0085	0,0041	0,122	0,21	1,090
	133	577	1,4	28 757	2189	985	5160	6912	7977	3,2	0,221	0,076	3,15	4,8	31,3
Max	170,8	51,0	0,460	1604	158	89	347	470	549	0,69	0,0508	0,0132	1,500	1,60	7,560
	50 140	21 385	34,5	555 450	34 615	20 930	128 225	139 150	106 260	339,1	9,200	12,075	71,54	264,5	931,5
Min	0,4	4,0	0,003	342	23	7	16	64	92	0,04	0,0005	0,0007	0,007	0,01	0,005
	7	56	0,1	11 003	834	279	567	2219	3365	0,8	0,014	0,013	0,61	0,4	0,1
Max/min	427	13	153	5	7	13	22	7	6	16	102	19	214	160	1512
	7540	379	453	50	42	75	226	63	32	411	684	938	117	665	8788
Коэффициент корреляции Пирсона (r)															
C и Q	0,15	0,02	−0,17	**−0,36**	**−0,47**	−0,26	−0,16	**−0,39**	**−0,44**	0,25	−0,12	0,24	−0,20	−0,07	−0,14
M и Q	**0,91**	**0,73**	**0,88**	**0,94**	**0,96**	**0,92**	**0,91**	**0,96**	**0,92**	**0,84**	**0,93**	**0,93**	**0,62**	**0,92**	**0,89**
M и C	0,29	**0,39**	0,06	−0,25	**−0,45**	−0,14	0,04	−0,30	**−0,39**	**0,55**	0,13	**0,35**	0,03	0,17	0,14

(r = 0,5 – 0,7) наблюдалась только для взвешенных веществ в створе р. Ишим – с. Ильинка (табл. 4). При этом в створе р. Тобол – с. Звериноголовское достоверных положительных связей между значениями концентраций изучаемых веществ и расходом воды не выявлено (табл. 5).

Таблица 6. Качественная оценка силы корреляционной связи по результатам расчета коэффициентов корреляции Пирсона (r) [20]

Table 6. Qualitative assessment of the correlation strength according to the outcomes the Pearson correlation (r) coefficients calculation [20]

Коэффициент корреляции / Correlation	Сила связи / Strength of association
0,15–0,3	Слабая/weak
0,3–0,5	Умеренная/moderate
0,5–0,7	Значительная/significant
0,7–0,9	Сильная/strong
0,9–0,99	Очень сильная / very strong

Согласно признакам диффузных источников [2–4] логично предположить, что если существует положительная корреляционная зависимость между величинами концентраций какого-либо вещества и расходами воды в створе на момент отбора пробы, то поступление этого вещества в речную сеть выше данного створа может быть связано с его смывом с водосборной площади. Действительно, исходная (назовем ее условно фоновой) концентрация будет увеличиваться для тех химических веществ, которые дополнительно поступили в водоток в составе боковой приточности, объем которой напрямую влияет на увеличение расхода воды в створе. Здесь следует отметить, что заметное увеличение концентрации конкретного вещества в водотоке будет наблюдаться только тогда, когда исходная условно фоновая концентрация этого вещества в водотоке будет достоверно ниже его концентрации в водном потоке, поступающем в речную сеть с поверхности водосбора и из почвенно-грунтового горизонта (далее – рассредоточенный водный сток). При этом объем рассредоточенного водного стока должен быть таковым, чтобы при его смешении с речным потоком концентрация вещества в створе реки статистически значимо превышала условно фоновую концентрацию. По нашим данным, умеренная и значительная положительная корреляционная связь между величиной концентрации и расходом воды наблюдалась для взвешенных веществ в трех из четырех изучаемых створов (табл. 2–5), а для фосфатов, ХПК, Fe и нефтепродуктов – в одном из трех створов (табл. 2–4). Исходя из этого, можно предположить, что ВВ, фосфаты, ХПК, Fe и нефтепродукты поступают в русло реки выше створов наблюдения преимущественно с поверхности водосбора в составе рассредоточенного водного стока.

Данные табл. 2–4 также показывают, что для химических веществ, поступивших в реку преимущественно в составе рассредоточенного водного стока, в подавляющем большинстве случаев сильная и очень сильная корреляционная связь массового расхода вещества наблюдается как с концентрацией этого вещества, так и с расходом воды в створе, а отношение max/min концентрации вещества в створе выше 10. Это означает, что изменение величины массового расхода данного химического вещества или гидрохимического показателя в равной степени определяется как изменением величины расхода воды в створе, так и изменением концентрации этого вещества/показателя при его дополнительном поступлении с площади водосбора. Отметим, что при значительном варьировании расхода воды в створе (например, р. Тобол – с. Звериноголовское, табл. 5), изменение массового расхода химических веществ, поступивших от разных источников, будет иметь сильную и очень сильную положительную корреляционную связь с расходом воды, на фоне которой трудно вычленить доминирующую составляющую поступления химических веществ в речной поток.

При обратной корреляционной зависимости между значениями концентраций и расходом воды влияние рассредоточенного водного стока на исходную концентрацию веществ в речном потоке можно рассматривать как эффект разбавления. В изучаемых створах умеренная и значительная отрицательная корреляционная зависимость между значениями концентраций и расходом воды наблюдалась для минерализации и ее основных составляющих в створах р. Иртыш – г. Ханты-Мансийск, р. Ишим – с. Ильинка и р. Тобол – с. Звериноголовское. Это указывает на разбавляющую роль склонового стока для минеральной составляющей вод рек Ишим и Тобол (воды повышенной минерализации за счет разгрузки высокоминерализованного подземного стока), после поступления которого разбавляющий эффект продолжает сказываться и на составе воды в створе р. Иртыш – г. Ханты-Мансийск. Для створа р. Иртыш – г. Ханты-Мансийск умеренная отрицательная корреляционная связь получена также для Fe и Mn, а значительная – для нитратов. Если дополнительно наблюдается статистически значимая отрицательная корреляционная связь между массовым расходом вещества и его концентрацией в створе, можно говорить о разбавлении постоянного присутствующего химического фона. В нашем случае таким химическим фоном являются составляющие минерального состава воды в створах р. Иртыш – г. Ханты-Мансийск, р. Ишим – с. Ильинка и р. Тобол – с. Звериноголовское. Положительные корреляционные зависимости между массовым расходом этих веществ и расходом воды в створах показывают, что с водосбора все же поступает дополнительное количество минеральных веществ, однако их концентрации в рассредоточенном водном стоке заметно ниже, чем в исходном речном потоке. Поэтому отношение max/min концентрации вещества в этих створах незначительное.

Поступление химических веществ в речной водный поток от точечных источников (сточные воды промышленных предприятий и коммунальных служб) чаще всего не связано с изменением метеорологических факторов. Поэтому, если источник постоянный, а с водосбора не будет дополнительного поступления химических веществ, то должна наблюдаться отрицательная значимая корреляционная связь между концентраций вещества и расходом воды в створе, т. к. в данном случае объем водного стока с водосбора будет определять уровень разбавления исходной концентрации поступивших от точечного источника веществ. При этом изменение массового расхода вещества в створе в первую очередь будет зависеть от изменения величины его концентрации и слабо зависеть от расхода воды. Такая ситуация наблюдалась в створе р. Иртыш – г. Ханты-Мансийск для нитратов и фосфатов (табл. 3). Если предположить существование дополнительных источников поступления марганца и железа с водосбора выше данного створа (аналогично минеральной составляющей), то преимущественное поступление этих металлов также можно отнести к сосредоточенным источникам.

Значения природных фоновых концентраций веществ в речном потоке определяются равновесными обменными процессами между водным потоком и дренируемыми им почвогрунтами и по определению не должны зависеть от расхода воды в створе. При этом массовый расход этих веществ в первую очередь должен определяться изменением расхода воды в створе, а не изменением значений концентраций, а диапазон варьирования концентраций веществ должен быть минимальным. Под эти условия в нашем случае подходит весь минеральный состав (за исключением Mg) и Cu в створе р. Иртыш – с. Татарка, а также Cu, ХПК и $БПК_5$ в створе р. Ишим – с. Ильинка.

Сравнение средних и медианных значений концентраций и массовых расходов веществ также может дать дополнительную информацию, характеризующую способ поступления химических веществ в речной водный поток. В нашем исследовании медианные и средние значения концентраций для веществ природного фона были близки между собой, для веществ сосредоточенного водного стока незначительно разнились, а для рассредоточенного стока средние и медианные значения концентраций отличались существенно.

На основании вышесказанного можно сформулировать основные отличительные признаки (табл. 7), позволяющие идентифицировать доминирующий способ поступления химических веществ в воду водотоков.

Чтобы на практике использовать приведенную в табл. 7 информацию по идентификации источников поступления химических веществ в водотоки, необходимо предварительно выполнить следующие действия:

Провести верификацию исходных данных (исключить из рассмотрения явно некондиционные данные), а для концентраций ниже предела определе-

Таблица 7. Основные признаки, позволяющие классифицировать способ поступления химических веществ в водотоки

Table 7. Main features enabling to classify the way of chemical substances input into watercourses

Рассредоточенный сток	Сосредоточенный сток	Природный фон
Положительная статистически значимая корреляционная связь между концентрацией вещества и расходом воды в створе	Отрицательная статистически значимая корреляционная связь между значениями концентраций вещества и расходом воды в створе	Отсутствие статистически значимой корреляционной связи между концентрацией вещества и расходом воды в створе
Расход вещества через сечение створа в равной степени зависит как от концентрации вещества, так и от расхода воды в створе	Расход вещества через сечение створа в первую очередь зависит от изменения концентрации вещества в створе.	Расход вещества через сечение створа в первую очередь зависит от расхода воды в створе
Диапазон изменения концентрации вещества от одного до нескольких порядков	Диапазон изменения концентрации вещества в пределах одного порядка	Очень узкий диапазон изменения концентрации вещества в створе
Среднее и медианное значения концентрации вещества значительно разнятся между собой	Среднее и медианное значения концентрации вещества незначительно разнятся между собой	Среднее и медианное значения концентрации вещества близки между собой

ния метода (аналитический ноль) использовать значение ½ предела определения данного показателя.

По формуле (1) рассчитать массовый расход веществ через сечение изучаемого створа.

Рассчитать средние, медианные, максимальные и минимальные значения рядов данных по концентрациям и расходам веществ в створе.

Рассчитать коэффициенты парной корреляции между следующими рядами данных: концентрация вещества – расход воды, расход вещества – расход воды, концентрация вещества – расход вещества.

С помощью результатов расчетов и информации, приведенной в табл. 7, выполнить идентификацию доминирующего способа поступления веществ с территории водосбора в русло реки выше изучаемого створа.

В заключение следует отметить существующие ограничения для использования представленного в данной работе методического подхода. Достоверные корреляционные зависимости между рядами данных являются необходимым, но недостаточным условием для утверждения о взаимозависимости этих рядов, поэтому предложенный методический подход следует рассматривать как начальный этап для последующей идентификации конкретных источников

поступления загрязняющих веществ в воду водотоков. Иными словами, его следует рассматривать как важную информацию, позволяющую определить конкретные источники загрязнения воды водотоков.

С помощью предложенного методического подхода можно идентифицировать только доминирующий способ поступления химического вещества в речной сток, поэтому одновременно присутствующие значимые, но близкие по объему потоки рассредоточенного, сосредоточенного и природного стоков с помощью этого подхода идентифицировать невозможно. Данный подход нельзя использовать для водотоков зарегулированного стока (водохранилищ и прудов) и водоемов, а также для равнинных участков рек теплого климата, в которых, например, концентрации биогенных веществ будут в первую очередь определяться внутриводоемными процессами.

ВЫВОДЫ

В рамках проведенной работы предложен новый методический подход к идентификации доминирующего способа поступления химических веществ (рассредоточенный или сосредоточенный сток, природный фон) в воду водотоков, опробованный на примере р. Иртыш и ее притоков. В качестве исходной информации для идентификации доминирующего способа поступления использованы ряды данных по концентрации и расходу изучаемых веществ и расходу воды в створе реки на момент отбора пробы, а также коэффициенты парной корреляции Пирсона между концентрацией вещества и расходом воды, расходом вещества и расходом воды, концентрацией вещества и расходом вещества.

Обосновано, что анализ корреляционных связей между концентрацией химических веществ и расходом воды в створе может косвенно указывать на характер источника поступления этих веществ с водосбора, а связь между массовым расходом химических веществ, который характеризует совместное влияние изучаемых факторов, с концентрацией веществ и расходом воды позволяет вычленить доминирующий фактор этого влияния. В частности, показано, что основным признаком поступления химических веществ в реку от рассредоточенных источников может являться существование положительной корреляционной связи между концентрацией загрязнителя и расходом воды в створе, а также зависимость изменения расхода загрязнителя через сечение створа как от изменения величины концентрации вещества, так и от расхода воды. В отличие от рассредоточенных источников, поступление загрязняющих веществ от сосредоточенных источников характеризуется отрицательной корреляционной связью между концентрацией загрязнителя и расходом воды в створе, а также тем, что на изменение массового расхода загрязнителя через сечение створа в первую очередь влияет изменение величины концентрации

вещества в створе. Химические вещества природного фона характеризуются отсутствием значимой корреляционной связи между концентрацией загрязнителя и расходом воды, а массовый расход этих веществ зависит от расхода воды в створе.

Прямая оценка вклада различных источников в загрязнение водных объектов является сложной задачей, прежде всего, из-за отсутствия достоверных сведений об объемах и химическом составе сточных вод водопользователей. Предложенный авторами статьи методический подход оценки доминирующего способа поступления химических веществ в воду рек позволяет решать обратную задачу: по результирующему химическому составу речного стока идентифицировать способ поступления химических веществ от природных (в результате обменных процессов между водным потоком и дренируемыми им незагрязненными почвогрунтами) или антропогенных (диффузных и точечных) источников, определяющих качество воды в водотоке. Опробованный на примере р. Иртыш и ее притоков методический подход может быть в будущем использован для оценки поступления загрязняющих веществ на водосборах других рек умеренного климата, в которых вклад внутриводоемных процессов в химический сток веществ не является значимым.

Предложенный методический подход косвенной оценки доминирующего способа поступления химических веществ в воду рек следует рассматривать как дополнительную важную информацию к традиционному подходу выявления источников загрязнения на предварительной стадии их идентификации. Его применение позволяет: 1) косвенно оценить происхождение повышенных концентраций химических веществ (природное или антропогенное) в воде водного объекта, что особенно важно в трансграничных створах; 2) определить тип источника загрязнения (рассредоточенный или сосредоточенный), что сокращает временные и финансовые затраты выявления конкретного нарушителя водного законодательства.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTERESTS

The authors declare no relevant conflict of interests.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фащевская Т. Б., Полянин В. О., Кирпичникова Н. В. Диффузное загрязнение водных объектов: источники, мониторинг, водоохранные мероприятия. М.: Институт водных проблем РАН, 2020. 171 с.
2. Behrendt H. Point and diffuse loads of selected pollutants in the river Rhine and its main tributaries. Vienna: International Institute for Applied Systems Analysis, 1993. 84 p.
3. Novotny V. Diffuse (nonpoint) pollution – a political, institutional, and fiscal problem // Journal of Water Pollution Control Federation. 1988. Vol. 60. No. 8. P. 1404–1413.

4. Albek E. Estimation of Point and Diffuse Contaminant Loads to Streams by Non-Parametric Regression Analysis of Monitoring Data // Water, Air & Soil Pollution. 2003. Vol. 147. P. 229–243. https://doi.org/10.1023/A:1024592815576
5. Данилов-Данильян В. И., Полянина В. О., Фащевская Т. Б., Кирпичникова Н. В., Козлова М. А., Веницианов Е. В. Проблема снижения диффузного загрязнения водных объектов и повышение эффективности водоохранных программ // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 5. С. 503–514. https://doi.org/10.31857/S0321059620050053
6. Болгов М. В., Завьялова Е. В., Зайцева А. В., Осипова Н. В. Оценка диффузного стока с урбанизированных территорий в бассейне р. Волги (на примере г. Ростова) // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 5. С. 483–492. https://doi.org/10.31857/S032105962005003X
7. Диффузное загрязнение водных объектов: проблемы и решения / под ред. В. И. Данилов-Данильяна [и др.]. М.: РАН, 2020. 512 с.
8. Дрюпина Е. Ю., Эйрих А. Н., Эйрих С. С., Папина Т. С. Влияние крупных городов на качество речных вод (на примере р. Обь в районе г. Барнаула) // Вода: химия и экология. 2014. № 7. С. 3–9.
9. Зиновьев А. Т., Папина Т. С., Кудишин А. В., Ловцкая О. В., Дьяченко А. В., Марусин К. В., Носкова Т. В. Экспериментальные исследования и моделирование качества воды для оценки влияния диффузного стока с урбанизированных территорий // Научные проблемы оздоровления российских рек и пути их решения. М.: Студия Ф1, 2019. С. 359–365.
10. Кондратьев С. А., Шмакова М. В. Математическое моделирование массопереноса в системе водосбор – водоток – водоем. СПб.: Нестор-История, 2019. 246 с.
11. Михайлов С. А. Диффузное загрязнение водных экосистем. Методы оценки и математические модели. Барнаул: День, 2000. 131 с.
12. Ясинский С. В., Вишневская И. А., Веницианов Е. В. Диффузное загрязнение водных объектов и оценка выноса биогенных элементов при различных сценариях землепользования на водосборе // Водные ресурсы. 2019. Т. 46. № 2. С. 232–244. https://doi.org/10.31857/S0321-0596462232-244
13. Papina T. S., Eirikh A. N., Serykh T. G., Dryupina E. Yu. Space and time regularities in the distribution of dissolved and suspended manganese forms in Novosibirsk Reservoir water // Water Resources. 2017. Vol. 44. No. 2. P. 276–283. https://doi.org/10.1134/S0097807817020105
14. Мотовилов Ю. Г., Фащевская Т. Б. Пространственно-распределенная модель формирования стока тяжелых металлов в речном бассейне // Вода, химия и экология. 2018. № 1–3. С. 18–31.
15. Назаров Н. А. Оценки эрозионного смыва почв и выноса биогенных элементов с поверхностным стоком талых и дождевых вод в речном бассейне // Водные ресурсы. 1996. Т. 23. № 6. С. 645–652.
16. Kondratyev S., Mendel O. Mathematical Modelling of Runoff and Material Transport from Drainage Areas into Recipient Water Bodies // Hydrobiologia. 1996. Vol. 322. P. 237–240.
17. Tsakiris G., Alexakis D. Water quality models: an overview // European Water. 2012. No. 37. P. 33–46.
18. Теличенко В. И., Курочкина В. А., Блази К. Изменение качества воды и донных отложений водных объектов в условиях влияния техногенной нагрузки // Экология урбанизированных территорий. 2014. № 4. С. 35–39.
19. Ясинский С. В., Кашутина Е. А., Сидорова М. В. Диффузное загрязнение водных объектов равнинных территорий: проблемы оценки // Известия РАН. Сер. географическая. 2023. Т. 87. № 1. С. 115–130. https://doi.org/10.31857/S258755662301017X
20. Chaddock R. E. Principles and Methods of Statistics. Cambridge: The Riverside Press, 1925. 471 p.

REFERENCES

1. Fashchevskaya, T. B., Polyanin, V.O. and Kirpichnikova, N. V. Diffuse Pollution of Water Bodies: Sources, Monitoring, and Water Protection Measures. Moscow: Institute of Water Problems, Russian Academy of Sciences, 2020, 171 p. (in Russ.)

2. Behrendt H. Point and diffuse loads of selected pollutants in the river Rhine and its main tributaries. Vienna: International Institute for Applied Systems Analysis, 1993. 84 p.
3. Novotny V. Diffuse (nonpoint) pollution – a political, institutional, and fiscal problem. *Journal of Water Pollution Control Federation*. 1988. Vol. 60. № 8. P. 1404–1413.
4. Albek E. Estimation of Point and Diffuse Contaminant Loads to Streams by Non-Parametric Regression Analysis of Monitoring Data. *Water, Air & Soil Pollution*. 2003. Vol. 147. P. 229–243. https://doi.org/10.1023/A:1024592815576
5. Danilov-Danilyan V. I., Polyanin V. O., Fashchevskaya T. B., Kirpichnikova N. V., Kozlova M. A., Venitsianov E. V. The problem of reducing the diffuse pollution of water bodies and improving the efficiency of water protection programs. *Water Resources*. 2020. Vol. 47. No. 5. P. 691–701.
6. Bolgov M. V., Zav'yalova E. V., Zaitseva A. V., Osipova N. V. Evaluating the diffuse runoff from urban territories in the Volga basin: case study of Rostov city. *Water Resources*. 2020. Vol. 47. No. 5. P. 673–681.
7. Diffuse pollution of water bodies: problems and solutions / edited by V. I. Danilov-Danilyan [et al]. M.: RAS, 2020. 512 p. (in Russ.).
8. Dryupina E. J., Eirich A. N., Eirich S. S., Papina T. S. Influence of large cities on river water quality (by the example of the Ob River near Barnaul). *Water: Chemistry and Ecology*. 2014. No. 7. P. 3–9 (in Russ.).
9. Zinoviev A. T., Papina T. S., Kudishin A. V., Lovtskaya O. V., Dyachenko A. V., Marusin K. V., Noskova T. V. Experimental studies and modeling of water quality to assess the impact of diffuse runoff from urbanized areas. Scientific problems of improving the health of Russian rivers and ways to solve them. Moscow: Studio F1, 2019. P. 359–365 (in Russ.)
10. Kondratiev S. A., Shmakova M. V. Mathematical modeling of mass transfer in the catchment-watercourse-reservoir system. St. Petersburg: Nestor-History, 2019. 246 p. (in Russ.).
11. Mikhailov S. A. "Diffuse Pollution of Aquatic Ecosystems: Assessment Methods and Mathematical Models. Barnaul: Day, 2000, 131 p. 9 (in Russ.).
12. Yasinskii S. V., Vishnevskaya I. A., Venitsianov E. V. Diffuse pollution of water bodies and estimation of export of biogenic elements under different scenarios of water use in the watershed *Water Resources*. 2019. Vol. 46. No. 2. P. 266–277.
13. Papina T. S., Eirikh A. N., Serykh T. G., Dryupina E. Yu. Space and time regularities in the distribution of dissolved and suspended manganese forms in Novosibirsk Reservoir water. *Water Resources*. 2017. Vol. 44. No. 2. P. 276–283. https://doi.org/10.1134/S0097807817020105
14. Motovilov Iu. G., Fashchevskaia T. B. Spatially distributed model of the heavy metals flow formation in the river basin. *Water: Chemistry and Ecology*. 2018. No. 1–3. P. 18–31 (in Russ.).
15. Nazarov N. A. Estimation of soil erosion and removal of biogenic elements with surface runoff of melt and rainwater in a river basin. *Water Resources* 1996. Vol. 23. No. 6. P. 645–652 (in Russ.).
16. Kondratyev S., Mendel O. Mathematical Modelling of Runoff and Material Transport from Drainage Areas into Recipient Water Bodies. *Hydrobiologia*. 1996. Vol. 322. P. 237–240.
17. Tsakiris G., Alexakis D. Water quality models: an overview. *European Water*. 2012. No. 37. P. 33–46.
18. Telichenko V. I., Kurochkina V. A., Blasi K. A change of water quality and sediment processes in water objects under technogenic impact. *Ecology of Urban Areas*. 2014. No. 4. P. 35–39 (in Russ.).
19. Yasinsky S.V., Kashutina E. A., Sidorova M. V. The Current State of the Problem of Assessing the Characteristics of Water Bodies Diffuse Pollution in Lowland Watersheds. *Newsletters of the Russian Academy of Science. Series: Geography*. 2023. Vol. 87. No. 1. P.115–130. (In Russ.). https://doi.org/10.31857/S258755662301017X
20. Chaddock R. E. Principles and Methods of Statistics. Cambridge: The Riverside Press, 1925. 471 p.

Сведения об авторах:

Папина Татьяна Савельевна, д-р хим. наук, начальник химико-аналитического центра, ФБУН «Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук», Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1; https://orcid.org/0000-0002-8388-7289; e-mail: papina@iwep.ru

Ловцкая Ольга Вольфовна, старший научный сотрудник, ФБУН «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: lov@iwep.ru

Жерелина Ирина Владимировна, канд. геогр. наук, начальник отдела водного хозяйства и охраны окружающей среды, ООО «Центр инженерных технологий», Россия, 656031, г. Барнаул, ул. Папанинцев, 129; https://orcid.org/0000-0003-1446-4087; e-mail: zherelina@mail.ru

About the authors:

Tatyana S. Papina, Doctor of Chemical Sciences., Head, Chemical Analytical Centre, Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, ul. Molodezhnaya, 1, Barnaul; 656038, Russia; https://orcid.org/0000-0002-8388-7289; e-mail: papina@iwep.ru

Olga V. Lovtskaya, Senior Researcher, Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, ul. Molodezhnaya, 1, Barnaul; 656038, Russia; https://orcid.org/0000-0002-3942-1350; e-mail: lov@iwep.ru

Irina V. Zherelina, Candidate of Geographic Sciences, Head, Department of Water Management and Environmental Protection, Engineering Technologies Center LLC, ul. Papanintsev 129, Barnaul; 656031, Russia; https://orcid.org/0000-0003-1446-4087; e-mail: zherelina@mail.ru

Поступила в редакцию / Received 07.04.2026.
Поступила после рецензирования / Revised 27.04.2026.
Принята к публикации / Accepted 14.05.2026.

УДК 626; 841.004 *https://doi.org/10.35567/19994508-2026-3-26-42*

Оригинальная статья/Original paper

Обоснование стратегий модернизации оросительных систем на основе сценарного моделирования

В. Д. Гостищев, Т. С. Пономаренко, А. Н. Рыжаков, А. В. Бреева

ann22hp@mail.ru

Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации, г. Новочеркасск, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Актуальность статьи обусловлена ростом климатической неопределенности и критическим износом оросительной инфраструктуры (до 60–70 %), что делает неэффективным планирование на основе усредненных показателей. Переход к проактивным методам управления, в частности к сценарному моделированию, позволяет заблаговременно оценить уязвимости системы, определить приоритеты модернизации и обеспечить устойчивость водопользования в условиях водного дефицита. **Методы.** Предложена классификация причин отклонений фактических объемов водопотребления от плановых показателей, разделенных на технические (износ инфраструктуры, неисправность оросительной техники, недостаток автоматизации, механизации и гидрометрии), управленческие, а также объективные внешние причины (изменение гидрометеорологических условий). Для каждого фактора разработаны типовые сценарии оптимизации с количественной оценкой ожидаемого эффекта. **Результаты.** Установлено, что реализация сценариев оптимизации позволяет снизить потери воды на 10–50 %, повысить коэффициент полезного действия системы до 0,80–0,85, сократить дефицит водоподачи на концевых участках на 30–50 %. Введена система ранжирования участков оросительной сети по критериям величины и продолжительности дефицита воды, что позволяет формировать приоритетные дорожные карты мероприятий. Предложен стандартизированный восьмиэтапный цикл оптимизации: от диагностики и калибровки гидродинамической модели до мониторинга эффективности внедренных мер.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Азовская оросительная система, оросительные системы, гидродинамическое моделирование, дефицит воды, водораспределение, сценарное моделирование, оптимизация управления, техническое состояние, гидротехнические сооружения, автоматизация водопользования

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Гостищев В. Д., Пономаренко Т. С., Рыжаков А. Н., Бреева А. В. Обоснование стратегий модернизации оросительных систем на основе сценарного моделирования // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2026. № 3. С. 26–42. https://doi.org/10.35567/19994508-2026-3-26-42; EDN: LZXDYI

© Гостищев В. Д., Пономаренко Т. С., Рыжаков А. Н., Бреева А. В., 2026

Justification of Strategies for Irrigation System Modernization Based on Scenario Modeling

Vyacheslav D. Gostishchev, Taisiya S. Ponomarenko, Alexeyi N. Ryzhakov, Anna V. Breeva

ann22hp@mail.ru

Russian Research Institute of Land Reclamation Problems, Novocherkassk, Russia

ABSTRACT

Relevance. The relevance of this article is driven by growing climate uncertainty and the critical deterioration of irrigation infrastructure (up to 60–70%), which renders planning based on averaged indicators ineffective. The transition to proactive management methods, particularly scenario modeling, allows for advance assessment of system vulnerabilities, determination of modernization priorities, and ensuring water use sustainability under conditions of water deficit. **Methods.** A classification of causes for deviations of actual water consumption volumes from planned indicators is proposed, divided into technical (infrastructure wear, malfunction of irrigation equipment, lack of automation, mechanization, and hydrometry), managerial (personnel shortage), as well as objective external causes (changes in hydrometeorological conditions). For each cause, typical optimization scenarios have been developed with a quantitative assessment of the expected effect. **Results.** It was established that implementing optimization scenarios allows reducing water losses by 10–50 %, increasing the system efficiency coefficient to 0.80–0.85, and reducing the water delivery deficit in tail-end sections by 30–50 %. A system for ranking sections of the irrigation network based on criteria of water deficit magnitude and duration (ranks 1–4) has been introduced, which allows forming priority roadmaps of measures. A standardized eight-stage optimization cycle is proposed: from diagnostics and calibration of the hydrodynamic model to monitoring the effectiveness of implemented measures.

KEYWORDS: Azov Irrigation System; irrigation systems; hydrodynamic modeling; water deficit; water distribution; scenario modeling; management optimization; technical condition; hydraulic structures; water use automation

FOR CITATION: Gostishchev V. D., Ponomarenko T. S., Ryzhakov A. N., Breeva A. V. Justification of Strategies for Irrigation System Modernization Based on Scenario Modeling. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2026. No. 3. P. 26–42. https://doi.org/10.35567/19994508-2026-3-26-42; EDN: LZXDYI

ВВЕДЕНИЕ

Современное сельское хозяйство во многих регионах мира остается критически зависимым от искусственного орошения. Глобальное потепление нарушает историческую устойчивость гидрологического цикла, смещая сезонность осадков и увеличивая потенциальное испарение. Учащение экстремальных погодных аномалий, включая продолжительные периоды высоких температур и интенсивные ливни, вызывает резкие колебания доступности влаги, нарушая традиционные схемы водообеспечения**.** Однако функционирование

оросительных систем происходит в условиях растущей неопределенности: изменение климатических режимов приводит к непредсказуемости состояния водных ресурсов, учащаются периоды засухи, а рост конкуренции за воду между отраслями усложняет планирование водопользования. Одновременно износ оросительной инфраструктуры в ряде регионов достигает 60–70 %, что повышает риски сбоев в водоснабжении сельскохозяйственных культур в критические фазы их развития[1] [1–5].

Традиционные методы проектирования и управления оросительными системами, основанные на усредненных гидрометеорологических показателях, теряют эффективность в условиях изменчивости внешней среды. Для обеспечения устойчивости водоснабжения аграрного сектора требуется переход к проактивным подходам, позволяющим оценивать работоспособность систем до наступления критических ситуаций. Сценарное моделирование представляет собой инструмент стратегического анализа, с помощью которого можно протестировать поведение сложных технических систем при различных комбинациях внешних и внутренних факторов – от экстремальных климатических явлений до отказов оборудования или изменения структуры посевов [6–10].

Применение сценарного подхода к оросительным системам позволяет не только выявить уязвимые элементы инфраструктуры, но и обосновать приоритеты модернизации, оптимизировать режимы водораспределения и разработать адаптивные алгоритмы управления. Особенно актуально это для территорий с дефицитом водных ресурсов, где каждый кубометр воды должен использоваться с максимальной эффективностью [11–14].

На международном уровне сценарное моделирование и адаптивные стратегии уже стали стандартом управления водными ресурсами: в ЕС и Нидерландах они применяются для оценки климатической устойчивости инфраструктуры, в Австралии – для оптимизации водораспределения в условиях дефицита, а в США и Израиле активно внедряются «цифровые двойники» и системы поддержки решений на базе машинного обучения[2].

Цель представленного исследования – разработка и апробирование методики сценарного моделирования функционирования оросительной системы для оценки ее устойчивости и эффективности в условиях вариабельности климатических, гидрологических и эксплуатационных факторов. Достижение поставленной цели предполагает решение следующих задач: формализацию ключевых факторов неопределенности; построение репрезентативного набора сценариев развития событий; разработку имитационной модели взаимодействия компонентов оросительной системы; количественную оценку пока-

1 Информационный портал ФГБНУ ВНИИ «Радуга». [Электр. ресурс]. Режим доступа: https://informraduga.ru/sites/ all/files/presentation_potencial.pdf (дата обращения: 19.03.2026).

2 WaterGuide: руководство по формированию путей к улучшенному управлению водными ресурсами и водопользованию в условиях дефицита воды (русская версия). Australian Water Partnership, Канберра. 2019. Режим доступа: https://waterpartnership.org.au/wp-content/uploads/2024/03/WaterGuide-Russian-Edition.pdf (дата обращения: 13.03.2026).

зателей надежности и эффективности системы в каждом сценарии; выработку рекомендаций по повышению адаптивности системы к неблагоприятным условиям.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование выполнено на основе условно-типовой оросительной системы регулярного типа, параметры которой сформированы на основе усредненных нормативных значений для равнинных сельскохозяйственных массивов Юга России и фактических данных Азовской оросительной системы (Ростовская область) [15].

В качестве базовых характеристик приняты следующие показатели: общая площадь орошения составляет 3 тыс. га при проектной мощности 37,2 тыс. га. Протяженность магистрального канала достигает 92 км. Система включает 9 регулирующих гидротехнических сооружений, а водоснабжение осуществляется из реки с гарантированным расходом в меженный период[3,4].

Гидравлический режим канала характеризуется фактическим расходом в голове системы на уровне 10 м³/с. Скорость течения воды варьирует в пределах 0,05–0,25 м/с при уклонах дна 0,0001–0,0003. Форма поперечного сечения – трапецеидальная, однако вследствие эксплуатационных деформаций она частично нарушена. Коэффициент шероховатости по Маннингу [16] принят в диапазоне 0,030–0,045, что отражает влияние интенсивного зарастания русла водной растительностью.

Грунтовые условия представлены преимущественно суглинками и глинами. Коэффициент фильтрации [17] ложа канала составляет 0,1–1 м/сут из-за разуплотнения грунта корневой системой растений.

Эксплуатационное состояние системы оценивается как неудовлетворительное: физический износ инфраструктуры достигает 70 %, что проявляется в деформации берегов, зарастании русел и заилении. Управление водораспределением осуществляется вручную. Гидрометрическое обеспечение минимально (три поста), наблюдается недостаток механизации службы эксплуатации и низкая оснащенность хозяйств оросительной техникой. Структура посевных площадей включает 40 % зерновых культур, 35 % пропашных и 25 % многолетних насаждений.

Для каждого сценария теоретически задавали: граничные условия на входе, внутренние параметры сети (шероховатость, пропускная способность), схемы управления, структуру посевов, климатические возмущения. Моделирование выполнено для условного вегетационного периода.

3 Паспорт мелиоративной системы: «Азовская ОС». Информационный портал ФГБНУ ВНИИ «Радуга» [Электр. ресурс]. URL: https://inform-raduga.ru/gts/599 (дата обращения: 19.03.2026).

4 Реконструкция орошаемых земель совхоза «Луговой» Аксайского района Ростовской области и повышение водообеспеченности Азовской оросительной системы. Стадия: рабочий проект. Кн. 6. Азовский магистральный канал. Пояснительная записка. Чертежи. Ростов на Дону: Южгипроводхоз, 1988. 134 с.

Рассчитаны относительные показатели эффективности: изменение КПД системы, объема нецелевых потерь, равномерности водораспределения, времени реакции на возмущения. Сравнение всех сценариев проведено относительно соответствующих базовых вариантов.

Исследование носит методологический характер: все сценарии и параметры являются теоретическими и предназначены для демонстрации возможностей сценарного подхода к оценке устойчивости и эффективности оросительных систем.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Разработано 28 теоретических сценариев, сгруппированных в семь блоков (рисунок): базовые (референтные) сценарии для каждого блока; сценарии деградации («без изменений»); сценарии улучшения (локальная и комплексная реконструкция, автоматизация, механизация и др.); стрессовые и аварийные сценарии.

Долгосрочная эффективность мелиоративных систем зависит от регулярности эксплуатационно-восстановительных работ, а не только от качества их первоначального проектирования и возведения. Без регулярного ухода даже новая сеть быстро превращается в заросшее, заиленное русло, где вода теряет скорость, напор и направление. Базовый (референтный) сценарий воспроизводит текущее состояние системы: режимы водоподачи, гидравлические параметры (уровни, расходы, скорости), дефекты инфраструктуры (утечки, засоры, повреждения ГТС) и повышенные коэффициенты шероховатости. Результат – карта дефицитных и избыточно увлажненных участков, оценка нецелевых потерь и зон аварийного риска. Сценарий служит эталоном для сравнения альтернатив.

Блок 1. Неудовлетворительное техническое состояние водопроводящей сети и гидротехнических сооружений государственных и внутрихозяйственных мелиоративных систем

Водопроводящие сети и гидротехнические сооружения мелиоративных систем накопили критический износ: разрушена облицовка каналов, корродированы трубопроводы, деформированы береговые укрепления, заросли русла. Это снижает пропускную способность, увеличивает гидравлические потери и повышает аварийность. Для оценки состояния и выбора стратегии развития применяется сценарное моделирование.

Сценарий «без изменений» (S1) моделирует деградацию системы при отсутствии ремонтов: рост утечек, снижение пропускной способности из-за зарастания и осадконакопления, деформация конструкций. К концу прогнозного периода КПД системы падает на 15–30 %, частота нарушений возрастает на 25–40 %, особенно в паводковые периоды.

Сценарий локальной реконструкции (S2) предполагает точечное восстановление наиболее изношенных элементов: замену участков каналов и трубопроводов, ремонт насосных станций и регуляторов, укрепление берегов. Эффект: снижение утечек на 10–20 %, сокращение дефицита воды на концевых участках на 30–50 %, формирование приоритетного перечня объектов для инвестиций.

Сценарий комплексной реконструкции (S3) включает системную модернизацию: замену открытых каналов закрытыми трубопроводами, обновление ГТС с автоматизированными затворами и датчиками, внедрение единой системы мониторинга и диспетчеризации. Результат: снижение неучтенных потерь на 20–50 %, рост КПД системы, переход к прогнозному управлению.

Сценарий адаптации к изменению климатических условий (S4) учитывает снижение стока, рост частоты засух и ливней, смещение фаз водопотребления. Моделирование выявляет уязвимые участки и обосновывает строительство резервных емкостей, внедрение водосберегающих технологий. Ожидаемый эффект – снижение ущерба от засух и паводков на 25–40 %.

Сценарий оптимизации режимов водораспределения (S5) фокусируется на совершенствовании управления без капитальных вложений: гибкие графики подачи, дифференцированный полив с учетом фазы вегетации и данных дистанционного зондирования (NDVI, влажность почвы). Результат: снижение нецелевого расхода на 15–30 %, повышение коэффициента водопользования до 0,80–0,90.

Аварийные сценарии (S6) моделируют последствия отказов критических элементов (прорыв дамбы, отказ насосной станции, обрушение канала). Анализ позволяет определить зоны затопления, разработать резервные схемы переброски потоков, обосновать резервирование узлов. Эффект: сокращение времени реагирования до 2–4 часов, снижение площади затопления на 30–60 % при наличии резервных маршрутов.

Блок 2. Недостаточное оснащение средствами автоматизированного управления водораспределением мелиоративных систем

Ручное управление мелиоративной системой, основанное на усредненных графиках и визуальных наблюдениях, приводит к системным дисбалансам: переливам на одних участках и дефициту воды на других, особенно на концевых участках сети.

Сценарий частичной автоматизации (S1) предполагает установку датчиков уровня и расхода на ключевых узлах и применение простых логических правил управления (например, коррекцию затворов при превышении заданного уровня). Эффект: снижение колебаний уровней на 30–50 %, сокращение времени реакции в 2–3 раза, повышение равномерности водораспределения на 20–35 %.

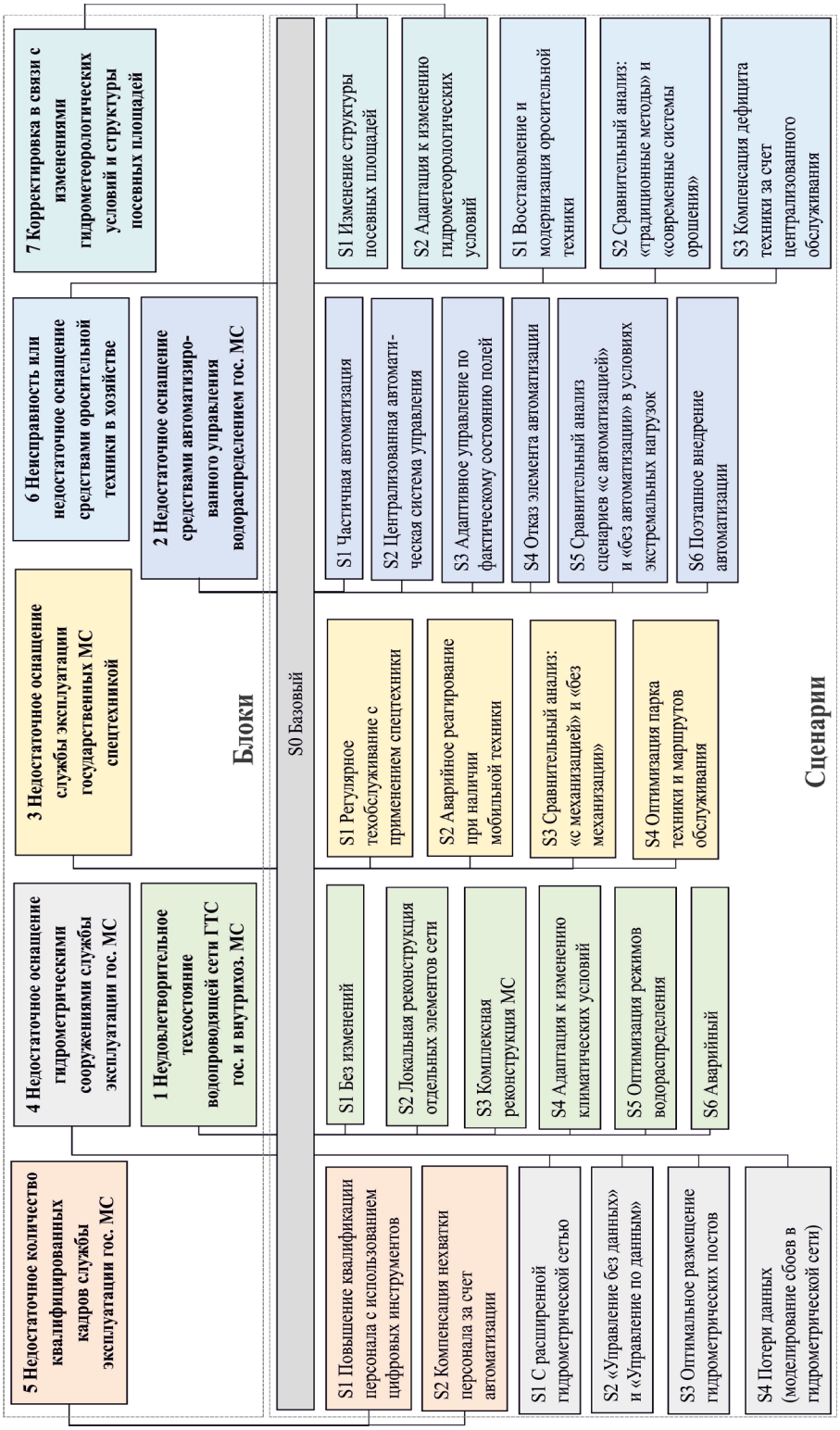


Рисунок. Типовые сценарии моделирования
Figure. Typical modeling scenarios

Сценарий централизованной автоматической системы управления (S2) объединяет датчики, исполнительные механизмы и гидродинамическую модель в единую систему с обратной связью и прогнозированием. Учет метеоданных, фазы вегетации и испарения позволяет формировать опережающие управляющие воздействия. Результат: снижение нецелевых потерь на 25–40 %, сокращение эпизодов дефицита/избытка воды на 50–70 %, повышение коэффициента полезного водопользования до 0,80–0,85.

Сценарий адаптивного управления по состоянию полей (S3) интегрирует данные дистанционного зондирования (индексы растительности NDVI, влажность почвы) в алгоритмы распределения воды. Полив адаптируется под реальные потребности культур, а не под жесткий календарный график. Эффект: снижение объема подаваемой воды на 15–25 % без ущерба урожайности, повышение коэффициента водопользования до 0,85–0,90.

Сценарий отказа элемента автоматизации (S4) моделирует последствия выхода из строя датчиков, обрыва связи или отключения питания. Грамотно спроектированная система с дублированием критических компонентов и резервными каналами связи сокращает время восстановления режима до 2–3 часов и снижает риск аварий на 40–60 %.

Сравнительный анализ (S5) в экстремальных условиях (засуха, паводки, резкий рост водопотребления) показывает, что автоматизированная система восстанавливает штатный режим в 2–4 раза быстрее, а число аварийных ситуаций на ней ниже на 50–75 % по сравнению с ручным управлением.

Сценарий поэтапного внедрения (S6) предлагает начинать с головных сооружений (эффект до 20 % снижения потерь при минимальных затратах), далее переходить к магистральным каналам и узлам перераспределения и лишь затем – к распределительной сети. Такой подход обеспечивает окупаемость каждого этапа и в итоге дает снижение водопотерь на 35–50 % при сокращении сроков окупаемости инвестиций.

Блок 3. Недостаточное оснащение службы эксплуатации мелиоративных систем средствами механизации и специальной техникой

Сценарий регулярного технического обслуживания с применением специализированной техники (S1) обеспечивает циклический режим работы: каналоочистители и гидроудалители работают по графику (например, ежеквартально), восстанавливая проектное сечение русла и нормализуя шероховатость. После каждого цикла параметры сети корректируются в модели, отражая постепенное возвращение к расчетным характеристикам. Результат – стабилизация уровней и расходов, снижение гидравлических потерь на 25–35 %, восстановление пропускной способности до 90–95 % от проектной. Число эпизодов дефицита воды на полях сокращается на 40–60 %, вода вновь достигает конечного потребителя в нужном объеме и вовремя.

Однако даже при регулярном обслуживании аварии неизбежны. Сценарий аварийного реагирования (S2) моделирует критическую ситуацию – резкое перекрытие канала из-за обвала берега или скопления растительности. Разница между «до» и «после» оказывается решающей: при отсутствии мобильной техники ликвидация завала занимает до недели, при наличии – менее суток. Сокращение времени реагирования в 5–7 раз напрямую снижает объем дефицита водоподачи на 60–80 %, минимизируя ущерб для сельскохозяйственного производства. Мобильная техника становится не просто инструментом ремонта, а страховкой от катастрофических потерь урожая.

Сравнительный анализ «с механизацией» и «без механизации» (S3) обобщает эти эффекты в цифрах. К концу сезона в варианте без техники лишь 50–60 % каналов сохраняют проектную пропускную способность, суммарные водопотери достигают критических значений. При наличии техники 80–90 % сети функционирует штатно, потери снижаются на 20–30 %. Эти данные формируют экономическое обоснование инвестиций: механизация перестает восприниматься как затрата и обретает статус фактора устойчивости всей системы.

Но эффективность механизации зависит от ее организации. Сценарий оптимизации парка техники и маршрутов обслуживания (S4) решает задачу разумного баланса: как обеспечить максимальный охват при минимальных ресурсах. Моделирование различных конфигураций (один каналоочиститель на 50 км, два на 100 км и т. д.) с учетом протяженности сети, труднодоступности участков и частоты засоров позволяет сформировать оптимальные графики выездов. Результат – снижение простоев техники на 20–25 %, охват 95 % сети при минимальном парке, сокращение среднего времени реакции на заявку до 24 часов. Таким образом, механизация обслуживания – это не набор машин, а стратегия поддержания жизнеспособности водной артерии. От хаотичных аварийных выездов – к плановому профилактическому уходу, от избыточного парка – к оптимизированной логистике.

Блок 4. Недостаточное оснащение гидрометрическими сооружениями службы эксплуатации государственных мелиоративных систем

Отсутствие достаточной гидрометрической сети лишает службу эксплуатации объективной информации о движении воды по системе. При минимальном оснащении (датчики только у головных сооружений) расходы на промежуточных участках оцениваются приблизительно, потери рассчитываются по нормам, а реальное распределение воды между потребителями остается неизвестным. Базовый сценарий (S0) выявляет критическую погрешность водного баланса, невозможность обнаружить утечки и несанкционированные водозаборы, а также неравномерность полива, снижающие эффективность деятельности водопользователей.

Сценарий с расширенной гидрометрической сетью (S1) предполагает установку автоматических датчиков уровня и расхода воды на головных сооружениях, узлах перераспределения и концах магистральных каналов с передачей данных в реальном времени. Интеграция измерений в гидродинамическую модель снижает погрешность расчетов до 10 %, обеспечивает оперативное выявление аномалий (утечек, засоров) и сокращает время обнаружения аварий до 1–3 часов. Система приобретает способность к самодиагностике и достоверному водному балансу по участкам.

Сравнительный сценарий «управление без данных» и «управление по данным» (S2) количественно оценивает ценность измерений. Управление по фактическим показаниям (а не по усредненным графикам) снижает водопотери на 15–30 %, сокращает случаи неравномерного полива на 40–60 % и повышает коэффициент полезного водопользования до 0,75–0,85. Информация становится ключевым ресурсом эффективного управления.

Сценарий продуктивного размещения гидрометрических постов (S3) обеспечивает оптимальную пропорцию между охватом мониторинга и затратами на модернизацию. Анализ эффективности и соотношения «затраты – точность» показывает: установка 30–40 % от максимально возможного количества постов в приоритетных точках (головные сооружения, узлы распределения, концевые участки) обеспечивает 90 % информативности системы. Такой иерархический подход минимизирует капитальные и эксплуатационные затраты при сохранении высокой управляемости.

Сценарий потери данных (S4) моделирует последствия отказа датчиков, обрыва связи или отключения питания. Без резервирования сбои в течение 24–72 часов приводят к отклонению режима от заданного и возникновению дефицита или перелива. Анализ выявляет «точки одиночного отказа» и обосновывает необходимость дублирования датчиков на критических узлах, резервных каналах связи и алгоритмов экстраполяции на основе смежных постов. Способность системы к сохранению функциональности становится условием безопасности водоснабжения.

Гидрометрическое оснащение – фундамент прозрачного и ответственного управления. Оно превращает водный баланс из формального документа в инструмент контроля, снижает потери, повышает равномерность полива и восстанавливает доверие водопользователей к службе эксплуатации. В условиях дефицита водных ресурсов измерение становится не технической процедурой, а условием устойчивого функционирования мелиоративной системы.

Блок 5. Недостаточное количество квалифицированных кадров службы эксплуатации мелиоративных систем

Дефицит квалифицированного персонала приводит к функциональной деградации мелиоративной системы: задержкам в принятии решений, отсут-

ствию реакции на изменения гидравлического режима, упрощенным расчетам водопотребления без учета текущих условий. Режимы сводятся к жестким графикам без корректировки, что отражается на пропускной способности каналов из-за несвоевременной очистки, приводит к хроническому дефициту воды на концевых участках, увеличению неучтенных потерь и росту аварийности из-за несвоевременной диагностики.

Сценарий повышения квалификации персонала с использованием цифровых инструментов (S1) предполагает его обучение на гидравлическом симуляторе (например, на базе программного комплекса MIKE). Сотрудники отрабатывают реакцию на засоры, паводки и другие ситуации в виртуальной копии сети, учатся интерпретировать данные датчиков и прогнозы модели. Управленческие решения предварительно тестируются в модели. Эффект – снижение ошибок управления на 40–60 %, сокращение времени реакции на 50–70 %, повышение равномерности орошения до 85–90 % от проектной нормы.

Сценарий компенсации нехватки персонала за счет автоматизации (S2) применяется в условиях острого кадрового дефицита. Алгоритмы автоматического регулирования, интегрированные с датчиками уровня и расхода воды, берут на себя рутинные функции: поддержание заданных параметров, корректировку затворов, стабилизацию давления. Персонал сохраняет роль диспетчера – принимает стратегические решения и реагирует на нештатные ситуации. В результате штатные «ручные» решения сокращаются на 60–80 %, ускоряются процессы восстановления рабочего режима после отклонений от нормальных параметров в 2–4 раза, обеспечивается стабильная эксплуатация мелиоративных систем при минимальной численности персонала.

Автоматизация и обучение – взаимодополняющие стратегии. Автоматизированные системы обеспечивают базовую стабильность и выполняют типовые операции по заданным алгоритмам, но только квалифицированный специалист способен принимать ответственные решения в нестандартных ситуациях и корректировать режимы работы системы с учетом агротехнических требований. Оптимальный подход сочетает оба направления: автоматизацию для надежности и обучение для стратегического управления.

Блок 6. Неисправность или недостаточное оснащение средствами оросительной техники

Мелиоративная система теряет смысл, если вода, доставленная по каналам к границе хозяйства, не может быть эффективно распределена по полям из-за неисправной или отсутствующей оросительной техники. Базовый сценарий фиксирует эту проблему: дождевальные машины простаивают, капельные системы отсутствуют или засорены, полив осуществляется фрагментарно или вручную. Коэффициент фактического водопотребления падает до 50–60 % от запрошенного, остальная вода уходит в сбросы, испаряется или фильтруется

мимо корневой зоны растений. Последствия – недоиспользование орошаемых площадей, снижение урожайности и нулевая экономическая отдача от вложений в инфраструктуру.

Сценарий восстановления и модернизации оросительной техники (S1) предполагает замену устаревших дождевальных машин на современные комплексы (фронтального или кругового действия) и внедрение капельных систем для высокотоварных культур. Точечная доставка воды в прикорневую зону повышает равномерность увлажнения и снижает потери. Это позволяет сократить нецелевые потери на поле на 30–50 %, повысить коэффициент полезного водопользования до 0,8–0,9, увеличить реально орошаемые площади на 20–40 % без увеличения объема водозабора. Равномерный водозабор снижает пиковую нагрузку на магистральную сеть.

Сравнительный анализ «традиционных методов» и «современных систем» (S2) выявляет принципиальную разницу в эффективности. Заливной полив характеризуется потерями 40–60 % воды на испарение и фильтрацию, низкой равномерностью и зависимостью от рельефа. Дождевание и капельное орошение минимизируют потери, исключая зависимость от рельефа и повышая устойчивость к кратковременным перебоям подачи воды (влага в корнеобитаемом слое сохраняется несколько часов). В результате повышается на 20–40 % эффективность водопользования, на 25–35 % снижаются пиковые нагрузки на сеть.

Сценарий централизованного обслуживания (S3) предлагает решение для хозяйств с ограниченными инвестиционными возможностями: создание мобильных поливальных бригад или кооперацию нескольких хозяйств с единым парком техники. При грамотном планировании графиков (с учетом критических фаз вегетации) и расчете пиков водозабора обеспечивается охват 70–90 % орошаемых площадей. Это промежуточная стратегия поэтапного перехода к собственной технике.

Блок 7. Корректировка мелиоративной системы в связи с изменениями гидрометеорологических условий по инициативе водопользователей или органов исполнительной власти

Мелиоративная система должна адаптироваться к динамике внешней среды: изменению климата, смещению фаз вегетации и трансформации структуры посевов под влиянием рыночных или управленческих решений. Жесткие нормативные режимы водораспределения в этих условиях становятся фактором риска, а гибкость управления – условием устойчивости системы. Сценарное моделирование позволяет заранее оценить последствия изменений и выработать адаптационные меры.

Сценарий изменения структуры посевных площадей (S1) моделирует два противоположных сценария:

– смена структуры посевов в пользу влаголюбивых культур (овощи, картофель, кукуруза) вместо зерновых (пшеница, ячмень) повышает суммарное водопотребление на 15–30 % и увеличивает пиковую нагрузку на сеть;

– переход на засухоустойчивые культуры (просо, сорго) в условиях дефицита воды гарантирует снижение водопотребления на 15–30 %, смещение пиков водозабора на 10–20 дней.

Моделирование обновляет карты водопотребления, пересчитывает графики полива с учетом новых фенологических фаз и выявляет риски дефицита или избытка воды на отдельных участках. Полученные результаты становятся основой для согласованных действий органов управления и водопользователей.

Сценарий адаптации к изменению гидрометеорологических условий (S2) учитывает прогнозируемые изменения: снижение весеннего стока, увеличение продолжительности засух, смещение сроков вегетации. Модель тестирует меры адаптации – приоритетное водоснабжение уязвимых культур в критические фазы, дифференцированный полив, снижение норм на менее значимых этапах, создание резервных емкостей. Эффект от ее внедрения – снижение ущерба от засухи на 20–35 %, сокращение объема недоотпущенной воды на 25–40 % за счет гибких управленческих решений.

Корректировка режимов работы – это переход от статичного нормативного управления к динамическому, прогнозному. Система обретает способность адаптироваться к изменениям климата и экономических приоритетов. В современных условиях устойчивое развитие мелиорации заключается в способности системы трансформироваться вместе с изменяющимися климатическими и экономическими условиями.

ВЫВОДЫ

Проведенная работа по теоретическому моделированию функционирования оросительной системы в 28 сценариях подтверждает, что устойчивость и эффективность мелиоративной инфраструктуры определяются не отдельными элементами, а целостностью подхода к ее эксплуатации и управлению. Базовые сценарии четко фиксируют системные уязвимости – износ сети, дефицит автоматизации, недостаток техники и кадров, устаревшие методы полива. Однако ключевой вывод исследования заключается в другом: каждая из этих проблем имеет научно обоснованный подход решения, а их взаимодополнение формирует качественно новое состояние системы.

Теоретическая значимость исследования состоит в развитии методологии сценарного анализа применительно к мелиоративным системам. Разработанный подход формализует взаимосвязь между климатической вариабельностью, физическим износом инфраструктуры и операционными ограничениями, предлагая воспроизводимый алгоритм оценки надежности и эффективности водохозяйственных объектов в условиях гидрологической неустойчивости.

Моделирование показало, что даже точечные меры дают ощутимый эффект: локальная реконструкция снижает дефицит воды на концевых участках на 30–50 %, частичная автоматизация сокращает колебания уровней на 30–50 %, а мобильная техника уменьшает время ликвидации аварий в 5–7 раз. Однако максимальная отдача достигается при комплексной стратегии, заключающейся в сочетании механизированного обслуживания, цифрового управления, оптимизированной гидрометрической сети и адаптивного водораспределения. В совокупности такие меры способны повысить коэффициент полезного использования воды до 0,85–0,90, снизить нецелевые потери на 35–50 % и обеспечить устойчивость системы к климатическим и эксплуатационным воздействиям.

Важно подчеркнуть, что эффективность решений зависит не от масштаба вложений, а от их последовательности и обоснованности. Поэтапное внедрение автоматизации, оптимизация парка техники, централизованное обслуживание хозяйств с ограниченными ресурсами – все эти подходы превращают ограниченные возможности в управляемые параметры развития.

Сценарный метод, примененный в представленной работе, доказал свою эффективность как инструмент проактивного управления. Он позволяет заблаговременно спрогнозировать критические ситуации, обосновывать приоритетное распределение ресурсов и в конечном итоге адаптировать систему к изменяющейся реальности. Возможности непосредственного использования разработанных сценариев и количественных индикаторов для выбора приоритетов модернизации на уровне конкретных водопользователей и бассейновых управлений составляют практическую значимость исследования.

Результаты исследования формируют методологическую основу для разработки «дорожных карт» модернизации мелиоративных систем. Перспективы дальнейших исследований связаны с верификацией имитационной модели на реальных объектах орошения, расширением сценарного набора за счет интеграции экономических факторов (стоимость воды, тарификация, оценка возврата инвестиций) и внедрением алгоритмов машинного обучения для динамической калибровки параметров в режиме реального времени.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTERESTS

The authors declare no relevant conflict of interests.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ольгаренко Г. В., Васильев С. М., Балакай Г. Т. Концепция Государственной программы «Восстановление и развитие мелиоративного комплекса Российской Федерации на период 2020–2030 годов». Новочеркасск: РосНИИПМ, 2019. 128 с.

2. Шевченко В. А., Исаева С. Д., Дедова Э. Б. Новый этап развития мелиоративно-водохозяйственного комплекса Российской Федерации // Вестник Российской академии наук. 2023. Т. 93. № 4. С. 355–361. https://doi.org/10.31857/S086958732-3040114. EDN: SDJBQR
3. Масный Р. С., Сенчуков Г. А., Абраменко И. П. Актуальные вопросы эффективности водопользования в мелиоративном комплексе современной России // Экология и водное хозяйство. 2023. Т. 5. № 2. С. 1–13. https://doi.org/10.31774/2658-7890-2023-5-2-1-13
4. Угрюмова А. А., Паутова Л. Е., Гришаева О. Ю. Точки роста эффективности использования мелиоративного потенциала России // Вестник Челябинского государственного университета. 2021. № 10 (456). С. 51–58.
5. Александровская Л. А. Проблемы эффективного использования водных ресурсов в агромелиоративной сфере // Экономика и экология территориальных образований. 2019. Т. 3. № 4. С. 82–87. https://doi.org/10.23947/2413-1474-2019-3-4-82-87. EDN: HMLRCT
6. Рогачев Д. А. Повышение эффективности управления водопользованием оросительных систем: методология и технология // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2025. Т. 26. № 4. С. 840–851. https://doi.org/I 10.30766/2072-9081.2025.26.4.840-851. EDN: PMGNHD
7. Ткачев А. А., Ольгаренко И. В. Современные проблемы в управлении водо-распределением в магистральных каналах оросительных систем // Научный журнал Российского НИИ проблем мелио-рации. 2021. Т. 11. № 2. С. 1–23. https://doi.org/10.31774/2222-1816-2021-11-2-1-23. EDN: NTRFMJ
8. Шаповалов В. Л., Корниенко Е. В. Способ формирования пространственной основы для моделирования // Транспорт: наука, образование, производство: материалы межд. научно-практ. конф., Ростов-на-Дону, 24–26 апреля 2024 г. Ростов-на-Дону: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2024. С. 58–62. EDN: MXAKOD
9. Зарубин В. В., Титаренко Д. В., Бочкарева Н. А. Использование локального управления водораспределением при повышении эффективности оросительных систем // Вестник мелиоративной науки. 2021. № 1. С. 15–19. EDN: SMNHFC
10. Батыкова А. Ж., Бейшекеев К. К. Автоматизация системы управления в оросительных системах для повышения эффективности водопользования // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. 2025. Т. 25, № 4. С. 20–27. https://doi.org/10.36979/1694-500X-2025-25-4-20-27. EDN: LKOOUK
11. Ольгаренко В. И., Ольгаренко И. В., Коржов И. В. Функции планирования водопользования на оросительных системах с использованием современных IT-технологий // Мелиорация и водное хозяйство. 2025. № 1. С. 34–40.
12. Сенчуков Г. А., Пономаренко Т. С. Применение компьютерного моделирования режимов водопотребления и водораспределения для повышения эффективности организации водопользования на оросительных системах // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2016. № 4(64) С. 27–31.
13. Юрченко И. Ф. Интеграция цифровых систем в сферу агропроизводства на мелиорированных землях // Международный технико-экономический журнал. 2020. № 4. С. 73–80. https://doi.org/10.34286/1995-4646-2020-73-4-73-80. EDN: JRBYVH
14. Бандурин М. А., Руденко А. А. Мониторинг технического состояния и оценка остаточного ресурса длительно эксплуатируемых гидротехнических сооружений // Передовые исследования Кубани: сб. материалов Ежегодной отчетной конференции грантодержателей Кубанского научного фонда, Сочи, 15–17 мая 2023 года. Краснодар: Кубанский научный фонд, 2023. С. 58–62. EDN: RTGICA.
15. Сенчуков Г. А., Гостищев В. Д. Анализ состояния и перспективы водораспределения на Азовской оросительной системе // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. Т. 95. № 1. 2025. С. 137–155.

16. Бакланова Д.В., Баев О.А. Оценка гидравлической шероховатости русла магистрального канала // Природообустройство. 2023. № 1. С. 76–81. https://doi.org/10.26897/1997-6011-2023-1-76-81
17. Талалаева В. Ф., Баев О. А. Результаты оценки коэффициента полезного действия необлицованных мелиоративных каналов // Мелиорация и гидротехника. 2025. Т. 15, № 1. С. 23–42. https://doi.org/10.31774/2712-9357-2025-15-1-23-42

REFERENCES

1. Olgarenko G. V., Vasiliev S. M., Balakai G. T. Concept of the State Program “Restoration and Development of the Land Reclamation Complex of the Russian Federation for 2020–2030”. Novocherkassk: RosNIIPM, 2019. 128 p.
2. Shevchenko V. A., Isaeva S. D., Dedova E. B. A New Stage in the Development of the Land Reclamation and Water Management Complex of the Russian Federation. *Vestnik of the Russian Academy of Sciences*. 2023. Vol. 93. No. 4. P. 355–361. https://doi.org/10.31857/S086958-7323040114
3. Masny R. S., Senchukov G. A., Abramenko I. P. Current Issues of Water Use Efficiency in the Land Reclamation Complex of Modern Russia. *Ecology and Water Management.* 2023. Vol. 5. No. 2. P. 1–13. https://doi.org/10.31774/2658-7890-2023-5-2-1-13
4. Ugryumova A. A., Pautova L. E., Grishaeva O. Yu. Growth Points for Improving the Efficiency of Russia’s Land Reclamation Potential. *Bulletin of Chelyabinsk State University.* 2021. No. 10 (456). P. 51–58.
5. Aleksandrovskaya L. A. Problems of Efficient Water Resources Use in the Agro-Reclamation Sector. *Economics and Ecology of Territorial Formations*. 2019. Vol. 3. No. 4. P. 82–87. https://doi.org/10.23947/2413-1474-2019-3-4-82-87
6. Rogachev D. A. Improving the Efficiency of Water Management in Irrigation Systems: Methodology and Technology. *Agrarian Science of the Euro-North-East.* 2025. Vol. 26. No. 4. P. 840–851. https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.4.840-851
7. Tkachev A. A., Olgarenko I. V. Modern Problems in Water Distribution Management in Main Canals of Irrigation Systems. *Scientific Journal of the Russian Research Institute of Land Reclamation Problems*. 2021. Vol. 11. No. 2. P. 1–23. https://doi.org/10.31774/2222-1816-2021-11-2-1-23
8. Shapovalov V. L., Kornienko E. V. Method of Forming a Spatial Framework for Modeling. In: Transport: Science, Education, Production: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Rostov-on-Don, April 24–26, 2024. Rostov-on-Don: Rostov State Transport University, 2024. P. 58–62.
9. Zarubin V. V., Titarenko D. V., Bochkareva N. A. Use of Local Water Distribution Control to Improve the Efficiency of Irrigation Systems. *Bulletin of Reclamation Science*. 2021. No. 1. P. 15–19.
10. Batykova A. Zh., Beishekeev K. K. Automation of Control Systems in Irrigation Networks to Enhance Water Use Efficiency. *Bulletin of the Kyrgyz-Russian Slavic University*. 2025. Vol. 25. No. 4. P. 20–27. https://doi.org/10.36979/1694-500X-2025-25-4-20-27
11. Olgarenko V. I., Olgarenko I. V., Korzhov I. V. Water Use Planning Functions in Irrigation Systems Using Modern IT Technologies. Land Reclamation and Water Management. 2025. No. 1. P. 34–40.
12. Senchukov G. A., Ponomarenko T. S. Application of Computer Modeling of Water Consumption and Distribution Regimes to Improve the Efficiency of Water Use Organization in Irrigation Systems. *Ways to Improve the Efficiency of Irrigated Agriculture*. 2016. No. 4 (64). P. 27–31.
13. Yurchenko I. F. Integration of Digital Systems into Agricultural Production on Reclaimed Lands. *International Technical and Economic Journal.* 2020. No. 4. P. 73–80. https://doi.org/10.34286/1995-4646-2020-73-4-73-80
14. Bandurin M. A., Rudenko A. A. Monitoring of Technical Condition and Assessment of Residual Life of Long-Operated Hydraulic Structures. In: Advanced Research of Kuban: Proceedings of the Annual

Report Conference of Grant Holders of the Kuban Scientific Foundation, Sochi, May 15–17, 2023. Krasnodar: Kuban Scientific Foundation, 2023. P. 58–62.
15. Senchukov G. A., Gostishchev V. D. Analysis of the Current State and Prospects of Water Distribution in the Azov Irrigation System. *Ways to Improve the Efficiency of Irrigated Agriculture*. 2025. Vol. 95. No. 1. P. 137–155.
16. Baklanova D. V., Baev O. A. Assessment of Hydraulic Roughness of the Main Canal Bed. *Environmental Engineering*. 2023. No. 1. P. 76–81. https://doi.org/10.26897/1997-6011-2023-1-76-81
17. Talalaeva V. F., Baev O. A. Results of Efficiency Coefficient Assessment for Unlined Reclamation Canals. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2025. Vol. 15. No. 1. P. 23–42. https://doi.org/10.31774/2712-9357-2025-15-1-23-42

Сведения об авторах:

Гостищев Вячеслав Дмитриевич, канд. с.-х. наук, ведущий научный сотрудник, ФГБНУ «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации», Россия, 346421, Ростовская область, г. Новочеркасск, пр. Баклановский, 190; https://orcid.org/0000-0002-0868-0712; e-mail: nb515@mail.ru

Таисия Сергеевна Пономаренко, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, ФГБНУ «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации», Россия, 346421, Ростовская область, г. Новочеркасск, пр. Баклановский, 190; https://orcid.org/0000-0002-2003-1686; e-mail: ponomarenko.taisia@yandex.ru

Алексей Николаевич Рыжаков, научный сотрудник, ФГБНУ «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации», Россия, 346421, Ростовская область, г. Новочеркасск, пр. Баклановский, 190; http://orcid.org/0000-0002-9268-255X; e-mail: xrust.89@bk.ru

Бреева Анна Викторовна, научный сотрудник, ФГБНУ «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации», Россия, 346421, Ростовская область, г. Новочеркасск, пр. Баклановский, 190; http://orcid.org/0000-0001-5835-1231; e-mail: ann22hp@mail.ru

About the author:

Vyacheslav D. Gostishchev, Candidate of Agricultural Sciences, Leading Researcher, Federal State Budgetary Scientific Institution “Russian Research Institute of Land Reclamation Problems”, 190 Baklanovsky Prospect, Novocherkassk, Rostov Oblast, 346421, Russia; https://orcid.org/0000-0002-0868-0712; e-mail: nb515@mail.ru

Taisia S. Ponomarenko, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Federal State Budgetary Scientific Institution “Russian Research Institute of Land Reclamation Problems”, 190 Baklanovsky Prospect, Novocherkassk, Rostov Oblast, 346421, Russia; https://orcid.org/0000-0002-2003-1686; e-mail: ponomarenko.taisia@yandex.ru

Aleksey N. Ryzhakov, Researcher, Federal State Budgetary Scientific Institution “Russian Research Institute of Land Reclamation Problems”, 190 Baklanovsky Prospect, Novocherkassk, Rostov Oblast, 346421, Russia; https://orcid.org/0000-0002-9268-255X; e-mail: xrust.89@bk.ru

Anna V. Breeva, Researcher, Federal State Budgetary Scientific Institution “Russian Research Institute of Land Reclamation Problems”, 190 Baklanovsky Prospect, Novocherkassk, Rostov Oblast, 346421, Russia; http://orcid.org/0000-0001-5835-1231; e-mail: ann22hp@mail.ru

Поступила в редакцию / Received 13.04.2026.
Поступила после рецензирования / Revised 14.05.2026.
Принята к публикации / Accepted 23.05.2026.

УДК 556.048

https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-3-43-64

Оригинальная статья/Original paper

Изменение гидрологического режима реки Иртыш на территории Республики Казахстан в условиях функционирования Верхне-Иртышского каскада водохранилищ

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

bolgovmv@mail.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. В статье рассматриваются особенности формирования водных ресурсов в казахстанской части бассейна р. Иртыш в связи с трансграничным характером реки и необходимостью получения оценок экологического стока, требуемых для согласования перспективных планов водопользования на трансграничном участке. Обсуждаются основные черты гидрологического режима рек бассейна, особенности формирования и регулирования стока. **Методы.** Основной метод исследования – статистический анализ временных рядов годового и сезонного стока для основных пунктов гидрологических наблюдений на основном русле р. Иртыш и сравнительный анализ полученных характеристик для различных периодов хозяйственной деятельности в бассейне. **Результаты.** На основе собранных данных гидрологического мониторинга получены оценки изменений состояния водных ресурсов в результате масштабного гидротехнического строительства. Рассмотрены изменения годового и сезонного стока рек. Получены количественные оценки водных ресурсов, приходящих на территорию Российской Федерации из Казахстана, за различные периоды хозяйственного воздействия.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Иртыш, водные ресурсы, регулирование стока, изменения гидрологического режима, трансграничные водные проблемы

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: 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; EDN: TCQWNX

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

The Irtysh River hydrological regime changes on the territory of Republic of Kazakhstan in the conditions of the Upper Irtysh reservoir cascade functioning

Aleksey E. Kosolapov[1], Mikhail V. Bolgov[1,3], Dmitry V. Savostitskiy[2], Irina A. Filippova[3]

bolgovmv@mail.ru

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

ABSTRACT

Relevance. The article deals with specific features of water resources formation in the Kazakh part of the Irtysh River basin in connection with the river transboundary character and the necessity of obtaining the ecological runoff assessment required for agreement of prospective plans of water use at the transbondary river range. The article discusses the basin rivers' hydrological regime main features as well as features of the runoff formation and regulation. **Methods.** We used statistical analysis of the annual and seasonal runoff temporal series for the main hydrological observation stations at the Irtysh River main channel and comparative analysis of the obtained characteristics for the different periods of economic activities in the basin as main methods of research. **Results.** We have obtained assessments of the water resources state resulted from dimensioned hydrological construction and based on the hydrological monitoring collected data. We have considered changes of annual and seasonal river runoff. Quantitative assessments of water resources inflowing to the territory of the Russian Federation from Kazakhstan over the different periods of economic impact have been obtained.

KEYWORDS: the Irtysh River, water resources, runoff regulation, hydrological regime changing, transboundary water problems

FOR CITATION: Kosolapov A. E., Bolgov M. V., Savostitskiy D. V., Filippova I. A. The Irtysh River hydrological regime changes on the territory of Republic of Kazakhstan in the conditions of the Upper Irtysh reservoir cascade functioning. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2026. No. 3. P. 43–64. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-3-43-64; EDN: TCQWNX

ВВЕДЕНИЕ

Водные ресурсы р. Иртыш формируются на территории четырех государств (Монголии, Китая, Казахстана и России) в различных физико-географических условиях и испытывают заметную антропогенную нагрузку, заключающуюся в основном в регулировании стока, осуществляемом преимущественно в энергетических целях, а также в заборе воды на различные нужды.

Трансграничный характер реки определяет проблемы методического и информационного характера, возникающие при оценке происходящих из-

менений стока и расчете величин допустимых изъятий при урегулировании трансграничных водных отношений между Республикой Казахстан и Российской Федерацией. Основная сложность при принятии водохозяйственных управленческих решений заключается в отсутствии достоверной информации о водопотреблении и водоотведении как на территории Казахстана, так и на китайской части бассейна Иртыша.

Гидрологический режим реки изучается на очень ограниченном числе пунктов наблюдений, что не способствует получению достоверных оценок стока (актуальных и прогнозируемых).

Для обеспечения необходимыми данными решения задач трансграничного водопользования в исследуемой части бассейна Иртыша собрана из открытых источников и обработана гидрологическая информация в виде временных рядов годового, сезонного и месячного стока, что в итоге позволило установить характер происходящих изменений гидрологического режима, определить статистические параметры распределений стока и осуществить приведение расчетных значений в створы, соответствующие точкам пересечения государственных границ.

Сложность получения достоверных оценок характеристик стока Иртыша в условиях интенсивного хозяйственного влияния заключается в недостаточном числе пунктов наблюдений на территории Казахстана. Ближайшие к границе с РФ и более или менее надежные открытые данные по стоку имеются в створе Усть-Каменогорского гидроузла. На участке от Усть-Каменогорской ГЭС до государственной границы значительных притоков не впадает, гидрограф половодья сильно трансформируется за счет поймы. Отсутствие данных по сбросам с нижерасположенной Шульбинской ГЭС и в целом надежных измерений на этом бесприточном участке сильно затрудняет расчеты русловых водохозяйственных балансов и обсуждение экологически допустимых режимов стока.

Происходящие под влиянием хозяйственной деятельности изменения на различных участках бассейна Иртыша обсуждались в ряде публикаций казахских и российских авторов в изданиях различного характера, в т. ч. и в диссертационных работах. В данной статье выводы о произошедших изменениях (нарушениях) стационарности получены на основе продолжительных рядов с учетом данных наблюдений последних лет.

Полученные оценки необходимы для согласования планов развития водопользования, установления экологически допустимых объемов изъятий стока и решения прочих вопросов, возникающих при реализации Соглашения между Правительством Республики Казахстан и Правительством Российской Федерации о совместном использовании и охране трансграничных водных объектов от 7 сентября 2010 г.[1]

1 Соглашение между Правительством Республики Казахстан и Правительством Российской Федерации о совместном использовании и охране трансграничных водных объектов от 7 сентября 2010 г. // Бюллетень международных договоров. 2011. № 4. С. 73.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Общая характеристика климатических условий и гидрологического режима Иртыша

Климат в бассейне р. Иртыш континентальный, что определяет продолжительную холодную зиму (для большей части территории) и сравнительно теплое, а на юге жаркое, лето. В целом в бассейне Иртыша средняя годовая температура воздуха в северной части – 1,4 °С, центральной – около 0 °С, на юге – +1,5…+2 °С. Переход через 0 °С весной в среднем течении Иртыша наблюдается в начале второй декады апреля, в южной части Иртыша – в начале апреля. Соответственно распространяется с юга на север фронт снеготаяния, определяющий сроки начала половодья на реках. Снежный покров устанавливается на юге в среднем в конце ноября, на севере – в конце октября, а сходит соответственно в начале апреля и в начале мая.

Осадки зонально уменьшаются с запада на восток и с севера на юг и составляют для большей части территории 400–500 мм. Наибольшее количество осадков (75–80 %) выпадает в теплое время года. В горных районах на выпадение осадков сильно влияет рельеф местности, поэтому для их определения используются зависимости от средней высоты водосбора.

Различны на рассматриваемой территории и условия снеготаяния. В равнинных и низкогорно-предгорных участках снеготаяние идет преимущественно по солярному типу, велико испарение талой воды в начале снеготаяния. Снежный покров может сходить полностью до установления положительных среднесуточных температур.

Характерной особенностью равнинных рек бассейна являются потери на русловую аккумуляцию в маловодные годы. Весь или почти весь сток малых рек в маловодные годы может пойти на заполнение русловых емкостей с последующим испарением в летний период.

Разнообразие природных условий на исследуемой территории определяет различия в условиях формирования стока в разных частях водосборной площади. Значительная часть левобережья Иртыша, а также равнинное правобережное Прииртышье относятся к районам недостаточного увлажнения[2] [1]. Поверхностный сток на равнинных и низкогорно-равнинных территориях формируется исключительно за счет талых вод. В летнее время дождевые осадки практически полностью расходуются на испарение и поверхностного стока не образуют. Подземная составляющая стока невелика, а на временных водотоках практически отсутствует. На реках с преобладанием низкогорно-среднегорного рельефа левобережной части бассейна подземное питание увеличивается, но и здесь талые воды преобладают. В питании большинства рек правобережной части бассейна

2 Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 15. Алтай и Западная Сибирь. Вып. 1. Горный Алтай и Верхний Иртыш. Ч. 1. Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1969 г. 316 с.

Иртыша преобладают талые снеговые воды. В верховьях рек доля подземного и дождевого питания увеличивается, появляется ледниковое питание.

В целом можно сделать вывод, что на всей территории бассейна Иртыша основной фазой водного режима является половодье, в которую проходит основная часть стока и формируются максимальные расходы воды. Для максимальных в году расходов воды р. Иртыш у г. Омска начиная с 1960 г. характерно их уменьшение под воздействием Верхне-Иртышского каскада водохранилищ, однако уже у г. Тобольска статистически значимых изменений не обнаруживается. Наименьшие в году минимальные расходы воды в бассейне Иртыша наблюдаются в зимний сезон. В последние десятилетия происходит статистически значимое их увеличение, прежде всего по причине регулирования стока.

Особенностью многолетних колебаний водных ресурсов Иртыша является наличие многоводных и маловодных фаз, длительность которых может достигать нескольких десятилетий, и отсутствие статистически значимых однонаправленных трендов. Более подробное описание особенностей многолетних колебаний стока и условий формирования водных ресурсов в бассейне Иртыша представлено в работах[3] [2–4].

Гидрометеорологическая изученность и климатические изменения стока

Для анализа водного режима Иртыша использованы данные регулярных наблюдений за стоком реки на казахстанской и российской частях бассейна. В бассейне р. Иртыш в российской части до г. Тобольска действуют три гидрологических поста (табл. 1). Тобольск – уже внутрироссийский пост, но данные по нему используются для сравнительных оценок влияния изъятий стока на водные ресурсы. На территории Казахстана данные гидрологических наблюдений доступны по двум постам, расположенным на основном русле реки.

Исходными материалами для анализа многолетних колебаний стока рек послужили сведения о месячном, годовом, максимальном и минимальном летне-осеннем и зимнем стоке за весь период наблюдений. Используемые в работе гидрологические ряды сформированы из различных источников: база данных ВНИИГМИ-МЦД, содержит расходы воды до 1985 г., АИС ГМВО – с 2008 г., Гидрологические ежегодники Казгидромета, находящиеся в открытом доступе, архивы ГГИ и МГУ, подготовленные путем оцифровки ежегодников, опубликованные в разные годы.

3 Схема комплексного использования и охраны водных объектов бассейна реки Иртыш. Нижне-Обское бассейновое водное управление / ФГУП РосНИИВХ, 2014. Режим доступа: https://nobwu.ru/index.php/ndvskiovo (дата обращения: 25.06.2025).

Анализ многолетних данных гидрологических наблюдений, оценка характеристик стока производились в соответствии с рекомендациями СП 529.1325800.2023.[4]

Таблица 1. Сведения о гидрологических постах в бассейне Иртыша, данные по которым использованы в работе

Table 1. Information about hydrological stations in the Irtysh River basin, these data has been used in this work

Код	Название водного объекта – пост	Расстояние		Площадь водосбора, км^2
		от истока, км	от устья, км	
11001	р. Иртыш (Черный Иртыш) – с. Буран	560	3688	55 900
11018	р. Иртыш – ГЭС Усть-Каменогорская	700	3089	146 000
11048	р. Иртыш – г. Омск	2424	1824	769 000
11634	р. Иртыш – Татарка	2226	2022	596 000
11056	р. Иртыш – г. Тобольск	6470	416	958 000

Государственным гидрологическим институтом (ГГИ) в 2016–2019 гг. выполнялись исследования, одной из основных задач которых являлась оценка изменений основных характеристик стока рек в условиях происходящих климатических преобразований [5]. Исследования ГГИ показали, что в результате климатических изменений с середины 1980-х годов на реках российской части бассейна Иртыша наблюдается увеличение годового стока в пределах 10–20 % по сравнению с предшествующим многолетним периодом. Значимые положительные тренды выявлены в минимальном зимнем стоке рек и в целом в стоке за холодный сезон. К сожалению, такой же вывод про водные ресурсы в казахстанской части бассейна сделать сложно, т. к. сток Иртыша сильно зарегулирован, а современные данные по другим рекам казахстанской части отсутствуют. Результаты сценарных расчетов изменений стока Черного Иртыша под влиянием прогнозируемых изменений климата приведены в работе [6].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Трансграничные проблемы водопользования и характеристика водохозяйственного комплекса в бассейне Иртыша

В верхнем течении р. Иртыш (Черный Иртыш) протекает по территории Или-Казахского автономного округа Синьцзян-Уйгурского автономного района Китайской Народной Республики. Небольшая часть водосборной площади находится в границах Баян-Ульгийского аймака Монгольской Народной Республики. Водосборная площадь Иртыша в верхнем и среднем течении расположена на территории Республики Казахстан в границах Восточно-Ка-

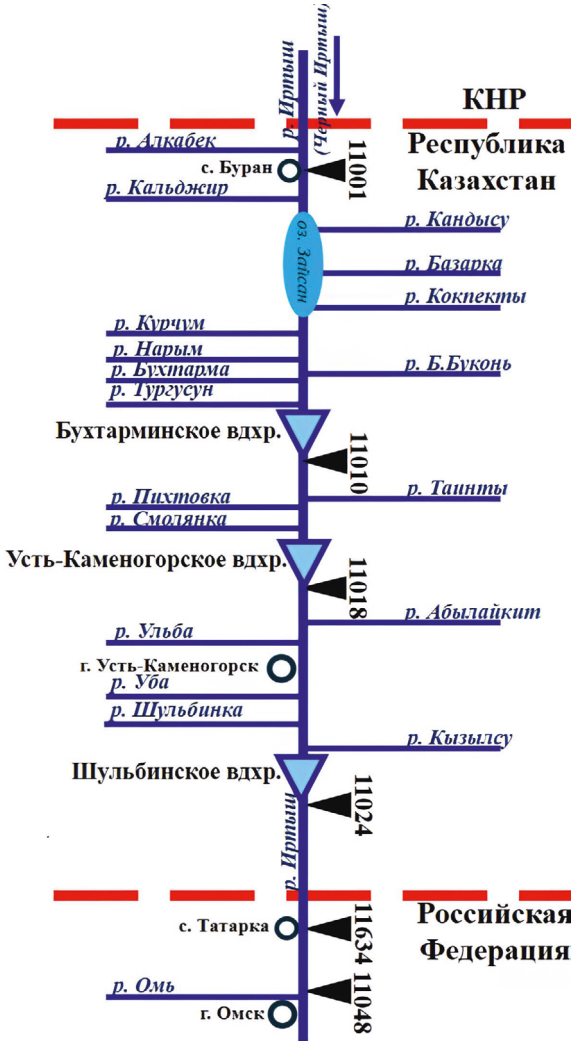
4 СП 529.1325800.2023. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. М.: Минстрой России, 2023. 103 с.

захстанской, Павлодарской, Акмолинской, Северо-Казахстанской и Костанайской областей; небольшие территории водосбора находятся в Карагандинской и Улытауской областях (табл. 2).

Таблица 2. Доли площади бассейна Иртыша, расположенные в пределах территорий государств

Table 2. The Irtysh River basin area fractions located within the states' boundaries

Страна	Площадь в бассейне р. Иртыш, тыс. км^2	Доля площади государства в бассейне р. Иртыш, %
Российская Федерация	683,2	60,6
Республика Казахстан	392,4	34,8
Китайская Народная Республика	51,3	4,5
Монгольская Народная Республика	1,4	0,1



Использование водных ресурсов Иртыша различно на китайской и казахстанской частях водосбора. На территории Китая с 2000 г. введен в строй канал Иртыш (Черный Иртыш) – Карамай, забор воды в который возрос от 1–1,5 км^3/год до 2 км^3/год и более в настоящее время [7]. На территории Республики Казахстан сток р. Иртыш зарегулирован каскадом Верхне-Иртышских водохранилищ (Бухтарминское, Усть-Каменогорское, Шульбинское), крупнейшим из которых является Бухтарминское (рис. 1).

Рис. 1. Схема расположения основных водохранилищ и пунктов гидрологических наблюдений в бассейне р. Иртыш на территории Казахстана и России (до г. Омска)

Fig. 1. The scheme of the main reservoirs and hydrological observation stations' location in the Irtysh River basin on the territories of Kazakhstan and Russia (up to the city of Omsk)

По каналу Иртыш – Караганда производится переброска части стока реки в Карагандинскую и Акмолинскую области, а также для водообеспечения столицы Республики Казахстан – г. Нур-Султан (Астана) [2].

Результаты исследования водохозяйственных проблем бассейна Иртыша освещены в ряде работ [8–12]. Далее дадим краткую характеристику водохозяйственного комплекса бассейна и приведем основные сведения о гидроузлах.

Водохранилища Верхне-Иртышского каскада осуществляют многолетнее и сезонное регулирование стока Иртыша (табл. 3). Заполнение водохранилищ происходило в период с 1962–1967 гг.

Бухтарминская ГЭС (БГЭС) осуществляет многолетнее регулирование стока Иртыша, а также, в случае необходимости, попуски для покрытия недостатка объемов воды для весеннего затопления его поймы. Высокая степень регулирования стока, проводимого Бухтарминским водохранилищем, определяет работу Усть-Каменогорского водохранилища небольшой емкости, которое используется для внутрисуточного регулирования. В навигационный период Бухтарминское водохранилище производит попуски для обеспечения требуемых навигационных расходов в нижнем бьефе Усть-Каменогорской ГЭС и удовлетворения водопотребителей до створа плотины Шульбинской ГЭС (ШГЭС).

Водохранилище Шульбинской ГЭС осуществляет сезонное регулирование боковой приточности и обеспечивает весеннее обводнение поймы за счет сработки собственной полезной емкости и пропуска транзитом половодья боковой приточности между створами плотины БГЭС и ШГЭС. При этом в случае недостаточной боковой приточности Бухтарминское водохранилище работает в режиме компенсирования.

Таблица 3. Основные характеристики водохранилищ Верхне-Иртышского каскада
Table 3. Main characteristics of the Upper-Irtysh cascade reservoirs

Наименование характеристики	Единица измерения	Значение		
		Бухтарминская ГЭС	Усть-Каменогорская ГЭС	Шульбинская ГЭС
Нормальный подпорный уровень (НПУ)	мБс	394,84	327,84	240,0
Уровень мертвого объема (УМО)	мБс	387,84	326,84	232,0
Емкость водохранилища при НПУ	км^3	49,62	0,66	2,39
Емкость водохранилища при УМО	км^3	18,81	0,62	0,92
Полезный объем	км^3	30,81	0,035	1,47
Многолетняя составляющая емкости	км^3	26,02	–	–
Площадь зеркала при НПУ	км^2	5490	37,9	254,8
в т. ч. оз. Зайсан	км^2	3750		
Площадь зеркала водохранилища при УМО	км^2	3140	35,5	130,0
оз. Зайсан (в естественных условиях)	км^2	2000		

В состав участников Верхне-Иртышского водохозяйственного комплекса (ВК) входят: энергетика, водный транспорт, промышленность и население, рыбное и сельское хозяйство.

Из Шульбинского водохранилища в весенний период производится природоохранный попуск с целью поддержания в среднем течении р. Иртыш близких к естественным условий при прохождении весенних паводков. При соблюдении условий проведения попуска обеспечивается поддержание кормовой базы для сельского хозяйства Павлодарской области, улучшаются условия для рыбного хозяйства [13–14].

Величина попуска складывается из расходов Бухтарминской ГЭС, работающей в энергетическом режиме, боковой приточности на участке Бухтарминская – Шульбинская ГЭС и расходов сработки Шульбинского водохранилища. В случае необходимости (при маловодном паводке) из Бухтарминской ГЭС предусматриваются повышенные энергетические сбросы с расходами до 1100 м^3/с. Объем попуска составляет 4,8 км^3 (с учетом расходов до 2000 м^3/с на заключительной фазе попуска). Продолжительность попуска – от 15 до 21 дня.

Водохозяйственный комплекс бассейна Иртыша характеризовался значительными величинами забора воды и объемами безвозвратного водопотребления. К середине 1980-х годов суммарный объем забора воды из речной сети и подземных вод в бассейнах рек, расположенных в пределах Советского Союза, составил более 10 км^3/год при сбросе в водные объекты примерно 5 км^3/год. При этом для российской и казахстанской частей бассейна забор и сброс составляли соответственно ≈ 6 км^3/год и 4 км^3/год[5]. После распада СССР произошло резкое снижение водопотребления. Так, в российской части бассейна общий забор поверхностных и подземных вод в настоящее время составляет около 2 км^3/год, при сбросе ≈ 1,6 км^3/год[5]. Данные по современному использованию речных и подземных вод на казахстанской части бассейна отсутствуют.

Оценка современного распределения суммарного водозабора в бассейне Иртыша между тремя странами такова: Казахстан – 50,8 %, Китай – 25,5 %, Россия – 23,7 % [7].

Многолетние изменения стока рек бассейна Иртыша под влиянием хозяйственной деятельности

Из общего объема стока Верхнего Иртыша примерно 25 % формируется на территории Китая и 75 % – на территории Казахстана (из них 40 % годового стока приходится на сток малых рек, непосредственно впадающих в Иртыш от границы с Китаем до устья р. Бухтармы, а 35 % приходится на реки Ульба, Уба и малые притоки, впадающие в р. Иртыш ниже г. Усть-Каменогорска. Ниже впадения р. Убы до г. Омска (р. Омь) на протяжении около 1200 км значительных притоков Иртыш не принимает.

5 Ресурсы поверхностных и подземных вод, их использование и качество. 1982–2015. Ежегодное издание. Водный кадастр Российской Федерации, 1982–2015.

Влияние хозяйственной деятельности на территории Казахстана и КНР на сток Иртыша существенно ослабевает ниже по течению от г. Омска за счет значительной боковой приточности, у г. Тобольска доля стока реки, сформировавшегося на территории России, составляет 61 %.

В качестве основных сведений о режиме р. Иртыш на участке от границы Республики Казахстан и Российской Федерации до г. Омска использованы данные по четырем гидрологическим постам на территории России и Казахстана (р. Иртыш – с. Буран, р. Иртыш – с. Татарка, р. Иртыш – ГЭС Усть-Каменогорская, р. Иртыш – г. Омск) (см. рис. 1).

Для оценки происходящих изменений стока р. Иртыш и расчета величин допустимых изъятий при урегулировании трансграничных водных отношений между РК и РФ необходимо определить статистические параметры распределений стока и привести их в створы, соответствующие точкам пересечения государственных границ.

В качестве пояснений к предлагаемой методике расчетов необходимо отметить следующее:

– водомерный пост р. Иртыш – с. Буран фиксирует сток Иртыша, поступающий на территорию Казахстана из Китая. Выше него, на казахстанской части бассейна Иртыша, расположено несколько мелких притоков, сток которых незначителен;

– гидропост р. Иртыш – с. Татарка является наиболее близким к государственной границе РК и РФ, но наблюдения за стоком начаты с 1984 г.;

– данные по посту р. Иртыш – г. Усть-Каменогорск включают измерения на гидрологическом посту до создания ГЭС и собственно сбросы с нее после строительства. Есть небольшая разница в площадях водосборов, соответствующих этим гидропостам;

– наиболее продолжительные наблюдения за стоком р. Иртыш имеются по гидрологическому посту р. Иртыш – г. Омск. Ряд наблюдений составляет 100 лет и может быть использован для продления стокового гидрологического ряда по с. Татарка;

– в период с 1962 по 1967 г. включительно осуществлялось заполнение водохранилищ Верхне-Иртышского каскада, поэтому данные наблюдений за указанный период не учитывались при анализе режимов и параметров стока.

Анализ гидрологического режима р. Иртыш на участке от границы КНР и РК до гидропоста р. Иртыш – г. Омск (включительно) составлял следующие исследования и оценки:

– продление стокового ряда р. Иртыш в створе с. Татарка за условно естественный период до 1961 г.;

– оценку изменений годового стока р. Иртыш в створах наблюдений, в т. ч. за периоды до и после заполнения водохранилищ;

– оценку изменений сезонного стока р. Иртыш (в периоды: апрель – август; сентябрь – ноябрь; декабрь – март) в створах наблюдений, в т. ч. за периоды до и после заполнения водохранилищ;

– анализ внутригодового распределения стока в створах наблюдений, в т. ч. за периоды до и после заполнения водохранилищ;

– анализ среднемесячных расходов р. Иртыш в створах наблюдений.

В табл. 4 представлены оценки норм стока (средних значений) для выделенных участков и периодов, полученные по данным наблюдений.

Таблица 4. Средние значения стока для выделенных периодов для постов на р. Иртыш на участке от границы КНР – РК до границы РК – РФ

Table 4. The runoff average values for the selected periods for the stations at the Irtysh River at the range from the Chinese-Russian frontier to the Kazakh-Russian frontier

Река – пункт	Период наблюдений, гг.	Средний годовой расход, м³/с		
		Весь период наблюдений	Период до начала заполнения вдхр в 1961 г.	Период после окончания заполнения вдхр в 1968 г.
р. Иртыш (Черный Иртыш) – с. Буран	1938–2022	288	324	274
р. Иртыш – ГЭС Усть-Каменогорская	1903–1961	589	623	567
р. Иртыш – с. Татарка	1983–2023	795	–	795
р. Иртыш – г. Омск	1923–2023	881	932	861

Для приведения рядов годового и месячного стока р. Иртыш в створе с. Татарка к многолетнему периоду использованы регрессионные уравнения, параметры которых оценивались по данным наблюдений. График зависимости объема годового стока р. Иртыш в створе с. Татарка от объема стока в створе г. Омска за периоды 1983/1984–1984/1985, 1989/1990–2022/2023 гг. показывает тесную связь годового стока в створах г. Омска и с. Татарка (рис. 2).

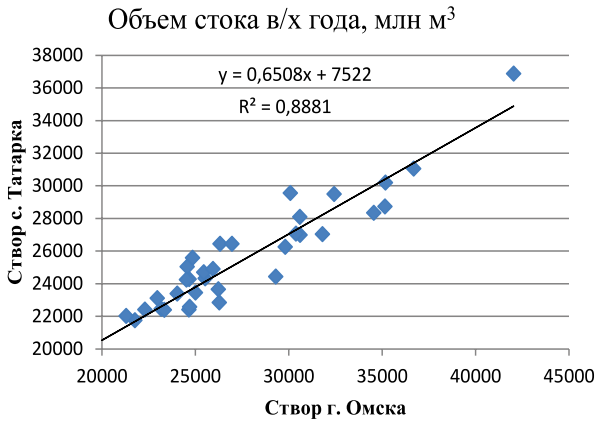


Рис. 2. Зависимость годового стока р. Иртыш в створе с. Татарка от годового стока в створе г. Омска за периоды 1983/1984–1984/1985 гг., 1989/1990–2022/2023 гг.

Fig. 2. The Irtysh River annual runoff in the alignment of Tatarka dependence on annual runoff in the alignment of Omsk over the 1983/1984–1984/1985 and 1989/1990–2022/2023 periods

Объем годового стока р. Иртыш в створе с. Татарка рассчитан по уравнению регрессии. Внутригодовое распределение стока в створе с. Татарка по месяцам определено в том же соотношении, что и в створе г. Омска (для соответствующих лет).

Анализ изменения годового стока р. Иртыш в периоды до и после заполнения водохранилищ Верхне-Иртышского каскада ГЭС

До 1961 г. (начала заполнения Бухтарминского водохранилища) водный режим р. Иртыш может условно рассматриваться как близкий к естественному. В последующие годы в результате создания водохранилищ, увеличения водопотребления, в т. ч. за счет заборов воды в канал Иртыш – Караганда, произошли изменения параметров и режима стока.

Выполненный статистический анализ, результаты которого представлены на рис. 3 и в табл. 5, позволяет сравнить динамику годового стока р. Иртыш в рассматриваемых створах, оценить изменение среднегодового стока и стандартного отклонения за два периода (до 1961 г. и с 1968 г.) в указанных створах.

Средний сток за период после 1968 г. снижается в каждом створе, причем абсолютная величина этого снижения больше всего в самом нижнем створе по течению р. Иртыш (г. Омск), а относительно среднемноголетнего значения (в %) – в самом верхнем створе (с. Буран). Снижение среднегодового стока во всех створах является результатом действия комплекса факторов: регулирования стока, увеличения безвозвратного водопотребления, возрастания количества и площади прудов и запруд, наращивания площади земель сельскохозяйственного назначения и др.

Таблица 5. Статистические параметры годового стока р. Иртыш в створах наблюдений с 1938/1939 гг.

Table 5. Statistical parameters of the Irtysh River annual runoff in the observation alignments since 1938/1939

Период	Среднее значение, млн м^3				Стандартное отклонение			
	г. Омск	с. Татарка	ГЭС Усть-Каменогорская	с. Буран	г. Омск	с. Татарка	ГЭС Усть-Каменогорская	с. Буран
До 1961 г.	30 552	27 087	19 760	10 273	7456	5746	4902	2403
С 1968 г.	27 273	25 022	17 925	8742	4802	3210	2681	2530
Весь период	27 924	25 415	18 226	9156	5883	4195	3616	2593
Разность: период 1 – период 2	3279	2065	1835	1531	2654	2537	2221	−127
%	11,7	8,1	10,1	16,7	45,1	60,5	61,4	−4,9

Во всех створах, кроме верхнего (р. Иртыш – с. Буран), значительно снизилось стандартное отклонение (абсолютное значение и в % относительно среднего за весь период). Снижение амплитуды колебаний годового стока по годам обусловлено влиянием регулирования стока расположенными выше водохранилищами. Количественные оценки параметров годового стока в створах наблюдений за разные периоды представлены в табл. 5 и в виде графиков на рис. 3.

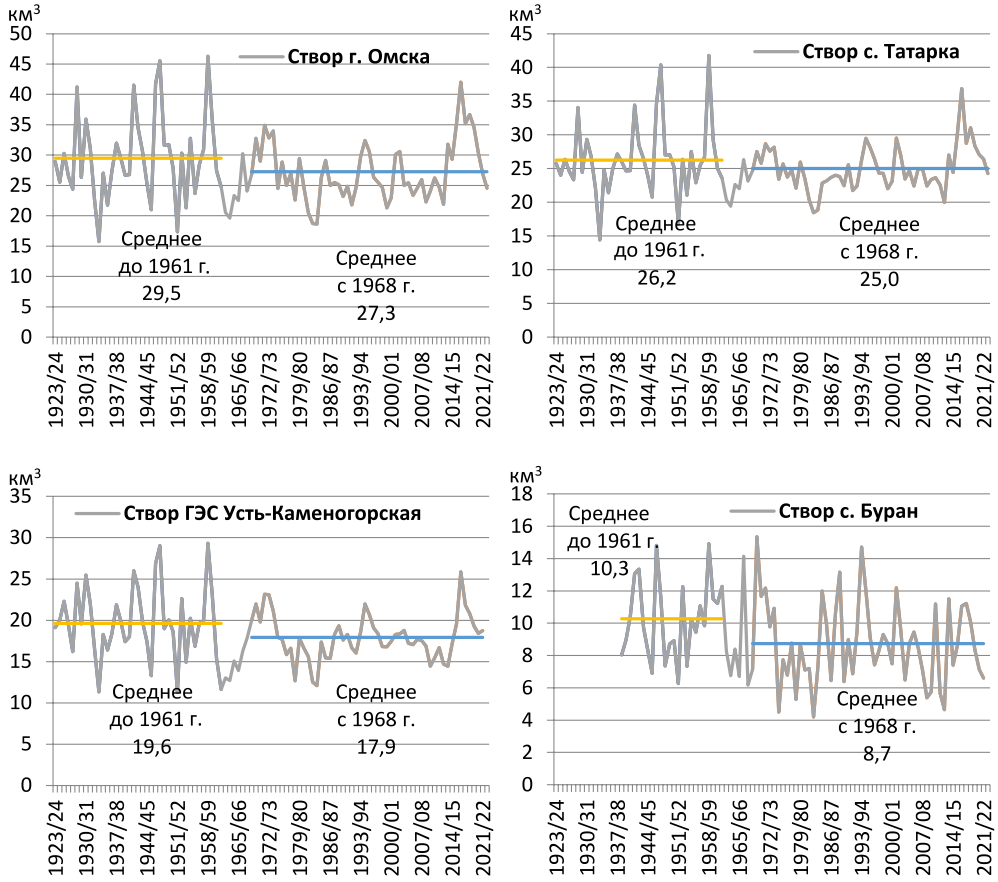


Рис. 3. Изменение годового стока р. Иртыш в створах и среднее значение за два периода: до 1961 г. и с 1968 г.

Fig. 3. The Irtysh River annual runoff changes in the alignments and the average value over the two periods: before 1961 and since 1968

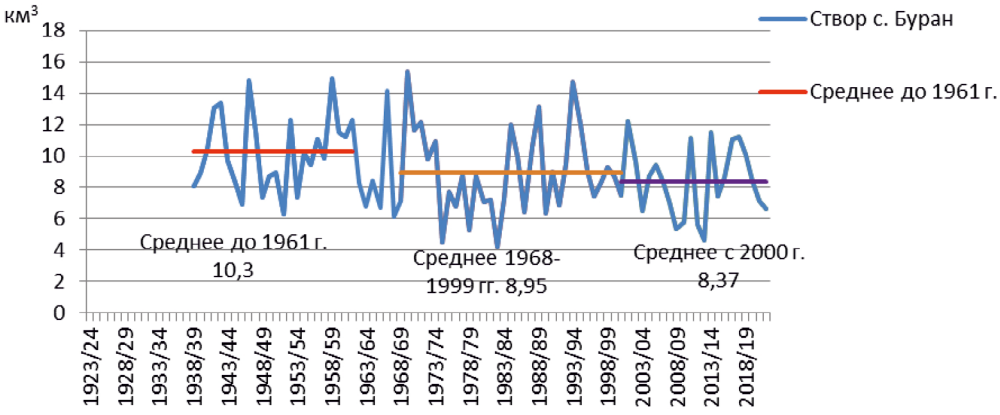


Рис. 4. Изменение среднегодового стока в створе с. Буран за три периода: до 1961 г., за 1968–1999 гг., с 2000 г.

Fig. 4. The average annual runoff changes in the Buran alignment over the three periods: before 1961, 1968–1999, since 2000

Для створа р. Иртыш – с. Буран на рис. 4 дополнительно приведено среднее значение годового стока за период 2000/2001–2022/2023 гг., которое составило 8,37 км^3, что свидетельствует о снижении среднегодового стока по сравнению с предыдущим периодом (1968/1969–1999/2000 гг.) на 0,58 км^3.

Для подтверждения выявленных изменений стока рассчитаны и приведены в табл. 6 парные коэффициенты корреляции годового стока между створами наблюдений отдельно за периоды до 1961 г. и с 1968 г. До 1961 г. связь между створами более тесная, чем после 1968 г. Например, парный коэффициент корреляции стока в створах г. Омска и с. Буран до 1961 г. равен 0,75, а после 1968 г. снижается до 0,58. Это свидетельствует о влиянии водохранилищ на годовой сток, поскольку система осуществляет довольно глубокое многолетнее его регулирование.

Таблица 6. Парные коэффициенты корреляции годового стока между створами на р. Иртыш для периодов до 1961 г. и с 1968 г.

Table 6. Pair coefficients of the annual runoff correlation between the Irtysh River alignments for the periods before 1961 and since 1968

Створ	Период	г. Омск	с. Татарка	ГЭС Усть-Каменогорская	с. Буран
г. Омск	до 1961 г.	1	0,98	0,94	0,75
	с 1968 г.		0,94	0,79	0,58
с. Татарка	до 1961 г.		1	0,92	0,74
	с 1968 г.			0,82	0,53
ГЭС Усть-Каменогорская	до 1961 г.			1	0,71
	с 1968 г.				0,53
с. Буран	до 1961 г.				1
	с 1968 г.				

Анализ изменения сезонного стока р. Иртыш в створах наблюдений

Рассмотрим далее изменения стока по сезонам. Изменение стока за весенне-летний период (апрель – август) также охарактеризовано путем сравнения параметров за два периода (табл. 7).

Таблица 7. Статистические параметры сезонного стока за апрель – август в створах с 1938/1939 гг.

Table 7. Statistical parameters of the seasonal runoff over the April – Aigust period in the alignments since 1938/1939

Период	Среднее значение, млн м^3				Стандартное отклонение			
	г. Омск	с. Татарка	ГЭС Усть-Каменогорская	с. Буран	г. Омск	с. Татарка	ГЭС Усть-Каменогорская	с. Буран
До 1961 г.	21 310	18 907	–	8166	4975	3857	–	1870
С 1968 г.	16 499	14 619	8108	6755	3482	2477	1627	2257
Весь период	17 718	15 774	7975	7152	4546	3511	1610	2262
Разность: период 1 – период 2	4811	4288	–	1411	1493	1380	–	−387
%	27,2	27,2	–	19,7	32,8	39,3	–	−17,1

Сравнение величин стока в створах за период апрель – август с годовыми данными показывает более существенное по сравнению с годовым объемом снижение стока за апрель – август в период после 1968 г. и меньшее снижение стандартного отклонения.

На рис. 5 представлены результаты сравнения среднего значения стока за период апрель – август в створах. Парные коэффициенты корреляции стока, рассчитанные за апрель – август в створах для периодов до 1961 г. и с 1968 г., также показали, что до 1961 г. связь стока в створах более тесная, чем после 1968 г.

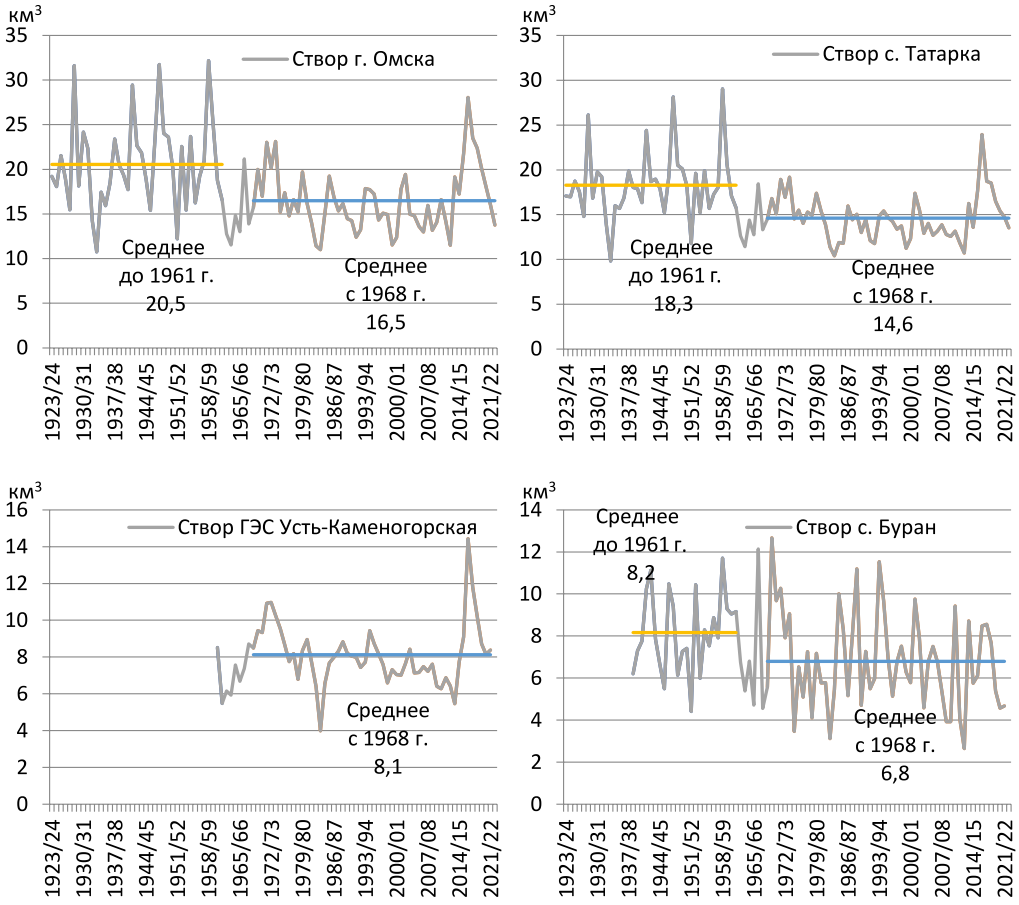


Рис. 5. Изменение стока за апрель – август в створах и среднее значение за два периода: до 1961 г. и с 1968 г.

Fig. 5. The runoff changes over the April – August period in the alignments and the average value over the two periods: before 1961 and since 1968

Средний сток за осеннюю межень (сентябрь – ноябрь) за период после 1968 г. значительно снизился только в створе с. Буран (снижение на 20 %). В двух нижних створах средний сток после 1968 г. относительно среднемноголетнего значения изменяется незначительно (от 3 до 4 %); в створе ГЭС Усть-

Каменогорская данные по сезонному стоку имеются только с 1960 г., поэтому анализ невозможен. Стандартное отклонение во втором периоде значительно ниже во всех створах (табл. 8, рис. 6).

Таблица 8. Статистические параметры стока за сентябрь – ноябрь в створах с 1938/1939 гг.

Table 8. The runoff statistical parameters over the September – November period in the alignments since 1938/1939

Период	Среднее значение, млн м³				Стандартное отклонение			
	г. Омск	с. Татарка	ГЭС Усть-Каменогорская	с. Буран	г. Омск	с. Татарка	ГЭС Усть-Каменогорская	с. Буран
До 1961 г.	5748	5080	–	1429	2081	1664	–	567
С 1968 г.	5307	5079	4513	1174	771	683	595	389
Весь период	5399	5050	4430	1239	1284	1045	607	450
Разность: период 1 – период 2	441	1	–	256	1310	982	–	178
%	8,2	0,0	–	20,6	102,1	93,9	–	39,5

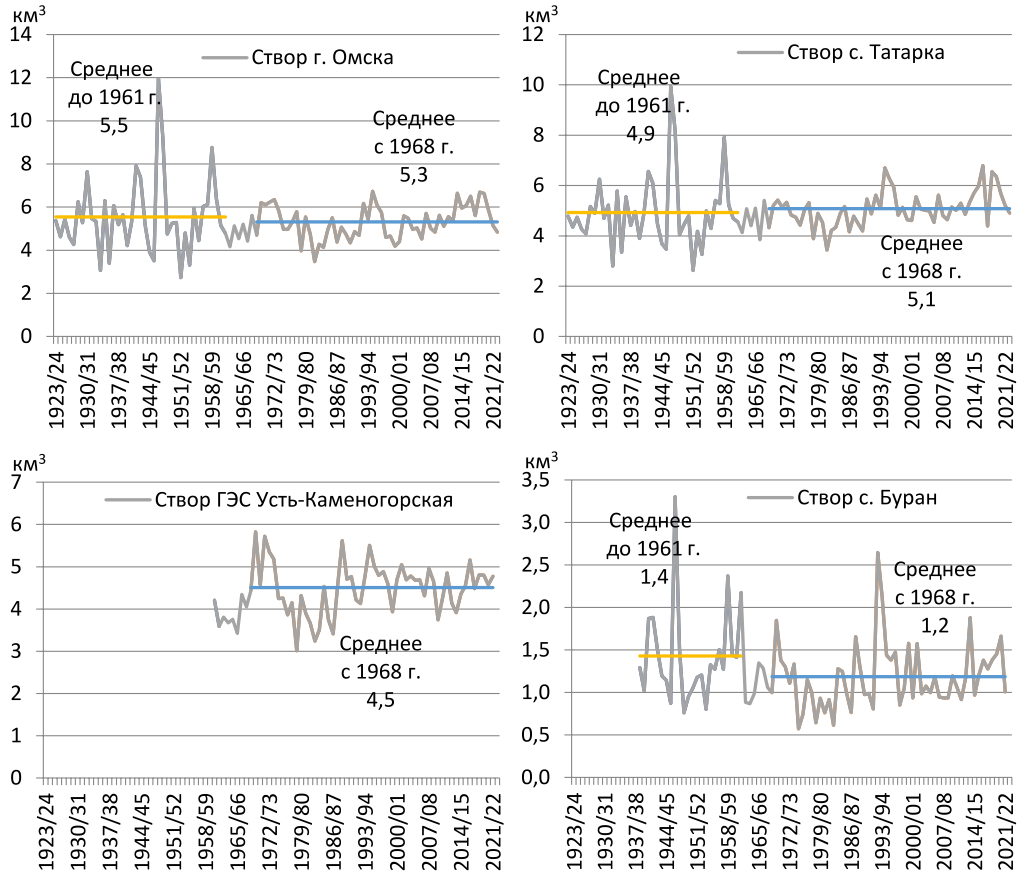


Рис. 6. Изменение стока р. Иртыш за период сентябрь – ноябрь в створах наблюдений и среднее значение за два периода: до 1961 г. и с 1968 г.

Fig. 6 The Irtysh River runoff changes over the September – November period in the observation alignments and the average value over the two periods: before 1961 and since 1968

На рис. 6 представлены графики, иллюстрирующие изменение среднего значения стока за сентябрь – ноябрь в створах наблюдений.

Таблица 9. Статистические параметры стока за декабрь-март в створах с 1938/1939 гг.

Table 9. The runoff statistical parameters over the December-March period in the alignments since 1938/1939

Период	Среднее значение				Стандартное отклонение			
	г. Омск	с. Татарка	ГЭС Усть-Каменогорская	с. Буран	г. Омск	с. Татарка	ГЭС Усть-Каменогорская	с. Буран
До 1961 г	3495	3100	–	677	1028	817	–	150
С 1968 г	5467	5324	5284	757	1207	1023	974	228
Весь период	4808	4591	5061	723	1440	1378	1121	205
Разность: период 1 – период 2	−1973	−2224	–	−80	−178	−206	–	−78
%	−41.0	−48.4	–	−11.0	−12.4	−15,0	–	−37,9

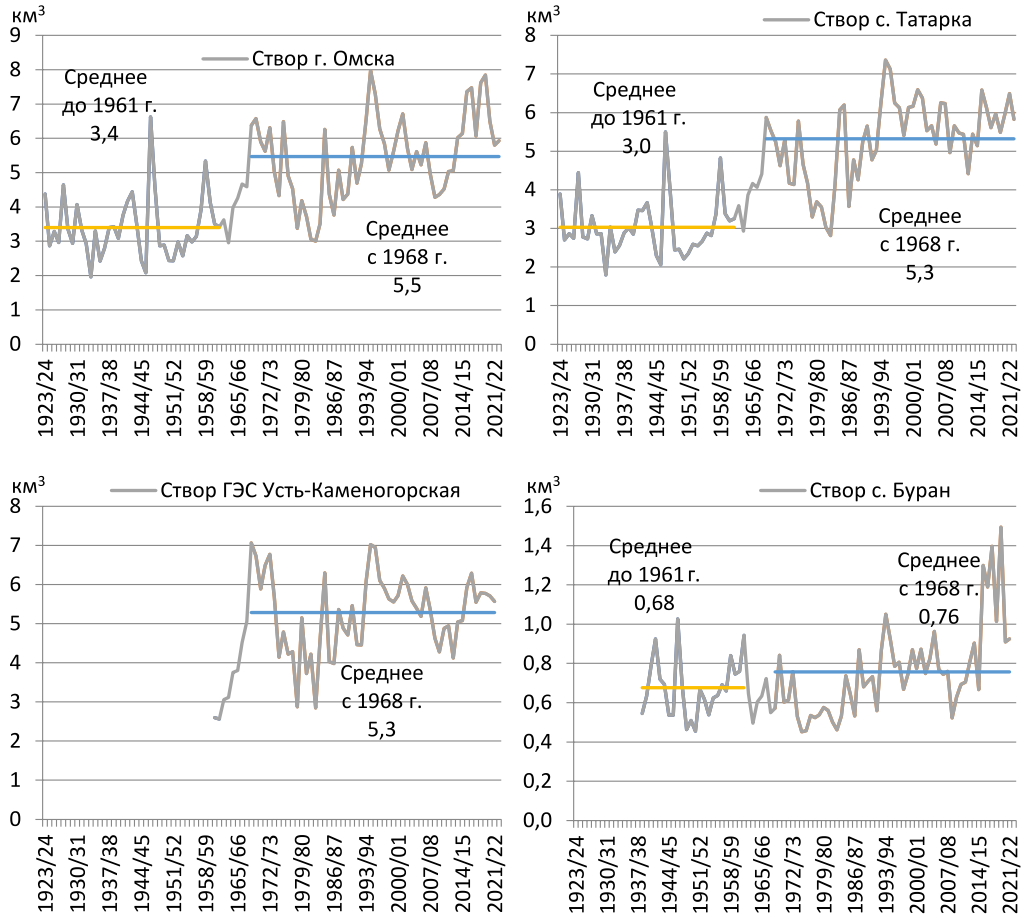


Рис. 7. Изменение стока за декабрь – март в створах наблюдений и среднее значение за два периода: до 1961 г. и с 1968 г.

Fig. 7. The runoff changes over the December – March period in the observation alignments and the average value over the two periods: before 1961 and since 1968

Приведенные в табл. 9 статистические параметры стока за декабрь – март в створах с 1938/39 гг. и на рис. 7 графики, иллюстрирующие изменение стока за зимнюю межень за два периода, указывают на существенные изменения – рост среднего значения стока за декабрь – март во всех створах наблюдений.

Расчет парных коэффициентов корреляции стока за декабрь – март в створах для периодов до 1961 г. и с 1968 г. показывает, что до 1961 г. связь в створах более тесная, чем после 1968 г.

В качестве сводной иллюстрации на рис. 8 представлена динамика годового и сезонного стока в створе р. Иртыш – г. Омск. В табл. 10 приведены количественные оценки произошедших изменений.

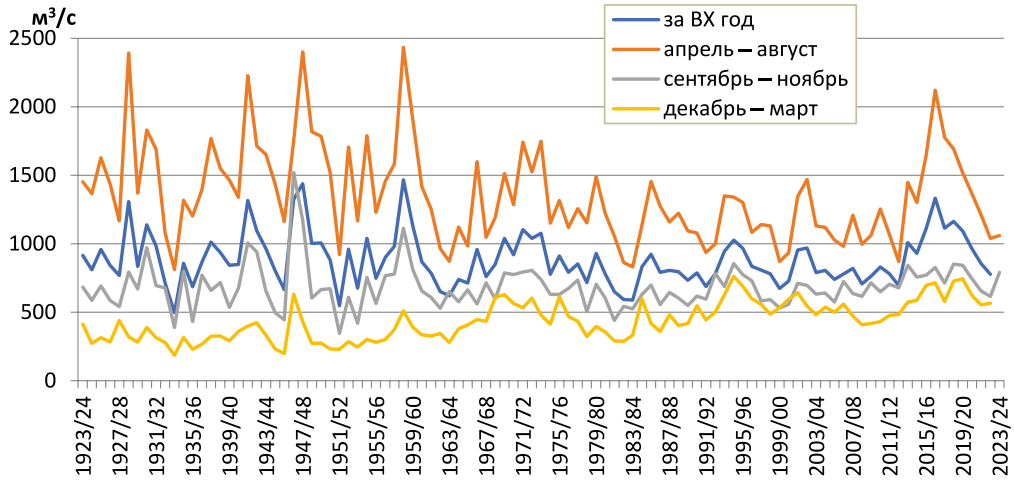


Рис. 8. Динамика годового и сезонного стока р. Иртыш в створе г. Омска
Fig. 8. The Irtysh River annual and seasonal runoff dynamics in the alignment of Omsk

После ввода в эксплуатацию водохранилищ произошло перераспределение стока внутри года. Как следует из данных табл. 10, до 1961 г. средняя доля стока за апрель – август в годовом объеме выше, чем после 1968 г. Соответственно, после 1968 г. выше средняя доля стока за декабрь – март в годовом объеме.

Таблица 10. Изменение среднего объема стока и долей сезонного стока в годовом в створе г. Омска

Table 10. The average runoff volume and shares of seasonal runoff changes in the alignment of Omsk

Период	Объем стока, км³				Доля сезона в годовом, %		
	за ВХ год	апрель – август	сентябрь – ноябрь	декабрь – март	апрель – август	сентябрь – ноябрь	декабрь – март
До 1961 г.	29,48	20,54	5,54	3,40	69,7	18,7	11,6
С 1968 г.	27,27	16,50	5,31	5,47	60,3	19,6	20,1
Весь период	27,90	17,96	5,37	4,57	64,0	19,3	16,6
Разность: период 1 – период 2	2,21	4,04	0,24	−2,07	9,43	−0,98	−8,45
%	7,9	22,5	4,4	−45,3	14,7	−5,1	−50,8

ВЫВОДЫ

По результатам анализа данных гидрологических наблюдений в бассейне р. Иртыш на территории Российской Федерации и Республики Казахстан можно сделать следующие выводы.

Изученность гидрологического режима позволяет оценить происходящие изменения стока в основном для его годовых и сезонных значений. Анализ мониторинговых данных показал, что по сравнению с условно-естественным периодом в бассейне Иртыша произошли заметные изменения состояния водных ресурсов, связанные в основном с антропогенным влиянием: регулированием стока и безвозвратными изъятиями для нужд различных отраслей экономики. Годовой приток с территории Казахстана по основному руслу Иртыша на территорию Российской Федерации уменьшился по сравнению с периодом естественного режима.

Регулирование стока и водопотребление привели к существенным нарушениям в режиме многолетних колебаний сезонного стока. Изменения сезонного стока разнонаправлены по сезонам, что связано в основном с особенностями его регулирования: преобладает энергетическое использование водных ресурсов. Для сезонного стока отмечается уменьшение половодного стока и стока осенней межени, существенно (до 45 %) вырастает сток зимней межени.

Дальнейшие исследования в области использования водных ресурсов трансграничной р. Иртыш должны включать более детальное изучение гидрологического режима реки на участке ниже Шульбинской ГЭС с целью оценки потерь стока, требуемого режима обводнения поймы как на казахской, так и на российской частях, и в целом водохозяйственного баланса этого участка в связи с планируемым ростом водопотребления. Особую актуальность полученным и планируемым результатам придает предлагаемое казахской стороной строительство Семипалатинской ГЭС, сооружение и эксплуатация которой могут оказать заметное влияние на гидрологический режим и экосистему реки как на казахском, так и на приграничном российском участках Иртыша.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соколов А. А. Гидрография СССР / А. А. Соколов. Л.: Гидрометеоиздат, 1952. 471 с.
2. Бейсембаева М. А., Дубровская Л. И. Оценка многолетней динамики водного стока Верхнего Иртыша в целях устойчивого водопользования // Вестник Томского государственного университета. 2014. № 379. С. 189–195.
3. 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.
4. Бурлибаев М. Ж., Куц С. И., Фащевский Б. В., Опп К., Царегородцева А. Г., Шенбергер И. В., Бурлибаева Д. М., Айтуреев А. М. Затопление поймы Ертиса – главный фактор устойчивого развития речной экосистемы. Алматы, 2014. 396 с.

5. Разработать методы и выполнить оценку пространственно-временной изменчивости водных ресурсов и основных характеристик стока рек Российской Федерации: отчет о НИР 1.1.8.1 № ГР АААА-А17. / ФГБУ ГГИ, рук. В. Ю. Георгиевский. СПб., 2019. 145 с.
6. Медеу А. Р., Алимкулов С. К., Загидуллина А. Р., Баспакова Г. Р. Оценка трансграничного притока по р. Кара Ертис при различных сценариях антропогенного влияния на территории Китая // Исследования, результаты. 2023. № 3 (99). Режим доступа: https://journal.kaznaru.edu.kz/index.php/research/article/view/320/229 (дата обращения: 25.06.2025).
7. Винокуров Ю. И., Красноярова Б. А. Диагностический анализ состояния, проблемы и перспективы водопользования в трансграничном бассейне реки Иртыш // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2016. № 4. С. 47–61. URL: https://waterjournal.ru/files/wj/1614838408.pdf
8. Романова Ю. А. Водохозяйственный комплекс бассейна реки Иртыш в условиях перераспределения речного стока выше трансграничных створов: дис. … канд. техн. наук по специальности 05.23.16 «Гидравлика и инженерная гидрология». М., 2013 г.
9. Винокуров Ю. И., Красноярова Б. А. Трансграничный бассейн реки Иртыш: проблемы и решения // Регион: экономика и социология. 2017. № 3 (95). Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_30109944_52012765.pdf (дата обращения: 25.06.2025).
10. Зонн И. С., Жильцов С. С., Семенов А. В., Костяной А. Г. Трансграничные реки Казахстана и Китая // Экономика природопользования. Вестник Московского университета им. С. Ю. Витте. Серия 1. Экономика и управление. 2018. № 4 (27). Режим доступа: https://cyberleninka.ru/article/n/transgranichnye-reki-kazahstana-i-kitaya (дата обращения: 25.06.2025).
11. Раткович Л. Д., Романова Ю. А. Водохозяйственный баланс реки Иртыш в пределах Республики Казахстан с учетом проектных мероприятий в Китайской Народной Республике // Природообустройство. 2014. № 2. Режим доступа: http://elib.timacad.ru/dl/full/gmgup-17-2014-02.pdf/download/gmgup-17-2014-02.pdf?lang=en (дата обращения: 25.06.2025).
12. Раткович Л. Д., Романова Ю. А. Схема водохозяйственного анализа Верхнего и Среднего Иртыша // Природообустройство. 2012. № 4. С. 57–61.
13. 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. Алматы. 2013. № 4. С. 68–80.
14. Куц С. И. Распределение максимального расхода природоохранного попуска между руслом и пойменными участками реки Иртыш // Гидрометеорология и экология. Алматы. 2018. № 2. С. 73–88.

REFERENCES

1. Sokolov A. A. Hydrography of the USSR. A. A. Sokolov. L.: Gidrometeoizdat. 1952, 471 p.
2. Beysembaeva M. A., Dubrovskaya L.I. Assessment of many-year dynamics of the Upper Irtysh water runoff for sustainable water use. *Newsletters of the Tomsk State University*. 2014. No. 379. P. 189–195.
3. Beysembaeva M. A., Dubrovskaya L.I., Zemtsov V. A. Water resources and the Irtysh River maximal levels anthropogenic changes in the flat part of the basin in Republic of Kazakhstan. *Newsletters of the Tomsk Polytechnical University*. *Engineering of geo/resources*. 2018. Vol. 329. No. 3. P. 6–15.
4. Burlibaev M. Z., Kuts S. I. Fashchevskiy B. V., Opp K., Tsaregorodtseva A. G., Shenberger I.V., Burlibaeva D. M., Aytureyev A.M. Flooding of the Ertis floodplain as a main factor of the river ecosystem sustainable development. Almaty, 2014. 396 p.
5. To develop methods and to perform assessment of spatial/temporal variability of water resources and runoff main characteristics of the rivers of the Russian Federation: research report 1.1.8.1 № ГР АААА-А17 / GGI, under V. Y. Georgievskiy. SPb., 2019. 145 p.

6. Medeu A. P., Alimkulov S.K., Zagidullina A. R., Baspakova G. R. Assessment of transboundary inflow through the Kara Ertis River provided different versions of scenario of anthropogenic impact on the territory of China. *Researches and results*. 2023. No. 3 (99). Access regime: https://journal.kaznaru.edu.kz/index.php/research/article/view/320/229 (date of address: 25.06.2025).
7. Vinokurov Y.I., Krasnoyarova B.A. Diagnostic analysis of the state, problems and prospects of water use in the Irtysh River transboundary basin. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2016. No. 4. P. 47–61. URL: https://waterjournal.ru/files/wj/1614838408.pdf
8. Romanova Y. A. The Irtysh River water/economic complex in the conditions of the river runoff redistribution upstream of the transboundary alignments: thesis for candidate of technical sciences degree according to "Hydraulic and engineering hydrology" 05.23.16 specialty. M., 2013.
9. Vinokurov Y.I., Krasnoyarova B.A. The Irtysh River transboundary basin: problems and solutions. *Region: economics and sociology*. 2017. No. 3 (95). Access regime: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_30109944_52012765.pdf (date of address: 25.06.2025).
10. Zonn I.S., Zhiltsov S.S., Semenov A.V., Kostyanoy A. G. Transboundary rivers of Kazakhstan and China. Economics of nature use. *Newsletters of S.Y. Witte Moscow University. Series 1. Economics and management*. 2018. № 4 (27). Access regime: https://cyberleninka.ru/article/n/transgranichnye-reki-kazahstana-i-kitaya (date of address: 25.06.2025).
11. Ratkovich L. D., Romanova Y. A. The Irtysh River water/economic balance within the boundaries of Republic of Kazakhstan with taking into account prospected measures in the People's Republic of China. *Nature arrangement*. 2014. No. 2. Access regime: http://elib.timacad.ru/dl/full/gmgup-17-2014-02.pdf/download/gmgup-17-2014-02.pdf?lang=en (date of address: 25.06.2025).
12. Ratkovich L. D., Romanova Y. A. The scheme of the Upper and Middle Irtysh water/economic analysis. *Nature arrangement*. 2012. No. 4. P. 57–61.
13. Burlibaev M. Z., Kuts S.I., Shenberger I.V., Burlibaeva D. M. Analysis of the Ertis (Irtysh) River spring discharges impact on water supply to its floodplain. *Hydrometeorology and ecology*. Alamaty. 2013. No. 4. P. 68–80.
14. Kuts S.I. Distribution of the nature-saving discharge maximal value between the bed and floodplain parts of the Irtysh River. *Hydrometeorology and ecology*. Alamaty. 2018. No. 2. P. 73–88.

Сведения об авторах:

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

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

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

Филиппова Ирина Александровна, канд. геогр. наук, старший научный сотрудник, лаборатория моделирования поверхностных вод, отдел поверхностных вод, ФГБУН «Институт водных проблем РАН», 119333, Россия, Москва, ул. Губкина, 3.

About the authors:

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

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

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.

Irina A. Filippova, Candidate of Geographical Sciences, Senior Researcher, RAS Water Problems Institute Laboratory of Surface Waters Modeling Section of Surface Waters, ul. Gubkina, 3, Moscow, 119333, Russia.

Поступила в редакцию / Received 16.04.2025.
Поступила после рецензирования / Revised 23.04.2026.
Принята к публикации / Accepted 15.05.2026.

УДК: 556.5.02
https://doi.org/10.35567/19994508-2026-3-65-93
Обзорная статья/Review paper

Мониторинг химического состава речных вод крупных рек РФ: состояние, перспективы

С. Р. Чалов[1], Е. А. Крастынь[1] ✉, В. А. Ефимов[1], О. Н. Ерина[1], Д. С. Андрюшин[5], В. С. Жихарев[6], А. В. Клещенков[4], Р. А. Колесников[2], А. С. Лохов[3], М. Ю. Лычагин[1], Н. М. Махнович[3], О. П. Нецветаева[3], Е. И. Котова[3], Е. Д. Панченко[1,8], А. С. Печкин[2], А. Д. Сазонов[4], Н. С. Сапелкин[7], Д. И. Соколов[1], А. Р. Чудакова[1], А. В. Коноплев[1], Н. С. Касимов[1]

✉ krastyn-e@mail.ru

[1] *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия*
[2] *Научный центр изучения Арктики, г. Салехард, Россия*
[3] *Северо-Западное отделение ИО РАН, г. Архангельск, Россия*
[4] *Южный научный центр Российской академии наук, г. Ростов-на-Дону, Россия*
[5] *Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова Сибирского отделения Российской академии наук, г. Игарка, Россия*
[6] *ННГУ им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия*
[7] *Волонтер, г. Воронеж, Россия*
[8] *Институт водных проблем Российской академии наук, Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Актуальные данные о химическом составе речных вод – важнейшая основа решения водохозяйственных задач, входная информация для глобального климатического моделирования. В статье приводится обзор систем мониторинга химического состава речных вод крупных рек Российской Федерации (Северной Двины, Оби, Енисея, Лены, Дона) на сети наблюдений Росгидромета, на ведомственных станциях, проводимого в рамках научно-исследовательских программ. **Методы.** Рассмотрены источники информации, представляющие данные, их доступность. Обобщены результаты многолетних сетевых наблюдений на нижних постах Росгидромета рассматриваемых рек, рассмотрены программы и данные проектов ArcticGRO (Обь, Енисей, Лена, Колыма), Arctic FLUX (Обь, Енисей, Лена, Колыма), мониторинга на НИС на о. Самойловский (Лена). Проанализированы результаты мониторинга химического состава речных вод нижнего течения рек Москвы, Оки, Дона, Северной Двины, Оби, Енисея, Лены, организованного в 2024 г. при поддержке мегагранта Министерства образования и науки Российской Федерации «Потоки потенциально токсичных элементов и соединений в речных бассейнах: технологии изучения, количественная оценка и прогноз». В нем на еженедельной основе круглогодично осуществляется измерение более 150 взвешенных и растворенных форм химических элементов, биогенных и органических веществ, что является качественно новым типом мониторинга химического состава вод крупных рек РФ как по детальности, так и составу

© Чалов С. Р., Крастынь Е. А., Ефимов В. А., Ерина О. Н., Андрюшин Д. С., Жихарев В. С., Клещенков А. В., Колесников Р. А., Лохов А. С., Лычагин М. Ю., Махнович Н. М., Нецветаева О. П., Котова Е. И., Панченко Е. Д., Печкин А. С., Сазонов А. Д., Сапелкин Н. С., Соколов Д. И., Чудакова А. Р., Коноплев А. В., Касимов Н. С., 2026

наблюдений. **Результаты.** Приведены первые оценки сезонных форм транспорта биогенных элементов, даны оценки поступления взвешенных форм микроэлементов в приемные моря. Обсуждены перспективы внедрения дистанционных и автоматизированных методов мониторинга химического состава речных воды рек РФ.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: мониторинг химического состава, реки России, экспедиционные исследования, биогенные элементы, органические вещества, формы транспорта

ФИНАНСИРОВАНИЕ: результаты исследования на реках Лена, Енисей, Обь, Северная Двина получены при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации в рамках Соглашения № 075-15-2025-008 от 27.02 2025, по Москве-реке – в рамках проекта РНФ № 25-17-00073.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Чалов С. Р., Крастынь Е. А., Ефимов В. А., Ерина О. Н., Андрюшин Д. С., Жихарев В. С., Клещенков А. В., Колесников Р. А., Лохов А. С., Лычагин М. Ю., Махнович Н. М., Нецветаева О. П., Котова Е. И., Панченко Е. Д., Печкин А. С., Сазонов А. Д., Сапелкин Н. С., Соколов Д. И., Чудакова А. Р., Коноплев А. В., Касимов Н. С. Мониторинг химического состава речных вод крупных рек РФ: состояние, перспективы // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2026. № 3. С. 65-93. https://doi.org/10.35567/19994508-2026-3-65-93; EDN: OUZDYI

Large Russian rivers water chemical composition monitoring: state of research, recent results, and prospects

Sergey R. Chalov[1], Ekaterina A. Krastyn[1] ✉, Vasily A. Efimov[1], Oksana N. Erina[1], Dmitry S. Andryushin[5], Vyacheslav S. Zhikharev[6], Aleksey V. Kleshchenkov[4], Roman A. Kolesnikov[2], Aleksey S. Lokhov[3], Mikhail Yu. Lychagin[1], Natalya M. Makhnovich[3], Olga P. Netsvetaeva[3], Ekaterina I. Kotova[3], Evgeniya D. Panchenko[1,8], Aleksandr S. Pechkin[2], Alexey D. Sazonov[4], Nikolay S. Sapelkin[7], Dmitry I. Sokolov[1], Angelina R. Chudakova[1], Aleksey V. Konoplev[1], Nikolay S. Kasimov[1]

✉ krastyn-e@mail.ru

[1] *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia*
[2] *Scientific Center for Arctic Studies of the Yamal-Nenets Autonomous District, Salekhard, Russia*
[3] *Northwestern Branch of the Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Arkhangelsk, Russia*
[4] *Southern Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russia*
[5] *Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Russia*
[6] *Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Russia*
[7] *volunteer, Voronezh, Russia*
[8] *Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

ABSTRACT

Relevance. Current data on the chemical composition of river water is a crucial foundation for addressing water management challenges and serves as input information for global climate modeling. This article provides an overview of monitoring systems for the chemical composition

of river water in major Russian rivers (Northern Dvina, Ob, Yenisei, Lena, Don) within the observation network of Roshydromet, at departmental stations, and as part of scientific research programs. **Methods.** Information sources providing data and their accessibility are examined. The results of long-term network observations at the downstream Roshydromet stations on the rivers under consideration are summarized. The programs and data of the ArcticGRO (Ob, Yenisei, Lena, Kolyma) and Arctic FLUX (Ob, Yenisei, Lena, Kolyma) projects, as well as monitoring at the Samoylovsky Island Research Station (Lena), are reviewed. The monitoring of the chemical composition of river water in the lower reaches of the Moskva, Oka, Don, Northern Dvina, Ob, Yenisei, and Lena rivers is discussed. This monitoring was established in 2024 with the support of a mega-grant from the Ministry of Education and Science of the Russian Federation titled "Flows of potentially toxic elements and compounds in river basins: study technologies, quantitative assessment, and forecast." Within this monitoring, more than 150 suspended and dissolved forms of chemical elements, nutrients, and organic substances are measured weekly, year-round. This represents a qualitatively new type of monitoring of the chemical composition of water in major Russian rivers, both in terms of detail and the scope of observations. **Results.** First estimates of seasonal transport forms of nutrients are presented, along with assessments of the input of suspended forms of trace elements into the receiving seas. The prospects for implementing remote and automated methods for monitoring the chemical composition of river water in Russian rivers are discussed.

KEYWORDS: chemical composition monitoring, Russian rivers, expeditionary research, nutrients, organic substances, transport forms

FUNDING: the results for the Lena, Yenisei, Ob, and Northern Dvina rivers were obtained with financial support from the Government of the Russian Federation under Agreement No. 075-15-2025-008 dated February 27, 2025; for the Moskva River – within the framework of the Russian Science Foundation Project No. 25-17-00073.

FOR CITATION: Chalov S. R., Krastyn Ye. A, Efimov V. A., Erina O. N., Andryushin D. S., Zhikharev V. S., Kleshchenkov A. V., Kolesnikov R. A., Lokhov A. S., Lychagin M. Yu., Makhnovich N. M., Netsvetaeva O. P., Kotova Ye. I. , Panchenko Ye. D., Pechkin A. S., Sazonov A. D, Sapelkin N. S., Sokolov D. I., Chudakova A. R., Konoplev A. V, Kasimov N. S. Large Russian rivers water chemical composition monitoring: state of research, recent results, and prospects. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management.* 2026. No. 3. P. 65–93. https://doi.org/10.35567/19994508-2026-3-65-93; EDN: OUZDYI

ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных факторов, определяющих безопасность окружающей среды, является качество природных вод[1]. Нарастающий количественный и качественный дефицит питьевой воды, рост заболеваемости населения, связанный с негативными воздействиями водного фактора, определяют актуальность исследований химического состава природных вод, используемых в качестве источников питьевого водоснабжения, в первую очередь – речных. Важное значение эти исследования имеют не только для водопользования и контроля антропогенного воздействия на речные экосистемы, но и для фун-

1 Росгидромет. Качество поверхностных вод Российской Федерации. Ежегодник 2023. Ростов-на-Дону, 2024.

даментальных вопросов глобального климата. Вынос растворенных солей и микроэлементный состав речных вод определяют биохимический цикл морей и океанов; поступающие с речным стоком органические вещества в процессе аэробной и анаэробной деструкции в воде трансформируются в форму углекислого газа и метана, и, таким образом, становятся составляющей баланса парниковых газов [1].

Химические вещества и соединения в речных водах переносятся в растворенной и нерастворенной формах, при этом большая часть токсичных веществ транспортируется в составе взвесей [2, 3], а важнейшей характеристикой загрязняющего вещества с точки зрения его миграционной способности и биологической доступности является его распределение между твердой (наносы, взвешенное вещество) и жидкой фазой (раствор) [3, 4]. Активность сорбционно-десорбционных процессов, аккумуляция на геохимических барьерах, формирование органоминеральных комплексов приводят к сложным перераспределениям поллютантов между различными формами транспорта. Для разных веществ эти процессы и их соотношение сугубо индивидуальны [5], что значительно усложняет характеристику химического состава речных вод. Распределение загрязняющего вещества в системе «взвесь – раствор» определяется в значительной мере гидрохимическими характеристиками речных вод, и, как следствие, является специфическим для каждой реки [6, 7]. Все это определяет актуальность комплексных многокомпонентных программ мониторинга химического состава речных вод.

Наличие стационарных наблюдений обусловливается фиксируемыми изменениями составляющих речного стока. В арктических бассейнах таяние вечной мерзлоты является причиной трансформации химического стока за счет высвобождения объемов химических веществ и соединений [9]. Биогенное загрязнение характеризуется разнонаправленными трендами – снижением на реках юга России за счет уменьшения половодного поверхностного склонового стока [10] и ростом в связи с интенсификацией сельского хозяйства и увеличением объемов сточных вод урбанизированных территорий. Протяженные участки русловой сети крупных рек РФ, нарушенные горнодобывающей деятельностью [11], становятся источниками загрязнения речных вод металлами и металлоидами [12].

Таким образом, оценка химического состава вод крупных рек – важнейшая научная и водохозяйственная задача, решение которой возможно на основе детальных по составу и временному разрешению стационарных наблюдений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Несмотря на важность исследования химического состава речных вод, в частности крупных рек РФ, анализ существующих систем мониторинга ранее не проводился. В Российской Федерации мониторинг химического состава реч-

ных вод осуществляется на трех уровнях (рис. 1): система государственного мониторинга, научно-исследовательские программы, ведомственный мониторинг. Система государственного мониторинга, которая учитывает химический состав только ограниченного числа растворенных химических веществ и соединений [8], направлена на оценку качества воды в виде обобщенных индексов (УКИЗВ). Состояние государственной сети наблюдений характеризуется сокращением числа пунктов, что приводит к плохой изученности современной ситуации.

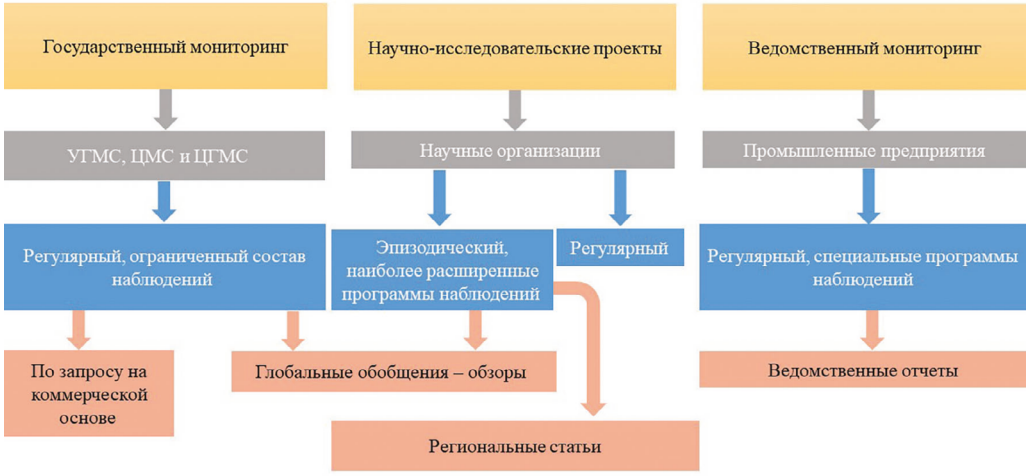


Рис. 1. Основные источники информации о химическом составе речных вод Российской Федерации

Fig. 1. Main sources of information on the chemical composition of river waters in the Russian Federation

В последние десятилетия в мониторинге химического состава речных вод существенно выросла роль научно-исследовательских программ. Это связано с развитием новых методов и приборов, позволяющих определять следовые количества большого числа химических элементов (в частности, масс-спектральный анализ). Они были задействованы в научных программах и представили ценный источник информации о химическом составе речных вод. Многие из этих программ функционировали на протяжении продолжительного периода (ArcticGRO, наблюдения на о. Самойловский в дельте Лены и др.). С 2024 г. в рамках мегагранта Министерства образования и науки Российской Федерации «Потоки потенциально токсичных элементов и соединений (ПТЭиС) в речных бассейнах: технологии изучения, количественная оценка и прогноз» географический факультет МГУ ведет мониторинг на реках Москве, Оке, Дону, Северной Двине, Оби, Енисее, Лене (далее – мониторинг ПТЭиС МГУ). Это самая детальная по составу (более 150 физических параметров и концентраций растворенных и взвешенных форм химических элементов, биогенных и органических веществ) и частоте (раз в неделю и более) программа мониторинга речных вод в России.

Мониторинг химического состава речных вод отличается по доступности результатов. Данные государственного мониторинга качества воды в РФ доступны на коммерческой основе. Результаты научных программ широко публикуются в региональных работах и обобщениях, а ведомственного мониторинга – в специальных отчетах (рис. 1).

Целью данной статьи является характеристика и сравнительный анализ действующих в РФ систем мониторинга химического состава речных вод. Впервые обобщены сведения о существующих программах исследований, включая государственную сеть наблюдений в нижнем течении рек, обзор исследований, посвященных содержанию и потокам химических веществ, проводимых в рамках ведомственного мониторинга и научных программ и анализ изученности поступления химических веществ Дона, Северной Двины, Оби, Енисея, Лены к их устьевым областям, рассмотрены программа мониторинга ПТЭиС МГУ и перспективы развития мониторинга химического состава речных вод. Впервые обобщена информация о различных источниках гидрохимической информации, являющейся наиболее закрытой среди всех данных гидрологического мониторинга на территории РФ. Сопоставлены программы мониторинга, источники получения данных, периодичность отбора проб. Особое внимание уделено программе ПТЭиС МГУ, в рамках которой впервые на еженедельной основе, в т. ч. в период ледостава, проводится сбор данных о концентрациях растворенных и взвешенных форм показателей химического состава воды. Результаты мониторинга направлены на получение принципиально новых данных о величине потоков растворенных и взвешенных форм элементов в крупнейших арктических бассейнах РФ, их сезонных вариациях и открывают новые возможности разработки моделей химического стока.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Мониторинг качества воды на государственной сети наблюдений

Определение параметров качества воды[2] на государственной сети наблюдений Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет) осуществляется в рамках государственной наблюдательной сети (ГНС). В настоящее время списочный состав сети режимных наблюдений за загрязнением поверхностных вод суши ГНС Росгидромета включает 1819 пунктов наблюдений (ПН), 2499 створов, расположенных на 1186 водных объектах – на 1034 водотоках и 152 водоемах [13].

Организация наблюдений, руководство работой наблюдательной сети и контроль результатов измерений осуществляют УГМС (Управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды) и ЦГМС (Центры по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды) в соответствии с ло-

2 РД 52.24.309-2016. Организация и проведение режимных наблюдений за состоянием и загрязнением поверхностных вод суши. М: Росгидромет, 2016.

кальными нормативными актами. Головной организацией, координирующей и обобщающей данные мониторинга поверхностных вод, является Гидрохимический институт Росгидромета (г. Ростов-на-Дону). Регулярные наблюдения за химическим составом воды проводятся на гидрохимических постах (ГХП) с фиксированной периодичностью (ежемесячно, ежеквартально). Основные параметры качества воды, определяемые на ГСН [14], включают:

– общие физико-химические показатели (температура, pH, электропроводность, мутность, $БПК_5$, ХПК, растворенный кислород);

– главные ионы (Cl^-, SO_4^{2-}, HCO_3^-, CO_3^{2-}, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+, K^+);

– биогенные элементы (NO_3^-, NO_2^-, NH_4^+, PO_4^{3-}, Si);

– загрязняющие вещества (тяжелые металлы, нефтепродукты, фенолы, пестициды).

Среди методов химического анализа используют титриметрию, спектрофотометрию, атомно-абсорбционную спектрометрию (ААС), газовую и высокоэффективную жидкостную хроматографию (ГХ, ВЭЖХ) и основываются на методиках, отраженных в ГОСТ и РД Росгидромета: ГОСТ 31957-2012 (карбонаты и гидрокарбонаты), ГОСТ 4245-72 (хлориды), ПНД Ф 14.1:2:3.4.121-97 (ХПК), ГОСТ 33045-2014 (аммонийный азот), ГОСТ 31955-2012 (общий фосфор), ГОСТ Р 57164-2016 (нитриты), РД 52.24.380-2008 (фенолы), ГОСТ Р 57162-2016 (тяжелые металлы), а также другие нормативные акты.

На многих постах проводятся специальные наблюдения. Содержание техногенных радионуклидов и радиационной обстановки на реках РФ и других пресноводных объектах определяется в рамках системы радиационного мониторинга (СРМ) Росгидромета[3], деятельность которой координируется ФГБУ НПО «Тайфун» (г. Обнинск). На ключевых постах в зонах радиоактивного загрязнения определяется содержание в воде ^{90}Sr и трития. Отбор проб воды и первичное концентрирование при анализе на ^{90}Sr осуществляются по установленной методике[4] на гидрологических станциях и постах радиометрической сети территориальных УГМС[5]. В настоящее время на реках РФ действует 15 постов для определения содержания трития, среди замыкающих створов несколько крупнейших рек.

В практику внедряются автоматизированные системы (например, АКСВ-Р), которые проводят измерение основных параметров в режиме реального времени (pH, электропроводность, растворенный кислород, мутность, температура). Данные передаются в Единый государственный фонд данных о состоянии окружающей среды (ЕГФД).

3 Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2024 году: ежегодник. Обнинск: ФГБУ «НПО «Тайфун», 2025. 342 с.

4 Методика контроля радиоактивного загрязнения водной среды и донных отложений в ФГБУ «НПО «Тайфун» (МВК 7.4.8-15). Обнинск: ФГБУ «НПО «Тайфун», 2015. 2015a.

5 Методика измерений объемной активности трития в пробах природных вод с применением радиометра Quantulus-1220 в ФГБУ «НПО «Тайфун» (МВИ 7.5.2-15). Обнинск: ФГБУ «НПО «Тайфун», 2015. 2015b.

Наблюдения за качеством воды на ГСН ведутся синхронно с наблюдениями за водностью, а ряды наблюдений отличаются большой продолжительностью. В Ежегодниках качества воды для каждого створа наблюдений внутри водосбора публикуются значение класса качества воды, а также перечень превышений ПДК. В гидрологических ежегодниках с периодичностью один раз в месяц фиксируется частота превышения ПДК. По тем веществам, для которых не наблюдается превышение ПДК, информация не публикуется (табл. 1). Данные приводятся также в интервалах наиболее часто встречаемых значений (НЧВЗ), которые обычно включают от 60 до 80 % значений вариации, отдельно указываются случаи высокого загрязнения (ВЗ) и экстремально высокого загрязнения (ЭВЗ) воды.

Традиционно рассчитываются ИЗВ – индекс загрязнения воды – и УКИЗВ – удельный комбинаторный индекс загрязненности воды (РД 52.24.643-2002): индексы загрязнения вод, используемые для интегральной оценки состояния водных объектов. ИЗВ – комбинированный показатель, рассчитываемый как сумма отношений концентраций загрязняющих веществ (нормированных по 6–7 ключевым показателям, таким как растворенный кислород, $БПК_5$, азот аммонийный и др.) к их предельно допустимым концентрациям (ПДК). УКИЗВ учитывает не только концентрации, но и класс опасности загрязняющих веществ, а также повторяемость превышения ПДК и ранжирует воду по категориям качества (от «условно чистой» до «экстремально грязной»), позволяет оценивать комплексное химическое воздействие.

Особое внимание уделяется замыкающим створам крупнейших рек (табл. 1), на основе данных которых проводят оценки поступления загрязняющих веществ в приемные водоемы [14]. Обобщение соответствующей информации периодически публикуют представители ведомственных учреждений Росгидромета (в первую очередь Гидрохимический институт) [15–25; 27–29], где приводятся выводы об интегральном состоянии качества воды и его многолетних изменениях, данные о ионном стоке.

Таблица 1. Станции ГНС в замыкающих створах рек Дон, Северная Двина, Обь, Енисей, Лена

Table 1. State observation network stations at the outlet sections of the Don, Northern Dvina, Ob, Yenisei, and Lena Rivers

Река	Створ	Период наблюдений	Состав современных публикуемых наблюдений
Обь	Салехард	1955 – н. в.	Частота превышения ПДК следующих веществ: кислород, хлориды, ХПК, $БПК_5$, азот (аммонийный, нитритный, нитратный), железо, медь, цинк, никель, марганец, фенолы, нефтепродукты. Измерения проводятся 6–12 раз в год
Енисей	Дивногорск	1973 – н. в.	
Лена	Кюсюр	1954 – н. в.	
Северная Двина	Усть-Пинега	1949 – н. в.	
Дон	Станица Раздорская	1980 – н. в.	

Дон. В 2023 г. наблюдения за химическим составом воды р. Дон осуществляли в 43 створах. Качество воды в нижнем течении оценивалось как «загрязненная» и «грязная» и в последние годы снижалось, несмотря на сокращение сброса сточных, шахтно-рудничных и коллекторно-дренажных вод практически в два раза за последние 30 лет [15]. Важнейшим фактором этого процесса указывается сокращение водного стока [16].

Общая масса загрязняющих веществ, поступающих ежегодно в составе сточных вод в р. Дон, согласно отчетам Росгидромета оценивается величиной в 1341 т [17]. В ионном стоке большую долю составляют сульфаты – 746 т (55,7 %) и хлориды – 260 т (19,4 %) ежегодно. По другим данным [18], основные превышения по степени загрязнения воды р. Дон связаны с соединениями меди и нитритного азота. Для нижнего течения реки отмечалась тенденция увеличения поступления азота аммонийного, фосфора фосфатного, кремнекислоты и легкоокисляемых органических веществ при уменьшении притока соединений меди, цинка, фенолов и нефтяных углеводородов [18]. В основном поступление химических веществ связано с поверхностным стоком: несмотря на значительную минерализацию и содержание главных ионов в грунтовых водах, поступающих с урбанизированных территорий, их вклад в формирование общего стока в устьевом створе составляет около 0,01 % [19].

Северная Двина. В нижнем течении р. Северная Двина качество воды оценивается как «загрязненная». Основными загрязняющими веществами определены соединения железа, меди и марганца, что объясняется их повышенным фоновым содержанием либо влиянием целлюлозно-бумажной промышленности [20].

В водах Северной Двины в несколько раз превышены концентрации растворенного органического углерода и железа [21], что связано с природными особенностями водосборного бассейна (широким распространением болот). В обобщении 2000–2010 гг. [14] для всего бассейна отмечены отдельные случаи высоких концентраций нитритного N (6 раз), метанола (5), соединений Pb (2), трудноокисляемых органических веществ и нефтепродуктов.

Обь. В нижнем течении р. Оби качество воды оценивается как «грязная». Основные загрязняющие вещества – соединения железа, марганца, меди и нефтепродукты. Суммарный ионный сток Оби закономерно возрастает от верховьев к устью, достигая 46–47 млн т/год у Салехарда, при этом подземная составляющая стока и концентрация растворенного органического углерода многократно увеличиваются по направлению к Обской губе, что свидетельствует об интенсивной химической денудации водосбора [22]. За период 1990–2020 гг. отмечалась статистически значимая тенденция к снижению нагрузки нефтепродуктов и увеличению стока трудноокисляемых органических веществ [23]. После 2020 г. изменения стока нефтепродуктов не фиксировались [24]. Наибольшую нагрузку на нижнее течение р. Оби оказы-

вают соединения как аммонийного азота [18], так и нитратов, а также общего фосфора [25].

В бассейне Оби отдельные случаи высоких концентраций фиксируются значительно чаще, чем в бассейне Северной Двины [14]. В 2000–2010 гг. зафиксированы превышения соединений Zn, нефтепродуктов, соединений Mn, Fe, Cu; нитритного N, соединений Hg, аммонийного N, Cd, фенолов, пестицидов и АСПАВ. В бассейне Оби находятся крупные источники радиоактивного загрязнения, возникшие как в результате исторического наследия сбросов жидких радиоактивных отходов в р. Теча, так и вследствие аварийных радиоактивных выбросов в атмосферу и последующего их оседания на зеркало водных объектов и на водосборы рек бассейна [26].

Енисей. Гидрохимический мониторинг в бассейне Енисея проводится в 26 створах. Вода в нижнем течении реки характеризовалась как «грязная». Несмотря на снижение объемов забора воды и сброса загрязняющих веществ, качество воды на значительном протяжении реки неудовлетворительно: характерными загрязняющими веществами воды р. Енисей с 50–100 %-ной повторяемостью случаев превышения ПДК являлись соединения железа, меди, органические вещества. Для р. Енисей характерен рост концентраций неорганического кремния и растворенного азота, но при этом отмечается снижение содержания общего фосфора и органического углерода [22].

Лена в нижнем течении в настоящее время характеризуется как «очень загрязненная». Превышение ПДК фиксировалось по следующим показателям: соединениям меди, железа, марганца; фенолам, нитритному азоту. При этом отдельные исследования показывают, что, хотя среднегодовые концентрации нефтепродуктов могут не превышать ПДК, на локальных участках, таких как районы населенных пунктов, нефтебаз и судоходных путей, регулярно фиксируются значительные превышения норматива, достигавшие 10 ПДК и более [27]. Сравнение с архивными данными [28] за 1986–1995 гг. показывает, что качество воды в нижнем течении Лены продолжает характеризоваться повышенным содержанием фенолов и соединений железа, концентрации которых носят очаговый характер и связаны с поступлением загрязненных стоков от населенных пунктов и промышленных объектов. Минерализация воды в нижнем течении снижается до 100–200 мг/дм³ из-за увеличения водности, однако загрязнение нефтепродуктами и тяжелыми металлами сохраняется, особенно в районах с интенсивной хозяйственной деятельностью [29]. В период 2000–2010 гг. [14] случаи повышенного загрязнения в бассейне фиксировались для Zn (8 раз), Cu (4), нитритного N (4), Mo (2), трудноокисляемых органических веществ (2) и соединений Pb (1).

Таким образом, преимущество системы измерений Росгидромета обусловливается едиными методами отбора и анализа проб воды, широким охватом режимными наблюдениями водных объектов и продолжительными рядами.

Именно на этой основе можно выявить продольные изменения химического состава воды и их многолетней изменчивости. Среди рассматриваемых рек Дон и Обь выделяются в качестве наиболее проблемных по химическому составу вод. При этом данные Росгидромета основаны исключительно на растворенных формах переноса веществ. Неучет взвешенных форм транспорта химических элементов, ограниченность детальности отборов являются основными недостатками государственной системы наблюдений. Частично они решены в системах ведомственного мониторинга и в большей степени – в научно-исследовательских программах.

Ведомственный мониторинг

Изучение химического состава вод проводится на различных объектах водохозяйственного комплекса. В зависимости от сферы использования водных ресурсов перечень показателей может существенно меняться.

Для получения статистической информации об использовании водных ресурсов в больших объемах (забор более 50 м^3/сут; использование систем оборотного водоснабжения, водоотведения) Федеральным агентством водных ресурсов РФ осуществляется сбор данных с водопользователей по форме 2-ТП (водхоз)[6] [30]. Юридические лица и индивидуальные предприниматели передают сведения об источнике водоснабжения, объемах забираемой воды, месте забора, качестве забираемой воды. При указании характеристик водоотведения передаются данные о типе и расположении водного объекта – приемника загрязненных вод, степени загрязнения, объемах отведения, а также содержании загрязняющих веществ (221 вещество и соединение).

Мониторинг качества вод осуществляется коммунальными службами городских территорий. Так, на водных объектах г. Москвы предприятием ГПБУ «Мосэкомониторинг» выполняется оценка качества воды и донных отложений (РД 52.24.643-2002, ГН 2.1.5.1315-03, СанПиН 2.1.5.980-00). Мониторинг проводится на 24 водных объектах, включая крупные и малые реки, водоемы, очистные сооружения. Отдельно оценивается качество подземных вод и состояние родников. В воде определяются около 40 физико-химических показателей – органолептические характеристики, pH, минерализация, содержание взвешенных веществ, содержание органических веществ, содержание биогенных веществ, содержание растворенного кислорода, ХПК, $БПК_5$, общий солевой состав и концентрация микроэлементов, нефтепродукты. Особое внимание уделяется воздействию противогололедных реагентов на водные экосистемы и контролю водопользования в пределах водоохранных зон.

Предприятия, специализирующиеся на добыче полезных ископаемых, реализуют программы мониторинговых наблюдений. Особенности методики

6 Приказ Росстата от 02.10.2024 № 445 «Об утверждении формы федерального статистического наблюдения № 2-ТП (водхоз) «Сведения об использовании» воды и указаний по ее заполнению».

проведения мониторинга зависят от класса опасности отходов. Например, на рудниках ОАО «Апатит», добывающих апатит-нефелиновую руду в Мурманской области, осуществляется полный (pH, SO_4^{2-}, PO_4^{3-}, NO_2^-, NO_3^-, NH_4^+, Cl^-, F^-, Ca_2^+, Mg^{2+}, K^+, Na^+, Al^{3+}, $Fe_{общ}$, Y_2SiO_3, АПАВ, $БПК_5$, ХПК, сухой остаток, нефтепродукты, взвешенные вещества), биологический (общие колиформные бактерии, термотолерантные колиформные бактерии, колифаги) и сокращенный (pH, SO_4^{2-}, PO_4^{3-}, NO_2^-, NO_3^-, NH_4^+, Cl^-, F^-, Al^3, сухой остаток, ХПК, $БПК_5$, АПАВ, нефтепродукты, взвешенные вещества) химический анализ с частотой 1 раз в 10 дней, месяц или квартал[7]. Особое внимание агропредприятиями уделяется мониторингу гидрохимических и гидробиологических характеристик [31].

Научно-исследовательские программы

Научно-исследовательские программы, реализованные на реках РФ, посвящены в первую очередь растворенным формам загрязняющих веществ и представлены в работах В. С. Савенко, А. В. Савенко, В. В. Гордеева, А. Ю. Опекунова, О. С. Покровского, М. Б. Заславской, О. А. Алекина, J. Gallardet, B. Dupre, M. Meybeck, S. Moran, Н. И. Тананаева и др. Концентрации химических элементов в составе взвешенных наносов изучены слабее, чем растворенные формы.

Важным источников информации о химическом составе речных вод в последние десятилетия стали региональные и глобальные обзоры. Опубликованы подобные обобщения разного типа – по солевому составу речных вод Восточной Сибири (включая Лену) [35], по солевому составу и содержанию N, P, Si, Fe, Cu, Zn, Pb, Cd, Hg, pH, а также COD [36] рек Западной Сибири, глобальное обобщение по содержанию ртути [37]. Ряд международных программ нацелен на постоянный сбор данных с сетей государственного мониторинга (GEMS) (табл. 2). Аналогично по химическому составу взвесей представлены обобщения в работе В. В. Гордеева [9], где приведен средний химический состав взвесей рек мира, основанный на материалах по 100 рекам. В работе В. С. Савенко [38] суммированы данные о среднем содержании оксидов главных петрогенных элементов во взвесях 28 рек мира, а также микроэлементов и биогенов. Последнее крупное обобщение выполнено в работе [39] и для некоторых элементов включает данные по 164 рекам и существенно дополнено в базе данных GloRiSe [40]. Эти работы позволили установить средние концентрации взвешенных наносов рек мира и их соотношения с кларками земной коры [38] и на этой основе определить степень антропогенного преобразования содержания технофильных элементов в реках мира [39].

7 Проектная документация «Центральный рудник. Отработка запасов месторождения Плато Расвумчорр открытыми горными работами» / ООО «Горнохимический инжиниринг». 2012. (Приложение 1, т. 8.1.2). Договор № 11ГХИ-40/12 от 21 мая 2012 г.

Таблица 2. Некоторые обобщения о химическом составе речных вод с данными по рассматриваемым в статье рекам

Table 2. Selected reviews of the chemical composition of river waters containing data on the rivers considered in this study

База данных	Состав базы данных	Реки	Объем данных	Период	Ссылка
GEMS/ Water (Global Environment Monitoring System)	608 параметров, включая главные ионы (Na^+, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Cl^-, SO_4^{2-}, HCO_3^-, CO_3^{2-}), тяжелые металлы и металлоиды (Pb, Cd, Hg, As), биогенные элементы (N, P), органические загрязнители.	Весь мир (включая реки Обь, Енисей, Лена, Северная Двина)	20 млн проб воды на 13 660 станциях (в 37 странах)	1906–2023	GEMS[8]
Eastern Siberian River Chemistry (ESRC)	Главные ионы (Na^+, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Cl^-, SO_4^{2-}, HCO_3^-, CO_3^{2-})	Лена, Яна, Идигирка, Колыма, Ангара, Селенга, малые реки Восточной Сибири	9487 результатов измерений в 1434 пробах воды	1940–2019	[35]
GLORICH	44 параметра, включая главные ионы (Na^+, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Cl^-, SO_4^{2-}, HCO_3^-, CO_3^{2-}), биогенные элементы (N, P, S), углерод (растворенный, взвешенный, органический, неорганический)	Весь мир (включая реки Обь, Лена, Енисей)	1,27 млн проб воды на 18 000 станциях	1980– 2015	[41]
GloRiSe	Концентарции макро- и микроэлементов, минералогический состав взвешенных наносов и донных отложений	Весь мир, в т. ч. рассматриваемые в данной работе реки	2828 точек обследования в 59 странах		[40]

Регулярные наблюдения, выполненные по единой методике в течение длительного времени на крупнейших реках России, проводились несколькими научными программами. Самой продолжительной программой мониторинга растворенных форм химического стока является ArcticGRO[9], функционирующая с 2003 г. (на реках Оби, Енисее, Лене, Колыме, Юконе, Маккензи). Створы гидрохимических наблюдений располагаются выше устьевых областей (р. Лена – с. Кюсюр), рядом с пунктом наблюдений за уровнями и расходами воды государственной сети (табл. 3). В 2019 г. к списку рассматриваемых постов добавились посты с измерением расходов воды для рек Онеги, Северной Двины, Мезени, Печоры, Надыма, Пура, Оленька, Яны и Индигирки. Пробы отбираются шесть раз в год, раз в два месяца, с учащением в период половодья, с поверхностных горизонтов. Проводится анализ общего взвешенного

8 GEMStat database of the Global Environment Monitoring System for freshwater (GEMS/Water) Programme (Electronic resource) / UNEP.

9 ArcticGRO; www.arcticgreatrivers.org

органического азота и углерода (POC и PON), изотопов углерода, кислорода и водорода, растворенного органического углерода и общего азота (DOC, TDN), NO_3, NH_4, PO_4, SiO_2, а также микро- и макрокомпонентный состав (F, Cl, SO_4, Br, As, Sr, Ba, U, Ca, Na, Mg, K) и Hg и MeHg.

Таблица 3. Научные программы регулярного мониторинга
Table 3. Scientific programs of regular monitoring

База данных	Химические характеристики	Пространственный охват в РФ	Число измерений	Период
ArcticGRO (Arctic Great Rivers Observatory)	Изотопный состав ($\delta^{18}O$, $\delta^{2}H$), главные ионы, биогенные элементы (NO_3^-, PO_4^{3-} и др.), органический углерод (DOC, POC)	Обь, Енисей, Лена, Колыма. С 2019 г. – Онега, Северная Двина, Мезень, Печора, Надым, Пур, Оленек, Яна и Индигирка	19 617 результатов измерений на 6 станциях	С 2003 г. по н. в.
ArcticFLUX [42]	Весовая мутность, оптическая мутность, гранулометрический состав, физико-химические параметры, главные ионы, биогенные элементы, растворенный углерод, микроэлементы (n = 61)	Обь, Енисей, Лена, Колыма	450 проб воды 450 проб взвешенных наносов 56 интегральных проб взвешенных наносов	2018–2022
о. Самойловский	Температура воды, электропроводность, стабильные изотопы кислорода и водорода, растворенный органический углерод, ^{14}C, окрашенное и флюоресцентное органическое вещество, растворенные формы Al, Ba, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, P, Si, S, биогены (TDN, TDP, TN, TP, Si, PO4, NH4, NO2, NO3)	Лена, дельта	[redacted]	2018–2022

С апреля 2018 г. по август 2022 г. в Оленекской протоке дельты р. Лены с НИС на о. Самойловский с периодичностью от 2 дней до 1 недели осуществлялся мониторинг температуры воды, электропроводности, стабильных изотопов кислорода и водорода, растворенного органического углерода и ^{14}C, окрашенного и флюоресцентного органического вещества, растворенных форм Al, Ba, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, P, Si, S, а также форм биогенных веществ (TDN, TDP, TN, TP, Si, PO_4, NH_4, NO_2, NO_3). Суммарная длина ряда составила 587 проб [43].

Впервые изучение переноса взвешенных и растворенных форм стало проводиться в экспедициях МГУ и привело к созданию новых подходов к анализу химического состава речных вод (DS-анализ, от D – dissolved, растворенные; S – suspended, взвешенные). Выполнены масштабные гидрогеохимические наблюдения в бассейне Селенги, в дельте Волги и Дона (1993–2025 гг.) [32, 33], на реках Надым, Пур, Таз (2021–2023 гг.) [34] и создана база данных, насчитывающая тысячи определений микроэлементного состава взвешенных и рас-

творенных форм химического состава речных вод. Среди фундаментальных результатов этих исследований можно выделить парагенетическую классификацию химических элементов по их доминирующей форме переноса в речных водах [3], оценки средних региональных концентраций тяжелых металлов и металлоидов во взвешенной и растворенной формах на разных региональных уровнях, что позволило практически подойти к вопросу о создании региональных «гидрокларков» [4, 12].

Этот подход получил развитие в программе исследований химического состава воды и взвешенных наносов крупнейших сибирских рек – ArcticFLUX, проводившейся в 2018–2022 гг. на четырех крупнейших реках российской Арктики – Оби, Енисее, Лене, Колыме (15 полевых компаний). Всего проведено 50 измерений в створах, отобрано более 450 проб воды и наносов, в которых современными методами проанализированы весовая мутность, гранулометрический и химический состав [42]. Измерения проводились в различные фазы водного режима – половодье, летнюю межень, летне-осенний паводочный период, осеннюю и зимнюю межени. В рамках работ выполнялась серия пробоотборов с интервалом в 3–10 дней в зависимости от фазы водного режима на разных горизонтах. Накоплен большой массив новых данных о содержании химических элементов во взвешенных наносах в замыкающих створах рек Арктики (табл. 4). Выявлено, что уровни содержания металлов и металлоидов во взвешенных наносах Енисея в наибольшей степени соответствуют среднемировым (по [38]). Взвешенные наносы Оби относительно обогащены Fe, Mn, Zn, Sn и As, содержание которых в 1,5–2,5 раза превышает среднемировое. Если для Fe и Mn это объясняется природными факторами (заболоченностью водосборного бассейна), то для Zn, Sn и As этот рост, очевидно, связан с воздействием судоходства в низовьях Оби и судоремонта в г. Салехарде (соединения Zn, Sn и As используются в качестве биоцидов в составе противообрастающих покрытий корпусов судов). В дельте Лены ассоциация элементов, накапливающихся во взвеси, еще шире – в нее входят Cd, Mn, Zn, Sr, U и Cr, что объясняется большим числом рудогенных проявлений в бассейне реки и дальним привносом тонкодисперсной взвеси, обогащенной тяжелыми металлами и металлоидами.

Параллельно с отбором проб выполнялись измерения расходов с помощью акустического доплеровского измерителя скоростей потока (ADCP), что позволило впервые получить данные о потоках взвешенных химических элементов и соединений в устьевых створах крупнейших рек. Измеренный вынос металлов и металлоидов в устьевые области в период открытого русла составляет около 12–24 % от общего потока взвешенных наносов каждой из рек и достигает максимальных значений для р. Лены (19 % от стока взвешенных наносов периода открытого русла), в Енисее – 31 %, в Оби – 13 %, в р. Колыме – 20 %.

Таблица 4. Содержание металлов и металлоидов (ММ) в составе взвешенных наносов в период открытого русла в замыкающих створах рек Оби, Енисея и Лены по данным мониторинговой программы МГУ ArcticFLUX

Table 4. Content of metals and metalloids in suspended sediments during the open-water period at the outlet sections of the Ob, Yenisei, and Lena rivers according to the ArcticFLUX monitoring program of Moscow State University

Элемент	Средняя концентрация ММ в период открытого русла, мкг/г		
	Обь (n = 78)	Енисей (n = 60)	Лена (n = 67)
Fe	66 215	46 508	60 648
Al	55 790	50 334	99 249
Mn	2751	1239	2386
Zn	270	141	254
Sr	145	198	292
Cr	100	101	119
Zr	92	60	140
V	87	87	129
Ni	50	52	56
Cu	35	45	46
Pb	27	19	31
As	24	4,92	8,66
Co	18	21	25
Sn	6,89	2,20	3,17
Cs	3,84	2,65	4,71
U	2,09	2,05	3,78
W	1,01	0,62	1,50
Sb	0,94	0,81	0,58
Cd	0,36	0,38	1,33
Mo	0,20	1,06	0,90

С 2024 г. эта программа в рамках реализации мониторинга МГУ в коллаборации с научными организациями (ИГЛ ИМЗ СО РАН, ЮНЦ РАН, СЗО ИО РАН, ГАУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики») и отдельными учеными значительно расширена по составу и распространена на станции, расположенные на семи реках – Оби, Енисее, Лене, Оке, Дону (в верхнем и нижнем течении), Северной Двине, Москве (табл. 5). Большая часть постов находится в замыкающих створах крупных рек. Программа наблюдений включает измерение содержания биогенных элементов (растворенных и взвешенных форм фосфора, углерода, азота и кремния), содержания взвешенных и растворенных форм тяжелых металлов и металлоидов, гранулометрического состава взвеси, содержания взвешенного органического углерода. Учитывая большое

число участников мониторинга, важной ее составляющей является информационная система сбора и обработки обширной информации, получаемой в рамках проекта. Наблюдатели и координаторы взаимодействуют для контроля методических нюансов работы; атрибутивная информация по отбору каждой пробы сохраняется в общей базе данных. Данные сбора объединяются с данными государственного мониторинга – погодные данные, данные о водных объектах, получаемые из отрытых источников. Хранение на единой информационной основе дает широкие возможности для аналитики и представления результатов: данные отборов могут на единой временной шкале объединяться с погодой и гидрологией, с результатами анализов, позволяют изучать условия и строить зависимости между характеристиками.

Таблица 5. Ведомость постов программы мониторинга химического состава речных вод МГУ
Table 5. List of monitoring stations of the Moscow State University program for monitoring the chemical composition of river waters

Река	Расположение поста, место отбора	Координаты	Кто осуществляет наблюдения	Первая дата отбора проб
Лена	о. Самойловский	72.368093, 126.473341	Научно-исследовательская станция «Остров Самойловский»	03.08.2024
Северная Двина	г. Архангельск	64.525079, 40.566482	СЗО ИО РАН	15.10.2024
Ока	г. Нижний Новгород	56.326752, 43.977546	ННГУ им. Н. И. Лобачевского	19.08.2024
Москва	Нижний бьеф Можайского водохранилища	55.53046, 35.95974	МГУ им. М. В. Ломоносова	16.09.2024
Москва	д. Барсуки	55.68707, 35.60216	МГУ им. М. В. Ломоносова	16.09.2024
Дон	г. Ростов-на-Дону	47.214498, 39.719403	ЮНЦ РАН	07.09.2024
Дон	г. Задонск	52.367890, 38.818132	МГУ им. М. В. Ломоносова	14.06.2024

На данный момент получены первые результаты (данные 2024 и 2025 гг.) определения содержания биогенных веществ в речных водах, позволяющие выявить некоторые бассейновые отличия (рис. 2). Доля взвешенных форм в миграции фосфора (TPP) по сравнению с азотом (TPN) в речных системах выше, составляя в среднем 35 % (28–43 %) для фосфора и 20 % (14–27 %) для азота. Максимальное содержание взвешенных форм азота характерно для Лены, где достигает 57 % и сопоставимо с закономерностями, обнаруживаемыми для фосфора. Минимальное содержание переноса фосфора и азота в составе взвешенных наносов во всех реках обнаруживается в периоды зимней или летней межени и составляет первые проценты. Это объясняется более высокой растворимостью большинства азотных соединений и лучшей спо-

собностью фосфора сорбироваться на частицах минеральной и органогенной взвеси и образовывать комплексы [44]. Наиболее высокими средними значениями характеризуются не зарегулированные в нижнем течении водотоки рек Енисея и Лены, в которых около 40 % фосфора переносится во взвешенной форме.

Концентрации взвешенных форм характеризуются сезонной вариабельностью, отражая общие изменения стока взвесей. Так, в р. Лене в 2024–2025 гг. концентрация общего взвешенного фосфора изменялась от 0,001 до 0,09 мг/л, в р. Оке – от 0,006 до 0,153 мг/л, в нижнем течении р. Дон – от 0,008 до 0,087 мг. Для водосборов с интенсивной антропогенной трансформацией формирования химического стока при низких медианных значениях для азота фиксируется значительная внутригодовая неоднородность. Так, в р. Дон в районе г. Ростова-на-Дону в вегетационный период до 70 % азота переносится во взвешенной органической форме за счет активного развития водорослей в расположенном выше по течению Цимлянском водохранилище.

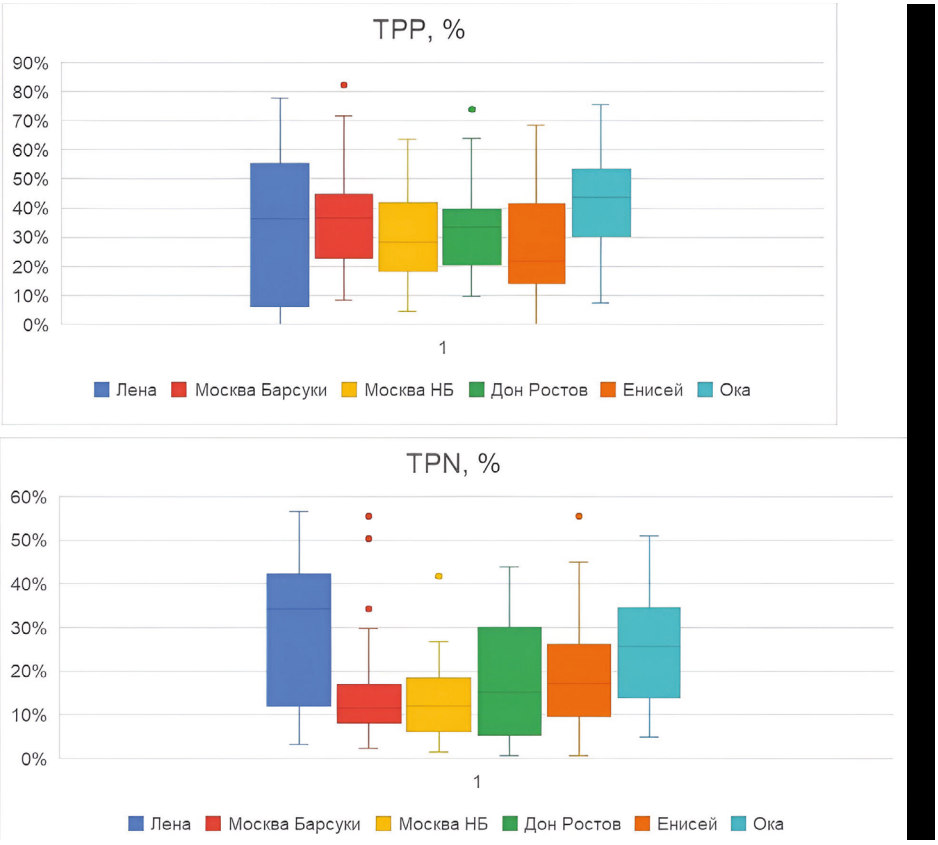


Рис. 2. Распределение доли взвешенных форм фосфора (TPP) и азота (TNN) на некоторых реках Российской Федерации

Fig. 2. Distribution of the proportion of suspended forms of phosphorus (TPP) and nitrogen (TNN) in selected rivers of the Russian Federation

Перспективы развития мониторинга химического состава речных вод

Существующая в России система мониторинга химического состава речных вод ограничена в пространстве, по частоте наблюдений, составу измеряемых показателей. Очевидно, что посты Росгидромета, ведущие регулярные пробоотборы и формирующие многолетние ряды данных, будут оставаться основой наблюдений за качеством воды, при этом сложно ожидать существенного расширения сети наблюдений как с точки зрения числа станций, так и программы. В итоге главной задачей является сохранение действующей системы. При этом реальным путем развития представляется внедрение в систему наблюдений автоматических и дистанционных методов, которые в сочетании с действующими опорными постами могут привести к значительному информационному прогрессу с точки зрения обеспечения данными о химическом составе речных вод. Для существующих систем мониторинга важными факторами, повышающими их значимость для мировой науки, становятся открытость баз данных, расширение перечня исследуемых показателей и непрерывность наблюдений. Для увеличения охвата территории мониторинга и выборки данных к работам могут привлекаться общественные организации и волонтеры. В этом случае требуется тщательное соблюдение методик пробоподготовки и анализа, которые позволяют сравнивать результаты мониторинговых программ.

Развитие измерительных оптических, люминесцентных, спектральных технологий открывает широкие перспективы внедрения автоматических станций контроля параметров качества воды. Позитивным в этом отношении является и зарубежный опыт. В США более 200 постов на данный момент ведут наблюдения за температурой, удельной электропроводностью, растворенным кислородом и pH в режиме реального времени в интервалах от 5 минут до 1 часа (http://waterdata.usgs.gov/nwis). Среди других примеров зарубежных систем автономного мониторинга указывают [45] системы Федерального министерства окружающей среды, охраны природы и энергетической безопасности Германии, где, в зависимости от состава оборудования на станциях, наблюдения проводятся по 4–13 показателям – это температура воды, растворенный кислород, pH, удельная электропроводность, мутность, нитратный азот, аммонийный азот, поглощение (SAK), летучие органические соединения, флуоресценция, сумма хлорофилла, биотестирование на Daphnia magna и водорослях.

Большие перспективы связаны с дистанционными методами. Технологии определения параметров состава речных вод дистанционно хорошо отработаны для мутности воды [46, 47], растворенного органического вещества [48], окрашенного органического вещества и валовых концентраций фосфора и азота [49]. Наличие возможностей автоматизированной подготовки и обработки снимков, успешный опыт применения подобных технологий для многих круп-

ных рек РФ, большой пространственный охват данными – все это позволяет рассматривать дистанционные методы как важное дополнение существующих натурных программ мониторинга химического состава речных вод.

ВЫВОДЫ

Данная статья – первый системный анализ источников информации о химическом составе речных вод в РФ. В ней рассмотрены государственные, ведомственные и научно-исследовательские программы. Общим недостатком почти всех существующих программ является невысокая регулярность пробоотбора (6–12 раз в год на постах Росгидромета; 1 раз в 2 месяца на сети ArcticGRO), что предполагает пропуск таких кратковременных событий, как, например, прохождение сильных дождевых паводков или «черной воды» – периода таяния мерзлоты в конце июня – начале июля в нижнем течении крупных северных рек.

Системы мониторинга редко охватывают взвешенную форму химического состава речных вод, многие элементы и соединения не регистрируются. По этой причине на реках возникает множество критических экотоксикологических ситуаций, которые не могут быть выявлены существующей системой гидрохимического мониторинга и, соответственно, не предпринимаются необходимые меры по быстрому реагированию на техногенные катастрофы и реабилитации пораженных территорий.

Таким образом, современное состояние мониторинговых исследований химического режима крупных рек РФ ограничено как по пространственному охвату, так и по спектру анализируемых параметров и временной дискретности наблюдений. Представленная авторами данной статьи научная программа мониторинга (ПТЭиС МГУ) является беспрецедентно обширным и по частоте (1 раз в неделю и чаще) и спектру элементов (более 150 показателей) типом исследований химического состава речных вод Москвы, Оки, Дона, Северной Двины, Оби, Енисея и Лены. Ее реализация стала возможна при коллаборации разных ученых и краеведов в рамках мегагранта Министерства образования и науки Российской Федерации «Потоки потенциально токсичных элементов и соединений в речных бассейнах: технологии изучения, количественная оценка и прогноз». Представленные в статье результаты демонстрируют перспективы этого мониторинга и одновременно ставят вопрос о его будущем после окончания действия указанного проекта. Применение подходов, отраженных в этих программах, существенно увеличивает точность, воспроизводимость и возможности по сравнению гидрохимических данных и может быть рекомендовано при проведении гидрохимического мониторинга заинтересованными организациями. Альтернативой для подобных мониторинговых программ является внедрение измерительных оптических, люминесцентных, спектральных технологий на автоматических станциях контроля параметров качества воды, а также дистанционные методы.

Обобщение приведенных в работе источников данных предоставляет возможность характеристики региональных различий (например, средних концентраций элементов в составе наносов) между крупнейшими речными бассейнами Российской Федерации. Рассмотренные в статье методы могут использоваться организациями при проведении или улучшении системы мониторинга водных объектов, поскольку охватывают большую часть гидрохимических характеристик воды и наносов.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTERESTS
The authors declare no relevant conflict of interests.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zheng H., Miao C., Huntingford C., Tarolli P., Li D., Panagos P., Yue Y., Borrelli P., van Oost K. The Impacts of Erosion on the Carbon Cycle // Reviews of Geophysics. 2025. Vol. 63. No. 1. https://doi.org/10.1029/2023RG000829
2. Гордеев В. В. Система река - море и ее роль в геохимии океана. 2009. 324 с.
3. Касимов Н. С., Лычагин М. Ю., Чалов С. Р., Шинкарева Г. Л., Пашкина М. П., Романченко А. О., Промахова Е. В. Бассейновый анализ потоков веществ в системе Селенга-Байкал // Вестник Московского университета. Сер. 5. География. 2016. № 3. С. 67–81.
4. Kasimov N. S., Lychagin M. Y., Shinkareva G. L., Kosheleva N. E., Chalov S. R., Pashkina M. P., Jarsjö J. River water quality within Selenga-Baikal catchment based on unprecedented field dataset. Part 1. Distribution of metal(loid)s in water and suspended solids // Water. 2020. Vol. 12. No. 8. Art. 2137. https://doi.org/10.3390/w12082137
5. Bulgakov A. A., Konoplev A. V. (1992). Accidental Pollution. In.: Hydrological Aspects of Accidental Pollution of Water Bodies. WMO Operational Hydrology Report No. 37. WMO-754. P. 7–12.
6. Konoplev A. V., Nasvit O. I., Rodhe A., Voitsekhovich O. V. (1992a). Processes of Contaminant Transport. In.: Hydrological Aspects of Accidental Pollution of Water Bodies. WMO Operational Hydrology Report. No. 37. WMO-754. P. 13–26.
7. Konoplev A. V., Rodhe A., Voitsekhovich O. V. (1992b). Migration of Contaminants in Water Bodies. In.: Hydrological Aspects of Accidental Pollution of Water Bodies. WMO Operational Hydrology Report. No. 37. WMO-754. P. 27–48.
8. Папина Т. С. Транспорт и особенности распределения тяжелых металлов в ряду: вода – взвешенное вещество – донные отложения речных экосистем. Сер. «Экология». 2001. 58 с.
9. Schwab M. S. et al. An abrupt aging of dissolved organic carbon in large Arctic rivers // Geophysical Research Letters. 2020. Vol. 47. No. 23. https://doi.org/10.1029/2020GL088823
10. Коронкевич Н. И., Долгов С. В. Сток с водосбора как источник диффузного загрязнения рек // Вода и экология: проблемы и решения. 2017. №. 4 (72). С. 103–110.
11. Shkolnyi D., Magritsky D., Chalov S. Impact of open-cast placer mining on sediment transport across Far Eastern rivers of Russia // International Journal of Sediment Research. 2024. https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2024.03.001
12. Kasimov N., Shinkareva G., Lychagin M., Chalov S., Pashkina M., Thorslund J., Jarsjö J. River water quality of the Selenga-Baikal Basin. Part II. Metal partitioning under different hydroclimatic conditions // Water (Switzerland). 2020. Vol. 12. No. 9. https://doi.org/10.3390/W12092392
13. Лавренко Н. Ю., Романюк О. Л., Ничипорова И. П. К вопросу о качестве поверхностных вод

суши Российской Федерации по данным мониторинга государственной наблюдательной сети Росгидромета // Сборник статей, посвященный 105-летию со дня образования Гидрохимического института. 2025. С. 154–159.
14. Никаноров А. М., Минина Л. И., Брызгало В. А. Многолетняя изменчивость загрязненности воды и состояния речных экосистем различных широтных зон Европейской части России // Водные ресурсы. 2016. Т. 43. № 5. С. 515–527. https://doi.org/10.7868/S0321059616050102
15. Демин А. П., Зайцева А. В. Сброс загрязняющих веществ и качество воды в бассейне реки Дон // География и природные ресурсы. 2023. №. 2. С. 64–72.
16. Матишов Г. Г. и др. Мониторинг гидрохимических преобразований на взморье Дона в реальном времени // Наука Юга России. 2023. Т. 19. №. 2. С. 20–32.
17. Кулик А. К. и др. Оценка качества поверхностных вод бассейна реки Дон для обеспечения устойчивого функционирования водохозяйственного комплекса // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2019. №. 2 (54). С. 126–135.
18. Брызгало В. А., Никаноров А. М., Косменко Л. С., Решетняк О. С. Устьевые экосистемы крупных рек России: антропогенная нагрузка и экологическое состояние: монография. Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федерального университета, 2015. 161 с.
19. Барцев О. Б. и др. Оценка воздействия подземных вод урбанизированных территорий на качество воды р. Дон в нижнем течении // Метеорология и гидрология. 2016. №. 7. С. 82–92.
20. Джамалов Р. Г., Мироненко А. А., Мягкова К. Г., Решетняк О. С., Сафронова Т. И. Пространственно-временной анализ гидрохимического состава и загрязнения вод в бассейне Северной Двины // Водные ресурсы. 2019. Т. 46. № 2. С. 149–160. https://doi.org/10.31857/S0321-0596462149-160
21. Гордеев В. В., Шевченко В.П., Коробов В. Б., Коченкова А. И., Стародымова Д. П., Белоруков С. К., Лохов А. С., Яковлев А. Е., Чульцова А. Л., Золотых Е. О., Лобковский Л. И. Концентрации химических элементов в воде и взвеси реки Северная Двина и их годовой валовый сток в Белое море // Доклады Российской Академии Наук. Науки о Земле. 2021. Т. 500. № 1. С. 95–102. https://doi.org/10.31857/s2686739721090097
22. Савичев О. Г., Мазуров А. К., Пипко И. И., Сергиенко В. И., Семилетов И. П. Пространственные закономерности изменения химического состава и стока речных вод в бассейне Оби // Доклады Академии наук. 2016. Т. 466. № 2. С. 202–206. https://doi.org/10.7868/s0869565216020237
23. Reshetnyak O., Kovalenko A. Long-Term Trends of Organic Matter Runoff From Large Siberian Rivers Watersheds // Geographical Environment and Living Systems. 2023. Vol. 2023. No. 3. P. 26–43. https://doi.org/10.18384/2712-7621-2023-3-26-43
24. Lavrenko N. Y., Romanyuk O. L., Rogozina T. V. Dynamics of quality and results of monitoring the content of petroleum products in the rivers of the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug (Russia) // Arctic and Antarctic. 2025. No. 1. P. 92–107. https://doi.org/10.7256/2453-8922.2025.1.73034
25. Решетняк О. С., Косменко Л. С., Коваленко А. А. Антропогенная нагрузка и качество воды на замыкающих створах рек арктической зоны России // Вестник Московского университета. Серия 5. Географическая. 2022. № 3. С. 3–17.
26. Шамшурина Е. Н., Куракова А. А., Коноплев А. В., Голосов В. Н. Радиоактивное загрязнение пойм и воды рек Течи и Исети цезием-137 // Географический вестник. 2025. № 3 (74). С. 143–164.
27. Курносов А. Д., Анганова Е. В., Савилов Е. Д. Оценка качества вод бассейна реки Лены по содержанию нефтепродуктов. 2007. Т. 6. № 58. С. 137–139.
28. Шпакова Р. Н. Формирование качества воды реки Лена в современный период. М.: Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН; Биолого-географический факультет Якутского государственного университета им. М. К Аммосова, 1999.

29. Джамалов Р. Г., Сафронова Т. И., Галазур К. Г., Власов К. Г., Оботуров А. С. Качество речных вод бассейна р. Лены // Экология недропользования. 2024. С. 127–132.
30. Чепулянис А. В., Садыков Р. Р. Эколого-ориентированный учет и отчетность предприятий АПК // Учет. Анализ. Аудит. 2022. № 9 (4). С. 45–56.
31. Sasakova N., Gregova G., Takacova D., Mojzisova J., Papajova I., Venglovsky J., Szaboova T., Kovacova S. Pollution of Surface and Ground Water by Sources Related to Agricultural Activities // Frontiers in Sustainable Food Systems. 2018. Vol. 2. P. 42. https://doi.org/10.3389/fsufs.2018.00042
32. Ткаченко А. Н. и др. Потоки тяжелых металлов в аквальных системах дельт Дона и Кубани // Доклады Академии наук. 2017. Т. 474. №. 2. С. 234–237.
33. Пискарева В. М., Геннадиев А. Н., Лычагин М. Ю. Речные потоки полиаренов в дельтах Дона, Кубани и Волги // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2021. № 5. С. 14–23.
34. Lychagin M., Porsheva S., Sokolov D., Erina O., Krastyn E., Efimov V., Dubrovskaya T., Kotov D., Kasimov N. Levels, D,S-patterns and source identification of metals and metalloids in river waters of the gas-producing region in the north of Western Siberia (Pur River basin) // Geography, Environment, Sustainability. 2024. Vol. 17. No. 4. https://doi.org/10.24057/2071-9388-2024-3741
35. Liu S., Wang P., Huang Q., Gabysheva O. I., Li Z., Zhang J., Kazak E. S., Liu Y., Bazarzhapov T. Z., Gabyshev V. A., Shpakova R. N., Frolova N. L., Pozdniakov S. P. A database of water chemistry in eastern Siberian rivers // Scientific Data. 2022. Vol. 9. Art. 737. https://doi.org/10.1038/s41597-022-01844-y
36. Ivanova I., Savichev O., Trifonov N., Kolubaeva Y. V., Volkova N. Major-ion chemistry and quality of water in rivers of northern west Siberia // Water (Switzerland). 2021. Vol. 13. No. 21. https://doi.org/10.3390/w13213107
37. Amos H. M., Jacob D. J., Kocman D., Horowitz H. M., Zhang Y., Dutkiewicz S., Horvat M., Corbitt E. S., Krabbenhoft D. P., Sunderland E. M. Global biogeochemical implications of mercury discharges from rivers and sediment burial // Environmental Science and Technology. 2014. Vol. 48. No. 16. https://doi.org/10.1021/es502134t
38. Савенко В. С. Химический состав взвешенных наносов рек мира. М: ГЕОС, 2006. 175 с.
39. Viers J., Dupré B., Gaillardet J. Chemical composition of suspended sediments in World Rivers: New insights from a new database // Science of The Total Environment. 2009. Vol. 407. No. 2. P. 853–868. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.09.053
40. Muller G., Middelburg J. J., Sluijs A. Introducing GloRiSe – A global database on river sediment composition // Earth System Science Data. 2021. Vol. 13. No. 7. https://doi.org/10.5194/essd-13-3565-2021
41. Hartmann J., Lauerwald R., Moosdorf N. A Brief Overview of the GLObal RIver Chemistry Database, GLORICH // Procedia Earth and Planetary Science. 2014. Vol. 10. P. 23–27. https://doi.org/10.1016/j.proeps.2014.08.005.t
42. Ефимов В. А. Пространственно-временная изменчивость химического состава наносов рек российской Арктики: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Москва, 2023. 135 с.
43. Juhls B. и др. Lena River biogeochemistry captured by a 4.5-year high-frequency sampling program // Earth System Science Data. 2025. Vol. 17. No. 1. P. 1–28. https://doi.org/10.5194/essd-17-1-2025
44. Cai Y., Guo L. Abundance and variation of colloidal organic phosphorus in riverine, estuarine, and coastal waters in the northern Gulf of Mexico // Limnology and Oceanography Letters. 2009. Vol. 54. No. 4. P. 1393–1402.
45. Семенова И. В., Солодовников Б. В., Грудзевич О. И., Дородонова Ю. А. Использование автоматизированных станций контроля воды (АСКВ) для проведения наблюдений за состоянием и загрязнением трансграничных рек // Системы контроля окружающей среды. 2019: тезисы докладов Межд. научно-техн. конф., Севастополь, 12–13 сентября 2019 г. Севастополь: Институт природно-технических систем, 2019. С. 95.

46. Тарасов М. К., Тутубалина О. В. Методика определения мутности воды в р. Селенге и прилегающей акватории оз. Байкал по данным дистанционного зондирования // Исследования Земли из космоса. 2018. № 1. С. 60–71.
47. Chalov S., Prokopeva K. Sedimentation and Erosion Patterns of the Lena River Anabranching Channel // Water. 2022. Vol. 14. No. 23. Art. 3845. https://doi.org/10.3390/w14233845
48. Griffin C. G., Frey K. E., Rogan J., Holmes R. M. Spatial and interannual variability of dissolved organic matter in the Kolyma River, East Siberia, observed using satellite imagery // Journal of Geophysical Research: Biogeosciences. 2011. Vol. 116. No. G3. https://doi.org/10.1029/2010JG001634
49. Yang H., Kong J., Hu H., Du Y., Gao M., Chen F. A Review of Remote Sensing for Water Quality Retrieval: Progress and Challenges // Remote Sensing. 2022. Vol. 14. No. 8. Art. 1770. https://doi.org/10.3390/rs14081770

REFERENCES

1. Zheng H., Miao C., Huntingford C., Tarolli P., Li D., Panagos P., Yue Y., Borrelli P., van Oost K. The Impacts of Erosion on the Carbon. *Reviews of Geophysics*. 2025. Vol. 63. No. 1. https://doi.org/10.1029/2023RG000829
2. Gordeev V. V. River–Sea System and Its Role in Ocean Geochemistry (in Russ.). 2009. 324 p.
3. Kasimov N. S., Lychagin M. Yu., Chalov S. R., Shinkareva G. L., Pashkina M. P., Romanchenko A. O., Promakhova E. V. Basin Analysis of Substance Fluxes in the Selenga–Baikal System (in Russian). *Moscow State University Bulletin. Series 5. Geography.* 2016. No. 3. P. 67–81.
4. Kasimov N. S., Lychagin M. Y., Shinkareva G. L., Kosheleva N. E., Chalov S. R., Pashkina M. P., Jarsjö J. River Water Quality within Selenga-Baikal Catchment Based on Unprecedented Field Dataset. Part 1. Distribution of Metal(loid)s in Water and Suspended Solids. *Water*. 2020. Vol. 12. No. 8. Art. 2137. https://doi.org/10.3390/w12082137
5. Bulgakov A. A., Konoplev A. V. Accidental Pollution. *Hydrological Aspects of Accidental Pollution of Water Bodies*. *WMO Operational Hydrology Report.* 1992. No. 37. WMO-754. P. 7–12.
6. Konoplev A. V., Nasvit O. I., Rodhe A., Voitsekhovich O. V. Processes of Contaminant Transport. *Hydrological Aspects of Accidental Pollution of Water Bodies. WMO Operational Hydrology Report.* 1992. No. 37. WMO-754. P. 13–26.
7. Konoplev A. V., Rodhe A., Voitsekhovich O. V. Migration of Contaminants in Water Bodies. *Hydrological Aspects of Accidental Pollution of Water Bodies. WMO Operational Hydrology Report.* 1992. No. 37. WMO-754. P. 27–48.
8. Papina T. S. Transport and Distribution Features of Heavy Metals in the Water–Suspended Matter–Bottom Sediment System of River Ecosystems. Series “Ecology”. 2001. 58 p. (in Russ.)
9. Schwab M. S. et al. An Abrupt Aging of Dissolved Organic Carbon in Large Arctic Rivers. *Geophysical Research Letters*. 2020. Vol. 47. No. 23. https://doi.org/10.1029/2020GL088823
10. Koronkevich N. I., Dolgov S. V. Runoff from Watersheds as a Source of Diffuse River Pollution (in Russian). *Water and Ecology: Problems and Solutions*. 2017. No. 4 (72). P. 103–110.
11. Shkolnyi D., Magritsky D., Chalov S. Impact of Open-Cast Placer Mining on Sediment Transport across Far Eastern Rivers of Russia. *International Journal of Sediment Research.* 2024. https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2024.03.001
12. Kasimov N., Shinkareva G., Lychagin M., Chalov S., Pashkina M., Thorslund J., Jarsjö J. River Water Quality of the Selenga-Baikal Basin. Part II. Metal Partitioning under Different Hydroclimatic Conditions. *Water* (Switzerland). 2020. Vol. 12. No. 9. https://doi.org/10.3390/W12092392
13. Lavrenko N. Yu., Romanyuk O. L., Nichiporova I. P. On the Quality of Surface Waters of the Russian Federation According to Monitoring Data from the State Observation Network of Roshydromet. *Collection of Articles Dedicated to the 105th Anniversary of the Hydrochemical Institute*. 2025. P. 154–159 (in Russ.)

14. Nikanorov A. M., Minina L. I., Bryzgalo V. A. Long-Term Variability of Water Pollution and the State of River Ecosystems in Different Latitudinal Zones of European Russia (in Russian). *Water Resources.* 2016. Vol. 43. No. 5. P. 515–527. https://doi.org/10.7868/S0321059616050102
15. Demin A. P., Zaitseva A. V. Discharge of Pollutants and Water Quality in the Don River Basin (in Russian). *Geography and Natural Resources*. 2023. No. 2. P. 64–72.
16. Matishov G. G. et al. Monitoring of Hydrochemical Transformations in the Don Estuary in Real Time. *Science in the South of Russia*. 2023. Vol. 19. No. 2. P. 20–32 (in Russ.)
17. Kulik A. K. et al. Assessment of Surface Water Quality in the Don River Basin to Ensure Sustainable Functioning of the Water Management Complex. *Proceedings of the Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Professional Education*. 2019. No. 2 (54). P. 126–135 (in Russ.)
18. Bryzgalo V. A., Nikanorov A. M., Kosmenko L. S., Reshetnyak O. S. Estuarine Ecosystems of Large Rivers in Russia: Anthropogenic Load and Ecological State: Monograph (in Russian). Rostov-on-Don: Southern Federal University Publishing House, 2015. 161 p.
19. Bartsev O. B. et al. Assessment of the Impact of Groundwater from Urbanized Areas on Water Quality of the Lower Don River. *Meteorology and Hydrology*. 2016. No. 7. P. 82–92 (in Russ.)
20. Dzhamalov R. G., Mironenko A. A., Myagkova K. G., Reshetnyak O. S., Safronova T. I. Spatio-Temporal Analysis of Hydrochemical Composition and Water Pollution in the Northern Dvina Basin. *Water Resources*. 2019. Vol. 46. No. 2. P. 149–160 (in Russ.). https://doi.org/10.31857/S0321-0596462149-160
21. Gordeev V. V., Shevchenko V. P., Korobov V. B., Kochenkova A. I., Starodymova D. P., Belorukov S. K., Lokhov A. S., Yakovlev A. E., Chultsova A. L., Zolotykh E. O., Lobkovsky L. I. Concentrations of Chemical Elements in Water and Suspended Matter of the Northern Dvina River and Their Annual Gross Flux into the White Sea. *Doklady Earth Sciences.* 2021. Vol. 500. No. 1. P. 95–102 (in Russ.). https://doi.org/10.31857/S2686739721090097
22. Savichev O. G., Mazurov A. K., Pipko I. I., Sergienko V. I., Semiletov I. P. Spatial Patterns of Changes in Chemical Composition and Runoff of River Waters in the Ob Basin. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences*. 2016. Vol. 466. No. 2. P. 202–206 (in Russ.). https://doi.org/10.7868/S0869565216020237
23. Reshetnyak O., Kovalenko A. Long-Term Trends of Organic Matter Runoff from Large Siberian River Watersheds. *Geographical Environment and Living Systems*. 2023. Vol. 2023. No. 3. P. 26–43. https://doi.org/10.18384/2712-7621-2023-3-26-43
24. Lavrenko N. Y., Romanyuk O. L., Rogozina T. V. Dynamics of Quality and Results of Monitoring the Content of Petroleum Products in the Rivers of the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug (Russia). *Arctic and Antarctic*. 2025. No. 1. P. 92–107. https://doi.org/10.7256/2453-8922.2025.1.73034
25. Reshetnyak O. S., Kosmenko L. S., Kovalenko A. A. Anthropogenic Load and Water Quality at Closing Sections of Rivers in the Russian Arctic Zone. *Moscow State University Bulletin. Series 5. Geography.* 2022. No. 3. P. 3–17 (in Russ.).
26. Shamshurina E. N., Kurakova A. A., Konoplev A. V., Golosov V. N. Radioactive Contamination of Floodplains and Waters of the Techa and Iset Rivers by Cesium-137. *Geographical Bulletin*. 2025. No. 3 (74). P. 143–164 (in Russ.).
27. Kurnosov A. D., Anganova E. V., Savilov E. D. Assessment of Water Quality in the Lena River Basin Based on Petroleum Product Content. 2007. Vol. 6. No. 58. P. 137–139 (in Russ.).
28. Shpakova R. N. Formation of Water Quality in the Lena River under Modern Conditions (in Russian). Moscow: Institute of Global Climate and Ecology of Roshydromet and RAS; Faculty of Biology and Geography, Ammosov Yakut State University, 1999.
29. Dzhamalov R. G., Safronova T. I., Galazur K. G., Vlasov K. G., Oboturov A. S. Water Quality of the Lena River Basin. *Ecology of Subsoil Use*. 2024. P. 127–132 (in Russ.).
30. Chepulyanis A. V., Sadykov R. R. Environmentally Oriented Accounting and Reporting of Agricultural Enterprises. *Accounting. Analysis. Audit*. 2022. Vol. 9. No. 4. P. 45–56 (in Russ.).

31. Sasakova N., Gregova G., Takacova D., Mojzisova J., Papajova I., Venglovsky J., Szaboova T., Kovacova S. Pollution of Surface and Ground Water by Sources Related to Agricultural Activities. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. 2018. Vol. 2. P. 42. https://doi.org/10.3389/fsufs.2018.00042
32. Tkachenko A. N. et al. Heavy Metal Fluxes in Aquatic Systems of the Don and Kuban Deltas. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences*. 2017. Vol. 474. No. 2. P. 234–237 (in Russ.).
33. Piskareva V. M., Gennadiev A. N., Lychagin M. Yu. River Fluxes of Polyarenes in the Deltas of the Don, Kuban, and Volga Rivers. *Moscow State University Bulletin*. *Series 5. Geography.* 2021. No. 5. P. 14–23 (in Russ.).
34. Lychagin M., Porsheva S., Sokolov D., Erina O., Krastyn E., Efimov V., Dubrovskaya T., Kotov D., Kasimov N. Levels, D,S-Patterns and Source Identification of Metals and Metalloids in River Waters of the Gas-Producing Region in the North of Western Siberia (Pur River Basin). *Geography, Environment, Sustainability*. 2024. Vol. 17. No. 4. https://doi.org/10.24057/2071-9388-2024-3741
35. Liu S., Wang P., Huang Q., Gabysheva O. I., Li Z., Zhang J., Kazak E. S., Liu Y., Bazarzhapov T. Z., Gabyshev V. A., Shpakova R. N., Frolova N. L., Pozdniakov S. P. A Database of Water Chemistry in Eastern Siberian Rivers. *Scientific Data*. 2022. Vol. 9. Art. 737. https://doi.org/10.1038/s41597-022-01844-y
36. Ivanova I., Savichev O., Trifonov N., Kolubaeva Y. V., Volkova N. Major-Ion Chemistry and Quality of Water in Rivers of Northern West Siberia. *Water* (Switzerland). 2021. Vol. 13. No. 21. https://doi.org/10.3390/w13213107
37. Amos H. M., Jacob D. J., Kocman D., Horowitz H. M., Zhang Y., Dutkiewicz S., Horvat M., Corbitt E. S., Krabbenhoft D. P., Sunderland E. M. Global Biogeochemical Implications of Mercury Discharges from Rivers and Sediment Burial. *Environmental Science and Technology*. 2014. Vol. 48. No. 16. https://doi.org/10.1021/es502134t
38. Savenko V. S. Chemical Composition of Suspended Sediments in the Rivers of the World. Moscow: GEOS, 2006. 175 p. (in Russ.)
39. Viers J., Dupré B., Gaillardet J. Chemical Composition of Suspended Sediments in World Rivers: New Insights from a New Database. *Science of The Total Environment*. 2009. Vol. 407. No. 2. P. 853–868. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.09.053
40. Muller G., Middelburg J. J., Sluijs A. Introducing GloRiSe – A Global Database on River Sediment Composition. *Earth System Science Data*. 2021. Vol. 13. No. 7. https://doi.org/10.5194/essd-13-3565-2021
41. Hartmann J., Lauerwald R., Moosdorf N. A Brief Overview of the GLObal RIver Chemistry Database, GLORICH. *Procedia Earth and Planetary Science*. 2014. Vol. 10. P. 23–27. https://doi.org/10.1016/j.proeps.2014.08.005
42. Efimov V. A. Spatio-Temporal Variability of the Chemical Composition of River Sediments in the Russian Arctic: PhD Dissertation in Geography. Moscow, 2023. 135 p. (in Russ.).
43. Juhls B. et al. Lena River Biogeochemistry Captured by a 4.5-Year High-Frequency Sampling Program. *Earth System Science Data*. 2025. Vol. 17. No. 1. P. 1–28. https://doi.org/10.5194/essd-17-1-2025
44. Cai Y., Guo L. Abundance and Variation of Colloidal Organic Phosphorus in Riverine, Estuarine, and Coastal Waters in the Northern Gulf of Mexico. *Limnology and Oceanography.* 2009. Vol. 54. No. 4. P. 1393–1402.
45. Semenova I. V., Solodovnikov B. V., Grudzevich O. I., Dorodonova Yu. A. Use of Automated Water Quality Monitoring Stations for Observations of the State and Pollution of Transboundary Rivers (in Russian). *Environmental Monitoring Systems*. 2019: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference, Sevastopol, September 12–13, 2019. Sevastopol: Institute of Natural and Technical Systems, 2019. P. 95.
46. Tarasov M. K., Tutubalina O. V. Methodology for Determining Water Turbidity in the Selenga River and Adjacent Water Area of Lake Baikal Using Remote Sensing Data. *Earth Research from Space*. 2018. No. 1. P. 60–71 (in Russ.).
47. Chalov S., Prokopyeva K. Sedimentation and Erosion Patterns of the Lena River Anabranching Channel. *Water*. 2022. Vol. 14. No. 23. Art. 3845. https://doi.org/10.3390/w14233845

48. Griffin C. G., Frey K. E., Rogan J., Holmes R. M. Spatial and Interannual Variability of Dissolved Organic Matter in the Kolyma River, East Siberia, Observed Using Satellite Imagery. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2011. Vol. 116. No. G3. https://doi.org/10.1029/2010JG001634
49. Yang H., Kong J., Hu H., Du Y., Gao M., Chen F. A Review of Remote Sensing for Water Quality Retrieval: Progress and Challenges. *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14. No. 8. Art. 1770. https://doi.org/10.3390/rs14081770

Сведения об авторах:

Чалов Сергей Романович, д-р геогр. наук, заведующий лабораторией, НИЛ эрозии почв и русловых процессов, географический факультет, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова», Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1; https://orcid.org/0000-0002-6937-7020; e-mail: hydroserg@mail.ru

Крастынь Екатерина Александровна, младший научный сотрудник, лаборатория геохимии природных вод, географический факультет, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова», Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1; https://orcid.org/0009-0006-9989-0868; e-mail: krastyn-e@mail.ru

Ефимов Василий Антонович, канд. геогр. наук, младший научный сотрудник, кафедра гидрологии суши, географический факультет, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова», Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1; https://orcid.org/0000-0003-3433-6787; e-mail: roxifixat@mail.ru

Ерина Оксана Николаевна, канд. геогр. наук, заведующая Красновидовской УНС, кафедра гидрологии суши, географический факультет, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова», Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1; https://orcid.org/0000-0001-8579-3852; e-mail: otamiblack@yandex.ru

Андрюшин Дмитрий Станиславович, научный сотрудник, Игарский геокриологический стационар – филиал Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, Россия, г. Игарка, 663200; https://orcid.org/0000-0001-5674-3135; e-mail: andriushinds@mail.ru

Жихарев Вячеслав Сергеевич, канд. биол. наук, доцент, кафедра экологии, Институт биологии и биомедицины, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского», Россия; https://orcid.org/0000-0003-3241-2133; e-mail: zhiharev@ibbm.unn.ru

Клещенков Алесей Владимирович, канд. геогр. наук, старший научный сотрудник, ФГБУН «Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук», Россия, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, д. 41; https://orcid.org/0000-0002-7976-6951; e-mail: klealeksej@yandex.ru

Колесников Роман Александрович, канд. геогр. наук, заведующий сектором охраны окружающей среды, ГКУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики», Россия, 629008, Ямало-Ненецкий автономный округ, г. Салехард; https://orcid.org/0000-0002-2722-5133; e-mail: RAKolesnikov@yanao.ru

Лохов Алексей Сергеевич, старший научный сотрудник, Северо-Западное отделение Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Россия, 163002, Архангельск, наб. Северной Двины, д. 17; e-mail: szo@ocean.ru

Лычагин Михаил Юрьевич, канд. геогр. наук, доцент, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, географический факультет, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова», Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1; https://orcid.org/0000-0002-6224-3257; e-mail: lychagin@geogr.msu.ru

Махнович Наталья Михайловна, научный сотрудник, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова», Россия, 163002, г. г. Архангельск, наб. Северной Двины, д. 17; e-mail: szo@ocean.ru

Нецветаева Ольга Петровна, старший научный сотрудник, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова», Россия, 163002, г. Архангельск, наб. Северной Двины, д. 17; e-mail: szo@ocean.ru

Котова Екатерина Ильинична, канд. геогр. наук, ведущий научный сотрудник, директор Северо-Западного отделения Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Россия, 163013, г. Архангельск, Маймаксанское шоссе, д. 1, корп. 1; e-mail: ecopp@yandex.ru

Панченко Евгения Дмитриевна, канд. геогр. наук, научный сотрудник, Институт водных проблем РАН, ул. Губкина, 3, Москва, 119333; ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова», Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1; https://orcid.org/0000-0002-0745-3518; e-mail: panchenko.zhe@yandex.ru

Печкин Александр Сергеевич, канд. геогр. наук, научный сотрудник, ГКУ ЯНАО «научный центр изучения Арктики», 629008, Тюменская область, Ямало-Ненецкий автономный округ, г. Салехард, ул. Республики, д. 20; https://orcid.org/0000-0002-8558-7247; e-mail: a.pechkin.ncia@gmail.com

Сапелкин Николай Сергеевич, волонтер, г. Воронеж, Россия, sapelkin@mail.ru

Соколов Дмитрий Игоревич, канд. геогр. наук, старший научный сотрудник, кафедра гидрологии суши, географический факультет, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова», Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1; https://orcid.org/0000-0001-9035-1725; e-mail: dmitriy.sokolov@yandex.ru

Чудакова Ангелина Романовна, инженер, лаборатория геохимии природных вод, географический факультет, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова», Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1; eco.chudakova@gmail.com

Коноплев Алексей Владимирович, д-р биол. наук, заведующий лабораторией, лаборатория геохимии природных вод, географический факультет, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова», Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1; https://orcid.org/0000-0002-9930-8739; e-mail: alexeikonoplev@gmail.com

Касимов Николай Сергеевич, д-р геогр. наук, заведующий кафедрой, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, географический факультет, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова», Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1; https://orcid.org/0000-0001-9177-6020; e-mail: nskasimov@mail.ru

About the authors:

Sergey R. Chalov, Doctor of Geographical Sciences, Head of Laboratory, Research Laboratory of Soil Erosion and Channel Processes, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia; https://orcid.org/0000-0002-6937-7020; e-mail: hydroserg@mail.ru

Ekaterina A. Krastyn, Junior Researcher, Laboratory of Natural Water Geochemistry, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia; https://orcid.org/0009-0006-9989-0868; e-mail: krastyn-e@mail.ru

Vasily A. Efimov, PhD in Geography, Junior Researcher, Department of Land Hydrology, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia; https://orcid.org/0000-0003-3433-6787; e-mail: roxifixat@mail.ru

Oksana N. Erina, PhD in Geography, Head of the Krasnovidovo Educational and Scientific Station, Department of Land Hydrology, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia; https://orcid.org/0000-0001-8579-3852; e-mail: otamiblack@yandex.ru

Dmitry S. Andryushin, Researcher, Igarka Geocryological Station – Branch of the Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Igarka, 663200, Russia; https://orcid.org/0000-0001-5674-3135; e-mail: andriushinds@mail.ru

Vyacheslav S. Zhikharev, PhD in Biology, Associate Professor, Department of Ecology, Institute of Biology and Biomedicine, Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Russia; https://orcid.org/0000-0003-3241-2133; e-mail: zhiharev@ibbm.unn.ru

Aleksey V. Kleshchenkov, PhD in Geography, Senior Researcher, Federal Research Centre the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, 41 Chekhova Ave., Rostov-on-Don, 344006, Russia; https://orcid.org/0000-0002-7976-6951; e-mail: kle-aleksej@yandex.ru

Roman A. Kolesnikov, PhD in Geography, Head of the Environmental Protection Sector, Scientific Centre for Arctic Studies, Yamalo-Nenets Autonomous Okrug, Salekhard, 629008, Russia; https://orcid.org/0000-0002-2722-5133; e-mail: RAKolesnikov@yanao.ru

Aleksey S. Lokhov, Senior Researcher, Northwestern Branch of the Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, 17 Severnaya Dvina Embankment, Arkhangelsk, 163002, Russia; e-mail: szo@ocean.ru

Mikhail Yu. Lychagin, PhD in Geography, Associate Professor, Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia; https://orcid.org/0000-0002-6224-3257; e-mail: lychagin@geogr.msu.ru

Natalya M. Makhnovich, Researcher, Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov, 17 Severnaya Dvina Embankment, Arkhangelsk, 163002, Russia; e-mail: szo@ocean.ru

Olga P. Netsvetaeva, Senior Researcher, Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov, 17 Severnaya Dvina Embankment, Arkhangelsk, 163002, Russia; e-mail: szo@ocean.ru

Ekaterina I. Kotova, PhD in Geography, Director of the Northwestern Branch of the Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, 1 Bldg. 1 Maymaksanskoye Highway, Arkhangelsk, 163013, Russia; e-mail: ecopp@yandex.ru

Evgeniya D. Panchenko, PhD in Geography, Researcher, Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, 3 Gubkina St., Moscow, 119333, Russia; Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia; https://orcid.org/0000-0002-0745-3518; e-mail: panchenko.zhe@yandex.ru

Alexander S. Pechkin, PhD in Geography, Researcher, Scientific Centre for Arctic Studies, 20 Respubliki St., Salekhard, Yamalo-Nenets Autonomous Okrug, Tyumen Region, 629008, Russia; https://orcid.org/0000-0002-8558-7247; e-mail: a.pechkin.ncia@gmail.com

Aleksey D. Sazonov, Researcher, Federal Research Centre the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, 41 Chekhova Ave., Rostov-on-Don, 344006, Russia

Nikolay S. Sapelkin, Volunteer, Voronezh, Russia; e-mail: sapelkin@mail.ru

Dmitry I. Sokolov, PhD in Geography, Senior Researcher, Department of Land Hydrology, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia; https://orcid.org/0000-0001-9035-1725; e-mail: dmitriy.sokolov@yandex.ru

Angelina R. Chudakova, Engineer, Laboratory of Natural Water Geochemistry, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia; e-mail: eco.chudakova@gmail.com

Aleksey V. Konoplev, Doctor of Biological Sciences, Head of Laboratory, Laboratory of Natural Water Geochemistry, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia; https://orcid.org/0000-0002-9930-8739; e-mail: alexeikonoplev@gmail.com

Nikolay S. Kasimov, Doctor of Geographical Sciences, Head of Department, Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia; https://orcid.org/0000-0001-9177-6020; e-mail: nskasimov@mail.ru

Поступила в редакцию / Received 15.04.2026
Поступила после рецензирования / Revised 19.05.2026
Принята к публикации / Accepted 27.05.2025

УДК 556.06; 574 *https://doi.org/10.35567/19994508-2026-3-94-114*

Оригинальная статья/Original paper

Моделирование эмиссии метана из Цимлянского водохранилища с различным набором входных параметров

В. А. Ломов[1], **М. Г. Гречушникова**[1,2]

lomson620@mail.ru

[1] *Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия*
[2] *Институт водных проблем Российской академии наук, Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Водохранилища являются антропогенными источниками поступления парниковых газов в атмосферу. Работа посвящена гидроэкологическому моделированию Цимлянского водохранилища и определению характерных значений эмиссии метана с его поверхности. Метан, несмотря на его небольшую концентрацию в воздухе, обладает высоким потенциалом глобального потепления. На Цимлянском водохранилище метод оценки эмиссии метана, включающий и натурные данные, и математическое моделирование, ранее не применялся. **Методы.** Модель была откалибрована с использованием данных натурных наблюдений 2023–2024 гг. Инструментальное определение эмиссии проводилось методом «плавучих камер», пробы обработаны на хроматографе «Хроматэк-Кристалл 5000.2». Комплекс полевых работ включал изучение характеристик донных отложений, распределения температуры воды и растворенного кислорода в водной толще. **Результаты.** По полученным данным и результатам выявлена межгодовая изменчивость содержания и удельного потока метана, связанная с особенностями гидрологической структуры водоема в зависимости от погодных условий, а также пространственная изменчивость, обусловленная различием характера донных отложений и глубины станций. Модель показала адекватную степень воспроизведения температурного и кислородного режимов, а также сходимость временного хода удельных потоков метана между численными экспериментами и натурными данными.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: водная экосистема, Цимлянское водохранилище, метан, удельные потоки метана, донные отложения, температура воды, растворенный кислород, гидроэкологическое моделирование

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование выполнено в рамках государственного задания по теме «Гидрологический режим и экологическое состояние водных объектов суши в условиях современного и будущего климата и антропогенного воздействия»; полевые данные получены в рамках проекта «Карбоновый полигон “Цимлянское водохранилище”» М7.7/08-18-24.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ломов В. А., Гречушникова М. Г. Моделирование эмиссии метана из Цимлянского водохранилища с различным набором входных параметров // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2026. № 3. С. 94–114. https://doi.org/10.35567/19994508-2026-3-94-114; EDN: NZZNCT

© Ломов В. А., Гречушникова М. Г., 2026

Modeling of methane emission from Tsimlyansk reservoir with various set of input parameters

Victor A. Lomov[1], **Maria G. Grechushnikova**[1,2]

lomson620@mail.ru

[1] *Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*
[2] *Institute of Water Problems, Moscow, Russia*

ABSTRACT

Relevance. Reservoirs are anthropogenic sources of greenhouse gases emitted into the atmosphere. This work is devoted to hydroecological modeling of the Tsimlyansk Reservoir and determination of characteristic values of methane emissions from its surface. Methane, despite its low concentration in the air, has a high global warming potential. At the Tsimlyansk Reservoir, a method for estimating methane emissions, incorporating both in-situ data and mathematical modeling, has not previously been used. **Methods.** The model was calibrated using in situ observation data from 2023–2024. Instrumental determination of emissions was carried out using the "floating chamber" method, and samples were processed on a Chromatec-Crystal 5000.2 chromatograph. The fieldwork included studying the characteristics of bottom sediments, water temperature and dissolved oxygen profiles in the water column. **Results.** Based on the data and results obtained, interannual variability in methane content and specific flux was identified, related to the reservoir's hydrological structure and weather conditions, as well as spatial variability due to differences in the nature of bottom sediments and station depths. The model demonstrated adequate reproduction of temperature and oxygen conditions, as well as convergence in the time course of specific methane fluxes between numerical experiments and field data.

KEYWORDS: aquatic ecosystem, Tsimlyansk reservoir, methane, specific methane fluxes, bottom sediments, water temperature, dissolved oxygen, hydro/ecological modeling

FINANCING: The study was carried out within the framework of the State Assignment of the MSU on the topic "Hydrological regime and ecological state of water bodies on land in conditions of current and future climate and anthropogenic impact"; the field data was obtained within the framework of the Carbon landfill project "Tsimlyansk reservoir" M7.7/08-18-24.

FOR CITATION: Lomov V. A., Grechushnikova M. G. Modeling of methane emission from Tsimlyansk reservoir with various set of input parameters. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management.* 2026. No. 3. P. 94–114. https://doi.org/10.35567/19994508-2026-3-94-114; EDN: NZZNCT

ВВЕДЕНИЕ

Водохранилища являются важным компонентом энергосистемы Российской Федерации и, как и естественные водные объекты, источниками эмиссии метана. Оценки эмиссии метана с водохранилищ мира значительно различаются – от 2 до 122 Тг/год [1, 2]. Наиболее современная оценка глобальной эмиссии метана с водохранилищ мира в различных природных зонах [3] при сравнении с данны-

ми измерений на некоторых водохранилищах России показывает существенное расхождение результатов [4]. Многофакторность процесса эмиссии затрудняет параметризацию удельного потока метана и его диагностические и прогностические расчеты по данным единичных или нерегулярных измерений [5].

Основным фактором поступления метана в слабопроточном водохранилище при отсутствии значительных источников загрязнения является анаэробное разложение органического вещества как аллохтонного, так и автохтонного происхождения [6, 7]. Метан, образованный посредством жизнедеятельности архей-метаногенов, поступает к поверхности водоема в виде двух основных составляющих потока – диффузионного и пузырькового [8]. Диффузионный перенос метана в водной толще имеет небольшую скорость (коэффициент диффузии ~ 10^{-5} см^2/с), но главный фактор, ограничивающий его выход в атмосферу, – это микробное аэробное окисление [9]. Пузырьковый перенос возникает при перенасыщении порового раствора донных отложений метаном, резко снижает окисление, поскольку время подъема пузырька через кислородсодержащий слой составляет минуты, а то и секунды [10]. Так как растворимость газов чувствительна к гидростатическому давлению столба воды, в водохранилищах возможны проявления интенсивных пузырьковых выбросов, сопряженные с регулированием уровня воды [11]. Кроме того, в отличие от незарегулированных озер, для водохранилищ характерна дегазация метана при сбросах воды в нижний бьеф [12]. Весенний выброс метана, вызванный вскрытием ледяного покрова, также наблюдается на водохранилищах умеренной зоны [13].

Измерения удельного потока метана с водохранилищ ПАО «РусГидро», расположенных в различных регионах России, выявили значительный региональный и сезонный разброс значений эмиссии [14]. Несмотря на проведение по инициативе компаний МКПАО «Эн+ Груп» и ПАО «РусГидро» масштабных полевых работ в 2020–2023 гг. и пополнение банка данных сведениями об удельном потоке метана на водохранилищах России, по-прежнему остались малоизученными вопросы о его временной и пространственной неоднородности. Для уточнения оценок эмиссии метана из Цимлянского водохранилища авторами использована модель LAKE [15], которая при калибровке по результатам полевых данных с достаточной точностью воспроизводит сезонные изменения потока метана и позволяет оценить его эмиссию для периодов с различными погодными и гидрологическими условиями.

Помимо модели LAKE в мировом научном сообществе применяются и другие математические модели, которые включают блок биохимических расчетов. Так, например, на базе широко известной модели Delft3D разработан блок биохимических уравнений Delft3D-WAQ[1], однако данная модель из-за своей трехмерной структуры требует большого количества вычислительных ресурсов и не

1 D-Water Quality. User Manual for Delft3D-WAQ. [Электр. ресурс]. URL: https://content.oss.deltares.nl/delft3d4/D-Water_Quality_User_Manual.pdf (дата обращения: 01.08.2024).

может быть использована для многочисленных запусков на длительный период времени с учетом калибровки внутренних параметров модели. Другая распространенная модель озерной экосистемы GLM-AED включает широкий перечень биохимических параметров [16], но для оценок временной динамики удельных потоков метана в атмосферу с поверхности водоемов данная модель не применялась. Модель LAKE, в свою очередь, уже успешно апробирована для расчетов годовой эмиссии метана с разнотипных водохранилищ [15, 17, 18]. Кроме того, авторы имеют непосредственный доступ к внутреннему коду модели и хорошо владеют ее инструментарием.

Цимлянское водохранилище в данной работе рассматривается как объект апробации методики оценки эмиссии метана из водоема с помощью математического моделирования при небольшом числе натурных данных. Это один из крупнейших водоемов на юге Европейской территории России, аккумулирующий сток р. Дон. В пределах его акватории находятся различные типы аквальных комплексов, что выражается в большой пространственной изменчивости характеристик водной экосистемы. Цимлянское водохранилище отличается от водохранилищ Нижней Волги большим периодом водообмена (коэффициент водообмена у Саратовского и Волгоградского водохранилищ 17,97 и 7,57 год$^{-1}$ соответственно, а у Цимлянского – 0,83 год$^{-1}$ [19]), что создает предпосылки формирования бескислородных условий в придонных слоях воды. На Дону отсутствует столь же большой каскад водохранилищ, как на Волге. Хотя многие его притоки зарегулированы, но водохранилища на них имеют небольшую регулирующую емкость и не оказывают такое значительное влияние на приток наносов, как, например, на Нижней Волге. Поэтому режим Цимлянского водохранилища, донные отложения и характерные значения удельного потока метана значительно отличаются от Волгоградского водохранилища [14, 20].

На Цимлянском водохранилище с 2023 г. функционирует карбоновый полигон, в число задач которого входит накопление данных измерений в различные сезоны. После публикации материалов эти данные возможно использовать для более детальной верификации модели. Результаты первичных исследований эмиссии метана, проведенных сотрудниками ИФА РАН и ФГБУ РосНИИВХ, опубликованы в [20] и выявили значительную пространственную неоднородность удельного потока метана на акватории Цимлянского водохранилища. Цель представленной в статье работы – апробация расчета эмиссии метана с Цимлянского водохранилища на модели LAKE, ее верификация и сравнение с результатами расчета эмиссии метана по натурным данным.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Цимлянское водохранилище на р. Дон образовано в 1952 г. Цимлянской плотиной. Мелководная зона с глубинами до 2 м занимает при НПУ ~ 10 % его площади [21]. Ледостав на Цимлянском водохранилище наблюдается с сере-

дины декабря по конец марта, весной верхний участок быстрее освобождается ото льда из-за притока паводковых вод, а осенью приплотинный участок замерзает почти на месяц позже, чем верховья. Наибольшие градиенты температуры воды (до 1,5 °С/м) отмечаются в июне и в июле. Ежегодно на Цимлянском водохранилище фиксируется «цветение» воды вследствие интенсивного роста водорослей, при этом в поверхностных слоях наблюдается перенасыщение воды кислородом. В придонных горизонтах дефицит кислорода присутствует регулярно в конце июля – начале августа.

Донные отложения в Цимлянском водохранилище представлены различными фракциями: мелкий песок, илистый песок, песчанистый и глинистый ил. В нижнем районе водоема на затопленной пойме происходит накопление отмерших моллюсков, приводящее местами к формированию слоя, сложенного раковинами с содержанием ила. На верхнем участке водохранилища отложения накапливаются за счет наносов, поступающих с речным стоком Дона, на среднем и нижнем – за счет береговой абразии [22].

Для проведения работы обобщены данные натурных наблюдений комплексных полевых съемок водоема в периоды с 27 сентября по 1 октября 2023 г. и с 7 по 10 сентября 2024 г., полученные в ходе экспедиций карбонового полигона «Цимлянское водохранилище». Схема расположения станций представлена на рис. 1. Измерение удельного потока метана производили методом «плавучих камер» с известными объемом и площадью основания, которые экспонировались на водной поверхности 20 мин. Воздух из камер в начале



Рис. 1. Схема расположения станций измерений
Fig. 1. The scheme of observation stations placement

и конце экспозиции отбирался шприцом с трехходовым краном в склянки объемом 20 мл, предварительно заполненные насыщенным раствором NaCl. Значения удельного потока метана определяли по разности концентрации метана в камере в начале и в конце экспозиции [23] с учетом метеопараметров с ручной метеостанции Kestrel 5000. Глубину станции измеряли судовым эхолотом. Сопутствующие измерения температуры воды и растворенного кислорода производили зондом YSI ProODO.

Одновременно были отобраны пробы воды с разных горизонтов для определения содержания метана. Из батометра Рутнера в шприц с трехходовым краном отбирали 40 мл воды и 20 мл воздуха, шприц встряхивали 2–3 мин, чтобы перевести растворенный метан в равновесие с газообразной фазой [24]. Воздух из шприца закачивали во флакон с насыщенным раствором NaCl, для учета содержания метана в воздухе отдельно отбиралась проба воздуха на каждой станции. Определение метана в пробах производили на газовом хроматографе «Хроматэк-Кристалл 5000.2» производства ЗАО «Хроматэк» (г. Йошкар-Ола) с пламенно-ионизационным детектором.

Отбор проб донных отложений производили дночерпателем Экмана – Берджа и трубкой ТГ-1. Определение содержания органического вещества (ОВ) в донных отложениях (ДО) производилось методом потерь при прокаливании[2].

В качестве основного инструмента для численного моделирования эмиссии метана из Цимлянского водохранилища использована модель LAKE 3.2. Подробное описание модели приведено в публикации [15], а также на сайте[3]. В модели реализована квазидвумерная постановка численных экспериментов для воспроизведения процессов, происходящих в водохранилищах. При осреднении по горизонтали слоев водной толщи в модели дифференцированы колонки донных отложений по глубине водоема, благодаря чему воспроизводится сложная морфометрическая структура рельефа дна, характерная для долинных водохранилищ. Модель включает блок термогидродинамических уравнений, а также блок биохимических процессов, в который входят генерация метана в донных отложениях, окисление метана в водной толще, модель пузырькового потока метана и т. д.

В качестве начальных условий задавался условный начальный профиль всех характеристик, из-за чего при расчете использовался разгонный период (spin up), позволяющий водной экосистеме прийти в устойчивое состояние. Разгонный период не учитывался при анализе результатов моделирования. Входные данные в модель – информация об атмосферном форсинге (полученная по данным реанализа ERA5-Land) и информация об изменении водного режима водоема, включая динамику уровня воды. Период расчета модели: 01.01.2022 – 31.12.2024 (дополнительно 2022 г. считали дважды в качестве разгонного периода).

2 ГОСТ 23740-2016. Грунты. Методы определения содержания органических веществ. М.: Стандартинформ, 2017.

3 Lake. Mathematical model. [Электр. ресурс]. 2021. https://mathmod.org/lake/ (дата обращения: 15.01.2026).

Процесс калибровки модели проводился с помощью методов случайного подбора параметров и эволюционных алгоритмов, реализованных на языке программирования Python – SPOTPY[4]. В ходе калибровки последовательно проводился подбор параметров термодинамического режима, кислородного режима и параметров метанового блока.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные полевые измерения выявили значительную неоднородность содержания и удельного потока метана в Цимлянском водохранилище – от 0 до 1139 мгCH_4/м^{2}сут (табл. 1). Большой разброс значений обусловлен различиями характера донных отложений, глубиной станции, содержанием растворенного кислорода, стратификацией, поступлением водных масс притоков, атмосферным давлением и прочими факторами. Фотосинтез в поверхностном слое и хорошее перемешивание, способствующие аэрации воды, сокращают поток метана из донных отложений при окислении. На большинстве станций в придонном горизонте отсутствовала аноксия, что способствовало снижению потока метана на поверхности.

Наибольшие значения потока метана приурочены к верховьям водохранилища и приустьевым заливам притоков, где происходит седиментация и формирование илистых, более богатых органическим веществом донных отложений, чем пески и ракушечник обширной затопленной поймы и террасы. Для расчета эмиссии в период съемки водохранилища использованы данные батиграфических кривых для отсеков водохранилища, полученные по данным схем, приведенных в[5] [25]. Водоем был подразделен на районы согласно принятому выделению в [26], для каждого района в соответствии с формой батиграфической кривой определена площадь, занятая затопленными русловой ложбиной и пойменно-террасным комплексом. По имеющимся материалам съемок для участков определены значения удельного потока метана, измерявшегося над участками с различной глубиной. Станции назначались заранее с учетом морфологического строения затопленной долины (рис. 1). Расчеты суточной эмиссии метана с учетом дифференциации его удельного потока над затопленными руслом и поймой по районам дают оценку в 205 т CH_4 для экспедиции в 2023 г. и 32,7 т CH_4 в 2024 г. Различия связаны с погодными условиями, глубиной перемешивания и аэрацией водной толщи. Подобная межгодовая изменчивость требует либо постоянного мониторинга, либо привлечения инструментов математического моделирования, что и было реализовано в рамках представленного исследования.

4 SPOTPY. Python library. Documentation. [Электр. ресурс]. 2020. https://spotpy.readthedocs.io/en/latest/ (дата обращения 15.11.2025).

5 Уточнение морфологических характеристик Цимлянского водохранилища с целью повышения эффективного режима его эксплуатации. М.: Филиал Гидропроекта, 2005. 145 с.

Таблица 1. Средние значения удельного потока метана (УПМ) для морфологических районов за периоды съемок, мгCH_4/м^{2}сут

Table 1. Average values of methane specific flux (mgCH_4/m^{2}day) for morphological regions during the field campaigns

Район		27 сентября – 1 октября 2023 г.	7 – 10 сентября 2024 г.
х. Кривский, плотина	Станции	2–7	
	УПМ	0,0–6,4	0,0–4,4
Устье р. Аксай Курмоярский – х. Кривский	Станции	9–10	
	УПМ	0,0–0,7	НД
г. Ильмень Суворовский – устье р. Аксай Курмоярский	Станции	11–15	
	УПМ	1,1–8,1	0,0–6,7
х. Логовской – г. Ильмень Суворовский	Станции	16–18, 20	
	УПМ	3,5–12,9	39,5–135
Выше х. Логовского	Станции	22, 25	
	УПМ	41,3–689	НД
Приустьевые заливы	Станции	17, 19, 21, 23	
	УПМ	12,9–1139	4,8–736

На рис. 2 приведено сравнение интегральных профилей распределения температуры по глубине Цимлянского водохранилища по результатам модели и по данным наблюдений (данные об интегральном распределении температу-

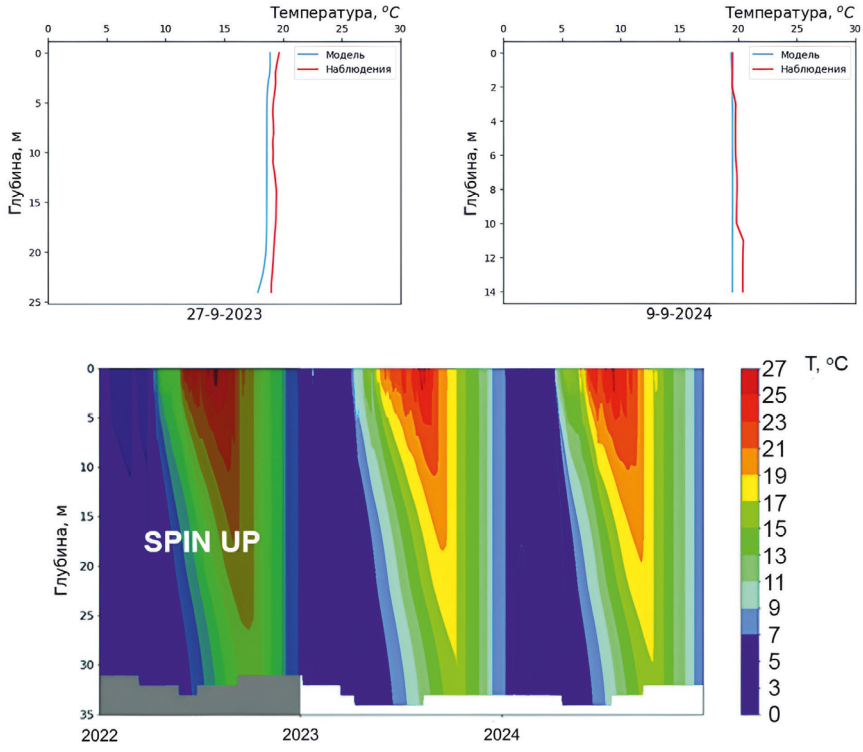


Рис. 2. Сравнение вертикальных профилей температуры по глубине Цимлянского водохранилища и временная изменчивость температуры по результатам расчета модели

Fig. 2. Comparison of vertical profiles of water temperature by depth of Tsimlyansk reservoir and temporal variability of temperature according to model calculations

ры воды по глубине получены с помощью осреднения профилей зондирования на станциях наблюдений), а также временная изменчивость температуры по глубине за период расчета.

Для Цимлянского водохранилища, как для димиктического водоема, характерны четыре фазы термического цикла, которые воспроизводятся в модели. В зимний период в поверхностных горизонтах температура воды опускается до 0 °С, образуется ледяной покров. Весной и осенью наблюдается полное перемешивание водоема, что также отражено в модельных результатах. В летний период закономерно возникает температурная стратификация, слой наибольшего температурного градиента в течение теплого периода, образовавшись в мае – июне, постепенно заглубляется, и значительная часть водоема хорошо прогревается, после чего наступает фаза осеннего конвективного перемешивания.

Обе полевые съемки на Цимлянском водохранилище проводились в сентябре: в 2023 г. в условиях сохранившейся стратификации и в 2024 г. уже в период гомотермии при охлаждении водоема. Вертикальное однородное распределение температуры с глубиной хорошо воспроизводится в модели LAKE (рис. 2).

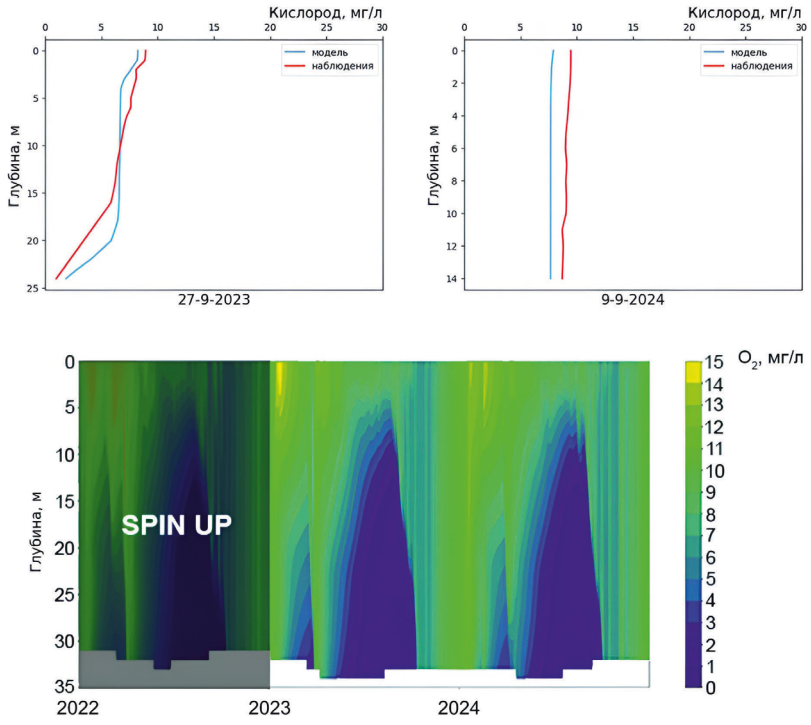


Рис. 3. Сравнение вертикальных профилей растворенного кислорода по глубине Цимлянского водохранилища и временная изменчивость содержания растворенного кислорода по результатам расчета модели

Fig. 3. Comparison of vertical profiles of dissolved oxygen by depth of Tsimlyansk reservoir and temporal variability of dissolved oxygen content according to model calculations

На рис. 3 представлено аналогичное сравнение результатов модели и данных наблюдений для растворенного кислорода, а также график его временной изменчивости с глубиной за 2022–2024 гг.

При относительно небольшой проточности [19] особенность кислородного режима Цимлянского водохранилища заключается в образовании зоны с бескислородными условиями в течение жарких периодов. При этом бескислородные условия могут продолжаться в отдельные годы и осенью, что хорошо видно по графикам совмещенных интегральных профилей распределения кислорода по глубине по результатам модели и по натурным данным в период первой полевой кампании (сентябрь 2023 г.) (рис. 3). Наступление периода, когда водная толща становится полностью насыщенной кислородом, может значительно варьировать от года к году в зависимости от предшествующих метеорологических условий. Тем не менее такие различия в кислородном режиме от года к году также адекватно описываются по результатам численных экспериментов с помощью модели LAKE. В остальную часть года содержание кислорода в водоеме достаточно высоко, максимума оно достигает в начале года, когда растворимость кислорода в воде наибольшая из-за низких температур, а биохимические процессы, на которые затрачивается кислород, в начале периода ледостава еще не сказываются на истощении его запасов.

В рамках проведенного исследования одной из задач математического моделирования эмиссии метана из Цимлянского водохранилища было изучение влияния различных комбинаций параметров модели на итоговую оценку выброса метана в атмосферу. Как уже отмечено выше, поток метана имеет очень высокую пространственно-временную изменчивость, а также высокую чувствительность к характеристикам водной среды и внешним условиям. Поэтому правильный подбор параметров при моделировании является ключевой задачей для корректной оценки эмиссии метана из водохранилища. Большое количество факторов, влияющих на удельный поток метана, приводит к необходимости использования натурных данных для калибровки численных моделей, без которой расхождение между результатами натурных наблюдений и численных экспериментов будет очень высоким.

Для того чтобы продемонстрировать необходимость использования натурных данных для моделирования эмиссии метана из водохранилищ, было проведено несколько запусков модели с разными параметрами в блоке реакций, связанных с генерацией и окислением метана. В эксперименте изменялись базовая скорость генерации метана, параметр температурной зависимости генерации, максимальная скорость окисления, параметры метановых пузырьков и т. д.

Первый эксперимент проведен со значениями параметров модели, являющимися значениями по умолчанию, т. е. эти значения в модели предустановлены до процесса калибровки. Во втором случае использовались значения па-

раметров, полученные в ходе исследования авторами динамики удельного потока метана на Иваньковском водохранилище, которое также характеризуется значительным «цветением» воды, но имеет более проточный режим (результаты моделирования эмиссии метана из Иваньковского водохранилища подробно описаны в [27]). И в третьем эксперименте была выполнена собственная калибровка параметров для реакций метанового блока для Цимлянского водохранилища по двум описанным выше полевым кампаниям. Результаты временной изменчивости потоков по описанным трем экспериментам представлены на рис. 4.

Значения параметров модели, которые заданы в ней по умолчанию, получены в основном в результате лабораторных экспериментов в ходе изучения микробиологических сообществ архей метаногенов или метанотрофных организмов (например, подобные исследования представлены в [28–30]). Эти значения являются осредненными из большого количества исследований, в т. ч. и при очень высоких температурах, не характерных для природных водоемов (до 40 °С) [30], а также для озер тропического пояса, где метаногенера-

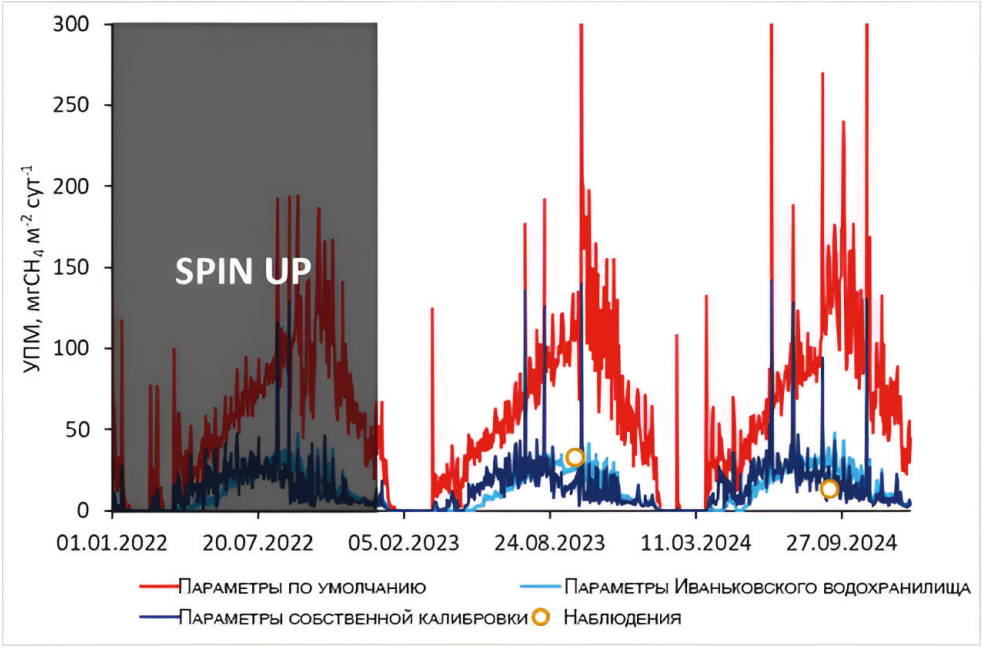


Рис. 4. Временная изменчивость удельного потока метана (УПМ) из Цимлянского водохранилища по результатам трех численных экспериментов с различными значениями входных параметров: значения по умолчанию; значения, аналогичные полученным для Иваньковского водохранилища; калибровка по натурным данным, полученным на Цимлянском водохранилище

Fig. 4. Temporal variability of methane specific flux (MSF) from Tsimlyansk reservoir according to numerical experiments with various sets of input parameters: default values; values, similar to calibrated values for Ivankovo reservoir; calibrated parameters according to field measurements data, obtained on Tsimlyansk reservoir

ция намного значительнее, чем в пресноводных водоемах умеренных широт. Поэтому не удивительно, что при применении к Цимлянскому водохранилищу подобных средних значений параметров результаты оценки эмиссии метана будут завышены.

Как следует из рис. 4, значения параметров модели «по умолчанию» приводят к завышенной оценке эмиссии метана из Цимлянского водохранилища. Более близкий к измерениям результат дает использование значений параметров, полученных для водоема-аналога. Разумеется, Иваньковское водохранилище отличается от Цимлянского проточностью и климатическими условиями, хотя оба расположены в умеренно-континентальном климате, однако при использовании параметров водоема-аналога результаты моделирования гораздо ближе к измеренным натурным данным и, более того, они близки к третьему эксперименту, где значения параметров для Цимлянского водохранилища калибровались отдельно. Ниже в табл. 2 приведены значения метрик ошибок, используемых для сравнения качества результатов описанных выше трех экспериментов.

При калибровке по натурным данным измеренных значений уровней потока метана из Цимлянского водохранилища удалось достичь минимальной относительной ошибки средних значений между моделью и данными наблюдений – 2 %. Значение метрики RSR, используемой для оценки качества математических моделей [31], также меньше 1 только для калибровки по натурным данным, в остальных случаях собственная изменчивость наблюдаемой величины меньше, чем ошибка модели, что свидетельствует о низкой надежности расчета.

Таблица 2. Оценка качества воспроизведения моделью значений удельного потока метана из Цимлянского водохранилища по результатам численных экспериментов

Table 2. Evaluation of the quality of the model's reproduction of methane specific fluxes values from the Tsimlyansk reservoir based on the results of the numerical experiments described above

Эксперимент	Относительная ошибка среднего значения	Относительная абсолютная ошибка	Отношение среднеквадратической ошибки к стандартному отклонению
	$\varepsilon[\%] = \left\lvert\frac{(\overline{MOD} - \overline{OBS})}{\overline{OBS}}\right\rvert$	$rMAE = \frac{1}{n}\left\lvert\sum_{i=1}^{n} OBS_i - MOD_i\right\rvert$	$RSR = \frac{RMSE}{\text{СКО}}$
Значения параметров по умолчанию	480 %	114	8,60
Значения параметров, аналогичные Иваньковскому водохранилищу	40 %	14,4	1,26
Значения параметров после калибровки по натурным данным	2 %	12,3	0,90

Исходя из полученных результатов, авторы не рекомендуют использовать базовые значения параметров биохимических процессов модели LAKE при гидроэкологическом моделировании для оценок годовой эмиссии метана. При наличии водоемов-аналогов допускается использование полученных при их моделировании значений необходимых параметров, однако наилучший результат возможен при использовании натурных данных измерений удельного потока метана в качестве материалов для калибровки.

Из табл. 2 видно, что даже для калибровки по натурным данным измерений удельного потока метана из Цимлянского водохранилища величина абсолютной ошибки модели остается достаточно высокой, что в первую очередь может быть связано с небольшим количеством данных наблюдений. Кроме того, используемые в численных экспериментах данные относятся только к одному периоду года – осенней гомотермии. Для наиболее корректных результатов моделирования необходимо учитывать измерения в летний период при наиболее устойчивой стратификации водной толщи и при наиболее высоких значениях УПМ, а самые точные результаты могут быть получены при калибровке модели по данным измерений за несколько лет в разные периоды года.

Что же касается оценки годовой эмиссии метана из Цимлянского водохранилища, она была получена по результатам модели как произведение УПМ за каждые сутки на площадь водоема за период с 2023 по 2024 г. (2022 г. являлся в модели разгонным периодом). Величина годовой эмиссии составила 12,4 тыс. т CH_4 за 2023 г. и 13,8 тыс. т CH_4 за 2024 г.

Дополнительно по результатам численных экспериментов для набора параметров модели после проведения калибровки по натурным данным проведена оценка вклада в общую величину эмиссии в атмосферу разных составляющих удельного потока метана. К основным составляющим потока метана относятся: диффузионный поток метана, пузырьковый поток и дегазация метана при сбросе воды в нижний бьеф ГЭС. Диффузионный поток, как правило, имеет небольшие величины из-за окисления метана в толще воды при подъеме от дна к поверхности. Его величина зависит в первую очередь от разницы концентрации метана в воде и в воздухе и от ряда метеоусловий. Пузырьковый поток появляется при пересыщении воды метаном, что в искусственных водоемах часто возникает из-за активной метаногенерации в грунтах. Пузырьки метана достигают поверхности воды достаточно быстро и не подвержены окислению, однако могут растворяться в водной толще в процессе подъема. Дегазация метана возникает при сбросах воды в нижний бьеф гидроузла и зависит от расхода воды и концентрации метана в верхнем и нижнем бьефах. На рис. 5 приведен график временной изменчивости основных составляющих потока метана в атмосферу по результатам модельных расчетов.

На примере 2023 и 2024 гг. отчетливо видно, что основной вклад в эмиссию метана в атмосферу вносит пузырьковая составляющая удельного потока.

Такая особенность не является уникальной для Цимлянского водохранилища, схожие результаты были получены по данным измерений или модельных экспериментов для Можайского, Иваньковского, Волгоградского водохранилищ [15, 17, 32].

Превышение пузырькового потока над диффузионным характерно для практически всего теплого периода года. Наиболее значительные пузырьковые УПМ наблюдаются в середине лета – в июле и августе. Это происходит по нескольким причинам. Во-первых, при устойчивой летней стратификации в придонных горизонтах устанавливаются бескислородные условия, что позволяет содержанию растворенного метана приближаться к критической концентрации, при превышении которой начинается образование пузырьков. Во-вторых, из-за жаркой погоды в поверхностных горизонтах воды, благодаря активному фотосинтезу, содержание кислорода очень велико, что в значительной степени ингибирует диффузионный поток.

В начале и середине осени, наоборот, наблюдается превышение и наибольшие в течение всего года значения диффузионного потока метана. В этот период метаногенерация ослабевает из-за снижения температуры, водная толща насыщается кислородом, поэтому метан не накапливается в придонной воде. Однако этот период гомотермии сопровождается активным конвективным перемешиванием воды, что приводит к тому, что насыщенные за лето метаном придонные воды поднимаются к поверхности и происходит усиление диффузионного переноса метана в атмосферу. Что же касается дегазации метана в нижнем бьефе Цимлянской ГЭС, ее величина не сопоставима с величиной эмис-

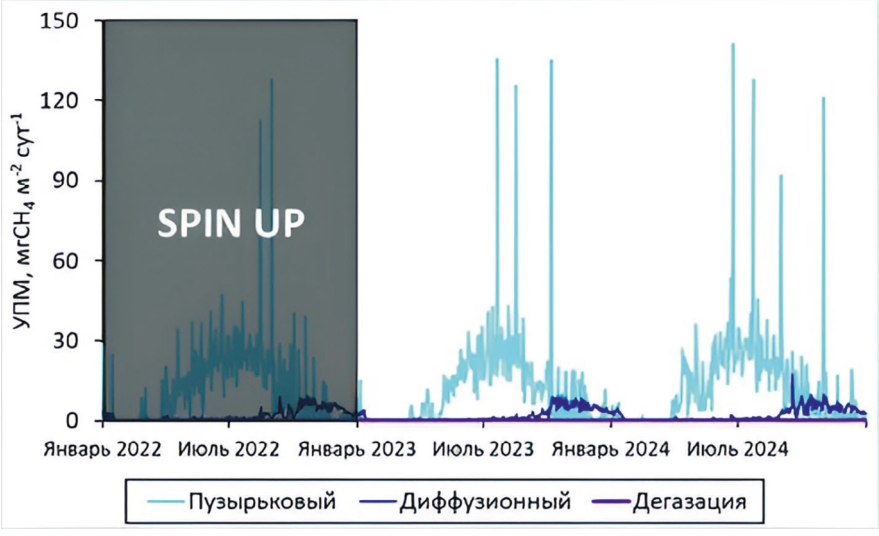


Рис. 5. Временная изменчивость пузырьковой и диффузионной составляющих УПМ, а также дегазации метана из Цимлянского водохранилища

Fig. 5. Temporal variability of the ebullition and diffusion components of the methane specific flux, as well as methane degassing from the Tsimlyansk reservoir

сии метана с поверхности водохранилища. Средние значения суточной дегазации метана при сбросах воды в нижний бьеф из Цимлянского водохранилища составляет около 60–70 кг CH_4 в сутки. В общей доле эмиссии метана вклад пузырькового потока составляет около 85 %, диффузионного – около 15 %, дегазации – менее одного процента.

Для сравнения проведена оценка годовой эмиссии метана с Цимлянского водохранилища по данным полевых кампаний без привлечения моделирования. При расчете годовой эмиссии за время ледостава принят период декабрь – март [32] с нулевым УПМ. Для весеннего и осеннего периодов – осредненные по районам (табл. 1) значения, полученные в период съемки в сентябре 2024 г., когда вода в водохранилище была полностью перемешана, для летнего периода – значения по съемке в сентябре 2023 г., когда сохранялась стратификация. При данных допущениях общий выход метана составил 17,2 тыс. т в год, что достаточно хорошо соответствует полученным выше модельным оценкам.

ВЫВОДЫ

На примере Цимлянского водохранилища авторами продемонстрирована методика оценки эмиссии метана с привлечением комплексного подхода, включающего данные натурных наблюдений и математического моделирования. Модель показала адекватную степень воспроизведения температурного и кислородного режимов, а также адекватную сходимость временного хода удельного потока метана и натурных данных, полученных in situ. На примере Цимлянского водохранилища показано, что для корректных модельных оценок такого рода необходимы данные натурных наблюдений, в качестве значений параметров модели возможно использование параметров для водоемов- аналогов, однако такие оценки будут нести в себе большую ошибку, чем моделирование с полноценной калибровкой по данным натурных измерений, проведенных на водохранилище.

Для грубой оценки годовой эмиссии метана по натурным данным необходимо иметь сведения о пространственном распределении удельного потока метана при наличии и при отсутствии стратификации в водоеме, принимая его выход в период ледостава равным нулю. Большая пространственная изменчивость удельного потока метана, обусловленная асимметричным продольным профилем, различием донных отложений на поперечных разрезах, ставит задачу проведения измерений на сетке станций в соответствии с морфометрическим строением водоема.

Теоретическая значимость работы заключается в выявлении решающей роли локальных параметров донных отложений и глубины в формировании пространственной неоднородности удельного потока метана, а также в обосновании необходимости локальной калибровки даже для водоемов одного

климатического пояса. В рамках проведенной работы практически апробирована методика, которая может быть использована для инвентаризации парниковых газов на водохранилищах с ограниченным объемом полевых данных.

Полученные оценки эмиссии (12,4–13,8 тыс. т CH_4 в год) важны для уточнения регионального углеродного баланса и экологической оценки вклада гидроэнергетики в выбросы парниковых газов в южном регионе России. Перспективы дальнейших исследований включают анализ климатической изменчивости эмиссии, а также адаптацию методики для прогнозных расчетов при проектировании новых ГЭС и при различных сценариях изменения климата.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTERESTS

The authors declare no relevant conflict of interests.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят сотрудников карбонового полигона «Цимлянское водохранилище» за помощь в проведении полевых работ.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank colleagues from the carbon polygon «Tsimlyansk reservoir» for their help in carrying out field work.

Описание применения генеративной модели: при проведении исследования и для подготовки текста статьи не использованы программы на основе искусственного интеллекта.

Description of a generative model application: No artificial intelligence-based programs were used during the research and for writing the text of the article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Giles J. Methane quashes green credentials of hydropower // Nature. 2006. Vol. 444. P. 524–525. https://doi.org/10.1038/444524a
2. Lima I., Ramos F., Bambace L., Rosa R. Methane emissions from large dams as renewable energy resources: a developing nation perspective // Mitigation Adaptation Strategy Global Change. 2006. Vol. 13. P. 1381–1386. https://doi.org/10.1007/s11027-007-9086-5
3. Johnson M. S., Matthews E., Bastviken D., Deemer B. et al. Spatiotemporal methane emission from global reservoirs // Journal of Geophysical Research: Biogeosciences. 2021. https://doi.org/10.1029/2021JG006305
4. *Гречушникова М. Г., Кравчук М. В.* Сравнение результатов натурных измерений эмиссии метана с разнотипных водохранилищ РФ с данными Global maps of methane emissions // Всерос. конф., посвященная памяти академика А. М. Обухова, «Турбулентность, динамика атмосферы и климата». М.: Физматкнига, 2022. С. 118–118.
5. Гречушникова М. Г., Репина И. А., Казанцев В. С. Параметризация удельного потока метана с акватории водохранилищ // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов: Труды IX Всерос. науч.-практ. конф. (г. Пермь, 25–28 мая 2023 г.). Пермь: ПГНИУ. 2023. Т. 1. С. 237–241.

6. Bazhin N. Methane Emission from Bottom Sediments // Chemistry for Sustainable Development. 2003. Vol. 11. P. 577–580.
7. Gruca-Rokosz R., Tomaszek J., Koszelnik P., Czerwieniec, E. Methane and carbon dioxide emission from some reservoirs in SE Poland // Limnol. Review. 2010. Vol. 10 (1). P. 15–21. https://doi.org/10.2478/v10194-011-0002-8
8. Bastviken D., Cole J., Pace M., Van de Bogert M. Fates of methane from different lake habitats: Connecting whole-lake budgets and CH4 emissions // Journal of Geophyscal Research. 2008. Vol. 113. P. 1–13. https://doi.org/10.1029/2007JG000608
9. Guerin F., Abril G. Significance of pelagic aerobic methane oxidation in the methane and carbon budget of a tropical reservoir // Journal of Geophysical Research. 2007. Vol. 112. P. 3006–3020. https://doi.org/10.1029/2006JG000393
10. Miller B., Arntzen E., Goldman A., Richmond M. Methane Ebullition in Temperate Hydropower Reservoirs and Implications for US Policy on Greenhouse Gas Emissions // Environmental Management. 2017. Vol. 60 (4). P. 615–629. https://doi.org/10.1007/s00267-017-0909-1
11. Harrison J., Deemer B., Birchfield M., O`Malley M. Reservoir Water-Level Drawdowns Accelerate and Amplify Methane Emission // Environmental Science & Technology. 2017. Vol. 51 (3) P. 1267–1277. https://doi.org/10.1021/acs.est.6b03185
12. Kemenes A., Melack J., Forsberg B. Downstream emissions of CH4 and CO2 from hydroelectric reservoirs (Tucuruí, Samuel, and Curuá-Una) in the Amazon basin // Inland Waters. 2016. Vol. 6. P. 1–8. https://doi.org/10.5268/IW-6.3.980
13. Казанцев В. С., Кривенок Л. А., Гречушникова М. Г. и др. Оценка эмиссии метана из Можайского водохранилища в весенний период // Метеорология и гидрология. 2026. № 3. С. 123–133. https://doi.org/10.52002/0130-2906-2026-3-123-133
14. Репина И. А., Гречушникова М. Г., Фролова Н. Л., Агафонова С. А. и др. Содержание и потоки метана в Волжских водохранилищах // Известия Российской академии наук. Сер. географическая. 2023. Т. 87. № 6. С. 899–913. https://doi.org/10.31857/S2587556623060080
15. Lomov V. A., Stepanenko V. M., Grechushnikova M. G., Repina I. A. Mechanistic modeling of the variability of methane emissions from an artificial reservoir // MDPI Water. 2024. Vol. 16. No. 1. 76. https://doi.org/10.3390/w16010076
16. Fenocchi A., Rogora M., Ciampittiello M., Dresti C., Hipsey M. R. Applicability of a one-dimensional coupled ecological-hydrodynamic numerical model to future projections in a very deep large lake (Lake Maggiore, Northern Italy/Southern Switzerland) // Ecological Modelling. 2019. Vol. 392. No. 1. P. 38–51. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2018.11.015
17. Tsvetnov E. V., Tyshova E. A., Lomov V. A., Kazantsev V. S., Sokolov D. I., Efimov V. A. Assessment of Methane Emissions from the Surface of the Volgograd Reservoir and the Associated Impact on the Environment // Water Resources. 2024. Vol. 51. No. (suppl. 1). P. S347–S355. https://doi.org/10.1134/S0097807824701513
18. Фролова Н. Л., Сазонов А. А., Ломов В. А. Эмиссия метана из Колымского водохранилища: данные наблюдений и результаты численных экспериментов // Вестник Московского университета. Сер. 5: География. 2025. Т. 80. № 6. С. 18–32. https://doi.org/10.55959/MSU0579-9414.5.80.6.2
19. Эдельштейн К. К. Водохранилища России: экологические проблемы, пути их решения // М: ГЕОС. 1998. 277 с.
20. Гречушникова М. Г., Репина И. А., Казанцев В. С., Усова Е. В. и др. Первые результаты изучения пространственно-временной изменчивости содержания и эмиссии метана в Цимлянском водохранилище // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 2. С. 80–100. https://doi.org/10.35567/19994508-2024-2-80-100

21. Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР. Цимлянское, водораздельные и Манычские водохранилища // под ред. В. А. Знаменского и В. М. Гейтенко. Л.: Гидрометеоиздат, 1977. 291 с.
22. Лобойко В. Ф., Зубов И. А. Роль факторов среды и антропогенного воздействия в формировании современной экосистемы Цимлянского водохранилища // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса. 2009. № 2 (14). С. 26–32.
23. Bastviken D., Cole J., Pace M., Tranvik L., et al. Methane emissions from lakes: Dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate // Global Biochemical Cycles. 2004. Vol. 18. https://doi.org/10.1029/2004GB00223
24. Bastviken D., Santoro A., Marotta H. Methane emissions from Pantanal, South America, during the low water season: toward more comprehensive sampling // Environmental Science and Technology. 2010. Vol. 44 (14). P. 5450–5455. https://doi.org/10.1021/es1005048
25. Панин Г. Н. и др. Особенности гидрологического режима Цимлянского водохранилища при климатических изменениях в бассейне Дона // Водные ресурсы. 2016. Т. 43. № 2. С. 111–121.
26. Гречушникова М. Г., Пуклакова Н. Г., Эдельштейн К. К. Возможное изменение гидрологического режима Цимлянского водохранилища при потеплении климата // Вестник Московского университета. Сер. 5. География. № 4. С. 17–25.
27. Ломов В. А. Эмиссия метана с разнотипных водохранилищ (по данным измерений и математической модели): автореф. дис… канд. геогр. наук. М., 2024. 209 с.
28. Liikanen A., Huttunen J. T., Valli K., Martikainen P. J. Methane cycling in the sediment and water column of mid-boreal hyper-eutrophic Lake Kevaton // Finland: Archiv fur Hydrobiologie. 2002. Vol. 154 (4). P. 585–603. https://doi.org/10.1127/archiv-hydrobiol/154/2002/585
29. Schulz S., Matsuyama H., Conrad R. Temperature dependence of methane production from different precursors in a profundal sediment (Lake Constance) // FEMS Microbiology Ecology. 1997. Vol. 22. No. 3. P. 207–213. https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.1997.tb00372.x
30. Striegl R. G., Michmerhuizen C. M, Survey U. S. Hydrologic influence on methane and carbon dioxide dynamics at two northcentral Minnesota lakes // Limnology and Oceanography. 1998. Vol. 43 (7). P. 1519–1529. https://doi.org/10.4319/lo.1998.43.7.1519
31. Moriasi D., Arnold J., Liew V., Bingner R. et. al. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations // Transactions of the ASABE (American Society of Agricultural and Biological Engineers), 2007. Vol. 50 (3). P. 885−900. https://doi.org/10.13031/2013.23153
32. Гречушникова М. Г., Григорьева И. Л., Ломова Д. В., Кременецкая Е. Р. и др. Формирование гидроэкологической структуры Иваньковского водохранилища в летний период в смежные годы с различными погодными условиями // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2024. Т. 60. № 3. С. 98–113. https://doi.org/10.31857/S0002351524030093

REFERENCES

1. Giles J. Methane quashes green credentials of hydropower. *Nature*. 2006. Vol. 444. P. 524–525. https://doi.org/10.1038/444524a
2. Lima I., Ramos F., Bambace L., Rosa R. Methane emissions from large dams as renewable energy resources: a developing nation perspective. *Mitigation Adaptation Strategy Global Change*. 2006. Vol. 13. P. 1381–1386. https://doi.org/10.1007/s11027-007-9086-5
3. Johnson M. S., Matthews E., Bastviken D., Deemer B. et al. Spatiotemporal methane emission from global reservoirs. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2021. https://doi.org/10.1029/2021JG006305

4. Grechushnikova M. G., Kravchuk M. V. Comparison of the results of field measurements of methane emissions from various reservoirs of the Russian Federation with data from Global maps of methane emissions. All-Russian conference dedicated to the memory of Academician A. M. Obukhov "Turbulence, dynamics of atmosphere and climate". Moscow: Fizmatkniga, 2022. P. 118–118.
5. Grechushnikova M. G., Repina I. A., Kazantsev V. S. Parametrization of the specific methane flux from the water area of reservoirs // Modern problems of reservoirs and their catchments: Proceedings of the IX All-Russian Scientific and Practical Conference with International participant. (Perm, May 25-28, 2023). Perm: PSNIU 2023. Vol. 1. P. 237–241.
6. Bazhin N. Methane Emission from Bottom Sediments. *Chemistry for Sustainable Development.* 2003. Vol. 11. P. 577–580.
7. Gruca-Rokosz R., Tomaszek J., Koszelnik P., Czerwieniec, E. Methane and carbon dioxide emission from some reservoirs in SE Poland. *Limnol. Review.* 2010. Vol. 10 (1). P. 15–21. https://doi.org/10.2478/v10194-011-0002-8
8. Bastviken D., Cole J., Pace M., Van de Bogert M. Fates of methane from different lake habitats: Connecting whole-lake budgets and CH4 emissions. *Journal of Geophysical Research*. 2008. Vol. 113. P. 1–13. https://doi.org/10.1029/2007JG000608
9. Guerin F., Abril G. Significance of pelagic aerobic methane oxidation in the methane and carbon budget of a tropical reservoir. *Journal of Geophysical Research.* 2007. Vol. 112. P. 3006– 3020. https://doi.org/10.1029/2006JG000393
10. Miller B., Arntzen E., Goldman A., Richmond M. Methane Ebullition in Temperate Hydropower Reservoirs and Implications for US Policy on Greenhouse Gas Emissions. *Environmental Management*. 2017. Vol. 60 (4). P. 615–629. https://doi.org/10.1007/s00267-017-0909-1
11. Harrison J., Deemer B., Birchfield M., O`Malley M. Reservoir Water-Level Drawdowns Accelerate and Amplify Methane Emission. *Environmental Science & Technology*. 2017. Vol. 51 (3). P. 1267–1277. https://doi.org/10.1021/acs.est.6b03185
12. Kemenes A., Melack J., Forsberg B. Downstream emissions of CH4 and CO2 from hydroelectric reservoirs (Tucuruí, Samuel, and Curuá-Una) in the Amazon basin. *Inland Waters*. 2016. Vol. 6. P. 1–8. https://doi.org/10.5268/IW-6.3.980
13. Kazantsev V. S., Krivenok L. A., Grechushnikova M. G. et al. Assessment of methane emission from Mozhaysk reservoir in spring period. *Meteorology and hydrology.* 2026. No. 3. P. 123–133. https://doi.org/10.52002/0130-2906-2026-3-123-133
14. Repina I. A., Grechushnikova M. G., Frolova N. L., Agafonova S. A. et al. Methane content and fluxes in the Volga reservoirs. *Newsletters of the Russian Academy of Sciences*. Series: Geography. 2023. Vol. 87. No. 6. P. 899–913. https://doi.org/10.31857/S2587556623060080
15. Lomov V. A., Stepanenko V. M., Grechushnikova M. G., Repina I. A. Mechanistic modeling of the variability of methane emissions from an artificial reservoir. *MDPI Water*. 2024. Vol. 16. No. 1. 76. https://doi.org/10.3390/w16010076
16. Fenocchi A., Rogora M., Ciampittiello M., Dresti C., Hipsey M. R. Applicability of a one-dimensional coupled ecological-hydrodynamic numerical model to future projections in a very deep large lake (Lake Maggiore, Northern Italy/Southern Switzerland). *Ecological Modelling.* 2019. Vol. 392. No. 1. P. 38–51. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2018.11.015
17. Tsvetnov E. V., Tyshova E. A., Lomov V. A., Kazantsev V. S., Sokolov D. I., Efimov V. A. Assessment of Methane Emissions from the Surface of the Volgograd Reservoir and the Associated Impact on the Environment. *Water Resources*. 2024. Vol. 51. No. (suppl. 1). P. S347–S355. https://doi.org/10.1134/S0097807824701513
18. Frolova N. L., Sazonov A. A., Lomov V. A. Methane Emission from the Kolyma Reservoir: Observation Data and Results of Numerical Experiments. *Moscow University Bulletin*. Series 5. Geography. 2025. Vol. 80. No. 6. P. 18–32. https://doi.org/10.55959/MSU0579-9414.5.80.6.2

19. Edelstein K. K. Reservoirs of Russia: environmental problems and ways to solve them. Moscow: GEOS. 1998. 277 p.
20. Grechushnikova M. G., Repina I. A., Kazantsev V. S., Usova E. V. et al. The first results of studying the spatial and temporal variability of methane content and emissions in the Tsimlyansk reservoir. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2024. No. 2. 80–100. https://doi.org/10.35567/19994508-2024-2-80-100
21. Hydrometeorological regime of lakes and reservoirs of the USSR. Tsimlyansk, watershed and Manych reservoirs. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1977. 291 p.
22. Loboiko V. F., Zubov I. A. The role of environmental factors and anthropogenic impact in the formation of the modern ecosystem of the Tsimlyansk reservoir. *Newsletters of Nizhnevolzhsk Agrarian University*, 2009. No. 2 (14). P. 26–32.
23. Bastviken D., Cole J., Pace M., Tranvik L. et al. Methane emissions from lakes: Dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate. *Global Biochemical Cycles*. 2004. No. 18. https://doi.org/10.1029/2004GB00223
24. Bastviken D., Santoro A., Marotta H. Methane emissions from Pantanal, South America, during the low water season: toward more comprehensive sampling. *Environmental Science and Technology*. 2010. 44(14). P. 5450–5455. https://doi.org/10.1021/es1005048
25. Panin G. N. et al. Features of the hydrological regime of the Tsimlyansk reservoir during climatic changes in the Don basin. *Water Resources*. 2016. Vol. 43. No. 2. P. 111–121.
26. Grechushnikova M. G., Puklakova N. G., Edelstein K. K. Possible changes in the hydrological regime of the Tsimlyansk reservoir during climate warming. *Newsletters of MSU*. Ser. 5. Geography. No. 4. P. 17–25.
27. Lomov V. A. Methane emissions from reservoirs of various types (according to measurement data and mathematical model) [Text]: abstract thesis for. Ph. D. Geographical Sciences: 1.6.16: protected on 12/19/2024, approved on 04/23/2025. M. 2024. 209 p.
28. Liikanen A., Huttunen J.T., Valli K., Martikainen P. J. Methane cycling in the sediment and water column of mid-boreal hyper-eutrophic Lake Kevaton. *Finland: Archiv fur Hydrobiologie*. 2002. Vol. 154 (4). P. 585–603. https://doi.org/10.1127/archiv-hydrobiol/154/2002/585
29. Schulz S., Matsuyama H., Conrad R. Temperature dependence of methane production from different precursors in a profundal sediment (Lake Constance). *FEMS Microbiology Ecology*. 1997. Vol. 22, no. 3. P. 207–213. https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.1997.tb00372.x
30. Striegl R. G., Michmerhuizen C. M, Survey U. S. Hydrologic influence on methane and carbon dioxide dynamics at two northcentral Minnesota lakes. *Limnology and Oceanography*. 1998. Vol. 43 (7). P. 1519–1529. https://doi.org/10.4319/lo.1998.43.7.1519
31. Moriasi D., Arnold J., Liew V., Bingner R., et. al. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE* (American Society of Agricultural and Biological Engineers), 2007. Vol. 50(3). P. 885−900. https://doi.org/10.13031/2013.23153
32. Grechushnikova M. G., Grigorieva I. L., Lomova D. V., Kremenetskaya E. R. *et al*. Formation of the hydroecological structure of the Ivankovo reservoir in the summer period in adjacent years with different weather conditions. *Newsletters of RAS*. Physics of the atmosphere and ocean. 2024. Vol. 60. No. 3. P. 98–113. https://doi.org/10.31857/S0002351524030093

Сведения об авторах:

Ломов Виктор Александрович, канд. геогр. наук, младший научный сотрудник, кафедра гидрологии суши, географический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова, 119234, Москва, Ленинские горы, д. 1.; https://orcid.org/0000-0001-5275-390X; e-mail: lomson620@mail.ru

Гречушникова Мария Георгиевна, канд. геогр. наук, ведущий научный сотрудник, кафедра гидрологии суши, географический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова, 119234, Москва, Ленинские горы, д. 1.; https://orcid.org/0000-0001-6376-2473; e-mail: allavis@mail.ru

About the authors:

Victor A. Lomov, Ph.D., Junior Researcher, Hydrology Department, Faculty of Geography, Lomonosov MSU, 119234, Moscow, Leninskie Gory, 1; https://orcid.org/0000-0001-5275-390X; e-mail: lomson620@mail.ru

Maria G. Grechushnikova, Ph.D., Leading Researcher, Hydrology Department, Faculty of Geography, Lomonosov MSU, 119234, Moscow, Leninskie Gory, 1; https://orcid.org/0000-0001-6376-2473; e-mail: allavis@mail.ru

Поступила в редакцию / Received 27.02.2026.
Поступила после рецензирования / Revised 23.03.2026.
Принята к публикации / Accepted 11.05.2026.

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 08.06.2026. Дата выхода в свет 25.06.2026.
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. 08.06.2026. Data of issue 25.06.2026
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