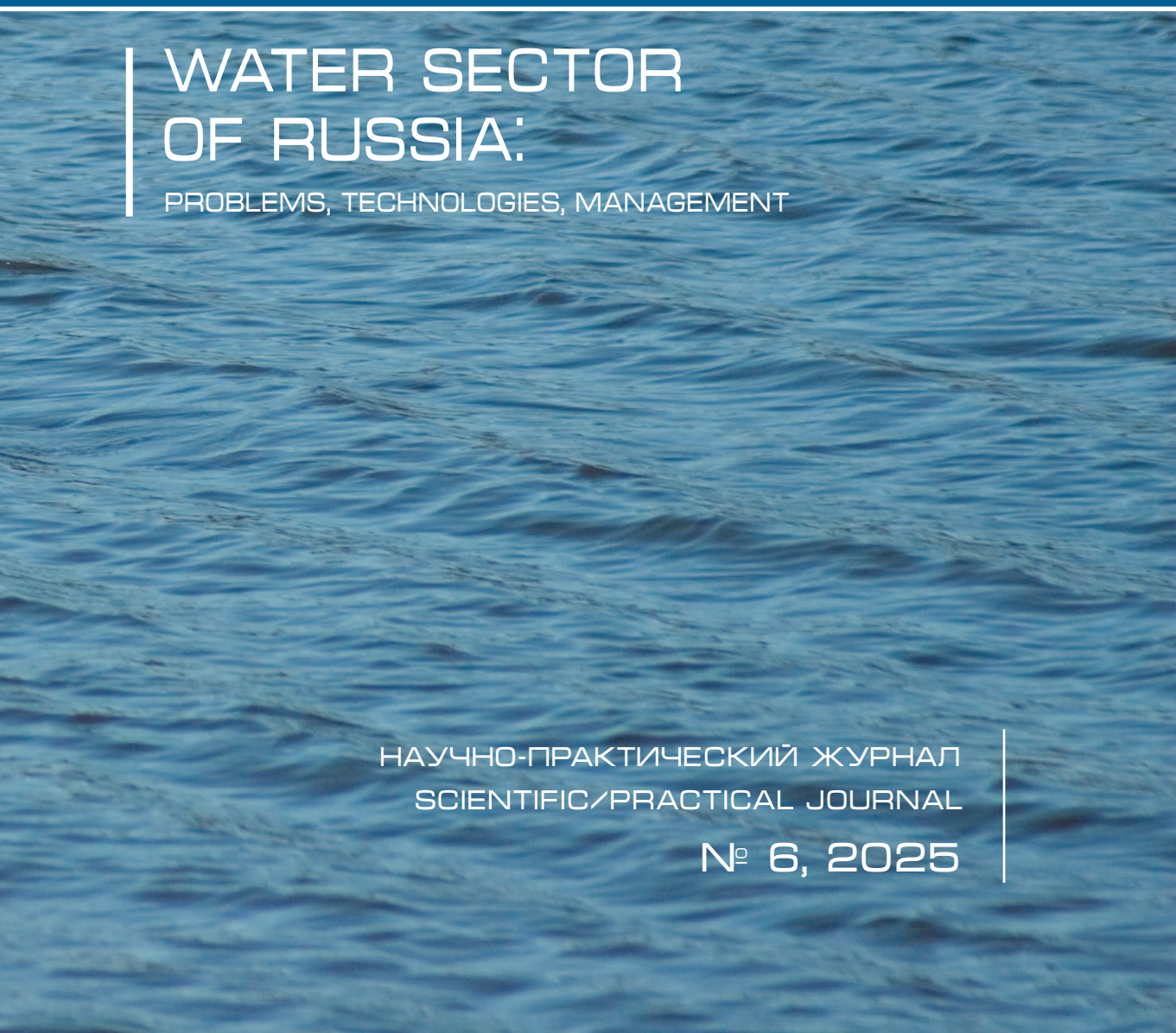
ISSN 1999-4508 (Print)
ISSN 2686-8253 (Online)

ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО РОССИИ:

ПРОБЛЕМЫ, ТЕХНОЛОГИИ, УПРАВЛЕНИЕ

WATER SECTOR OF RUSSIA:

PROBLEMS, TECHNOLOGIES, MANAGEMENT



НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
SCIENTIFIC/PRACTICAL JOURNAL

№ 6, 2025

РОСВОДРЕСУРСЫ
ИЗДАНИЕ ЖУРНАЛА ОСУЩЕСТВЛЯЕТСЯ В РАМКАХ МЕРОПРИЯТИЙ, ФИНАНСИРУЕМЫХ ЗА СЧЕТ СУБСИДИЙ НА ИНЫЕ ЦЕЛИ

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
Лепихин А.П., д-р геогр. наук, профессор, Горный институт Уральского отделения Российской академии наук (Пермь, Россия)

РЕДКОЛЛЕГИЯ
Беляев С.Д., д-р геогр. наук, Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов (Екатеринбург, Россия)
Болгов М.В., д-р техн. наук, профессор, Институт водных проблем РАН (Москва, 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

WATER SECTOR OF RUSSIA:

PROBLEMS, TECHNOLOGIES, MANAGEMENT

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

SCIENTIFIC/PRACTICAL JOURNAL

№ 6, 2025

ЕКАТЕРИНБУРГ
YEKATERINBURG

Журнал входит в ядро РИНЦ и в список журналов RSCI
(Russian Science Citation Index)

РОСВОДРЕСУРСЫ
PUBLISHING OF THE JOURNAL IS EFFECTED WITHIN THE FRAMEWORK OF THE STATE ASSIGNMENT APPROVED BY FEDERAL AGENCY OF WATER RESOURCES

FOUNDER OF THE JOURNAL «WATER SECTOR OF RUSSIA: PROBLEMS, TECHNOLOGIES, MANAGEMENT»
RUSSIAN RESEARCH INSTITUTE FOR INTEGRATED WATER MANAGEMENT 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
Anatoliy P. Lepikhin, Dr. Sc. (Geographical), Professor, Institute of Mining of the Ural branch of Russian Academy of Sciences (Perm, Russia)

MEMBERS OF THE EDITORIAL BOARD
Sergey D. Belayev, Dr. Sc. (Geographical), Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection (Ekaterinburg, Russia)
Mikhail V. Bolgov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Russian Academy of Sciences Water Problems Institute of Water Problems (Moscow, 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

Стратегические фронтиры индустриального ландшафта макрорегиона: кейс водных ресурсов
Н.А. Косолапова, Л.Г. Матвеева, Е.В. Каплюк.....5

Оценка поступления взвешенного вещества в реки методом трассировки источников наносов для решения задач управления урбанизированным водосбором
Е.М. Гирло, С.Р. Чалов, С.В. Харченко.....26

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Ферроцианидные сорбенты на основе целлюлозы для концентрирования Cs-137 из природных вод
В.С. Семенищев, В.П. Ремез, С.М. Титова, Е.И. Денисов, А.Ф. Никифоров.....52

Водные растения как фактор биологической деструкции ацетона в воде
В.А. Поклонов.....66

ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННОГО КОМПЛЕКСА

Информационно-аналитическое обеспечение водоохранной деятельности в Калининградской области
Н.А. Цупикова, Л.С. Федоров.....80

Указатель статей, опубликованных в журнале «Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление» в 2025 году.....100

Требования к оформлению материалов.....119

CONTENT

WATER/ECONOMIC SECTOR MANAGEMENT

Strategic frontiers of the macro/region industrial landscape: the case of water resources
N.A. Kosolapova, L.G. Matveeva, E.A. Kaplyuk.....5

Opportunities and Prospects of Suspended Sediment Source Tracing for Urban Catchment Management
E.M. Girlo, S.R. Chalov, S.V. Kharchenko.....26

ECOLOGICAL ASPECTS OF WATER/ECONOMIC ACTIVITIES

The ferrocyanide sorbents based on cellulose for preconcentration of cesium-137 from natural water
V.S. Semenishchev, V.P. Remez, S.M. Titova, E.I. Denisov, A.F. Nikiforov.....52

Aquatic plants as a factor in decreasing the concentrations of acetone in water
V.A. Poklonov.....66

INFORMATION/ANALYTICAL SUPPORT FOR THE WATER/ECONOMIC SECTOR FUNCTIONING

Information and analytical support for rational water use in Kaliningrad Region
N.A. Tsupikova, L.S. Fedorov.....80

Index of papers published in "Water sector of Russia: problems, technologies, management" journal in 2025.....100

Requirements for the articles to be accepted.....119

УДК 332.122 *https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-6-5-25*

Стратегические фронтиры индустриального ландшафта макрорегиона: кейс водных ресурсов

Н.А. Косолапова[1], Л.Г. Матвеева[1], Е.В. Каплюк[2]

nakosolapova@sfedu.ru

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

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Усиливающаяся под негативным воздействием внешних факторов социально-эколого-экономическая асимметрия регионов приводит не только к снижению их резильентности и устойчивости к внешним шокам, разбалансированности структуры индустриальных ландшафтов, но также к неравномерности динамики их системообразующих секторов, в т. ч. и водохозяйственного комплекса. Поскольку водохозяйственный комплекс является одновременно инфраструктурной и производственной системой, речь идет как о тактическом значении водных ресурсов, так и об их определяющей роли в качестве стратегического ресурса. В контексте тактического управления важное значение имеет текущее состояние водного бассейна региона, в стратегическом аспекте – научно обоснованные прогнозы необходимых для развития региона запасов воды. **Методы.** Для разработки концепции стратегического управления развитием индустриального ландшафта региона и его водохозяйственного комплекса методологическая база исследования сформирована путем конвергенции ряда теорий и подходов – регионально-бассейнового, сбалансированного роста, системно-динамического и ресурсно-целевого – для создания многоуровневой системы управления использованием ресурсного потенциала макрорегиона и входящих в состав его регионов водохозяйственных комплексов. **Результаты.** Определен вклад авторов в развитие теорий пространственного индустриального развития на основе исследования водных ресурсов как важного элемента индустриального ландшафта региона и ключевой составляющей стратегии сбалансированного развития, обусловленного тесной корреляцией производственной и водохозяйственной систем. С использованием инструментария системной динамики выявлены структурные сдвиги в объемах водных ресурсов в разрезе специализаций регионов Южного федерального округа, которые могут служить основой при принятии стратегических управленческих решений по рациональному водопользованию и эффективному использованию ресурсов водного бассейна региона.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: индустриальный ландшафт, водохозяйственный комплекс, макрорегион, ресурсообеспечение, водные ресурсы, стратегические фронтиры.

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

Для цитирования: Косолапова Н.А., Матвеева Л.Г., Каплюк Е.В. Стратегические фронтиры индустриального ландшафта макрорегиона: кейс водных ресурсов // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 6. С. 5–25. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-6-5-25; EDN: DRSCYB

© Косолапова Н.А., Матвеева Л.Г., Каплюк Е.В., 2025

Strategic frontiers of the macro/region industrial landscape: the case of water resources

Natalia A. Kosolapova[1] ✉, **Lyudmila G. Matveeva**[1], **Ekaterina V. Kaplyuk**[2]

✉ nakosolapova@sfedu.ru

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

ABSTRACT

Relevance. The socio-ecological-economic asymmetry of regions, which is increasing under the negative impact of external factors, results not only in a decrease in their resilience and stability to external shocks, an imbalance in the structure of industrial landscapes, but also in uneven dynamics of their system-forming sectors, including the water management complex (WMC). And since the WMC is both an infrastructure and production system, we are talking about both the tactical significance of water resources and their defining role as a strategic resource. In the context of tactical management, the current state of the region's water basin is of great importance, in the strategic aspect – scientifically based forecasts of the necessary water reserves in accordance with needs. **Methods.** To develop a concept of strategic management of the development of the industrial landscape of the region and its water management complex, the methodological base of the study was formed by converging a number of theories and approaches: regional-basin, balanced growth, system-dynamic and resource-targeted to create a multi-level system for managing the use of the resource potential of the macroregion and water management complexes of the regions included in it. **Results.** The authors' contribution to the development of theories of spatial industrial development was formed based on the consideration of water resources as an important element of the industrial landscape of the region and a key component of the balanced development strategy due to the close correlation of the production and water management systems. Using the tools of system dynamics, structural shifts in the volumes of water resources in the context of specializations of the regions of the Southern Federal District were determined, which can serve as a basis for making strategic decisions on rational water use. The results can be used in the work of regional government bodies responsible for the efficient use of the region's water basin resources.

Keywords: industrial landscape, water management complex, macro/region, resource supply, water resources, strategic frontiers

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

For citation: Kosolapova N.A., Matveeva L.G., Kaplyuk E.A. Strategic frontiers of the macro/region industrial landscape: the case of water resources. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2025. No. 6. P. 5–25. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-6-5-25; EDN: DRSCYB

ВВЕДЕНИЕ

Устойчивое стратегическое развитие индустрии макрорегиона и ее системообразующих подсистем, в т. ч. водохозяйственной, в концептах существующих теоретических положений и методологических подходов сдерживается целым рядом причин. В их числе: новая промышленная политика государ-

ства[1], направленная на пространственно-экономическую трансформацию (в т. ч. фрагментацию регионов в границах макрорегиона – их объединение в группы со схожими глобальными целями при сохранении суверенитета и относительной автаркии территорий); радикальные изменения индустриального ландшафта регионов в императивах наращивания удельного веса высокотехнологичных отраслей [1–4] и перехода от экономики спроса к экономике предложения в координатах полномасштабной цифровизации. Реальной практикой тестируется тот факт, что разного рода межрегиональные структуры, нацеленные на рациональное использование ресурсов территорий, в т. ч. и водных, способствуют повышению технологического и экономического суверенитета и становлению мобилизационной экономики в России [5].

В то же время новые макроэкономические условия, дополняемые масштабным перестроением глобальных цепочек формирования стоимости и мирохозяйственных связей, в которые вовлекаются макрорегионы, предполагают с новых экономико-экологических и институциональных позиций более глубокое исследование причин недоиспользования ресурсного потенциала региона и его подсистем, таких как водохозяйственная система (рис. 1), выявление его резервов для повышения связности региональной среды в рамках целей эффективной структурной трансформации индустриального ландшафта как системообразующего компонента мезоэкономики.

Индустриальный ландшафт тесно связан с такими смежными областями, как промышленная география, пространственное размещение, экономическая география. В данном контексте уточним, что промышленная география априори связана с размещением промышленных мощностей, в то время как пространственное размещение понимается непосредственно как процесс принятия решений предприятиями о размещении и отражает компромисс между доступом к природным ресурсам и к рынкам факторов производства [6–8]. Таким образом, индустриальный ландшафт региона необходимо рассматривать во взаимосвязи с природно-климатическими факторами и ресурсами (в т. ч. водными), инфраструктурными и институциональными условиями, в совокупности формирующими специфику и особенности каждого конкретного региона [9–12]. Иными словами, в текущих условиях стратегическое значение приобретает адаптация территориальных систем к общефедеральным императивам политики импортозамещения в промышленном секторе, что будет способствовать формированию инновационного вектора развития макрорегиона, его индустриального ландшафта и водохозяйственной системы (рис. 1).

В обозначенном концепте инновационный вектор определяется в том числе импульсом со стороны государственного управления в части норм, законов и стимулов в рамках соблюдения законодательства, особенно когда речь

[1] Распоряжение Правительства РФ от 20.05.2023 № 1315-р «Об утверждении Концепции технологического развития на период до 2030 года» (вместе с «Концепцией технологического развития на период до 2030 года») // Собрание законодательства РФ. 29.05.2023. № 22. Ст. 3964; Указ Президента РФ от 21.07.2020 № 474 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года» // Официальный сайт Администрации Президента РФ. URL: http://kremlin.ru.

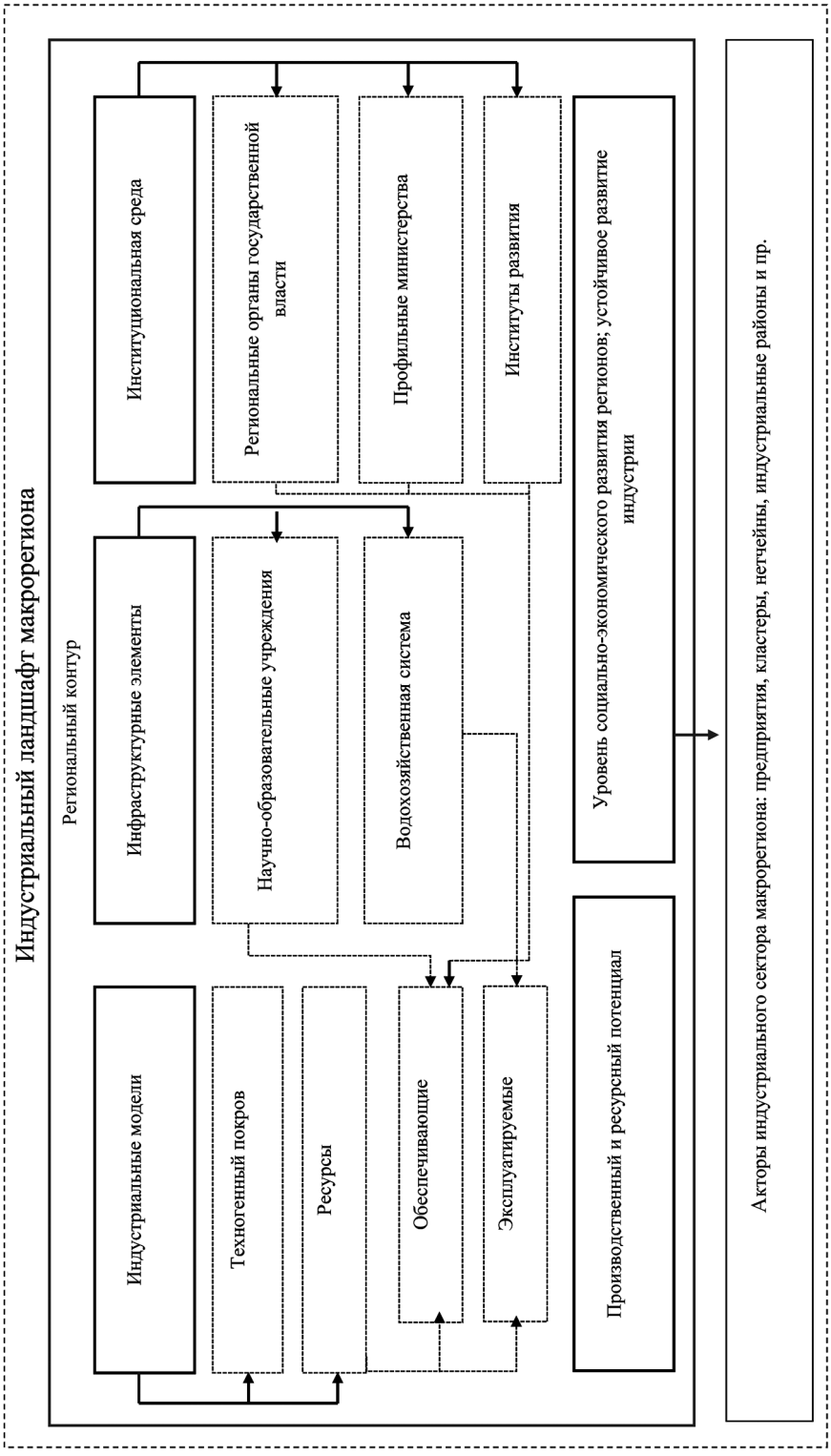


Рис. 1. Многоконтурная модель индустриального ландшафта макрорегиона.
Fig. 1. Multi-contour model of the industrial landscape of the micro/region.

идет о соблюдении норм экологического законодательства, внедрения современных или ресурсосберегающих технологий в производственных процессах [13]. В данном аспекте возможно получение следующих эффектов в масштабе макрорегиона:

– *для производственного сектора*: модернизация материально-технической базы в соответствии с нормами и требованиями законодательства, внедрение ресурсосберегающих технологий и циркулярных бизнес-моделей во всех подсистемах индустриального ландшафта региона, в т. ч. в водохозяйственном комплексе (ВХК);

– *для водохозяйственного комплекса*: реконструкция и модернизация систем оборотного и повторно-последовательного водоснабжения, внедрение водосберегающих технологий;

– *социально-экономические эффекты*: повышение качества жизни населения за счет улучшения экологического фона в субъектах макрорегиона.

В настоящее время широко обсуждается проект Водной стратегии Российской Федерации до 2035 года[2], в рамках которой определяются приоритеты системного управления водохозяйственным комплексом и повышения технологического суверенитета страны в сфере водного хозяйства. Декларируемая цель имеет высокую важность, а ее достижение продиктовано необходимостью совершенствования законодательства, формирования вектора опережающего инновационного развития научно-технической и технологической базы, обеспечения водного хозяйства страны необходимыми ресурсами (кадрами и оборудованием), создания информационной (цифровой) среды для управления водохозяйственным комплексом с использованием данных мониторинга водных объектов и адаптации к изменению климата.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование базируется на методах критического анализа, систематизации и обобщении исследований отечественных и зарубежных ученых о подходах к оценке состояния и механизмах управления использованием ограниченных водных ресурсов, а также результатах статистической обработки многолетних рядов гидрологических данных.

В основе концепции работы лежит идея о том, что целеориентированная на решение задач обеспечения устойчивости и сбалансированности регионального развития активизация использования эндогенных и экзогенных ресурсов регионов (в т. ч. водных) актуализирует макрорегиональный уровень проблемы стратегического развития индустрии. А ее многогранность и полиаспектность объясняют междисциплинарный характер исследования, базирующийся на совместном непротиворечивом использовании целого спектра взаимосвязанных теорий и концепций. В их числе: теория пространственного развития и размещения производительных сил, теория территориального и промышленного развития, новая экономическая география, концепция мо-

[2] Проект Водной стратегии Российской Федерации до 2035 года // https://raww.ru/assets/modckeditor/default/0/novaya-vodnaya-strategiya-do-2035.pdf.

дернизации промышленного производства на основе инноваций, теория стратегического управления развитием водохозяйственного комплекса в аспекте сопряжения социально-экономических показателей регионов с прогнозируемыми параметрами водохозяйственной системы.

Основанное на позициях перечисленных теорий исследование позволяет проводить оценку «эффективности действующих в ВХК регионов России механизмов водопользования с позиции рациональности распределения ограниченных водных ресурсов для производства конкурентоспособной на отечественном и мировых рынках продукции. Такой ракурс определяется тем, что стратегическое управление рациональным использованием водного потенциала каждого отдельного речного бассейна должно обеспечивать, с одной стороны, стимулирование и поддержку опережающего роста драйверов индустриального ландшафта региона на основе масштабного внедрения инноваций, которые реализуют политику ресурсосбережения и ресурсоэффективности; с другой – постепенное достижение сбалансированности внутрирегиональных, в том числе отраслевых, пропорций, с целью снижения асимметрии регионального развития в центре и на периферии» [14].

Развитие методологии исследования проблематики стратегического развития индустриального ландшафта макрорегиона и его водохозяйственного комплекса состоит в интеграции структурно-динамического, ресурсно-целевого и иерархического подходов для формирования многоуровневой системы управления использованием и наращиванием потенциала стратегического развития индустриального ландшафта макрорегиона и его подсистем (в т. ч. водной) в условиях структурной трансформации макроэкономики. Наряду с перечисленными подходами единая методологическая платформа включает новый ракурс, целевой вектор, логическую конструкцию и модельно-аналитический аппарат исследования научной проблемы устойчивого, сбалансированного по всем уровням стратегического развития индустриального ландшафта макрорегиона и его водохозяйственного комплекса.

Важное значение имеет научный поиск возможностей достижения синергетических эффектов в результате построения единой системы взаимодействий региональных индустриальных ландшафтов, являющихся суперсистемами по отношению к входящим в их состав подсистемам (таким, как водохозяйственный комплекс). При этом следует учитывать двойственность взаимодействий между регионом и его индустриальным ландшафтом, а также входящим в его структуру ВХК:

– с одной стороны, регион выступает в качестве транслятора политики (в частности, промышленной и водохозяйственной) федерального центра на мезоуровень, определяя фронтиры и глобальные (стратегические) цели развития регионов и их индустриальных ландшафтов, а также ВХК в их структуре;

– с другой стороны, принятие решений на уровне региона детерминируется, в т. ч. синергетическим образом формирующимися воздействиями его структурно-функциональных подсистем.

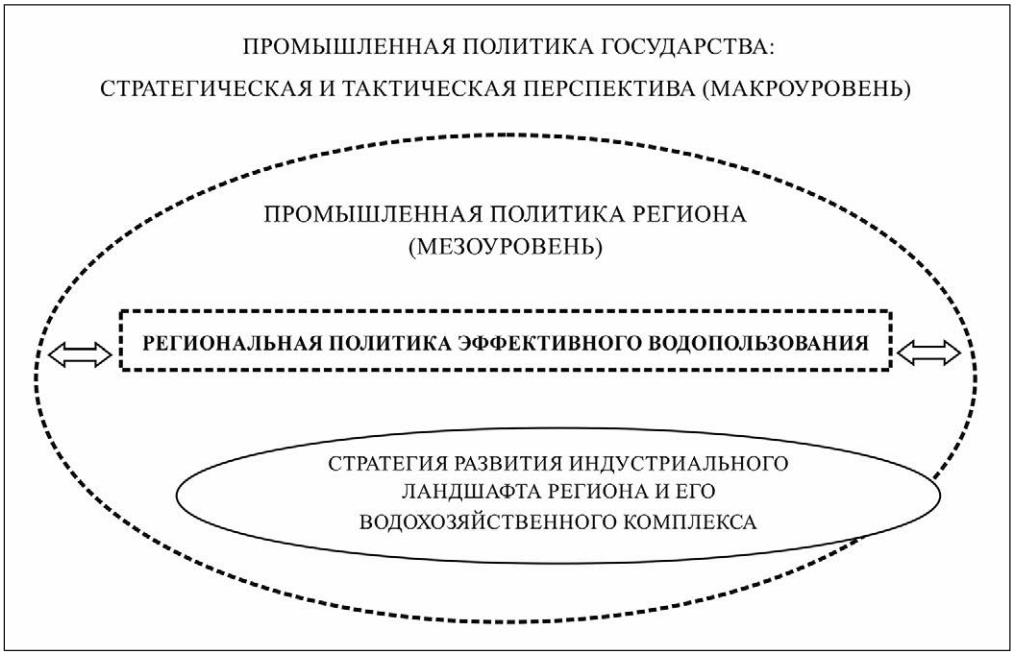


Рис. 2. Иерархическая «вложенность» составляющих региональной промышленной и водохозяйственной политики.
Fig. 2. Hierarchical «nesting» of components of regional industrial and water management policy.

Промышленная в целом и водохозяйственная в частности политика региона является «синтезом различных функциональных политик и неотъемлемым компонентом экономической политики, а государственные усилия за счет целеориентированного аккумулирования разнородных мер «частных» политик направлены на такие преобразования в производственной сфере, которые способствуют росту производительности труда, модернизации, активизации инновационной деятельности [15]» региона.

Таким образом, с позиции системного подхода можно говорить об иерархической вложенности рассмотренных понятий (рис. 2).

Отмеченная на рис. 2 взаимосвязь промышленной в целом и водохозяйственной в частности региональных политик с перспективами пространственного развития территории в координатах национальной промышленной политики потребовала уточнения сущности и экономического содержания ряда категорий. В данном контексте в отношении используемых авторами понятий следует отметить, что к настоящему времени не сформировано единое определение категории «пространственное развитие», экономическое содержание которого разными авторами понимается порою с противоречивых позиций [16]. Так, в Стратегии пространственного развития Российской Федерации до 2025 года данная категория представлена как «совершенствование

системы расселения и территориальной организации экономики, в том числе за счет проведения эффективной государственной политики регионального развития»[3]. В данном определении заложено решение региональных и государственных задач управления развитием регионов как единым объектом регулирования. В таком представлении пространственное развитие территорий является одной из наиболее приоритетных задач государственной политики, поскольку в нем заложена территориальная целостность государства, его безопасность и социально-экономическая стабильность.

Одним из важнейших направлений в проблематике стратегического развития индустриального ландшафта региона и его водохозяйственного комплекса является оценка уровня ресурсообеспеченности производственной системы региона (в т. ч. водными), которая должна позволять осуществлять мониторинг данного уровня как на этапе их накопления, так и в процессе использования ресурсов одновременно. Это дает возможность получать адекватную информацию для управления не только степенью ресурсного обеспечения, но и эффективностью водопользования в индустрии макрорегиона.

По отношению к производственной и водохозяйственной системам региона ресурсы делятся на внутренние (эндогенные) и внешние (экзогенные), формируя потенциал ресурсообеспеченности индустриального ландшафта региона (полное, неполное, достаточное обеспечение ресурсами). При этом наиболее реалистичным является неполное либо достаточное ресурсообеспечение, тогда как полное можно рассматривать как некую регулятивную идею в рамках управления устойчивым и сбалансированным развитием региона. В разрезе каждого вида имеющихся в регионе ресурсов «любой регион можно отнести к одному из трех типов:

– ресурсоизбыточный регион, когда имеется возможность удовлетворения не только внутренних потребностей в данном виде ресурсов, но и его вывоза на другие территории;

– ресурсодостаточный регион, когда ресурсов данного вида достаточно для воспроизводственных процессов в регионе в рассматриваемый период времени;

– ресурсонедостаточный регион, когда ресурсов данного вида недостаточно для эффективного протекания экономических процессов и следует их ввозить» [17].

Таким образом, проблематика внутрирегионального и межрегионального ресурсного (в частности, водного) обмена напрямую связана с процессом выявления «узких мест» и дефицитных ресурсов в отдельных звеньях производственного процесса региона [18] и разработки альтернативных сценариев взаимозамещения ресурсов – участников индустриального ландшафта – с учетом их специфики и функциональной роли в процессе создания новой ценности. Иными словами, целеполагание и взаимодействие подсистем региона и его индустриального ландшафта имеет ярко выраженный ресурсно-

[3] Стратегия пространственного развития Российской Федерации на период до 2025 года. Утв. Распоряжением Правительства Российской Федерации от 13 февраля 2019 г. № 207-р.

ориентированный характер. Следовательно, ресурсная определенность в аспекте реализации целей регионального развития важна как в тактическом, так и стратегическом контексте, в т. ч. в процессе структурных трансформаций индустриального ландшафта региона на основе инноваций. Акцент на инновационной среде структурных трансформаций индустриального ландшафта и его водохозяйственного комплекса означает приоритетную роль в этих процессах высокотехнологичных производств. Это подтверждается проводимой с учетом региональной специфики государственной поддержкой, поскольку регионы России характеризуются высокой степенью неоднородности по потенциалу создания новых технологий, производству высокотехнологичной продукции и технологической специализации.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенное исследование подтвердило тот факт, что промышленный комплекс регионов России в структуре потребления свежей воды занимает первое место: в 2023 г. 26,5 % свежей воды израсходовано на производственные нужды, 7,6 % – на хозяйственно-питьевые нужды, 6,3 % – на орошение и сельскохозяйственное потребление. С 2020 г. наблюдается положительная динамика потребления воды на производственные и хозяйственно-питьевые нужды (рис. 3).

В этой связи приобретает особую важность не только модернизация и реконструкция систем оборотного и повторно-последовательного водоснабжения, но и усиленный фокус на технологиях, используемых непосредственно субъектами промышленного сектора экономики, т. к. масштабы производственной деятельности определяют объемы водопотребления, а ее технологический уровень – объемы водопотерь.

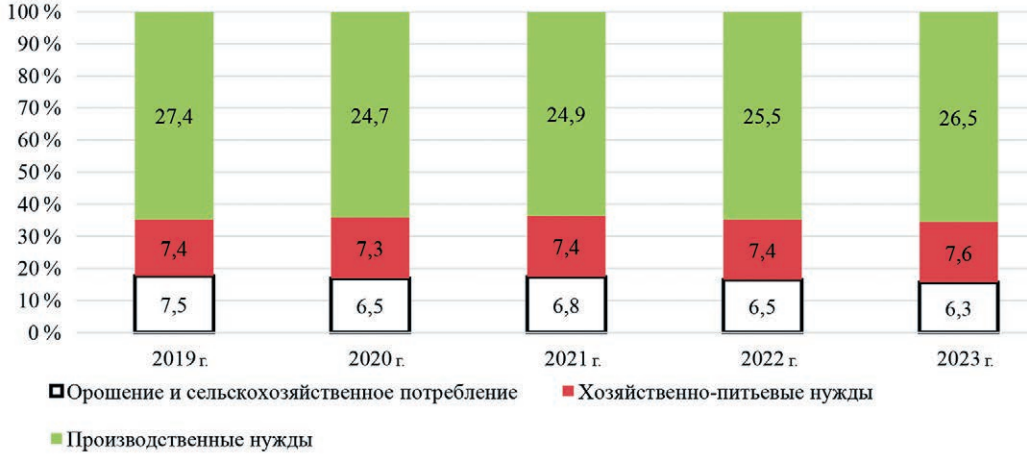


Рис. 3. Использование свежей воды в Российской Федерации, млрд куб. м.[4]
Fig. 3. Fresh water use (billions cubic meters).

[4] Охрана окружающей среды в России. 2024: Стат. сб. М.: Росстат, 2024. 118 с.

В контексте отмеченной ранее высокой дифференциации регионов РФ следует отметить, что, несмотря на разброс показателей по отдельным регионам Южного федерального округа (ЮФО), для южного макрорегиона в целом характерен недостаток водных ресурсов. Это наглядно иллюстрирует составленный в 2023 г. водный рэнкинг регионов России[5], в соответствии с которым они получили интегральную оценку на основе следующих групповых индексов: водный потенциал (природные условия), качество воды (оценка проб воды по санитарно-химическим и микробиологическим показателям), водоемкость экономики (удельные затраты воды при создании ВРП и в сфере сбыта), загрязнение водных ресурсов (антропогенное загрязнение водных ресурсов), управление водопотреблением (обобщающий показатель, включающий данные об оборотном и последовательном использовании воды, объемах расходов на сбор и очистку сточных вод по отношению к ВРП, удельный вес утечек и неучтенного расхода воды по отношению к забору пресных вод, а также число аварий в системах водопровода и канализации, количество экологических правонарушений по отношению к ВРП). Водный рэнкинг южного макрорегиона выглядит следующим образом (табл. 1).

С учетом приоритета промышленности в потреблении водных ресурсов важным является сопоставление полученных результатов в рамках рэнкинга с уровнем развития промышленного комплекса макрорегиона с учетом специализаций входящих в его состав регионов и динамики их ВРП (рис. 4)[6].

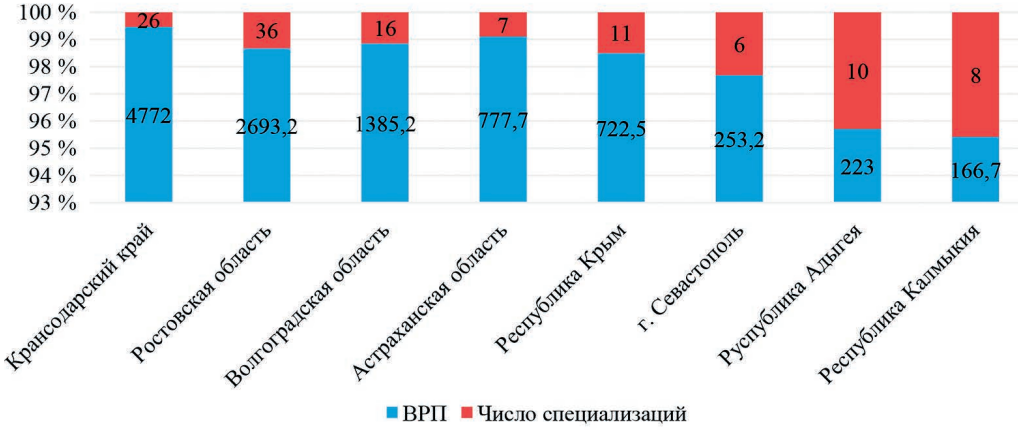


Рис. 4. ВРП субъектов южного макрорегиона и их специализации[7,8].
Fig. 4. GRP of constituent members of the Southern macro/region and their specializations.

[5] Аналитический обзор: водный рэнкинг регионов России за 2023 год // https://kairoseng.ru/upload/iblock/610/0fb3gfni8ojpqkc0j3qbjfuosw2fpi1e/Ан.%20обзор_Водный%20рэнкинг_2023.pdf.
[6] Ростовская область и Краснодарский край являются полиотраслевыми.
[7] https://23.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/VRP_2023.pdf.
[8] Охрана окружающей среды в России. 2024: Стат. сб. М.: Росстат, 2024. 118 с.

Таблица 1. Водный рэнкинг южного макрорегиона[9]
Table 1. Water ranking of the Southern macro/region

Регион	Место	Интегральный индекс	Характеристика	Отрасли	Число специализаций
Астраханская область	1	75	Достаточный	Отрасли национальной и локальной значимости / отрасли национальной значимости	3/4
Республика Адыгея	2	73	Достаточный	Отрасли локальной значимости	10
Волгоградская область	3	68	Достаточный	Отрасли национальной и локальной значимости / отрасли национальной значимости / отрасли локальной значимости	9/6/1
Краснодарский край	4	65	Достаточный	Отрасли национальной и локальной значимости / отрасли национальной значимости	8/18
Ростовская область	5	61	Достаточный	Отрасли национальной и локальной значимости / отрасли национальной значимости / отрасли локальной значимости	12/23/1
Республика Крым	6	57	Средний	Отрасли национальной и локальной значимости / отрасли национальной значимости	10/1
Севастополь	7	56	Средний	Отрасли национальной и локальной значимости / отрасли локальной значимости	1/5
Республика Калмыкия	8	51	Средний	Отрасли локальной значимости	8

[9] Составлено на основе: Аналитический обзор водный рэнкинг регионов России за 2023 год // https://kairoseng.ru/upload/iblock/610/0fb3gfni8ojpqkc0j3qbjfuosw2fpi1e/Ан.%20обзор_Водный%20рэнкинг_2023.pdf; Атлас экономической специализации регионов России. М.: НИУ ВШЭ, 2021. 264 с. https://cluster.hse.ru/mirror/pubs/share/460933626.

В контексте обозначенной тесной взаимосвязи между водохозяйственным комплексом макрорегиона и его индустрией, в т. ч. индустриальным ландшафтом с его природно-климатическими и техногенными подсистемами, научно-практический интерес представляет анализ изменений структуры и динамики функционирования субъектов ЮФО.

Южный макрорегион включает восемь регионов – Ростовскую область и Краснодарский край (являющиеся полиотраслевыми регионами с развитым индустриальным комплексом); Астраханскую и Волгоградскую области (относящиеся к среднеспециализированным регионам); Республику Крым (характеризуемую как сильноспециализированную), а также слабоспециализированные регионы – Республику Калмыкия, Республику Адыгея, г. Севастополь[10]. Динамика водопотребления в границах южного макрорегиона представлена в табл. 2.

Представленную в табл. 2 статистическую информацию можно интерпретировать следующим образом: в семилетней динамике наблюдается снижение основных характеристик водопользования по всем показателям, за исключением общего объема образованных отходов производства и потребления. Динамика забора воды из водных объектов демонстрирует устойчивость и небольшие отклонения в границах исследуемого периода. В 2020 г. зафиксирована отрицательная динамика по всем показателям, что связано с ограничительными мерами и снижением деловой активности в пандемийный период. Водоемкость (величина водозабора на единицу валового продукта субъекта), объем сброса загрязненных сточных вод и их доля в общем объеме сброса, а также удельный сброс загрязненных стоков в ВРП демонстрировали значительное снижение.

В данном контексте научный интерес представляют структурные соотношения показателей водопользования в субъектах южного макрорегиона с учетом их специализации по следующим показателям: оборотное и повторно-последовательное водоснабжение; объем использования водных ресурсов на производственные нужды; объем использования водных ресурсов для сельскохозяйственного водоснабжения. Графическая интерпретация статистических данных, отражающих динамику исследуемых показателей, представлена на рис. 5–8.

Существенный практический интерес имеет также динамика исследуемых показателей с учетом специализации субъектов, входящих в состав южного макрорегиона (табл. 3).

[10] Классификация специализаций согласно Атласу экономической специализации регионов России. М.: НИУ ВШЭ, 2021. 264 с

Таблица 2. Динамика водопотребления южного макрорегиона, 2017–2023 гг.[11]
Table 2. Dynamics of water consumption in the Southern macro/region, 2017–2023

Показатель	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.	2023 г.	Темп роста, %[12]
Забор воды из водных объектов, млн м^3	12 305	12 575	12 713	9 286	12 277	12 592	12 247	99,5
Водоемкость, м^3 / 1 млн руб. ВРП	2 110	1 989	1 923	1 369	1 544	1 283	–	60,8
Сброшено загрязненных сточных вод, млн м^3	1 265	1 221	1 241	990	1 148	1 285	602	47,58
Доля загрязненных сточных вод в общем объеме сбросов, %	21	26	23	24	21	23	11	52,38
Удельный сброс загрязненных стоков к ВРП, м^3 / 1 млн руб.	217	193	187	146	144	131	–	60,36
Общий объем образованных отходов производства и потребления, млн т	18,7	27,7	29,7	22,9	37,8	38,6	26,8	143,31

[11] О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2023 году. Проект Государственного доклада. М.: Минприроды России; ООО «Интеллектуальная аналитика»; ФГБУ «Дирекция НТП»; Фонд экологического мониторинга и международного технологического сотрудничества, 2024. 707 с.
[12] Темп роста. Расчет темпа роста к базовому периоду (2017 г.)



Рис. 5. Оборотное и повторно-последовательное водоснабжение субъектов южного макрорегиона, млн м^3 [13].

Fig. 5. Circulating and repeated-sequential water supply of the constituent members of the Southern macro/region, million m^3.

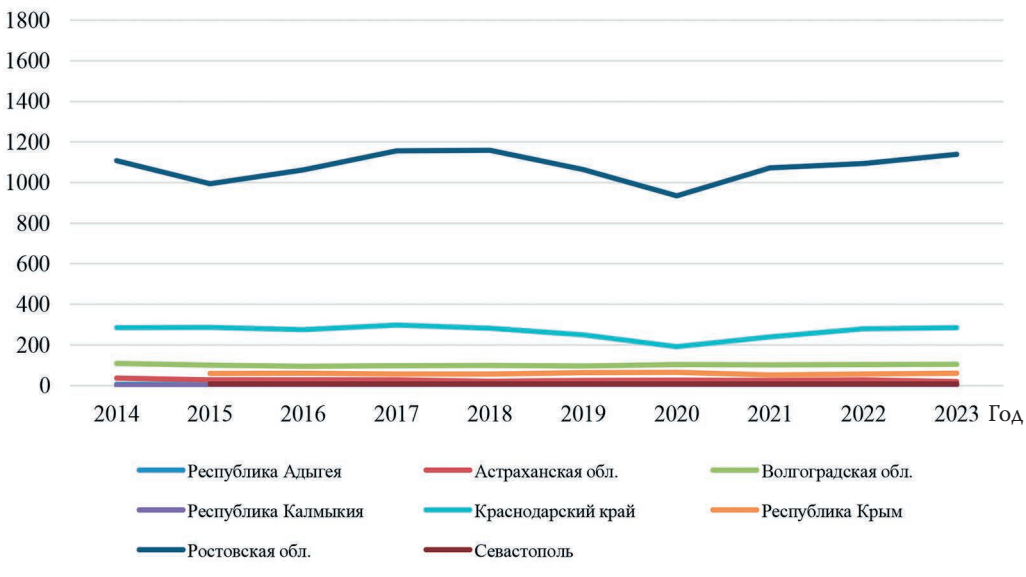


Рис. 6. Объем использования воды на производственные нужды субъектов южного макрорегиона, млн м^3.

Fig. 6. Volume of water use for production needs of constituent members of the Southern macro/region, million m^3.

[13] Составлено на основе: О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2023 году. Проект Государственного доклада. М.: Минприроды России; ООО «Интеллектуальная аналитика»; ФГБУ «Дирекция НТП»; Фонд экологического мониторинга и международного технологического сотрудничества, 2024. 707 с.



Рис. 7. Объем использования водных ресурсов для сельскохозяйственного водоснабжения субъектами южного макрорегиона, млн м^3.

Fig. 7. Volume of water resources used for agricultural water supply by constituent members of the Southern macro/region, million m^3.

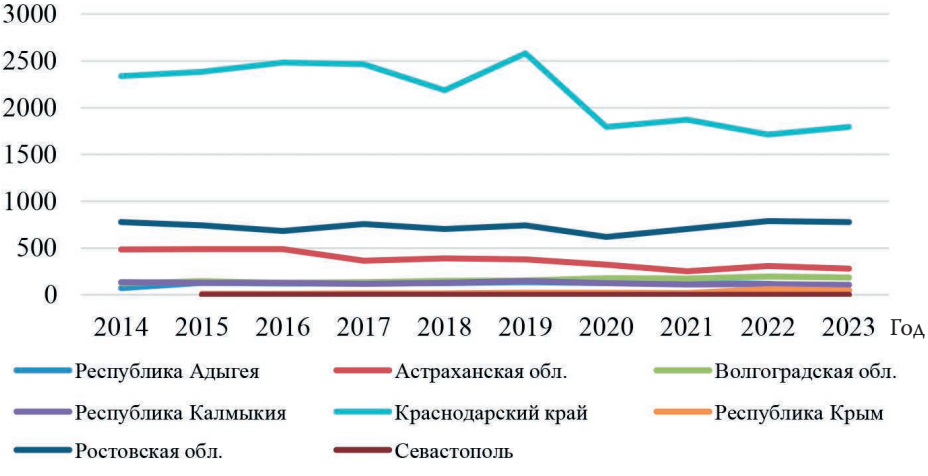


Рис. 8. Объем использования водных ресурсов для орошения субъектами южного макрорегиона, млн м^3.

Fig. 8. Volume of water resources used for irrigation by constituent members of the Southern macro/region, million m^3.

На основе результатов динамического анализа показателей водопользования в субъектах ЮФО можно сделать вывод о том, что полиотраслевые регионы, имеющие наиболее развитую индустрию в структуре макрорегиона, демонстрируют положительную динамику, за исключением показателей, относящихся к сельскохозяйственному профилю, что детерминируется сдвигом в структуре производства полиотраслевых регионов в сторону обрабатыва-

ющей промышленности. Также устойчивый рост в рамках исследуемого временного ряда демонстрирует Республика Крым, что связано с локализацией в ее границах отраслей национальной значимости, относящихся к растениеводству, производству продуктов питания, туризму. Слабо специализированные регионы в большинстве своем демонстрируют снижение водопотребления по исследуемым показателям.

Таблица 3. Динамический анализ показателей водопользования в субъектах южного макрорегиона, 2017–2023 гг., %[14]
Table 3. Dynamic analysis of water use indicators in the constituent members of the Southern macro/region, 2017–2023, %

Субъект	Темп роста, %				Достаточность водных ресурсов
	Оборотное и повторно-последовательное водоснабжение	Производственные нужды	С/Х водоснабжение	Орошение	
Полиотраслевые регионы					
Краснодарский край	105,56	100,42	131,92	76,84	Достаточный
Ростовская обл.	168,36	102,86	29,17	99,23	Достаточный
Среднеспециализированные регионы					
Астраханская обл.	151,17	53,89	0	57,83	Достаточный
Волгоградская обл.	129,73	96,34	194,5	150,06	Достаточный
Сильноспециализированные регионы					
Республика Крым	78,83	102,06	196,36	374,63	Средний
Слабоспециализированные регионы					
Республика Адыгея	98,76	96,21	128,30	71,37	Достаточный
г. Севастополь[15]	–	98,23	–	–	Средний
Республика Калмыкия	76,19	52,75	64,66	77,96	Средний

[14] Рассчитано авторами с использованием данных: О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2023 году. Проект Государственного доклада. М.: Минприроды России; ООО «Интеллектуальная аналитика»; ФГБУ «Дирекция НТП»; Фонд экологического мониторинга и международного технологического сотрудничества, 2024. 707 с.
[15] Расчет темпов роста на основании открытых источников по субъекту не проводился ввиду низких базовых показателей и галопирующего роста.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведенное исследование позволило констатировать, что в современной парадигме ресурсного обеспечения регионального развития возникает вопрос определения стратегических фронтиров наращивания ресурсного (водного) потенциала региона, учитывая императив инновационных трансформаций структуры индустриального ландшафта региона и его подсистем, в т. ч. водохозяйственного комплекса.

Показано, что географические границы региона определяют локалитеты его ресурсов, а стратегические – возможность и объемы их перемещения. Эти перемещения водных ресурсов, а также тот факт, что распределению воды, как правило, подлежит не весь речной сток, а лишь его часть, с изначальным резервированием значительных объемов для обеспечения экосистемных потребностей [19], порождают конкуренцию за ограниченные водные ресурсы и, как следствие, – конфликт интересов субъектов индустриального ландшафта и водохозяйственного комплекса. Разрешение данных противоречий возможно посредством создания механизма равновесия интересов на базе теоретико-игровой модели их согласования, обеспечивающего устойчивое развитие как отдельных хозяйствующих субъектов индустриального ландшафта и водохозяйственного комплекса, так и региона в целом. Причем устойчивое развитие промышленного сектора экономики является одним из важных направлений, остающихся в фокусе внимания в рамках стратегического управления [20–22]. В условиях равновесия системы возможна такая сегрегация ограниченных водных ресурсов, которая позволяет достигать баланс их использования через согласование объемов распределения воды, обеспечивающего непрерывность регионального производства, устойчивое функционирование индустриального ландшафта региона и его водохозяйственного комплекса, а также максимально возможный экономический рост.

Новизна подхода проведенной работы состоит в рассмотрении ресурсообеспечения индустриального ландшафта региона как определяющего фактора его структурных изменений на инновационно-цифровой платформе с учетом значительных современных масштабов и скорости диффузии инноваций как в границах региона, так и между регионами макрорегиона. Обосновано, что обеспеченность ресурсами (в т. ч. водными) входит в число приоритетов в составе региональных факторов в турбулентных условиях, поскольку способность региона (и его индустриального ландшафта) сохранять устойчивость и резильентность в значительной степени детерминируется наличием достаточного объема ресурсов разного вида, включая водные.

Принятие эффективных решений по достижению требуемой ресурсообеспеченности региона и его индустриального ландшафта предполагает несколько управленческих действий:

– выявление дефицитных (лимитирующих) ресурсов (в т. ч. водных), ограничивающих экономический рост территории;

– выработка действий по определению направлений, способов и объемов выхода на траекторию полного ресурсного обеспечения индустриального

ландшафта и региона в целом посредством целеориентированного воздействия «активных» ресурсов (политических, организационно-управленческих) на «пассивные» (природные, в т. ч. водные, топливно-энергетические, трудовые, экологические, рекреационные и другие);

– достижение рационального соотношения объемов внутренних (территориальная локализация) и ввозимых ресурсов;

– определение уровня вовлечения мобильных и немобильных ресурсов в производственные процессы индустриального ландшафта макрорегиона для обеспечения требуемого качества функционирования его экономики и сбалансированности в условиях турбулентности с учетом культурных и ментальных особенностей населения входящих в его состав территорий.

Практические предложения состоят также в том, что в число важных условий устойчивости регионов, их индустриальных ландшафтов и водохозяйственного комплекса входит гармонизация и совместное использование потенциала рыночных и государственных регуляторов ресурсообеспечения и эффективного использования водных и других ресурсов с учетом специфики каждого региона. Взаимодействие государства и бизнеса на принципах партнерства и сотрудничества в сфере высоких технологий в рамках индустриального ландшафта региона и его водохозяйственной подсистемы возможно через создание площадок для обмена опытом, проведение мероприятий по стимулированию инноваций и развитию наукоемких отраслей. Однако необходим объективный анализ потенциала (в т. ч. водного) региона, определение приоритетных направлений развития его индустриального ландшафта, установление целей и механизмов их достижения.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTERESTS

The authors declare no relevant conflict of interests.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Матвеева Л.Г., Никитаева А.Ю. Механизмы эндогенного развития промышленности. Ростов-на-Дону. Таганрог: Южный федеральный университет, 2023. 212 с. https://doi.org/10.18522/80130075
2. Ван Юйчань. Факторы и инструменты развития высокотехнологичной промышленности // Вестник Алтайской академии экономики и права. 2023. № 2. С.16–26.
3. Чернова О.А., Митрофанова И.В. Импортозамещение, ориентированное на экспорт, как модель стратегического развития регионов ЮФО // Московский экономический журнал. 2022. Т. 7. № 9. С. 159–176.
4. Zhao T., Jinwei H., Degang Y., Xinhuan Zh., Danni L., Mingjie C., Rongqian L., Yaning Ch. Study on the Spatial Differentiation Characteristics and Influencing Factors of China's Economic Resilience under Different Shocks // Sustainability. 2022. Vol. 14. No. 24. 16912. https://doi.org/10.3390/su142416912
5. Гришков В.Ф., Плотников В.А., Фролов А.О. Мобилизационная экономика в современной России: теоретические аспекты // Известия Санкт-Петербургского экономического университета. 2022. № 3 (125). С. 7–13.
6. Kolejka J., Klimánek M., Martinat S., Ruda A. Delineation of post-industrial landscapes of the Upper Silesian corridor in the Basin of Ostrava // Environmental & Socio-economic Studies. 2013. Vol. 1. https://doi.org/10.1515/environ-2015-0016

7. Glasmeier A.K. Industrial Geography // International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences. Pergamon. 2001. P. 7326–7331. https://doi.org/10.1016/B0-08-043076-7/02547-X
8. Lösch A. The economics of location. New Haven, 1954. Yale univ. press. 455 p.
9. Зубаревич Н.В. Регионы России в новых экономических условиях // Журнал Новой экономической ассоциации. 2022. № 3 (55). С. 226–234.
10. Исянбаев М.Н., Колонских Л.Р. Проблемы совершенствования экономических механизмов инновационного развития экономики региона // Журнал прикладных исследований. 2022. № 2 (10). С. 96–101.
11. Пьянкова С.Г., Митрофанова И.В., Ергунова О.Т. Актуализация роли инструментов «мягкой силы» в формировании имиджа регионов в условиях нестабильности // ARS administrandi (искусство управления). 2022. Т. 14. № 10. С. 646–666.
12. Ускова А.Ю., Саломатова Ю.В. Оценка факторов устойчивости обрабатывающих производств в индустриальных регионах России // Экономика промышленности. 2023. № 16 (1). С. 77–85.
13. Матвеева Л.Г. Промышленные ядра экономического каркаса инноватизации регионов юга России // Региональная экономика. Юг России. 2020. Т. 8. № 4. С. 87–98.
14. Вода как стратегический ресурс социально-экономического развития региона: монография / под ред. А.Е. Косолапова. Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федерального университета, 2021. 220 с.
15. Подгайнов Д.В. Инструментарий формирования экономико-технологического механизма энергоэффективности в теплоэнергетике // Российское предпринимательство. 2018. Т. 19. № 2. С. 395–404.
16. Дружинин А.Г. Центро-периферийное реструктурирование «морских» регионов Российского порубежья: современные геополитические и геоэкономические детерминанты / сб. Проблемы приграничья. Новые траектории международного сотрудничества. Материалы VII межд. научно-практ. конф. Калининград, 2023. С. 11–15.
17. Добролежа Е.В. Модельный инструментарий оценки ресурсного взаимодействия субъектов региональной экономики // Учет и статистика. 2011. № 1. С. 194–199.
18. Kosolapova N.A., Matveeva L.G., Nikitaeva A.Y. et al. The Rational Use of Water Resources in the Strategy of Industry 4.0. // Water Resources Management. 2021. Vol. 35. P. 3023–3041. https://doi.org/10.1007/s11269-021-02889-1
19. Никитина О.И., Косолапов А.Е. Вододеление в трансграничных бассейнах рек с учетом экологического стока (на примере бассейна реки Урал) // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 4. С. 5–24. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-4-5-24
20. Dolgova O.I., Nikitaeva A.Y. Evaluation of the potential for the development of the circular industry in the region: a new approach // Recycling. 2025. Vol. 10. No. 2. https://doi.org/10.3390/recycling10020038
21. Nikitaeva A.Y., Salem A.B.M. Institutional framework for the development of artificial intelligence in the industry // Journal of Institutional Studies. 2022. Vol. 14. No. 1. P. 108–126. https://doi.org/10.17835/2076-6297.2022.14.1.108-126
22. Nikitaeva A.Y., Chernova O.A., Molapisi L. Smart territories as a driver for the transition to sustainable regional development and green economy // R-Economy. 2022. Vol. 8. No 2. P. 120–134. https://doi.org/10.15826/recon.2022.8.2.010

REFERENCES

1. Matveeva L.G., Nikitaeva A.Yu. Mechanisms of endogenous development of industry. Rostov-on-Don. Taganrog: Southern Federal University, 2023. 212 p. ISBN 978-5-9275-4353-3 https://doi.org/10.18522/80130075
2. Wang Yuchan. Factors and instruments for the development of high-tech industry. *Bulletin of the Altai Academy of Economics and Law*. 2023. No. 2. P. 16–26.
3. Chernova O. A., Mitrofanova I.V. Export-oriented import substitution as a model of strategic development of the Southern Federal District regions. *Moscow Economic Journal*. 2022. Vol. 7. No. 9. P. 159–176.

4. Zhao T., Jinwei H., Degang Y., Xinhuan Zh., Danni L., Mingjie C., Rongqian L., Yaning Ch. Study on the Spatial Differentiation Characteristics and Influencing Factors of China's Economic Resilience under Different Shocks. *Sustainability*. 2022. Vol. 14. No. 24: 16912. https://doi.org/10.3390/su142416912
5. Grishkov V.F., Plotnikov V.A., Frolov A.O. Mobilization economy in modern Russia: theoretical aspects. *Bulletin of the St. Petersburg University of Economics*. 2022. No. 3 (125). P. 7–13.
6. Kolejka J., Klimánek M., Martinat S., Ruda A. Delineation of post-industrial landscapes of the Upper Silesian corridor in the Basin of Ostrava. *Environmental & Socio-economic Studies.* 2013. Vol. 1. https://doi.org/10.1515/environ-2015-0016
7. Glasmeier A.K. Industrial Geography. *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences*. Pergamon. 2001. P. 7326–7331. ISBN 9780080430768. https://doi.org/10.1016/B0-08-043076-7/02547-X
8. Lösch A. The economics of location. New Haven, 1954. Yale univ. press. 455 p.
9. Zubarevich N.V. Regions of Russia in the New Economic Conditions. *Journal of the New Economic Association*. 2022. No. 3 (55).
10. Isyanbaev M.N., Kolonskikh L.R. Problems of Improving Economic Mechanisms for Innovative Development of the Regional Economy. *Journal of Applied Research*. 2022. No. 2 (10). P. 96–101.
11. Pyankova S.G., Mitrofanova I.V., Ergunova O.T. Actualization of the Role of Soft Power Instruments in Shaping the Image of Regions in Conditions of Instability. *ARS administrandi (the art of management)*. 2022. Vol. 14. No. 10. P. 646–666.
12. Uskova A.Y., Salomatova Yu.V. Assessment of sustainability factors of manufacturing industries in industrial regions of Russia. *Economics of Industry*. 2023. No. 16 (1). P. 77–85.
13. Matveeva, L. G. Industrial cores of the economic framework for innovation of regions in the south of Russia. *Regional Economy. South of Russia*. 2020. Vol. 8. No. 4. P. 87–98.
14. Water as a strategic resource for the socio-economic development of a region: monograph / edited by A.E. Kosolapov. Rostov-on-Don: Publishing House of the Southern Federal University, 2021. 220 p.
15. Podgaynov D.V. Tools for the formation of an economic and technological mechanism for energy efficiency in thermal power engineering. *Russian entrepreneurship*. 2018. Vol. 19. No. 2. P. 395–404.
16. Druzhinin A.G. Center-peripheral restructuring of the «maritime» regions of the Russian borderland: modern geopolitical and geoeconomic determinants. *In the collection: Borderland Problems. New Trajectories of International Cooperation. Proceedings of the VII International Scientific and Practical Conference*. Kaliningrad, 2023. P. 11–15.
17. 17. Dobrolezha E.V. Model tools for assessing the resource interaction of regional economic entities. *Accounting and Statistics*. 2011. No. 1. P. 194–199.
18. 18. Kosolapova N.A., Matveeva L.G., Nikitaeva A.Y. *et al*. The Rational Use of Water Resources in the Strategy of Industry 4.0. *Water Resource Management*. 2021. Vol. 35. P. 3023–3041. https://doi.org/10.1007/s11269-021-02889-1
19. Nikitina O.I., Kosolapov A.E. Water allocation in transboundary river basins taking into account environmental flow (on the example of the Ural River basin). *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2025. No. 4. P. 5–24. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-4-5-24
20. Dolgova O.I., Nikitaeva A.Y. Evaluation of the potential for the development of the circular industry in the region: a new approach. *Recycling*. 2025. Vol. 10. No. 2. https://doi.org/10.3390/recycling10020038
21. Nikitaeva A.Y., Salem A.B.M. Institutional framework for the development of artificial intelligence in the industry. *Journal of Institutional Studies*. 2022. Vol. 14. No. 1. P. 108–126. https://doi.org/10.17835/2076-6297.2022.14.1.108-126
22. Nikitaeva A.Y., Chernova O.A., Molapisi L. Smart territories as a driver for the transition to sustainable regional development and green economy. *R-Economy*. 2022. T. 8. No. 2. P. 120–134. https://doi.org/10.15826/recon.2022.8.2.010

Сведения об авторах:

Косолапова Наталья Алексеевна, д-р экон. наук, ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», Россия, 344002, г. Ростов-на-Дону, ул. М. Горького, 88; https://orcid.org/0000-0001-9099-9062; e-mail: nakosolapova@sfedu.ru

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

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

About the authors:

Natalia A. Kosolapova, Doctor of Economic Sciences, Southern Federal University, ul. Maksima Gorkogo, 88, Rostov-on-Don, 344002, Russia; https://orcid.org/0000-0001-9099-9062; e-mail: nakosolapova@sfedu.ru

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

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

Поступила в редакцию / Received 11.10.2025.
Поступила после рецензирования / Revised 03.11.2025.
Принята к публикации / Accepted 17.11.2025.

УДК 556.013 *https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-6-26-51*

Оценка поступления взвешенного вещества в реки методом трассировки источников наносов для решения задач управления урбанизированным водосбором

Е.М. Гирло[1,2], С.Р. Чалов[1,2], С.В. Харченко[1,3]

kate.girlo.m@gmail.com

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

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Оценка вклада разных источников (процессов, территорий) в загрязнение рек, в частности взвесями, является важнейшей составляющей выработки мероприятий для снижения негативного воздействия на речную систему. В России эта методика только получает развитие, хотя давно является ключевой в городском хозяйстве многих стран. В статье представлен анализ применения метода трассировки источников наносов (известного как «фингерпринтинг» от англ. fingerprinting) и его адаптация для урбанизированного водосбора с использованием разных статистических алгоритмов, анализируются типовые источники загрязнения городских рек. **Методы.** Метод апробирован для бассейна р. Сетуни, расположенного в московской агломерации, и основан на отборе проб субстратов в источниках и в контрольной точке, лабораторном анализе на содержание макро- и микроэлементов во взвешенных наносах, выборе репрезентативных трассеров, а также непосредственно моделировании долевого вклада источников с привлечением статистических моделей сепарации смеси, таких как FingerPro, simmr, MixSIAR, Sed_SAT, SIFT. **Результаты.** Предложена унификация терминов, используемых при реализации данного метода. Рассмотрены результаты трехчленного деления проб на водосборе: почвы на участках открытого грунта, дорожная пыль, береговая эрозия. Сделан вывод, что в большинстве урбанизированных бассейнов основным источником взвеси являются береговые уступы, а процесс эрозии берегов – ключевым фактором формирования взвеси, что определяет актуальность мер по стабилизации береговой линии.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: метод трассировки источников наносов, фингерпринтинг, взвешенные наносы, источники загрязнения, модели сепарации смеси, FingerPro, MixSIAR, simmr, трассеры.

Финансирование: Полевые работы выполнены при поддержке проекта РНФ 25-17-00073, химико-аналитические работы – при поддержке проекта Правительства Российской Федерации, реализуемого в рамках Соглашения №075-15-2025-008 от 27.02.2025. Численные расчеты проведены в рамках темы государственного задания Института водных проблем РАН № FMWZ-2025-0001.

Для цитирования: Гирло Е.М., Чалов С.Р., Харченко С.В. Оценка поступления взвешенного вещества в реки методом трассировки источников наносов для решения задач управления урбанизированным водосбором // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 6. С. 26–51. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-6-26-51
EDN: GFXBAL

© Гирло Е.М., Чалов С.Р., Харченко С.В., 2025

Opportunities and Prospects of Suspended Sediment Source Tracing for Urban Catchment Management

Ekaterina M. Girlo[1,2], Sergey R. Chalov[1,2], Sergey V. Kharchenko[1,3]

kate.girlo.m@gmail.com

[1]*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*
[2]*Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*
[3]*Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

ABSTRACT

Relevance. Reducing river pollution by suspended sediments can be achieved by assessing the contribution of different sources. In Russia, this approach is only starting to develop, while in many other countries it is already an important part of urban water management. The article reviews how sediment fingerprinting is applied and adapted for urban catchments using different statistical methods, and discusses the main sources of pollution in urban rivers. The authors propose to unify terminology: instead of using the borrowed word "fingerprinting" or its literal translations, the term "suspended sediment source tracing" is suggested. **Methods.** The method was tested on the Setun River basin, located within the Moscow agglomeration. The study applies the fingerprinting method, which includes sampling of substrates from source areas and the control point, laboratory analysis of chemical element concentrations, selection of the most representative tracers, and modeling of source contributions using statistical mixing models such as FingerPro, simmr, MixSIAR, Sed_SAT, and SIFT. **Results.** The study shows that in most urban catchments the main source of suspended sediment is riverbanks, and bank erosion is the key process of sediment formation. This underlines the need for measures to stabilize riverbanks. Based on a review of algorithms, a strategy was developed for applying the method to a highly urbanized catchment – the Setun River, a tributary of the Moscow River. Three main sediment sources were identified: soils from bare ground, road dust, and bank erosion. The proposed research concept makes it possible to study seasonal changes in the contribution of each source to sediment transport and, for the first time in Russian cities, to provide a scientific basis for measures to reduce sediment-related pollution in rivers.

KEYWORDS: suspended sediment source tracing method, fingerprinting, suspended sediments, pollution sources, mixing models, FingerPro, MixSIAR, simmr, tracers, source contribution, urban area.

Financing: Field work was carried out with the support of the Russian Science Foundation project 25-17-00073, chemical-analytical work – with the support of the project of the Government of the Russian Federation, implemented within the framework of Agreement № 075-15-2025-008 dated 27.02.2025. Numerical calculations were carried out within the framework of the state assignment of Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences No. FMWZ-2025-0001.

For citation: Girlo E.M., Chalov S.R., Kharchenko S.V. Opportunities and Prospects of Suspended Sediment Source Tracing for Urban Catchment Management. Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management. 2025. No. 6. P. 26–51. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-6-26-51 EDN: GFXBAL

ВВЕДЕНИЕ

Наблюдающийся во всем мире рост темпов эрозии почв как за счет изменения структуры землепользования [1], так и увеличения частоты экстремальных гидрологических и метеорологических явлений [2, 3] влияет на усиленный перенос мелкодисперсных фракций наносов (взвесей), с которыми осуществляется основная транспортировка загрязняющих веществ в речные системы [4]. Одной из актуальных задач, имеющих практическую значимость для разработки схем управления водосборами, является оценка долевого вклада источников загрязнения рек.

Наносы, мобилизуемые на водосборе, могут иметь различные физико-химические характеристики (концентрации макро- и микроэлементов, гранулометрический состав, содержание органического вещества, радиоактивность и т. д.), а их смеси в точках мишеней, в аккумулятивных телах в нижних частях водосборов, в устьях водотоков, днищах водоемов часто позволяют установить долевой вклад источников на водосборе в поставку наносов в мишень. Соответствующая методика статистического анализа в международной литературе называется fingerprinting (в пер. с англ. – «отпечаток пальца»). Следует отметить, что методика, учитывая преимущественный перенос загрязняющих веществ в тонкодисперсных фракциях взвешенных наносов, применяется именно для взвесей. В отечественных исследованиях название метода часто заимствуют без перевода – фингерпринтинг, или «поиск питающих провинций» (в геологической литературе), что не соответствует масштабам исследования перераспределения взвесей в речных бассейнах.

Учитывая смысл подхода, в данной работе под *методом трассировки источников наносов* понимается совокупность процедур по идентификации и количественной оценке долевого вклада источников поступления взвешенного вещества в реки. Метод трассировки источников наносов включает ряд этапов от отбора проб источников и мишени до статистической оценки долевых вкладов источников. Под *источниками (sources)* понимают однородные области или субстраты на водосборе, из которых наносы поступают в водный объект и формируют *смесь (mixture)*, сформированную смешением материалов из разных источников. *Трассеры (tracers)* – количественные физические или химические характеристики, позволяющие статистически различать источники по вкладу в вынос взвеси. Отдельный образец смеси – *целевой образец (target sample). Мишень (target)* – литодинамически однородный объект или среда, в которой формируется смесь (например, толща воды в русле на створе, донные отложения или аккумулятивное тело). Место отбора целевого образца называется *контрольным створом или контрольной точкой (control site).* Для количественной оценки долевого вклада источников применяются статистические *модели сепарации смеси (mixing/unmixing models),* к которым относят как mixing-модели (состав смеси оценивается на основе информации об источниках), так и unmixing-модели (по данным смеси определяется, какие именно источники ее сформировали). Моделирование вкладов является последним этапом реализации метода трассировки

наносов. Процедура статистического разложения смеси на вклады источников – *процедура сепарации смеси (unmixing)*.

Данный метод играет ключевую роль для разработки стратегий охраны земельных и водных ресурсов, устойчивого управления ландшафтами в пределах водосборных бассейнов, управления водохозяйственным комплексом территорий [5]. В России метод трассировки источников наносов получил гораздо меньшее распространение и использовался в работах по Западной Двине [6], где был применен интегрированный подход, включающий гидрологическое моделирование (SWAT), разделение источников стока с помощью анализа EMMA и фингерпринтинг с использованием геохимических элементов и радионуклида ^{137}Cs. Метод применялся при идентификации источников поступления загрязнителей в Авачинский залив (Камчатка) [7].

Одной из ключевых задач метода является его адаптация к условиям урбанизированного ландшафта. Метод трассировки источников наносов в городах использует стандартный перечень источников, комбинации которых варьируют в зависимости от конкретного исследования: береговые уступы, поверхностный слой почв, дорожная пыль, а также наносы со строительных площадок [8–11]. В России этот метод впервые применяется для оценки влияния урбанизации на загрязнение рек Москвы и реализуется наравне с другими подходами к оценке перераспределения наносов в малых речных водосборах города [12, 13]. Основа его применения создана для бассейна р. Сетуни, находящегося в городской черте и включающего принципиально различные территории с разным режимом хозяйственного использования: жилые, общественные и промышленные зоны, а также незначительные по площади, но почти не измененные деятельностью человека условно-естественные ландшафты.

Цель данной работы – обзор мирового опыта применения метода трассировки источников наносов, в т. ч. для городских территорий, и разработка на этой основе концепции исследования вклада потенциальных источников наносов в малом речном бассейне р. Сетуни (г. Москва). Рассмотрена дифференциация источников взвешенных наносов, поступающих в устье р. Сетуни с ее водосбора, являющаяся первым этапом в применении методики.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

История развития метода трассировки источников наносов

Первоначально метод трассировки источников наносов был применен во второй половине XX в. [14, 15] и направлен на идентификацию источников с помощью минерального состава взвешенных отложений [14]. Используемые подходы во многом были качественными, т. е. заключались в описании и визуальном сравнении свойств наносов для идентификации источников загрязнения. Это заложило фундамент для формирования будущей методологии трассировки источников взвесей. При этом основной англоязычный термин методики – «фингерпринтинг» – еще не был введен. Развитие метода произошло, когда в качестве трассеров стали использоваться радиоактивные изотопы, в частности ^{137}Cs [16, 17]. Предлагались подходы к приме-

нению в качестве трассеров как антропогенных (^{137}Cs), так и естественных радионуклидов (^{210}Pb, ^{7}Be), характеристики которых минимально зависят от литологии пород [16].

Переход от качественных к количественным подходам в трассировке источников взвесей произошел в исследовании [17], в котором характеристики взвешенных наносов были соотнесены с их потенциальными источниками – почвами и русловыми отложениями. В качестве трассеров стали применяться минералогические и магнитные параметры источников, содержание радионуклидов, органического углерода и азота, фосфора, а также анализировался гранулометрический состав наносов. Ключевым этапом развития метода стали работы Э. Коллинза [18], где была впервые реализована системная идентификация источников наносов (рис. 1). В качестве источников на примере водосборов Великобритании (р. Северн) рассматривались различные эродированные почвы и русловые отложения, также был применен широкий набор трассеров – геохимические элементы, радионуклиды, органический углерод. Критерии выбора трассеров включали доступность анализа, устойчивость (консервативность) при транспортировке и различимость между источниками (дискриминация по трассерам). На начальном этапе выбор трассеров для идентификации наносов проводился на основе гипотез, а не статистических процедур.

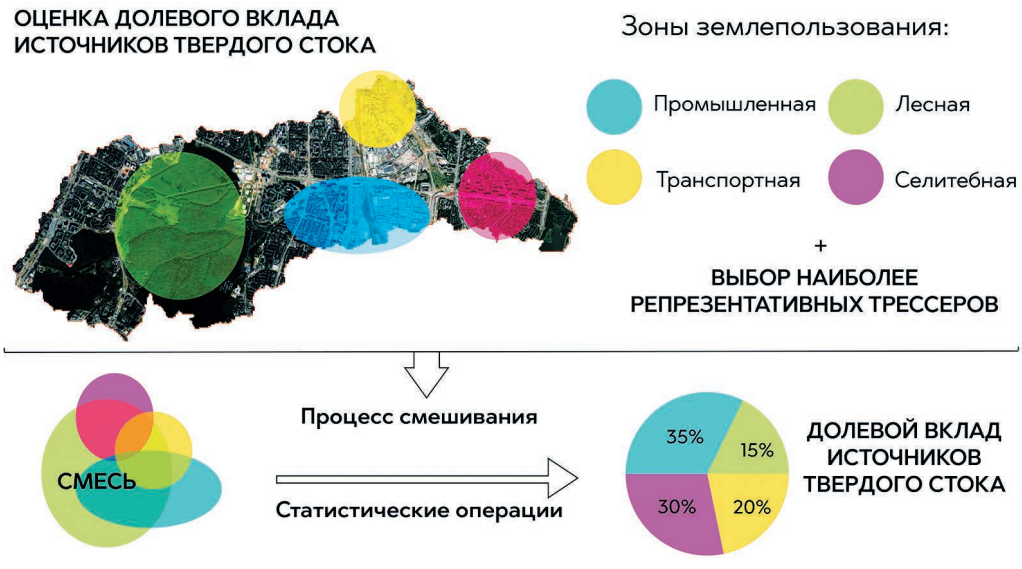


Рис. 1. Графическое отображение метода трассировки источников наносов.
Figure 1. Graphical representation of the fingerprinting method.

С конца 1990-х – начала 2000-х годов метод трассировки источников наносов начал стремительно развиваться и в теоретическом, и в практическом направлении. Расширился набор трассеров для идентификации источников, стали активно развиваться статистические подходы к оценке долевого вклада источников. Широкое применение получили геохимические маркеры [18], а радиоактивные изотопы стали использоваться для оценки времени транзита наносов в русловой сети [19].

Значительный вклад в унификацию метода трассировки источников наносов внесло исследование [20], в котором предложены три этапа выбора наиболее информативных трассеров: 1) проверка консервативности (range test) – устойчивость маркера при транспортировке: при перемещении от источника к контрольной точке трассер должен сохранять свои свойства; 2) статистическая различимость трассеров между источниками – проверка с использованием тестов Манна – Уитни (для двух источников) или Краскела – Уоллиса (для трех и более источников); 3) анализ дискриминантных функций (DFA) – на основе критерия λ Уилкса производится пошаговый отбор минимального количества трассеров, которые способны различать все источники. При этом некоторые авторы подвергают критике использование DFA, т. к. применение большого количества маркеров снижает вклад неконсервативных трассеров в общем результате [21, 22], в связи с чем рекомендуется параллельная проверка с и без DFA [23].

С 2010-х по 2020-е годы в методике трассировки источников наносов в качестве трассера стали применять экологическое ДНК (eDNA) [24], были созданы модели сепарации смеси (unmixing models) и предприняты первые попытки в формировании глобальных баз данных (Collins et al., 2017 г.; Owens и др., 2016 г.). Сложные в применении модели Isosource, MixSIAR [27] были доработаны в SIAR на языке R [28], использующем алгоритмы Монте-Карло с цепями Маркова (MCMC). Значительным прорывом количественного анализа является разработка модели MixSIAR [29], которая основана на байесовском подходе и реализована на языке R. Этот подход позволил корректно описывать неопределенность в источниках наносов и процессах. Помимо этого, модель обеспечивает существенное сужение доверительных интервалов оценок, что свидетельствует о повышении точности расчетов. Первоначально MixSIAR разработан для оценки пищевых цепей животных и впоследствии был успешно адаптирован для задач фингерпринтинга наносов.

Параллельно активно развиваются классические вероятностные модели, в частности модель FingerPro для оценки вклада источников поступления твердого вещества в речные системы, реализованная на языке R с открытым исходным кодом на GitHub [30]. Модель впоследствии была усовершенствована путем перехода от трехступенчатого метода (TSM) отбора трассеров в ее первоначальной версии к консенсусному методу (Consensus Method, CM) в последующей, который включает следующие методы выбора трассеров: Conservative Index (CI), Consensus Ranking (CR) и Consistent Tracer Selection (CTS). Это по-

высило ее точность и устойчивость (Lizaga et al., 2020 г.). Современный этап развития фингерпринтинга характеризуется разработкой новой байесовской модели simmr (Stable Isotope Mixing Model in R), выпущенной в 2023 г., которая позволяет использовать как классический алгоритм Монте-Карло с цепями Маркова (MCMC) с JAGS, так и фиксированную форму вариационного байесовского вывода (Fixed-Form Variational Bayes, FFVB) – ускоренную процедуру получения приблизительного решения [27].

Применение метода трассировки источников наносов осуществляется в масштабе от отдельных склонов и малых водотоков до бассейнов площадью свыше 10 000 км² [5]. Наиболее интенсивный рост интереса к методу произошел в Великобритании, США, Китае, Испании, Иране, Франции, Бразилии и Австралии [5]. В Китае большое количество исследований посвящено пустынным зонам [32–34]. В Иране изучали равнинные территории, подверженные антропогенным воздействиям [35]. В Великобритании и Испании – предгорные и сельскохозяйственные районы, частично с антропогенно нарушенными водосборами [18, 36]. В каждом регионе метод адаптируется под локальные физико-географические условия, что влияет на выбор трассеров. Современный этап развития метода характеризуется тенденцией к комплексному применению различных групп трассеров и моделей сепарации смеси, основанных на байесовской статистике [27–29, 37].

Методика трассировки источников наносов

Реализация метода состоит из нескольких ключевых этапов: опробование источников и мишеней, лабораторная обработка и анализ, выбор модели сепарации смеси, подбор наиболее репрезентативных трассеров, учитывающих специфику ландшафта, а также интерпретация результатов, полученных с помощью моделей, реализующих оценку долевых вкладов источников наносов. Метод отбора проб, лабораторного анализа данных, подход к выбору репрезентативных трассеров и модели оценки долевого вклада необходимо рассматривать как элементы единой системы.

Полевые и лабораторные работы

Программа отбора источников определяется типом ландшафтов, почвенно-геологическими условиями, пространственной и временной изменчивостью источников и др. [5]. В качестве источников поступления наносов рассматриваются три основных подхода: разные субстраты, водосборы (суббассейны), зоны землепользования. Источники могут выделяться согласно зонам землепользования: транспортная, промышленная, селитебная, природная, рекреационная, зона без жилой застройки [8, 38–40]. Кроме того, источники определяются по типу субстрата, например, поверхностные почвы, дорожная пыль, береговые уступы, взвесь из коллекторов и др. [41, 42]. Также существует подход, основанный на выделении источников по суббассейнам, т. е. по небольшим водосборам, являющимся частями исследуемого водосбора [43]. Каждый из этих вариантов имеет как преимущества, так и ограничения. Поэтому выбор подхода должен исходить из специфики конкретного водосбора и поставленных в исследовании задач (рис. 2).

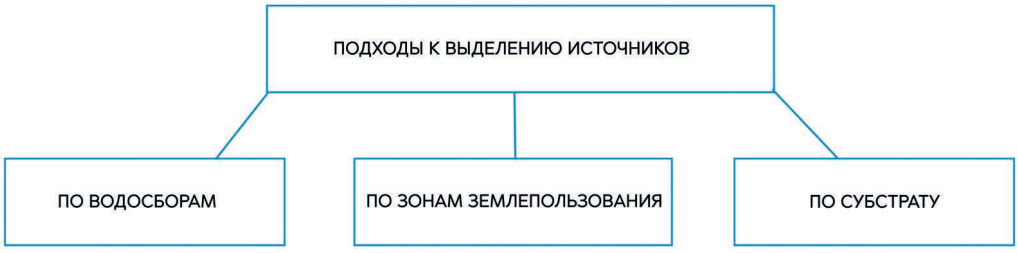


Рис. 2. Подходы к выделению источников поступления взвеси с водосбора в речную сеть.
Figure 2. Approaches to identifying sources of suspended sediment from the catchment to the river system.

В качестве субстрата в мишени используют взвешенные наносы, аллювиальные почвы, донные отложения, свежие аккумулятивные толщи (наилок) [44–46]. Как правило, анализируют тонкозернистые наносы размером < 63 мкм, концентрирующие наибольшее количество загрязняющих веществ [5, 47]. Проводят предварительную фильтрацию данных, например, отбрасывают параметры с высокой неопределенностью [23]. Важным аспектом метода трассировки источников наносов является учет гранулометрического состава наносов (PSC-коррекция, SSA) [48]. В большинстве рассматриваемых моделей сепарации смеси отсутствует блок, включающий коррекцию на размер частиц, в связи с чем необходимо учитывать это ограничение и осуществлять подготовку данных до запуска процесса моделирования.

Выбор трассеров для идентификации источников загрязнения

Выявление трассеров, способных наилучшим образом отражать пространственную дифференциацию и состав источников взвешенного вещества [5, 49, 50], является важнейшей задачей первого этапа метода. При выборе трассеров ключевым фактором является их консервативность. Консервативные трассеры (например, тяжелые металлы и металлоиды, редкоземельные элементы, радионуклиды) обладают стабильным поведением при транспортировке в русловой системе, что делает их предпочтительными при выборе для оценки определения источников взвеси. В отличие от них органические трассеры характеризуются неконсервативным поведением, что требует дополнительных корректировок при расчетах [25].

Применяются разные группы трассеров:

1. Макро- и микроэлементы – неорганические индикаторы (Al, Fe, K, Mg, Ti, тяжелые металлы и металлоиды, редкоземельные элементы). Преимуществом является высокая точность их аналитического определения даже при низких концентрациях элементов в образцах, благодаря применению методов масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) или рентгенофлуоресцентного анализа (XRF).

2. Органические маркеры – биоиндикаторы (биомаркеры и стабильные изотопы углерода $\delta^{13}C$ и азота $\delta^{15}N$, используемые для оценки растительных

и почвенных источников). Изотопный состав углерода и азота обладает высокой информативностью при оценке различия в источниках растительности и особенно широко применятся в сельскохозяйственных ландшафтах [51]. Органическое вещество содержит биомаркеры, устойчиво отражающие специфику почвенного и растительного покрова или антропогенных источников загрязнения.

3. Радионуклиды. Включают как антропогенные изотопы (например, ^{137}Cs), так и природные – ^{210}Pb, применяемый для оценки эрозионных процессов [19, 52]. Антропогенный радионуклид ^{137}Cs появился после ядерных испытаний 1950–1960-х годов и широко используется в качестве индикатора поверхностной эрозии за счет его устойчивого закрепления в верхнем горизонте почвы (0–20 см) [53].

4. Магнитная восприимчивость (χ) характеризует способность материалов реагировать на внешнее магнитное поле. Существенной характеристикой магнитной восприимчивости является ее связь с гранулометрическим составом наносов. Магнитные свойства отличаются у различных фракций наносов, что способствует проведению измерений в узких гранулометрических диапазонах [54].

5. Специфические маркеры, например соединения $\delta^{13}C$ и изотопные сигнатуры жирных кислот (CSSI), определенные радионуклиды [5]. Используют цветовые индикаторы, изотопные сигнатуры жирных кислот CSSI, экологический ДНК (eDNA), стабильное соотношение изотопов кислорода (^{18}O) в фосфате ($\delta^{18}Op$). Применяется метод определения спектральных свойств субстратов, основанный на анализе спектров отражения и оптической плотности в видимом, ультрафиолетовом и инфракрасном диапазонах [55]. С помощью цветовых характеристик можно выявить уровень содержания органического вещества, тяжелых металлов и металлоидов, а также использовать их для идентификации как типов землепользования (лес, пастбище, пашня), так и наносов, поступивших из различных почвенных горизонтов.

Устойчивые результаты достигаются при сочетании различных групп трассеров [51]. Современные исследования демонстрируют динамику увеличения количества применяемых трассеров, а также устойчивую тенденцию к комбинированию групп маркеров для идентификации источников [56]. Увеличение количества групп трассеров может повысить надежность расчета долевых вкладов с помощью моделей сепарации смеси [5]. Однако априорный выбор трассеров оказывает фундаментальное влияние на точность и достоверность оценки с помощью моделей, т. к. включение неконсервативных маркеров может снижать общее качество модельных оценок [23].

Выбор трассеров может базироваться как на статистических методах, так и на экспертной оценке их химических и физических свойств [25]. Например, для идентификации источников взвеси в сельскохозяйственном ландшафте лучше отдавать предпочтение органическим маркерам, тогда как в зоне лесного пожара – магнитной восприимчивости [57].

Численная реализация расчета

Численная реализация метода трассировки источников наносов определяется процедурой сепарации (unmixing), на основе которой статистическими методами состав взвешенных наносов в источниках на водосборе сопоставляется с составом взвеси в контрольной точке. Осуществляется поиск оптимального соотношения между источниками. Относительный вклад каждого источника наносов определяется по уравнению (1), которое удовлетворяет ограничениям уравнения (2) [58].

$$\sum_{j=1}^{m} a_{i,j}\,\omega_j = b_i, \tag{1}$$

$$\sum_{j=1}^{m} \omega_j = 1 \qquad 0 \le \omega_j \le 1, \tag{2}$$

где b_i – концентрация трассера i в целевом образце;
$a_{i,j}$ – представляет концентрацию трассера i в источнике типа j;
ω_j – неизвестный относительный вклад источника j;
m – количество потенциальных источников наносов,
n – количество выбранных трассеров.

Модели опираются на алгоритм Монте-Карло с марковской цепью для реализации процедуры сепарации. В отличие от моделей, использующих классический вероятностный подход, модели на основе байесовской статистики, такие как simmr или MixSIAR, опираются на разные варианты исходной априорной пропорции источников, т. е. проводят проверку корректности процедуры сепарации – насколько точно происходит прогнозирование долевых вкладов источников. С этой целью используются искусственные [59] или виртуальные смеси [60]. Искусственные смеси представляют собой смесь из нескольких реальных источников, смоделированных в лабораторных условиях с заданными пропорциями, далее происходит проверка, сможет ли модель правильно восстановить заданные пропорции. Виртуальные смеси представляют собой статистическую реконструкцию процесса сепарации и позволяют осуществлять калибровку моделей на основе данных моделирования. Это позволяет оценить уровень неопределенности результатов и обеспечивает более надежное решение [27–29, 37].

С помощью критерия согласия GOF (от англ. goodness of fit) на модели FingerPro определяется качество аппроксимации модели. Следует отметить, что несмотря на высокие значения критерия соответствия модели (GOF) [61] данный показатель не является гарантией точности прогноза [56]. Именно проверки по искусственным или виртуальным смесям позволяют убедиться в том, что модель корректно определяет долевые вклады источников поступления взвеси в речную сеть.

$$\mathrm{GOF} = 1 - \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left\{\left(\frac{b_i - \sum_{j=1}^{m} x_i a_{i,j}}{\Delta_i}\right)^2\right\}, \tag{3}$$

где $a_{i,j}$ – средняя концентрация трассера i в источнике j (j = 1 до m);
b_i – концентрация трассера i (i = 1 до n) в целевом образце;
x_j – относительный вклад источника j в целевой образец;
m – количество потенциальных источников наносов;
n – количество трассеров.

Программная реализация метода трассировки источников наносов выполнена в разных комплексах SIFT [62], Sed_SAT [65], FingerPro [31], MixSIAR [29] а также simmr [27, 28, 37] (таблица).

Таблица. Программные комплексы для трассировки источников взвесей
Table. Software packages for suspended sediment source tracing

Модель	Статистический подход	Примеры исследований	Источник
FingerPro	Классическая статистика	[36] https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111020 (сельскохозяйственный водосбор), [64] https://doi.org/10.3390/su151511856 (водосбор под влиянием горнодобывающей промышленности)	[31] (https://doi.org/10.1007/s11269-020-02650-0)
Sed_SAT	Классическая статистика	[41] https://doi.org/10.1002/rra.3325 (урбанизированный водосбор)	[65] (https://doi.org/10.3133/ofr20171062)
SIFT	Классическая статистика	[66] https://doi.org/10.1002/hyp.13736 (четыре контрастных водосбора)	[62] (https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.126)
MixSIAR	Байесовский подход. MCMC сложный со случайными и фиксированными эффектами	[67] https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.12.008 (пахотные поля в Австрии)	[29] (https://doi.org/10.7717/peerj.5096)
SIMM	Байесовский подход. MCMC более простой	[67] https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.12.008 (пахотные поля в Австрии)	[28] (https://doi.org/10.1371/journal.pone.0009672), [37] (https://doi.org/10.1002/env.2221), [27] (https://doi.org/10.48550/arXiv.2306.07817)

В модели SIFT, основанной на классическом вероятностном подходе, реализованы стандартные этапы фингерпринтинга [62]. Модель Sed_SAT дополнительно включает блок, где реализованы поправки на содержание органического вещества и на гранулометрический состав наносов, а также тесты на фильтрацию точек выбросов [65]. Кроме того, широко используемой моделью является FingerPro, основанная на классическом вероятностном подходе с трехэтапным методом (TSM) отбора трассеров и визуализацией результатов. В последнюю версию модели FingerPro интегрирован консенсусный метод (CM), который считается улучшенной альтернативой трехэтапному методу (TSM) [31]. Преимуществом FingerPro является наличие блока визуализации данных, что помогает исследователям предварительно оценить дифференциацию источников наносов и увидеть наличие аномальных измерений или выбросов. Однако в модели не реализован блок, включающий коррекцию на гранулометрический состав наносов, и отсутствует блок для калибровки данных с помощью виртуальных смесей.

Из моделей байесовской статистики наиболее широко используется реализованная в R с JAGS [29] модель MixSIAR, которая обеспечивает апостериорную оценку долевых вкладов источников на основе алгоритмов Монте-Карло на марковских цепях (MCMC). Преимуществом модели является возможность ее детальной настройки под определенное исследование, а также проведение калибровки данных на наборах виртуальных смесей, моделирующих всевозможные комбинации долевого вклада источников наносов в контрольной точке [56, 60]. Аналогичный статистический подход использует модель simmr [27].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Мировой опыт применения метода трассировки источников наносов в урбанизированном ландшафте

Трассировке источников взвесей в загрязнение урбанизированных рек посвящены работы [9, 38, 42, 68]. Специфика применения метода в этих условиях состоит в том, что: преимущественным источником поступления наносов в речную сеть или аккумуляции их в промежуточных коллекторах часто являются техногенно преобразованные грунты: стройплощадки, скопления дорожной пыли, цветники с насыпным грунтом, наносы из засыпанных эрозионных форм и т. д. [9]; в силу высокой пространственной мозаичности характера городских покрытий отдельные источники наносов могут быть трудны для учета; значительный, а иногда определяющий, вклад могут оказывать искусственные дренажные системы, ливневая канализация, сбросы предприятий.

Типичным для городских рек является использование в качестве субстрата в мишени образцов взвешенных наносов [44–46] в русле, а не аккумулятивных тел. Это объясняется тем, что русла могут расчищаться, а аккумулятивные поверхности по берегам рек могут характеризовать либо долгосрочную картину, либо отдельные экстремальные события, но не отвечать современному фоновому стоку наносов с водосбора. Спецификой можно считать высокую сезон-

ность вклада тех или иных источников поступления взвесей в реки городов. Учет сезонности необходим в том числе из-за применения зимой противогололедных реагентов [42].

Для расположенных в урбанизированных ландшафтах водосборов сохраняются классические подходы к выбору репрезентативных трассеров. В большинстве исследований применяется последовательность тестов: range test, Kruskal – Wallis test (KW) и DFA. Для предварительной оценки структуры данных часто используется анализ главных компонент (PCA). В урбанизированном ландшафте из-за высоких концентраций поллютантов, аккумулирующихся на мелкодисперсных частицах, исключительно важно вводить поправку на гранулометрический состав взвешенных веществ, а также на содержание органического вещества (TOC) [69].

Примеры региональных исследований свидетельствуют о применении метода трассировки источников наносов для малых водосборов площадью порядка первых десятков км^2 [9, 70] и о преимущественной роли береговой эрозии рек [8, 10, 38, 41, 71]. В урбанизированном водосборе р. Дед Ран штата Вирджиния (США) установлено, что береговые уступы формируют от 70 до 76 % взвешенных наносов в верхнем и, соответственно, в нижнем течении реки, особенно в периоды повышенной водности [71]. В верховьях р. Диффикулт Ран штата Вирджиния (США) во взвешенных наносах вклад берегов достигал 91 %, а в донных отложениях – до 98 % [41]. Степень зарегулированности русла отдельно рассматривалась в ряде работ [38, 41], свидетельствующих о том, что вклад береговых уступов был не более 40 % в условиях сильного регулирования и повышался до 45–85 % в естественном русле городской среды [8].

Вклад дорожной пыли становится особенно заметным после дождей [8, 41]. Так, в урбанизированном бассейне р. Дед Ран в штате Вирджиния (США) более 50 % взвешенных веществ после ливневых осадков приходилось на дорожную пыль, однако наносы с дорог не оседают в русле реки [41]. В бассейне р. Анакостия штата Мэриленд (США) вклад дорожной пыли составил 13 % [38]. Высокий вклад дорожной пыли (25–45 %) зарегистрирован в урбанизированном водосборе р. Дед Ран в Балтиморе (США) в зоне выхода коллекторов. Ниже по течению вклад пыли снижался до 15 % во взвеси, а доминирующим источником становилась эрозия береговых уступов [42]. Внедрение дренажных и фильтрационных систем позволило снизить вклад дорожной пыли с 35 до 23 %, тем не менее пыль остается приоритетным источником поллютантов в водосборе [42].

В ряде публикаций подчеркивается важность включения строительных площадок в перечень потенциальных источников [39, 40, 68]. Для урбанизированного водосбора в штате Алабама (США) во взвешенных наносах мелкая фракция со строительных площадок имела на 30–40 % более высокие концентрации ряда тяжелых металлов (Ni, V, Pb). Вклад строительных площадок во взвешенные наносы достигал до 100 % для мелкой фракции [68], а в донных отложениях в низовьях – до 91 % [39]. Это свидетельствует о том, что исключение строительных площадок из перечня может привести к некорректной

оценке долевого вклада источников, а отсутствие гранулометрической коррекции может занижать вклад техногенных источников загрязнения.

Многие исследователи в перечень источников городского загрязнения включают поверхностные почвы [8, 40, 72]. Однако долевой вклад поверхностных почв в городе, даже в урбанизированных ландшафтах с включениями сельскохозяйственных зон, не превышает 10 % [72]. При этом, как правило, на сельскохозяйственных территориях почвы определяют поступление взвесей и выносят до 70 % загрязняющих веществ [43].

Реализация метода трассировки источников наносов для бассейна реки Сетуни

Проведенный обзор позволил разработать концептуальную основу исследования источников поступления взвесей в бассейне р. Сетуни, которая является крупнейшим притоком р. Москвы в черте агломерации и испытывает постоянный рост степени урбанизированности территории. Около трети площади бассейна р. Сетуни представлено административно-жилым сектором, промышленными зонами (крупнейшая в Москве ПЗ «Очаково») и дорожным полотном (участок МКАДа). Почвенный покров в условиях городской застройки распространен фрагментарно и лучше всего сохранился в лесах и лесопарковых зонах [63].

В бассейне Сетуни и в бассейнах притоков – рек Навершки и Очаковки – за период 2019–2023 гг. было отобрано 211 образцов из источников наносов: 124 – поверхностный слой почвы, 77 – дорожная пыль, 10 – наносы из береговых уступов. В устье Сетуни отбирали пробы взвешенных наносов – за четыре года 76 образцов с регулярностью примерно 1 раз в месяц. Пробы из источников сепарировали, отсеивали все минеральные зерна крупностью выше песка, в мишени такая сепарация фактически проводится самой рекой. В лабораторных условиях методом отмучивания в центрифуге проводилось деление образцов источников и мишеней на фракции разного размера: менее 1 мкм (PM1), 1–10 мкм (PM1-10) и валовую фракцию. Во всех трех размерностях был осуществлен химический анализ методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS), определены концентрации микро- и макроэлементов – всего единообразно рассчитаны концентрации 54 химических элементов.

Проанализированы три возможных подхода к классификации источников наносов на водосборе р. Сетуни: бассейновый, зоны землепользования города, «субстратный». Последний был базовым при создании дизайна исследования. При проецировании всего набора данных для источников в двухмерное пространство методом линейного дискриминантного анализа была выполнена оценка разделимости разных классов с визуальной интерпретацией (рис. 3).

При разделении по типу субстрата получена четкая разделимость классов. Разделение по суббассейнам, каждый из которых включает как участки моренной равнины, так и техногенно переработанные поверхности на междуречьях, а также склоны и днища сохранившихся, не уничтоженных урбанизацией речных долин, не оказалось удачным в силу однородности рельефа

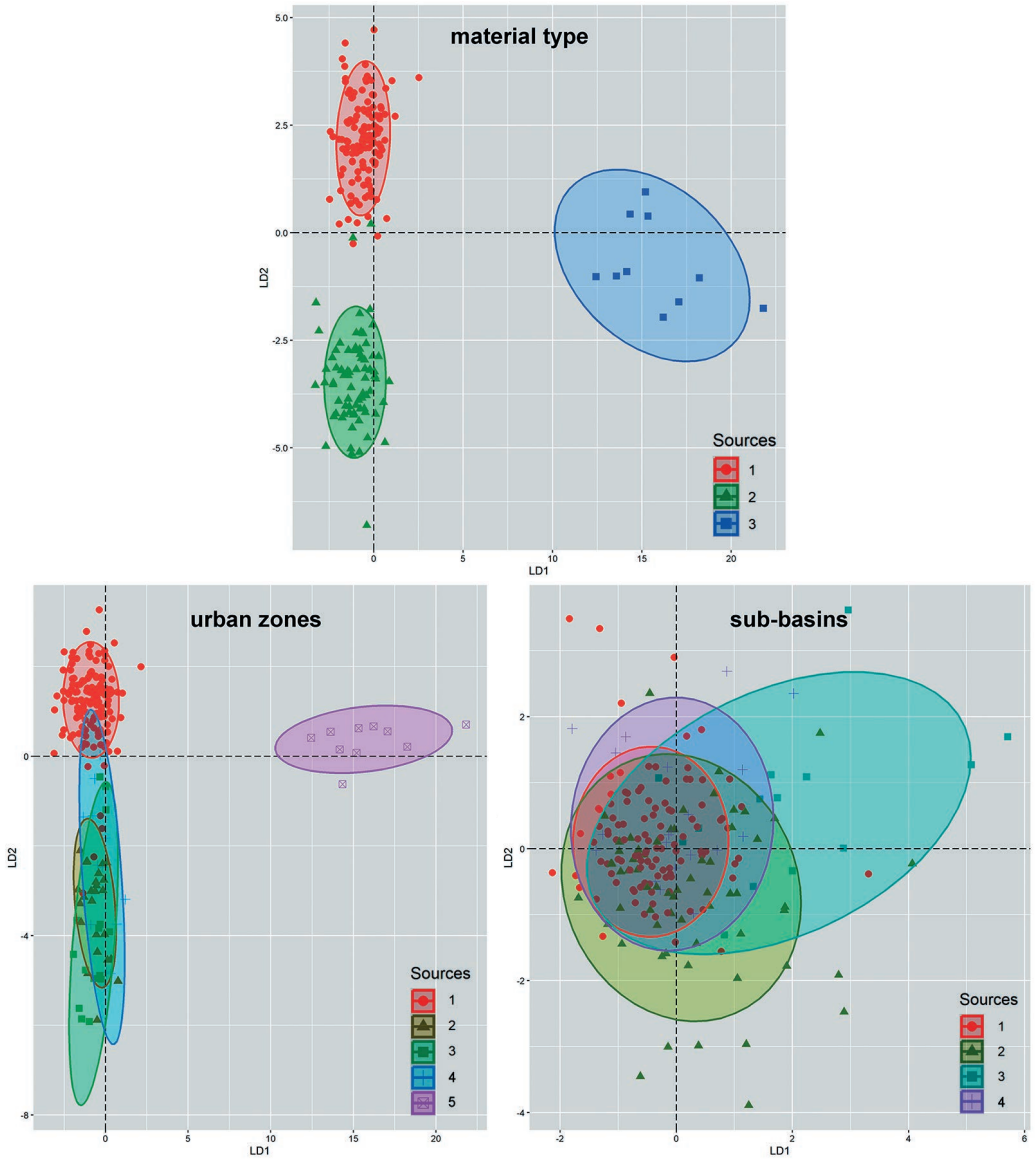


Рис. 3. Разделимость потенциальных источников наносов на водосборе р. Сетуни согласно трем различным подходам: тип субстрата (material types): 1 – почвы, 2 – дорожная пыль, 3 – речной аллювий; функциональные зоны (urban zones): 1 – транспортная зона, 2 – жилая и общественно-деловая зона, 3 – слабо измененные территории, антропогенные зеленые зоны, 4 – промышленная зона, 5 – днища речных долин; суббассейны: 1 – бассейн верхней Сетуни, 2 – бассейн Навершки, 3 – бассейн Очаковки, 4 – бассейн нижней Сетуни.

Fig. 3. Separability of potential sediment sources in the Setun River catchment according to three different approaches: material types – 1) soils, 2) road dust, 3) river alluvium; urban zones – 1) transport zone, 2) residential and mixed-use zone, 3) slightly modified areas and anthropogenic green zones, 4) industrial zone, 5) valley bottoms; sub-catchments – 1) The Upper Setun basin, 2) the Navershka basin, 3) the Ochakovka basin, 4) the Lower Setun basin.

и геологического строения территории. При разделении полного набора из 214 точек отбора проб по зонам землепользования хорошо обособились только две зоны – транспортная, включающая преимущественно пробы дорожной пыли, и естественная (аллювий днища долины р. Сетуни и ее притоков). Прочие зоны – жилая (вместе с близкой по геохимическому спектру общественно-деловой зоной), промышленная, слабо измененные участки парков и скверов – оказались очень близки в многомерном пространстве трассеров. Ожидаемых интуитивно закономерностей здесь не обнаружилось. Более того, часть из наиболее «грязных» проб выявлена в парках и скверах.

Таким образом, тип субстрата и зоны землепользования рассматриваются как основные типы источников для идентификации загрязнения в пределах водосбора р. Сетуни. Дальнейшая статистическая обработка позволит получить оценки долевого вклада почв, дорожной пыли и береговых уступов и обосновать меры по снижению загрязнения реки. При этом в постановку задачи впервые положена реализация метода трассировки источников наносов для разных фракций: менее 1 мкм (PM1), 1–10 мкм (PM1-10) и валовая фракция.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлен обзор истории создания и применения методики трассировки источников наносов, которая является эффективным инструментом для идентификации источников взвешенных веществ в урбанизированном ландшафте. В качестве наиболее информативных трассеров целесообразно использовать макро- и микроэлементы.

Выявленные принципы реализации методики определили подход к дифференциации источников взвешенных наносов, поступающих в устье р. Сетуни с ее водосбора. Подходы разделения на источники (их классификационные схемы) в ракурсе суббассейнов или городских зон землепользования оказались неэффективны. Смесь естественных четвертичных и дочетвертичных геологических образований и техногенных грунтов при осреднении их геохимических характеристик – в разрезе бассейнов притоков р. Сетуни (рек Очаковки и Навершки) и прямых водосборов главной реки (верхний и нижний отрезки Сетуни) – статистически значимо не дифференцирует эти части всего бассейна по составу грунтов. Аналогично в разрезе зон землепользования (общественно-деловой, индустриальной, жилой, транспортной, рекреационной): отличия химического состава грунтов в этих зонах статистически не дифференцируется, их внутреннее разнообразие гораздо выше отличий между средними значениями для зон, что приводит к почти полной потере эффективности подхода при использовании такой модели дифференциации водосбора. Эффективным оказалось только трехчленное деление проб на водосборе по типам субстрата: почвы на участках открытого грунта, дорожная пыль, береговая эрозия.

Таким образом, методика трассировки источников поступления взвеси направлена на разработку мер по управлению речными бассейнами, ограничению поступления поллютантов в речные системы. Перспективы метода обширны, его можно адаптировать на различные водосборы малых рек, про-

текающих на городских или промышленных территориях. Полученные выводы о том, что в большинстве урбанизированных бассейнов мира основным источником поступления взвеси в реки являются береговые уступы, определяют актуальность мер по стабилизации и укреплению береговых откосов.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Borrelli P., Robinson D., Panagos P., Lugato E., Yang J., Alewell C., Wuepper D., Montanarella L., Ballabio C. Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015–2070) // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2020. Vol. 117. P. 21994–22001. https://doi.org/10.1073/pnas.2001403117
2. Mokhov I., Roekner E., Semenov V., Khon V. Extreme precipitation regimes in Northern Eurasia in the 20th century and their possible changes in the 21st century // Doklady of Earth Science 2005. Vol. 403. P. 767–770.
3. Rosenberger L., Leandro J., Pauleit S., Erlwein S. Sustainable stormwater management under the impact of climate change and urban densification // Journal of Hydrology (Amst). 2021. Vol. 596. P. 126–137. https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2021.126137
4. Dashtey A. Fate and Transport of Heavy Metals in Soil, Surface Water, and Groundwater: Implications for Environmental Management // International Journal of Scientific Research and Management (IJSRM). 2024. Vol. 12. P. 202–215. https://doi.org/10.18535/ijsrm/v12i12.c01
5. Collins A., Blackwell M., Boeckx P., Chivers C., Emelko M., Evrard O., Foster I., Gellis A., Gholami H., Granger S., Harris P., Horowitz A., Laceby J., Martinez-Carreras N., Minella J., Mol L., Nosrati K., Pulley S., Silins U., da Silva Y., Stone M., Tiecher T., Upadhayay H., Zhang Y. Sediment source fingerprinting: benchmarking recent outputs, remaining challenges and emerging themes // Journal of Soils Sediments. 2020. Vol. 20. P. 4160–4193. https://doi.org/10.1007/s11368-020-02755-4
6. Chalov S., Terskii P., Pluntke T., Efimova L., Efimov V., Belyaev V., Terskaia A., Habel M., Karthe D., Bernhofer C. Integrated approach to study river fluxes, water and sediment sources apportionment in sparsely monitored catchment. // Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences. 2019. Vol. 381. P. 7–11. https://doi.org/10.5194/piahs-381-7-2019
7. Чалов С.Р, Цыпленков А.С., Школьный Д.И., Прокопьева К.Н., Бахарева Е.И. К оценке возможного влияния материкового стока на гибель гидробионтов в Авачинском заливе Тихого океана (Камчатка). // Известия Русского географического общества. 2022. № 154. С. 69–84.
8. Carter J., Owens P., Walling D., Leeks G. Fingerprinting suspended sediment sources in a large urban river system // Science of The Total Environment. 2023. Vol.314-316. P. 513–534. https://doi.org/10.1016/S0048-9697(03)00071-8
9. Charlesworth S., Ormerod L., Lees J. Tracing sediments within urban catchments using heavy metal, mineral magnetic and radionuclide signatures // Tracers in Geomorphology. 2020. P. 345–368.
10. Gellis A., Noe G. Sediment source analysis in the Linganore Creek watershed, Maryland, USA, using the sediment fingerprinting approach: 2008 to 2010 // Soils Sediments. 2013. Vol. 13. P. 1735–1753. https://doi.org/10.1007/s11368-013-0771-6
11. Zhu L., Ma Y., Goonetilleke A. Fingerprinting to trace sources of suspended solids in the transport of heavy metals in urban stormwater runoff // Environmental Pollution. 2024. Vol. 363. P. 125088. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.125088
12. Чалов С.Р., Лошков О.А., Крастынь Е.А. Причины и закономерности быстрых изменений состава взвесей в малой городской реке Сетунь // Известия РАН. Сер. Географическая. 2024. № 88. С. 893–901. https://doi.org/0.31857/S2587556624060043

13. Chalov S., Platonov V., Erina O., Moreido V., Samokhin M., Sokolov D., Tereshina M., Yarinich Y., Kasimov, N. Rainstorms impacts on water, sediment, and trace elements loads in an urbanized catchment within Moscow city: case study of summer 2020 and 2021 // Theoretical and Applied Climatology. 2023. Vol. 151. P. 871–889. https://doi.org/10.1007/s00704-022-04298-9
14. Wall G., Wilding L. Mineralogy and Related Parameters of Fluvial Suspended Sediments in Northwestern Ohio // Environment Quality. 1976. Vol. 5. P. 168–173. https://doi.org/10.2134/jeq1976.00472425000500020012x
15. Klages M., Hsieh Y. Suspended Solids Carried by the Gallatin River of Southwestern Montana: II. Using Mineralogy for Inferring Sources // Environment Quality. 1975. Vol. 4. P. 68–73. https://doi.org/10.2134/jeq1975.00472425000400010016x
16. Walling D., Woodward J. Use of Radiometric Fingerprints to Derive Information on Suspended Sediment Sources, Erosion and sediment transport monitoring programmes in river basins // Proceedings of the Oslo Symposium. 1992. Vol. 210. P. 153–164.
17. Peart M., Walling D. Fingerprinting Sediment Source: The Example of a Drainage Basin in Devon, UK // Drainage basin sediment delivery. 1986. Vol. 159. P. 41–55.
18. Collins A., Walling D., Leeks G. Sediment sources in the Upper Severn catchment: a fingerprinting approach // Hydrology of Earth System Science. 1997. Vol. 1. P. 509–521. https://doi.org/10.5194/hess-1-509-1997
19. Wallbrink P., Murray A., Olley J., Olive L. Determining sources and transit times of suspended sediment in the Murrumbidgee River, New South Wales, Australia, using fallout ^{137}Cs and ^{210}Pb // Water Resources Research. 1998. Vol. 34. P. 879–887. https://doi.org/10.1029/97WR03471
20. Collins A., Walling D. Selecting fingerprint properties for discriminating potential suspended sediment sources in river basins // Hydrology (Amst). 2002. Vol. 261. P. 218–244. https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00011-2
21. Sherriff S., Franks S., Rowan J., Fenton O., Ó'hUallacháin D. Uncertainty-based assessment of tracer selection, tracer non-conservativeness and multiple solutions in sediment fingerprinting using synthetic and field data // Soils Sediments. 2015. Vol. 15. P. 2101–2116. https://doi.org/10.1007/s11368-015-1123-5
22. Martínez-Carreras N., Gallart F., Iffly J., Pfister L., Walling D., Krein A. Uncertainty Assessment in Suspended Sediment Fingerprinting Based on Tracer Mixing Models: A Case Study from Luxembourg // IAHS-AISH. 2008. Vol. 325. P. 94–105.
23. Chalaux-Clergue T., Bizeul R., Batista P., Martínez-Carreras N., Laceby J., Evrard, O. Sensitivity of source sediment fingerprinting to tracer selection methods // SOIL. 2024. Vol. 10. P. 109–138. https://doi.org/10.5194/soil-10-109-2024
24. Evrard O., Laceby J., Ficetola G., Gielly L., Huon S., Lefèvre I., Onda Y., Poulenard J. Environmental DNA provides information on sediment sources: A study in catchments affected by Fukushima radioactive fallout // Science of The Total Environment. 2019. Vol. 665. P. 873–881. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.191
25. Collins A., Pulley S., Foster I., Gellis A., Porto P., Horowitz A. Sediment source fingerprinting as an aid to catchment management: A review of the current state of knowledge and a methodological decision-tree for end-users // Environment Management. 2017. Vol. 194. P. 86–108. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.09.075
26. Owens P., Blake W., Gaspar L., Gateuille D., Koiter A., Lobb D., Petticrew E., Reiffarth D., Smith H., Woodward, J. Fingerprinting and tracing the sources of soils and sediments: Earth and ocean science, geoarchaeological, forensic, and human health applications // Earth Science Review. 2016. Vol. 162. P. 1–23. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.08.012
27. Govan E., Jackson A., Inger R., Bearhop S., Parnell A. simmr: A package for fitting Stable Isotope Mixing Models in R. 2023. https://doi.org/10.48550/arXiv.2306.07817
28. Parnell A., Inger R., Bearhop S., Jackson A. Source Partitioning Using Stable Isotopes: Coping with Too Much Variation // PLoS One. 2010. Vol. 5. e9672. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0009672
29. Stock B., Jackson A., Ward E., Parnell A., Phillips D., Semmens B. Analyzing mixing systems using a new generation of Bayesian tracer mixing models // Peer Journal. 2018. Vol. 6. e5096. https://doi.org/10.7717/peerj.5096

30. Lizaga I., Latorre B., Gaspar L., Navas A. fingerPro: An R package for sediment source tracing. 2018. https://doi.org/10.5281/zenodo.1402029
31. Lizaga I., Latorre B., Gaspar L., Navas A. FingerPro: an R Package for Tracking the Provenance of Sediment // Water Resources Management. 2020. Vol. 34. P. 3879–3894. https://doi.org/10.1007/s11269-020-02650-0
32. Liang A., Zhang Z., Lizaga I., Dong Z., Zhang Y., Liu X., Xiao F., Gao J. Which is the dominant source for the aeolian sand in the Badain Jaran Sand Sea, Northwest China: Fluvial or gobi sediments? // Catena (Amst). 2023. Vol. 225. P. 107011. https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107011
33. Cui Y., Zhou Y., Lizaga I., Dong Z., Zhang J., Liang A., Lü P., Feng T. Quantitative Analysis of Aeolian Sand Provenance: A Comprehensive Analysis in the Otindag Dune Field, Central Inner Mongolia, China // Land (Basel). 2024. Vol. 13. P. 1194. https://doi.org/10.3390/land13081194
34. Chen D., Dai W., Li M., Wang B., Zeng Y., Ni L., Fang N., Shi, Z. Accuracy verification of optical fingerprinting methods in sediment tracing study // Hydrological Processes. 2023. Vol. 37. https://doi.org/10.1002/hyp.14870
35. Mohammadi M., Egli M., Kavian A., Lizaga I. Static and dynamic source identification of trace elements in river and soil environments under anthropogenic activities in the Haraz plain, Northern Iran // Science of The Total Environment. 2023. Vol. 892. P. 164432. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164432
36. Lizaga I., Gaspar L., Latorre B., Navas A. Variations in transport of suspended sediment and associated elements induced by rainfall and agricultural cycle in a Mediterranean agroforestry catchment // Environment Management. 2020. Vol. 272. P. 111020. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111020
37. Parnell A., Phillips D., Bearhop S., Semmens B., Ward E., Moore J., Jackson A., Grey J., Kelly D., Inger R. Bayesian stable isotope mixing models // Environmetrics. 2013. Vol. 24. P. 387–399. https://doi.org/10.1002/env.2221
38. Devereux O., Prestegaard K., Needelman B., Gellis A. Suspended-sediment sources in an urban watershed, Northeast Branch Anacostia River, Maryland // Hydrological Processes. 2010. Vol. 24. P. 1391–1403. https://doi.org/10.1002/hyp.7604
39. Malhotra K., Lamba J., Shepherd S. Sources of stream bed sediment in an urbanized watershed // Catena (Amst). 2020. Vol. 184. P. 104228. https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104228
40. Franz C., Makeschin F., Weiß H., Lorz C. Sediments in urban river basins: Identification of sediment sources within the Lago Paranoá catchment, Brasilia DF, Brazil – using the fingerprint approach // Science of The Total Environment. 2014. Vol. 466–467. P. 513–523. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.07.056
41. Cashman M., Gellis A., Sanisaca, L., Noe G., Cogliandro V., Baker A. Bank-derived material dominates fluvial sediment in a suburban Chesapeake Bay watershed // River Researches Application. 2018. Vol. 34. P. 1032–1044. https://doi.org/10.1002/rra.3325
42. Gellis A., Fuller C., Van Metre, P., Mahler B., Welty C., Miller A., Nibert L., Clifton Z., Malen J., Kemper J. Pavement alters delivery of sediment and fallout radionuclides to urban streams // Hydrology (Amst). 2020. Vol. 588. P. 124855. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124855
43. Collins A., Walling D., Stroud R., Robson M., Peet L. Assessing damaged road verges as a suspended sediment source in the Hampshire Avon catchment, southern United Kingdom // Hydrological Processes. 2010. Vol. 24. P. 1106–1122. https://doi.org/10.1002/hyp.7573
44. Walling D., Collins A., Stroud R. Tracing suspended sediment and particulate phosphorus sources in catchments // Journal of Hydrology (Amst). 2008. Vol. 350. P. 274–289. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.10.047
45. Lamba J., Karthikeyan K., Thompson A. Apportionment of suspended sediment sources in an agricultural watershed using sediment fingerprinting // Geoderma. 2015. Vol. 239–240. P. 25–33. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.09.024
46. Martínez-Carreras N., Udelhoven T., Krein A., Gallart F., Iffly J., Ziebel J., Hoffmann L., Pfister L., Walling D. The use of sediment colour measured by diffuse reflectance spectrometry to determine sediment sources: Application to the Attert River catchment (Luxembourg) // Hydrology (Amst). 2010. Vol. 382. P. 49–63. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.12.017
47. Чалов С.Р. Речные наносы. М.: ИНФРА, 2024.

48. Gaspar L., Blake W., Lizaga I., Latorre B., Navas A. Particle size effect on geochemical composition of experimental soil mixtures relevant for unmixing modelling // Geomorphology. 2022. Vol. 403. P. 108178. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108178
49. Collins A., Walling D. Documenting catchment suspended sediment sources: problems, approaches and prospects // Progress in Physical Geography: Earth and Environment. 2004. Vol. 28. P. 159–196. https://doi.org/10.1191/0309133304pp409ra
50. Evrard O., Batista P., Company J., Dabrin A., Foucher A., Frankl A., García-Comendador J., Huguet A., Lake N., Lizaga I., MartínezCarreras N., Navratil O., Pignol C., Sellier V. Improving the design and implementation of sediment fingerprinting studies: summary and outcomes of the TRACING 2021 Scientific School // Journal of Soils Sediments. 2022. Vol. 22. P. 1648–1661. https://doi.org/10.1007/s11368-022-03203-1
51. Smith H., Blake W. Sediment fingerprinting in agricultural catchments: A critical re-examination of source discrimination and data corrections // Geomorphology. 2014. Vol. 204. P. 177–191. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.08.003
52. Navas A., Lizaga I., Gaspar L., Latorre B., Dercon G. Unveiling the provenance of sediments in the moraine complex of Aldegonda Glacier (Svalbard) after glacial retreat using radionuclides and elemental fingerprints // Geomorphology. 2020. Vol. 367. P. 107304. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107304
53. Walling D., Collins A., Sichingabula H. Using unsupported lead-210 measurements to investigate soil erosion and sediment delivery in a small Zambian catchment // Geomorphology. 2003. Vol. 52. P. 193–213. https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00244-1
54. Hatfield R., Maher B. Suspended sediment characterization and tracing using a magnetic fingerprinting technique: Bassenthwaite Lake, Cumbria, UK // Holocene. 2008. Vol. 18. P. 105–115. https://doi.org/10.1177/0959683607085600
55. Summers D., Lewis M., Ostendorf B., Chittleborough D. Visible near-infrared reflectance spectroscopy as a predictive indicator of soil properties // Ecology Indicators. 2011. Vol. 11. P. 123–131. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2009.05.001
56. Gaspar L., Blake W., Smith H., Lizaga I., Navas A. Testing the sensitivity of a multivariate mixing model using geochemical fingerprints with artificial mixtures // Geoderma. 2019. Vol. 337. P. 498–510. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.10.005
57. Blake W., Wallbrink P., Doerr S., Shakesby R., Humphreys G. Magnetic enhancement in wildfire-affected soil and its potential for sediment-source ascription // Earth Surface Process Landforms. 2006. Vol. 31. P. 249–264. https://doi.org/10.1002/esp.1247
58. Gaspar L., Lizaga I., Blake W., Latorre B., Quijano L., Navas A. Fingerprinting changes in source contribution for evaluating soil response during an exceptional rainfall in Spanish pre-pyrenees // Environment Management. 2019. Vol. 240. P. 136–148. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.03.109
59. Haddadchi A., Olley J., Laceby P. Accuracy of mixing models in predicting sediment source contributions // Science of The Total Environment. 2014. Vol. 497–498. P. 139–152. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.07.105
60. Palazón L., Latorre B., Gaspar L., Blake W., Smith H., Navas A. Comparing catchment sediment fingerprinting procedures using an auto-evaluation approach with virtual sample mixtures // Science of The Total Environment. 2015. Vol. 532. P. 456–466. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.05.003
61. Motha J., Wallbrink P., Hairsine P., Grayson R. Determining the sources of suspended sediment in a forested catchment in southeastern Australia // Water Resources Research. 2003. Vol. 39. https://doi.org/10.1029/2001WR000794
62. Pulley S., Collins A. Tracing catchment fine sediment sources using the new SIFT (SedIment Fingerprinting Tool) open source software // Science of The Total Environment. 2018. Vol. 635. P. 838–858. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.126
63. Цыпленков А.С., Черницова О.В., Кошелева Н.Е., Чалов С.Р. ГИС-моделирование баланса наносов и загрязняющих веществ в бассейне р. Сетунь (Москва) // Инженерная экология – 2021: Доклады международного симпозиума / Под ред. Ф.А. Мкртчяна. 2021. С. 172–176.

64. Crespo J., Holley E., Guillen M., Lizaga I., Ticona S., Simon I., Garcia-Chevesich P., Martínez G. Tracking Sediment Provenance Applying a Linear Mixing Model Approach Using R's FingerPro Package, in the Mining-Influenced Ocoña Watershed, Southern Peru // Sustainability. 2023. Vol. 15. P. 11856. https://doi.org/10.3390/su151511856
65. Gorman Sanisaca L., Gellis A., Lorenz D. Determining the sources of fine-grained sediment using the Sediment Source Assessment Tool (Sed_SAT). 2017.
66. Pulley S., Collins A., Laceby J. The representation of sediment source group tracer distributions in Monte Carlo uncertainty routines for fingerprinting: An analysis of accuracy and precision using data for four contrasting catchments // Hydrological Processes. 2020. hyp.13736. https://doi.org/10.1002/hyp.13736
67. Mabit L., Gibbs M., Mbaye M., Meusburger K., Toloza A., Resch C., Klik A., Swales A., Alewell C. Novel application of Compound Specific Stable Isotope (CSSI) techniques to investigate on-site sediment origins across arable fields // Geoderma. 2018. Vol. 316. P. 19–26. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.12.008
68. Malhotra K., Lamba J., Srivastava P., Shepherd S. Fingerprinting Suspended Sediment Sources in an Urbanized Watershed // Water (Basel). 2018. Vol. 10. P. 1573. https://doi.org/10.3390/w10111573
69. Collins A., Walling D., Leeks G. Source type ascription for fluvial suspended sediment based on a quantitative composite fingerprinting technique // Catena (Amst). 1997. Vol. 29. P. 1–27. https://doi.org/10.1016/S0341-8162(96)00064-1
70. Charlesworth S., Lees J. The application of some mineral magnetic measurements and heavy metal analysis for characterising fine sediments in an urban catchment, Coventry, UK. Applied Geophysics. 2001. Vol. 48. P. 113–125. https://doi.org/10.1016/S0926-9851(01)00084-2
71. Gellis A., Gorman Sanisaca L. Sediment Fingerprinting to Delineate Sources of Sediment in the Agricultural and Forested Smith Creek Watershed, Virginia, USA. // Journal of the American Water Resources Association. 2018. Vol. 54. P. 1197–1221. https://doi.org/10.1111/1752-1688.12680
72. Collins A., Zhang Y., McChesney D., Walling D., Haley S., Smith P. Sediment source tracing in a lowland agricultural catchment in southern England using a modified procedure combining statistical analysis and numerical modelling. Science of The Total Environment. 2012. Vol. 414. P. 301–317. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.10.062

REFERENCES

1. Borrelli P., Robinson D., Panagos P., Lugato E., Yang J., Alewell C., Wuepper D., Montanarella L., Ballabio C. Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015–2070). *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2020. Vol. 117. P. 21994–22001. https://doi.org/10.1073/pnas.2001403117
2. Mokhov I., Roekner E., Semenov V., Khon V. Extreme precipitation regimes in Northern Eurasia in the 20th century and their possible changes in the 21st century. *Doklady Earth Sciencies*. 2005. Vol. 403. P. 767–770.
3. Rosenberger L., Leandro J., Pauleit S., Erlwein S. Sustainable stormwater management under the impact of climate change and urban densification. *Journal of Hydrology* (Amst). 2021. Vol. 596. P. 126-137. https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2021.126137
4. Dashtey A. Fate and Transport of Heavy Metals in Soil, Surface Water, and Groundwater: Implications for Environmental Management. *International Journal of Scientific Research and Management (IJSRM)*. 2024. Vol. 12. P. 202–215. https://doi.org/10.18535/ijsrm/v12i12.c01
5. Collins A., Blackwell M., Boeckx P., Chivers C., Emelko M., Evrard O., Foster I., Gellis A., Gholami H., Granger S., Harris P., Horowitz A., Laceby J., Martinez-Carreras N., Minella J., Mol L., Nosrati K., Pulley S., Silins U., da Silva Y., Stone M., Tiecher T., Upadhayay H., Zhang Y. Sediment source fingerprinting: benchmarking recent outputs, remaining challenges and emerging themes. *Journal of Soils Sediments*. 2020. Vol. 20. P. 4160–4193. https://doi.org/10.1007/s11368-020-02755-4
6. Chalov S., Terskii P., Pluntke T., Efimova L., Efimov V., Belyaev V., Terskaia A., Habel M., Karthe D., Bernhofer C. Integrated approach to study river fluxes, water and sediment sources apportionment in sparsely monitored catchment. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*. 2019. Vol. 381. P. 7–11. https://doi.org/10.5194/piahs-381-7-2019

7. Chalov S.R., Tsyplenkov A.S, Shkolny D.I., Prokopyeva K.N., Bakhareva E.I.: On the assessment of the possible influence of continental runoff on the mortality of aquatic organisms in Avacha Bay of the Pacific Ocean (Kamchatka). *Bulletin of the Russian Geographical Society*. 2022. Vol. 154 (4). P. 69–84.
8. Carter J., Owens P., Walling D., Leeks G. Fingerprinting suspended sediment sources in a large urban river system. *Science of The Total Environment*. 2023. Vol.314-316. P. 513–534. https://doi.org/10.1016/S0048-9697(03)00071-8
9. Charlesworth S., Ormerod L., Lees J. Tracing sediments within urban catchments using heavy metal, mineral magnetic and radionuclide signatures. *Tracers in Geomorphology*. 2020. P. 345–368.
10. Gellis A., Noe G. Sediment source analysis in the Linganore Creek watershed, Maryland, USA, using the sediment fingerprinting approach: 2008 to 201. *Soils Sediments*. 2013. Vol. 13. P. 1735–1753. https://doi.org/10.1007/s11368-013-0771-6
11. Zhu L., Ma Y., Goonetilleke A. Fingerprinting to trace sources of suspended solids in the transport of heavy metals in urban stormwater runoff. *Environmental Pollution*. 2024. Vol. 363. P. 125088. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.125088
12. Chalov S.R., Loshkov O.A., Krastyn E.A. Causes and patterns of rapid changes in the composition of suspended matter in the small urban river Setun. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geographical Series*. 2024. Vol. 88 (6). P. 893–901.
13. Chalov S., Platonov V., Erina O., Moreido V., Samokhin M., Sokolov D., Tereshina M., Yarinich Y., Kasimov, N. Rainstorms impacts on water, sediment, and trace elements loads in an urbanized catchment within Moscow city: case study of summer 2020 and 2021. *Theoretical and Applied Climatology*. 2023. Vol. 151. P. 871–889. https://doi.org/10.1007/s00704-022-04298-9
14. Wall G., Wilding L. Mineralogy and Related Parameters of Fluvial Suspended Sediments in Northwestern Ohio. *Environment Quality*. 1976. Vol. 5. P. 168–173. https://doi.org/10.2134/jeq1976.00472425000500020012x
15. Klages M., Hsieh Y. Suspended Solids Carried by the Gallatin River of Southwestern Montana: II. Using Mineralogy for Inferring Sources. *Environment Quality*. 1975. Vol. 4. P. 68–73. https://doi.org/10.2134/jeq1975.00472425000400010016x
16. Walling D., Woodward J. Use of Radiometric Fingerprints to Derive Information on Suspended Sediment Sources, Erosion and sediment transport monitoring programmes in river basins. Proceedings of the Oslo Symposium. 1992. Vol. 210. P. 153–164.
17. Peart M., Walling D. Fingerprinting Sediment Source: The Example of a Drainage Basin in Devon, UK. *Drainage basin sediment delivery*. 1986. Vol. 159. P. 41–55.
18. Collins A., Walling D., Leeks G. Sediment sources in the Upper Severn catchment: a fingerprinting approach. *Hydrology and Earth System Sciences*. 1997. Vol. 1. P. 509–521. https://doi.org/10.5194/hess-1-509-1997
19. Wallbrink P., Murray A., Olley J., Olive L. Determining sources and transit times of suspended sediment in the Murrumbidgee River, New South Wales, Australia, using fallout ^{137}Cs and ^{210}Pb. *Water Resources Research*. 1998. Vol. 34. P. 879–887. https://doi.org/10.1029/97WR03471
20. Collins A., Walling D. Selecting fingerprint properties for discriminating potential suspended sediment sources in river basins. *Hydrology* (Amst). 2002. Vol. 261. P. 218–244. https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00011-2
21. Sherriff S., Franks S., Rowan J., Fenton O., Ó'hUallacháin D. Uncertainty-based assessment of tracer selection, tracer non-conservativeness and multiple solutions in sediment fingerprinting using synthetic and field data. *Soils Sediments*. 2015. Vol. 15. P. 2101–2116. https://doi.org/10.1007/s11368-015-1123-5
22. Martínez-Carreras N., Gallart F., Iffly J., Pfister L., Walling D., Krein A. Uncertainty Assessment in Suspended Sediment Fingerprinting Based on Tracer Mixing Models: A Case Study from Luxembourg. *IAHS-AISH*. 2008. Vol. 325. P. 94–105.
23. Chalaux-Clergue T., Bizeul R., Batista P., Martínez-Carreras N., Laceby J., Evrard, O. Sensitivity of source sediment fingerprinting to tracer selection methods. *SOIL*. 2024. Vol. 10. P. 109–138. https://doi.org/10.5194/soil-10-109-2024
24. Evrard O., Laceby J., Ficetola G., Gielly L., Huon S., Lefèvre I., Onda Y., Poulenard J. Environmental DNA provides information on sediment sources: A study in catchments affected by

Fukushima radioactive fallout. *Science of The Total Environment*. 2019. Vol. 665. P. 873–881. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.191
25. Collins A., Pulley S., Foster I., Gellis A., Porto P., Horowitz A. Sediment source fingerprinting as an aid to catchment management: A review of the current state of knowledge and a methodological decision-tree for end-users. *Environment Management*. 2017. Vol. 194. P. 86–108. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.09.075
26. Owens P., Blake W., Gaspar L., Gateuille D., Koiter A., Lobb D., Petticrew E., Reiffarth D., Smith H., Woodward, J. Fingerprinting and tracing the sources of soils and sediments: Earth and ocean science, geoarchaeological, forensic, and human health applications. *Earth Science Review*. 2016. Vol. 162. P. 1–23. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.08.012
27. Govan E., Jackson A., Inger R., Bearhop S., Parnell A. simmr: A package for fitting Stable Isotope Mixing Models in R. 2023. https://doi.org/10.48550/arXiv.2306.07817
28. Parnell A., Inger R., Bearhop S., Jackson A. Source Partitioning Using Stable Isotopes: Coping with Too Much Variation. *PLoS One*. 2010. Vol. 5. e9672. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0009672
29. Stock B., Jackson A., Ward E., Parnell A., Phillips D., Semmens B. Analyzing mixing systems using a new generation of Bayesian tracer mixing models. *Peer Journal*. 2018. Vol. 6. e5096. https://doi.org/10.7717/peerj.5096
30. Lizaga I., Latorre B., Gaspar L., Navas A. fingerPro: An R package for sediment source tracing. 2018. https://doi.org/10.5281/zenodo.1402029
31. Lizaga I., Latorre B., Gaspar L., Navas A. FingerPro: an R Package for Tracking the Provenance of Sediment. *Water Resources Management*. 2020. Vol. 34. P. 3879–3894. https://doi.org/10.1007/s11269-020-02650-0
32. Liang A., Zhang Z., Lizaga I., Dong Z., Zhang Y., Liu X., Xiao F., Gao J. Which is the dominant source for the aeolian sand in the Badain Jaran Sand Sea, Northwest China: Fluvial or gobi sediments? *Catena* (Amst). 2023. Vol. 225. P. 107011. https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107011
33. Cui Y., Zhou Y., Lizaga I., Dong Z., Zhang J., Liang A., Lü P., Feng T. Quantitative Analysis of Aeolian Sand Provenance: A Comprehensive Analysis in the Otindag Dune Field, Central Inner Mongolia, China. *Land* (Basel). 2024. Vol. 13. P. 1194. https://doi.org/10.3390/land13081194
34. Chen D., Dai W., Li M., Wang B., Zeng Y., Ni L., Fang N., Shi, Z. Accuracy verification of optical fingerprinting methods in sediment tracing study. *Hydrological Processes*. 2023. Vol. 37. https://doi.org/10.1002/hyp.14870
35. Mohammadi M., Egli M., Kavian A., Lizaga I. Static and dynamic source identification of trace elements in river and soil environments under anthropogenic activities in the Haraz plain, Northern Iran. *Science of The Total Environment*. 2023. Vol. 892. P. 164432. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164432
36. Lizaga I., Gaspar L., Latorre B., Navas A. Variations in transport of suspended sediment and associated elements induced by rainfall and agricultural cycle in a Mediterranean agroforestry catchment. *Environment Management.* 2020. Vol. 272. P. 111020. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111020
37. Parnell A., Phillips D., Bearhop S., Semmens B., Ward E., Moore J., Jackson A., Grey J., Kelly D., Inger R. Bayesian stable isotope mixing model. *Environmetrics*. 2013. Vol. 24. P. 387–399. https://doi.org/10.1002/env.2221
38. Devereux O., Prestegaard K., Needelman B., Gellis A. Suspended-sediment sources in an urban watershed, Northeast Branch Anacostia River, Maryland. *Hydrological Processes*. 2010. Vol. 24. P. 1391–1403. https://doi.org/10.1002/hyp.7604
39. Malhotra K., Lamba J., Shepherd S. Sources of stream bed sediment in an urbanized watershed. *Catena* (Amst). 2020. Vol. 184. P. 104228. https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104228
40. Franz C., Makeschin F., Weiß H., Lorz C. Sediments in urban river basins: Identification of sediment sources within the Lago Paranoá catchment, Brasilia DF, Brazil – using the fingerprint approach. *Science of The Total Environment*. 2014. Vol. 466–467. P. 513–523. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.07.056
41. Cashman M., Gellis A., Sanisaca, L., Noe G., Cogliandro V., Baker A. Bank-derived material dominates fluvial sediment in a suburban Chesapeake Bay watershed. *River Research and Application*. 2018. Vol. 34. P. 1032–1044. https://doi.org/10.1002/rra.3325

42. Gellis A., Fuller C., Van Metre, P., Mahler B., Welty C., Miller A., Nibert L., Clifton Z., Malen J., Kemper J. Pavement alters delivery of sediment and fallout radionuclides to urban streams. *Hydrology* (Amst). 2020. Vol. 588. P. 124855. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124855
43. Collins A., Walling D., Stroud R., Robson M., Peet L. Assessing damaged road verges as a suspended sediment source in the Hampshire Avon catchment, southern United Kingdom. *Hydrological Processes*. 2010. Vol. 24. P. 1106–1122. https://doi.org/10.1002/hyp.7573
44. Walling D., Collins A., Stroud R. Tracing suspended sediment and particulate phosphorus sources in catchments. *Journal of Hydrology* (Amst). 2008. Vol. 350. P. 274–289. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.10.047
45. Lamba J., Karthikeyan K., Thompson A. Apportionment of suspended sediment sources in an agricultural watershed using sediment fingerprinting. *Geoderma*. 2015. Vol. 239–240. P. 25–33. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.09.024
46. Martínez-Carreras N., Udelhoven T., Krein A., Gallart F., Iffly J., Ziebel J., Hoffmann L., Pfister L., Walling D. The use of sediment colour measured by diffuse reflectance spectrometry to determine sediment sources: Application to the Attert River catchment (Luxembourg). *Hydrology* (Amst). 2010. Vol. 382. P. 49–63. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.12.017
47. Chalov S.R. River sediments. Moscow: INFRA, 2024.
48. Gaspar L., Blake W., Lizaga I., Latorre B., Navas A. Particle size effect on geochemical composition of experimental soil mixtures relevant for unmixing modelling. *Geomorphology*. 2022. Vol. 403. P. 108178. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108178
49. Collins A., Walling D. Documenting catchment suspended sediment sources: problems, approaches and prospects. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*. 2004. Vol. 28. P. 159–196. https://doi.org/10.1191/0309133304pp409ra
50. Evrard O., Batista P., Company J., Dabrin A., Foucher A., Frankl A., García-Comendador J., Huguet A., Lake N., Lizaga I., MartínezCarreras N., Navratil O., Pignol C., Sellier V. Improving the design and implementation of sediment fingerprinting studies: summary and outcomes of the TRACING 2021 Scientific School. *Journal of Soils Sediments*. 2022. Vol. 22. P. 1648–1661. https://doi.org/10.1007/s11368-022-03203-1
51. Smith H., Blake W. Sediment fingerprinting in agricultural catchments: A critical re-examination of source discrimination and data corrections. *Geomorphology*. 2014. Vol. 204. P. 177–191. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.08.003
52. Navas A., Lizaga I., Gaspar L., Latorre B., Dercon G. Unveiling the provenance of sediments in the moraine complex of Aldegonda Glacier (Svalbard) after glacial retreat using radionuclides and elemental fingerprints. *Geomorphology*. 2020. Vol. 367. P. 107304. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107304
53. Walling D., Collins A., Sichingabula H. Using unsupported lead-210 measurements to investigate soil erosion and sediment delivery in a small Zambian catchment. *Geomorphology*. 2003. Vol. 52. P. 193–213. https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00244-1
54. Hatfield R., Maher B. Suspended sediment characterization and tracing using a magnetic fingerprinting technique: Bassenthwaite Lake, Cumbria, UK. *Holocene*. 2008. Vol. 18. P. 105–115. https://doi.org/10.1177/0959683607085600
55. Summers D., Lewis M., Ostendorf B., Chittleborough D. Visible near-infrared reflectance spectroscopy as a predictive indicator of soil properties. *Ecological Indicators*. 2011. Vol. 11. P. 123–131. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2009.05.001
56. Gaspar L., Blake W., Smith H., Lizaga I., Navas A. Testing the sensitivity of a multivariate mixing model using geochemical fingerprints with artificial mixtures. *Geoderma*. 2019. Vol. 337. P. 498–510. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.10.005
57. Blake W., Wallbrink P., Doerr S., Shakesby R., Humphreys G. Magnetic enhancement in wildfire-affected soil and its potential for sediment-source ascription. *Earth Surface Processes Landforms*. 2006. Vol. 31. P. 249–264. https://doi.org/10.1002/esp.1247
58. Gaspar L., Lizaga I., Blake W., Latorre B., Quijano L., Navas A. Fingerprinting changes in source contribution for evaluating soil response during an exceptional rainfall in Spanish prepyrenees. *Environment Management*. 2019. Vol. 240. P. 136–148. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.03.109

59. Haddadchi A., Olley J., Laceby P. Accuracy of mixing models in predicting sediment source contributions. *Science of The Total Environment*. 2014. Vol. 497–498. P. 139–152. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.07.105
60. Palazón L., Latorre B., Gaspar L., Blake W., Smith H., Navas A. Comparing catchment sediment fingerprinting procedures using an auto-evaluation approach with virtual sample mixtures. *Science of The Total Environment*. 2015. Vol. 532. P. 456–466. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.05.003
61. Motha J., Wallbrink P., Hairsine P., Grayson R. Determining the sources of suspended sediment in a forested catchment in southeastern Australia. *Water Resources Research*. 2003. Vol. 39. https://doi.org/10.1029/2001WR000794
62. Pulley S., Collins A. Tracing catchment fine sediment sources using the new SIFT (Sediment Fingerprinting Tool) open source software. *Science of The Total Environment*. 2018. Vol. 635. P. 838–858. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.126
63. Tsyplenkov A.S., Chernitsova O.V., Kosheleva N.E., Chalov S.R. GIS modeling of sediment and pollutant balance in the Setun River basin (Moscow). Engineering Ecology – 2021: Reports of the international symposium / Ed. F.A. Mkrtchyan. 2021. P. 172–176.
64. Crespo J., Holley E., Guillen M., Lizaga I., Ticona S., Simon I., Garcia-Chevesich P., Martínez G. Tracking Sediment Provenance Applying a Linear Mixing Model Approach Using R's FingerPro Package, in the Mining-Influenced Ocoña Watershed, Southern Peru. *Sustainability*. 2023. Vol. 15. P. 11856. https://doi.org/10.3390/su151511856
65. Gorman Sanisaca L., Gellis A., Lorenz D. Determining the sources of fine-grained sediment using the Sediment Source Assessment Tool (Sed_SAT). 2017.
66. Pulley S., Collins A., Laceby J. The representation of sediment source group tracer distributions in Monte Carlo uncertainty routines for fingerprinting: An analysis of accuracy and precision using data for four contrasting catchments. *Hydrol Processes*. 2020. hyp.13736. https://doi.org/10.1002/hyp.13736
67. Mabit L., Gibbs M., Mbaye M., Meusburger K., Toloza A., Resch C., Klik A., Swales A., Alewell C. Novel application of Compound Specific Stable Isotope (CSSI) techniques to investigate on-site sediment origins across arable fields. *Geoderma*. 2018. Vol. 316. P. 19–26. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.12.008
68. Malhotra K., Lamba J., Srivastava P., Shepherd S. Fingerprinting Suspended Sediment Sources in an Urbanized Watershed. *Water* (Basel). 2018. Vol. 10. P. 1573. https://doi.org/10.3390/w10111573
69. Collins A., Walling D., Leeks G. Source type ascription for fluvial suspended sediment based on a quantitative composite fingerprinting technique. *Catena* (Amst). 1997. Vol. 29. P. 1–27. https://doi.org/10.1016/S0341-8162(96)00064-1
70. Charlesworth S., Lees J. The application of some mineral magnetic measurements and heavy metal analysis for characterizing fine sediments in an urban catchment, Coventry, UK. *Applied Geophysics*. 2001. Vol. 48. P. 113–125. https://doi.org/10.1016/S0926-9851(01)00084-2
71. Gellis A., Gorman Sanisaca L. Sediment Fingerprinting to Delineate Sources of Sediment in the Agricultural and Forested Smith Creek Watershed, Virginia, USA. *Journal of the American Water Resources Association*. 2018. Vol. 54. P. 1197–1221. https://doi.org/10.1111/1752-1688.12680
72. Collins A., Zhang Y., McChesney D., Walling D., Haley S., Smith P. Sediment source tracing in a lowland agricultural catchment in southern England using a modified procedure combining statistical analysis and numerical modelling. *Science of The Total Environment*. 2012. Vol. 414. P. 301–317. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.10.062

Сведения об авторах:

Гирло Екатерина Михайловна, аспирант, инженер, группа гидрохимии речных бассейнов, Институт водных проблем Российской академии наук, Россия, 119333, Москва, ул. Губкина, 3; младший научный сотрудник, лаборатория геохимии природных вод, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1; https://orcid.org/0000-0002-6110-9515; e-mail: kate.girlo.m@gmail.com

Чалов Сергей Романович, д-р геогр. наук, профессор, кафедра гидрологии суши географический факультет, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1; заведующий научно-исследовательской лабораторией эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева, географический факультет, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1; ведущий научный сотрудник, лаборатория гидроинформатики, Институт водных проблем Российской академии наук, Россия, 119333, Москва, ул. Губкина, 3; https://orcid.org/0000-0002-6937-7020; e-mail: hydroserg@mail.ru

Харченко Сергей Владимирович, канд. геогр. наук, ведущий научный сотрудник, кафедра геоморфологии и палеогеографии, географический факультет, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1; научный сотрудник, научно-исследовательская лаборатория эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1; старший научный сотрудник, лаборатория геоморфологии, Институт географии Российской академии наук, Россия, 119017, Москва, Старомонетный пер., 29; https://orcid.org/0000-0002-2823-5747; e-mail: xar4enkkoff@yandex.ru

About the authors:

Ekaterina M. Girlo, Post-graduate Student, Engineer, Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences, ul. Gubkina, 3, Moscow, 119333, Russia; Junior Researcher, River Basins Hydrochemistry Group, Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences, Russia, 119333, Moscow, 3 Gubkina st.; Junior Research, Laboratory of Natural Water Geochemistry, Lomonosov Moscow State University, Russia, 119991, Moscow, 1 Leninskiye Gory; https://orcid.org/0000-0002-6110-9515; e-mail: kate.girlo.m@gmail.com

Sergey R. Chalov, Phd, professor, department of land hydrology, Geography faculty, Lomonosov Moscow State University, Russia, 119991, Moscow, 1 Leninskiye Gory; head of the N.I. Makkaveev Research Laboratory of Soil Erosion and Channel Processes, Geography faculty, Lomonosov Moscow State University, Russia, 119991, Moscow, 1 Leninskiye Gory; senior research scientist, hydroinformatics laboratory, Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences, Russia, 119333, Moscow, 3 Gubkina st.; https://orcid.org/0000-0002-6937-7020; e-mail: hydroserg@mail.ru

Sergey V. Kharchenko, Phd, **S**enior Researcher, Department of Geomorphology and Paleogeography Geography faculty, Lomonosov Moscow State University, 1, Leninskiye Gory, Moscow 119991, Russia; Researcher, N.I. Makkaveev Research Laboratory of Soil Erosion and Channel Processes, Geography faculty, Lomonosov Moscow State University, Russia, 119991, Moscow, 1 Leninskiye Gory; Senior Researcher, Laboratory of Geomorphology, Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences, Russia, 119017, Moscow, 29 Staromonetny Lane; https://orcid.org/0000-0002-2823-5747; e-mail: xar4enkkoff@yandex.ru

Поступила в редакцию / Received 23.10.2025.
Поступила после рецензирования / Revised 6.11.2025.
Принята к публикации / Accepted 14.11.2025.

УДК 628.191; 628.161 *https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-6-52-65*

Ферроцианидные сорбенты на основе целлюлозы для концентрирования Cs-137 из природных вод

В.С. Семенищев[1], В.П. Ремез[2], С.М. Титова[1], Е.И. Денисов[1], А.Ф. Никифоров[1]

vovius82@mail.ru

[1]*Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия*

[2]*ООО НПП «Эксорб», г. Екатеринбург, Россия*

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Обеспечение радиационной безопасности населения требует создания высокочувствительных методик определения природных и техногенных радионуклидов в воздухе, воде и пищевых продуктах. Для оперативного контроля удельной активности Cs-137 в природных водах применяются сорбенты на основе ферроцианидов переходных металлов. В данной работе представлены результаты исследования сорбции цезия сорбентами серии АНФЕЖ, представляющими сорбционно-активную фазу ферроцианида железа, нанесенную на древесные опилки и делигнифицированную целлюлозу. **Методы.** Эксперименты по сорбции цезия на сорбентах серии АНФЕЖ проводили в статических и динамических условиях. В динамических экспериментах использовали сорбционную колонку с внутренним диаметром 0,5 см. Наличие цезия определяли с помощью масс-спектрометрии либо по радиоактивному индикатору Cs-137 с помощью гамма-спектрометрии. Для определения эффективности регистрации Cs-137 насыщенные сорбенты измеряли на гамма-бета-спектрометре «Атомтех МКС-1315 АТ». **Результаты.** Результаты статических экспериментов показали, что сорбенты АНФЕЖ способны извлекать Cs-137 из водных проб с pH от 4 до 9 с коэффициентами распределения от $1{,}5 \cdot 10^4$ до $2 \cdot 10^5$ мл/г. По результатам экспериментов по извлечению цезия в динамических условиях установлено, что оба исследованных сорбента извлекают порядка 99 % цезия из проб пресных вод (pH 4–9) при скорости пропускания до 200 мл/мин·см^2. При сопоставимых сорбционных характеристиках сорбент АНФЕЖ-БЛ на основе делигнифицированной целлюлозы обеспечивает эффективность регистрации гамма- и бета-излучения в 1,8 раза выше, чем сорбент АНФЕЖ, за счет использования основы с меньшей плотностью.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: природная вода, ферроцианид железа, цезий-137, тонкослойные сорбенты, концентрирование, радиохимический анализ.

Финансирование: Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках базовой части государственного задания, проект № FEUZ-2023-0013.

Для цитирования: Семенищев В.С., Ремез В.П., Титова С.М., Денисов Е.И., Никифоров А.Ф. Ферроцианидные сорбенты на основе целлюлозы для концентрирования Cs-137 из природных вод // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 6. С. 52–65. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-6-52-65. EDN:YZEOTI

© Семенищев В.С., Ремез В.П., Титова С.М., Денисов Е.И., Никифоров А.Ф., 2025

The ferrocyanide sorbents based on cellulose for preconcentration of cesium-137 from natural water

Vladimir S. Semenishchev[1], Viktor P. Remez[2], Svetlana M. Titova[1], Eugeny I. Denisov[1], Aleksandr F. Nikiforov[1]

vovius82@mail.ru

[1]*Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia*

[2]*Eksorb Ltd., Ekaterinburg, Russia*

ABSTRACT

Actuality. Ensuring the radiation safety of the population requires the development of highly sensitive methods for determining natural and technogenic radionuclides in air, water, and food products. Sorbents based on transition metal ferrocyanides are used for the rapid monitoring of Cs-137 specific activity in natural waters. This paper presents the results of a study on cesium sorption by sorbents of the ANFEZh series, which represent an iron ferrocyanide sorption-active phase applied to wood sawdust and delignified cellulose. **Methods.** Experiments on cesium sorption by the ANFEZh series sorbents were carried out under static and dynamic conditions. In the dynamic experiments, a sorption column with an internal diameter of 0.5 cm was used. Cesium was determined either via stable cesium using mass spectrometry or via the radioactive tracer Cs-137 using gamma spectrometry. To determine the Cs-137 detection efficiency, the saturated sorbents were measured using an Atomteh 1315-AT gamma-beta spectrometer. **Results.** The results of the static experiments showed that the ANFEZh sorbents are capable of extracting Cs-137 from aqueous samples with pH values ranging from 4 to 9, with distribution coefficients from $1{,}5 \cdot 10^4$ to $2 \cdot 10^5$ mL/g. Based on the results of the cesium extraction experiments under dynamic conditions, it was found that both studied sorbents extract approximately 99% of cesium from fresh water samples (pH 4–9) at flow rates of up to 200 mL/min·cm^2. With comparable sorption characteristics, the ANFEZh-BL sorbent based on delignified cellulose provides gamma and beta radiation detection efficiency 1.8 times higher than the ANFEZh sorbent, due to the use of a lower-density substrate.

KEYWORDS: natural water, iron ferrocyanide, cesium-137, thin-layer sorbents, preconcentration, radiochemical analysis.

Financing: The work was partially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (through the basic part of the government mandate, Project No. FEUZ-2023-0013).

For citation: Semenishchev V.S., Remez V.P., Titova S.M., Denisov E.I., Nikiforov A.F. The ferrocyanide sorbents based on cellulose for preconcentration of cesium-137 from natural water. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 20025. No. 6. P. 52–65. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-6-52-65. EDN:YZEOTI

ВВЕДЕНИЕ

Защита населения от радиационного воздействия остается одним из ключевых приоритетов для системы здравоохранения. Получаемая населением доза облучения складывается из внешнего облучения (в основном космическое излучение), а также из внутреннего облучения за счет поступления в организм человека радионуклидов с воздухом, пищей и водой.

В настоящее время в рекомендациях МКРЗ [1] установлены единые принципы регулирования для радионуклидов как природного, так и техногенного происхождения, что делает контроль их содержания в питьевой воде особенно актуальным.

Среди техногенных изотопов Cs-137 выделяется масштабами своего распространения. Согласно данным [2], его глобальные выбросы достигли 910 ПБк от испытаний ядерного оружия, 40 ПБк от штатной работы предприятий по переработке топлива, а также 40 и 70 ПБк в результате аварий на АЭС Три-Майл-Айленд и Чернобыльской АЭС. Хотя фоновая концентрация цезия в мире невелика, в зонах, пострадавших от радиационных аварий [3] или расположенных рядом с объектами ядерно-топливного цикла, его активность в воде может достигать значительных величин [4 – 6].

Для оперативного контроля удельной активности Cs-137 применяются современные методы экспрессного анализа. Наиболее распространенная схема включает два этапа: селективное извлечение цезия из пробы воды с помощью специальных сорбентов (на базе ферроцианидов [7–9] или фосфомолибдатов [7, 10, 11]) с последующим измерением активности на гамма- или бета-спектрометре. При этом, поскольку ферроцианиды образуют мелкие труднофильтруемые осадки, их часто используют не непосредственно, а в форме композитных сорбентов на основе различных носителей, таких как алюмосиликаты [12, 13], гранулированные оксиды [14], хитозан [15], целлюлоза [16], синтетические полимеры [17–19], оксид графена и др. [20].

Сорбент АНФЕЖ предназначен для быстрого концентрирования радионуклидов цезия из водных растворов – морской и пресной воды, а также технологических растворов с общим солесодержанием до 500 г/л. Сорбент показывает высокую эффективность сорбции (95–98 %) на фоне высокого содержания в растворе ионов калия и натрия. Разработка сорбента и методики его применения берет свое начало в исследованиях 1980-х годов по заказу Военно-морского флота СССР для определения низких концентраций содержания изотопов цезия в морской воде в местах базирования атомных подводных лодок противника. Активным компонентом сорбента АНФЕЖ является ферроцианид железа, обладающий высокой селективностью по отношению к цезию. Сорбент служит основой экспрессного метода (Система Анфеж), применяемого для массовых радиохимических анализов жидких сред с пределом обнаружения определяемой активности 1 Бк/м^3 и ниже.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования были взяты два вида сорбентов марки АНФЕЖ на основе ферроцианида железа-калия: нанесенного на древесные опилки (АНФЕЖ) и нанесенного на целлюлозную часть опилок после удаления из них лигнина (АНФЕЖ-БЛ) раствором гидроксида натрия. В составе сорбентов ферроцианид железа-калия является сорбционно-активным компонентом, проявляющим высокую селективность к цезию-137. Опилки выполняют функцию носителя, благодаря которому сорбент приобретает форму,

близкую к гранулированной, и может быть использован для сорбции цезия в динамических условиях, тогда как чистый ферроцианид железа представляет собой очень мелкий порошок, который при использовании в сорбционной колонке обладает очень высоким гидродинамическим сопротивлением. Благодаря удалению лигнина из целлюлозы насыпная плотность получаемого сорбента снижается, что в случае использования сорбентов в аналитических целях может повысить эффективность регистрации излучения цезия-137. Насыпная плотность сорбентов была определена экспериментально: АНФЕЖ – ρ = 0,274 г/см^3; АНФЕЖ-БЛ – ρ = 0,219 г/см^3.

Эксперименты по сорбции цезия из водных проб в динамических условиях проводили, пропуская с помощью перистальтического насоса пробу воды через колонку с внутренним диаметром 5 мм. В качестве пробы брали водопроводную воду с добавлением стабильного цезия в форме хлорида так, чтобы концентрация цезия составляла порядка 0,5 мг/л. Состав использованной воды по основным показателям приведен в табл. 1. Концентрацию цезия в пробах воды определяли без предварительной подготовки на масс-спектрометре NexION 350 (Perkin Elmer, США). Калибровку масс-спектрометра по цезию осуществляли с помощью аттестованного стандартного раствора.

Таблица 1. Элементный состав водопроводной воды, использованной в экспериментах (по основным элементам)
Table 1. Element composition of the tap water used in the experiments (main components)

Элемент	Концентрация, мг/л	Элемент	Концентрация, мг/л
Na	3,74	Mg	5,65
K	1,02	Ca	15,4
Rb	0,0014	Sr	0,08
Cs	0,00008 (добавлено 0,5)	Ba	0,015
Fe	0,5	Сульфаты	48,3
Mn	0,05	Хлориды	2,7
Al	0,06	Si	0,82

В экспериментах по сорбции цезия из меченых растворов активность Cs-137 в пробах измеряли на сцинтилляционном гамма-бета-спектрометре «Атомтех МКС-1315 АТ» (Атомтех, Республика Беларусь) по линии равновесного дочернего гамма-излучающего изотопа Ba-137m (E = 662 кэВ) в стандартной геометрии Маринелли (1 л) после выдержки пробы до радиоактивного равновесия не менее получаса.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве предварительных экспериментов получены зависимости сорбции цезия на сорбентах АНФЕЖ от pH раствора в статических условиях (рис.1).

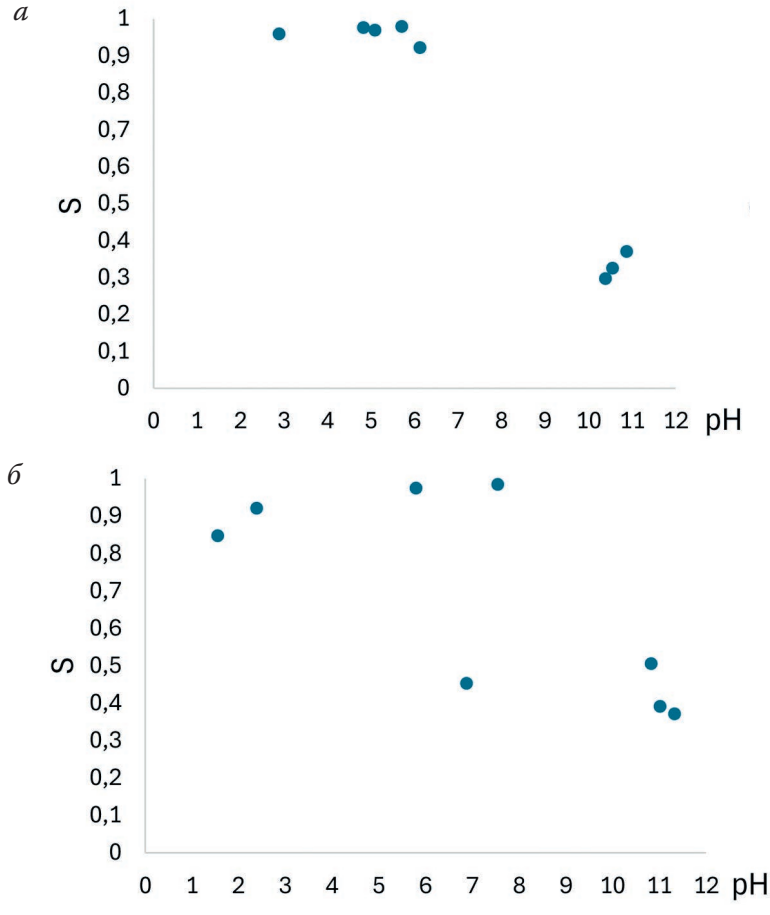


Рис. 1. Зависимости степени сорбции Cs-137 от pH в статических условиях на сорбентах АНФЕЖ (*а*) и АНФЕЖ-БЛ (*б*).

Fig. 1. The pH dependences of Cs-137 sorption under batch conditions on the ANFEZH (*a*) and ANFEZH-BL (*b*) sorbents.

Результаты экспериментов показали, что оба сорбента хорошо извлекают цезий из водных растворов (степень сорбции – от 95 до 98 %) в диапазоне pH от 2 до 8–9, что совпадает с типичным диапазоном pH для большинства природных вод. Рассчитанные коэффициенты распределения в оптимальном диапазоне pH составили от $1{,}5*10^4$ до $2*10^5$ мл/г. При pH > 10 наблюдается резкое снижение сорбционных свойств ферроцианидных сорбентов по отношению к цезию, которое объясняется частичным растворением фазы ферроцианида железа в щелочной среде [21]. Таким образом, оба сорбента обладают сопоставимыми сорбционными свойствами по отношению к Cs-137.

Для оценки применимости сорбентов для концентрирования цезия из природных вод в аналитических целях проведена серия экспериментов по сорбции цезия в динамических условиях. Через колонку, содержащую 1 г сорбента, пропускали 1 л водопроводной воды, насыщенной 0,5 мг/л цезия. При этом варьировали скорость пропуска и кислотность пробы. На рис. 2 приведены выходные кривые сорбции цезия из незакисленной пробы (pH = 7,8) при скорости пропускания 1 л/ч.

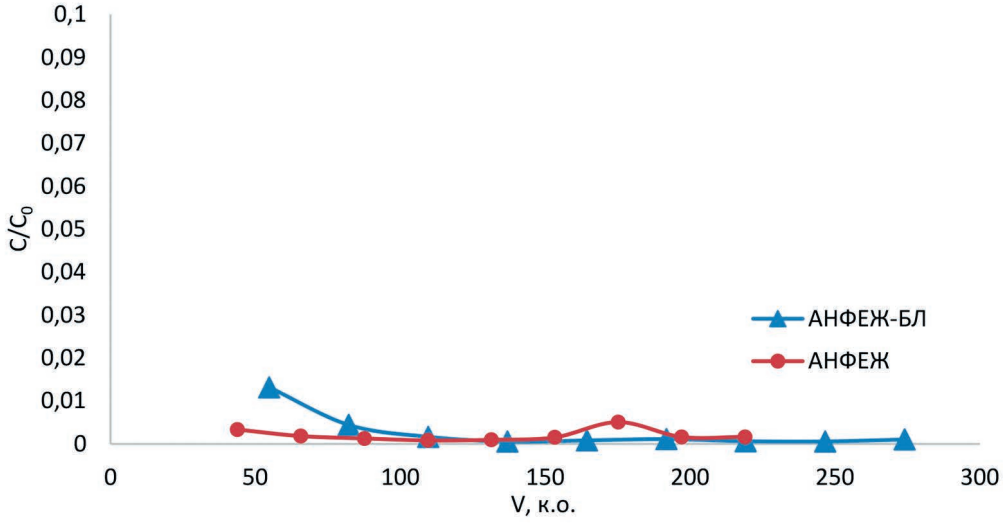


Рис. 2. Выходные кривые сорбции цезия из пробы водопроводной воды (pH = 7,8, начальная концентрация цезия – 0,6 мг/л) сорбентами АНФЕЖ и АНФЕЖ-БЛ при скорости пропускания пробы 1 л/ч.
Fig. 2. Breakthrough curves of cesium sorption from tap water by the ANFEZH and ANFEZH-BL sorbents (pH 7.8, C_{Cs} = 0.6 mg/L, flow rate = 1 L/h).

Результаты показали, что оба сорбента почти одинаково хорошо извлекают цезий из воды в динамических условиях. Суммарная степень извлечения цезия из 1 л пробы составила 99,8 % для сорбента АНФЕЖ и 99,7 % для сорбента АНФЕЖ-БЛ. В большинстве аналитических методик при отборе проб воды предполагается их консервация путем закисления пробы до pH = 1,5–2 с целью предотвращения сорбции микроколичеств анализируемого радионуклида стенками посуды или образования им коллоидной фракции. Проведен эксперимент по сорбции цезия в динамических условиях сорбентами АНФЕЖ и АНФЕЖ-БЛ из пробы воды с pH = 2. Остальные параметры были установлены аналогично предыдущему эксперименту. Результаты представлены на рис. 3.

Результаты эксперимента показали, что закисление пробы крайне негативно влияет на сорбцию цезия в динамических условиях: суммарные степени извлечения цезия из 1 л пробы упали до 65,0 % для сорбента АНФЕЖ и 73,4 % для сорбента АНФЕЖ-БЛ. Полученные результаты коррелируют с небольшим снижением степени сорбции цезия при pH = 2, установленным по результатам статических экспериментов (рис. 1). Таким образом, для извлечения цезия

в методике анализа закисление пробы не рекомендуется, а в соответствии с данными рис. 1 рекомендуемый диапазон pH пробы составляет от 5 до 8–9, что укладывается в требуемый диапазон pH для питьевых вод (от 6,0 до 9,0 в соответствии с СанПиН 2.1.4.1074-01 для водопроводной воды[1] и от 6,5 до 8,5 в соответствии с СанПиН 2.1.4.1116-02 для бутилированной воды[2]) и в фактический диапазон pH большинства природных вод.

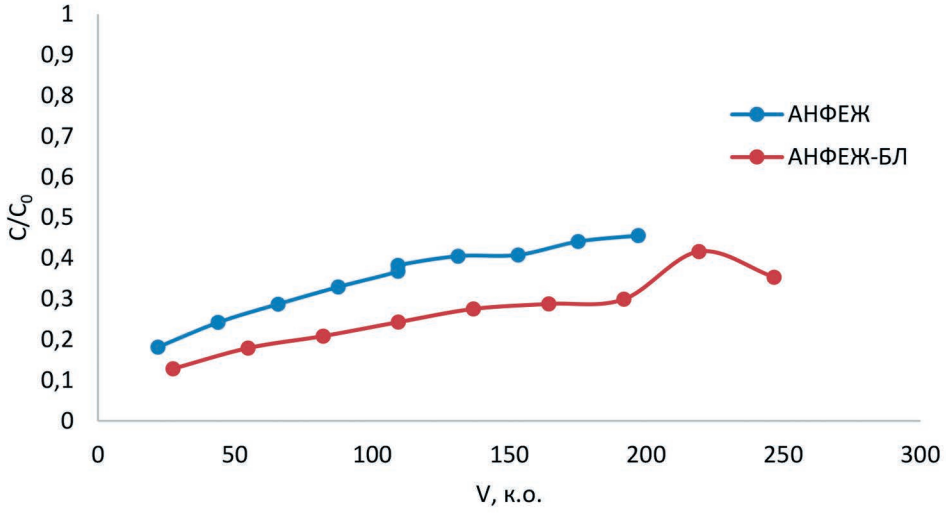


Рис. 3. Выходные кривые сорбции цезия сорбентами АНФЕЖ и АНФЕЖ-БЛ из закисленной пробы водопроводной воды (pH = 2, начальная концентрация цезия – 0,42 мг/л, скорость пропускания пробы 1 л/ч)
Fig. 3. Breakthrough curves of cesium sorption from tap water by the ANFEZH and ANFEZH-BL sorbents (pH 2, C_{Cs} = 0.42 mg/L, flow rate = 1 L/h).

Скорость пропуска пробы также является важным параметром, влияющим на длительность анализа. На рис. 4 приведены выходные кривые сорбции цезия сорбентами АНФЕЖ и АНФЕЖ-БЛ из пробы воды (pH = 7,8) при различных скоростях. В табл. 2 представлены суммарные степени сорбции цезия из 1 л проб воды в различных условиях.

Результаты экспериментов показали, что увеличение скорости пропускания до 2 л/ч практически не снижает степень извлечения цезия из пробы воды, даже при ее увеличении до 3 л/ч степень извлечения цезия остается не ниже 99 %. Таким образом, для колонки с внутренним диаметром 5 мм и объемом сорбента 3,5–4,5 мл скорость пропуска водной пробы 3 л/ч является приемлемой для концентрирования цезия-137 в методике анализа. В случае использования более крупных колонок возможно увеличение скорости с целью увеличения пропускаемого объема пробы.

[1] СанПиН 2.1.4.1074-01 – санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества».
[2] СанПиН 2.1.4.1116-02: «Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды, расфасованной в ёмкости. Контроль качества».

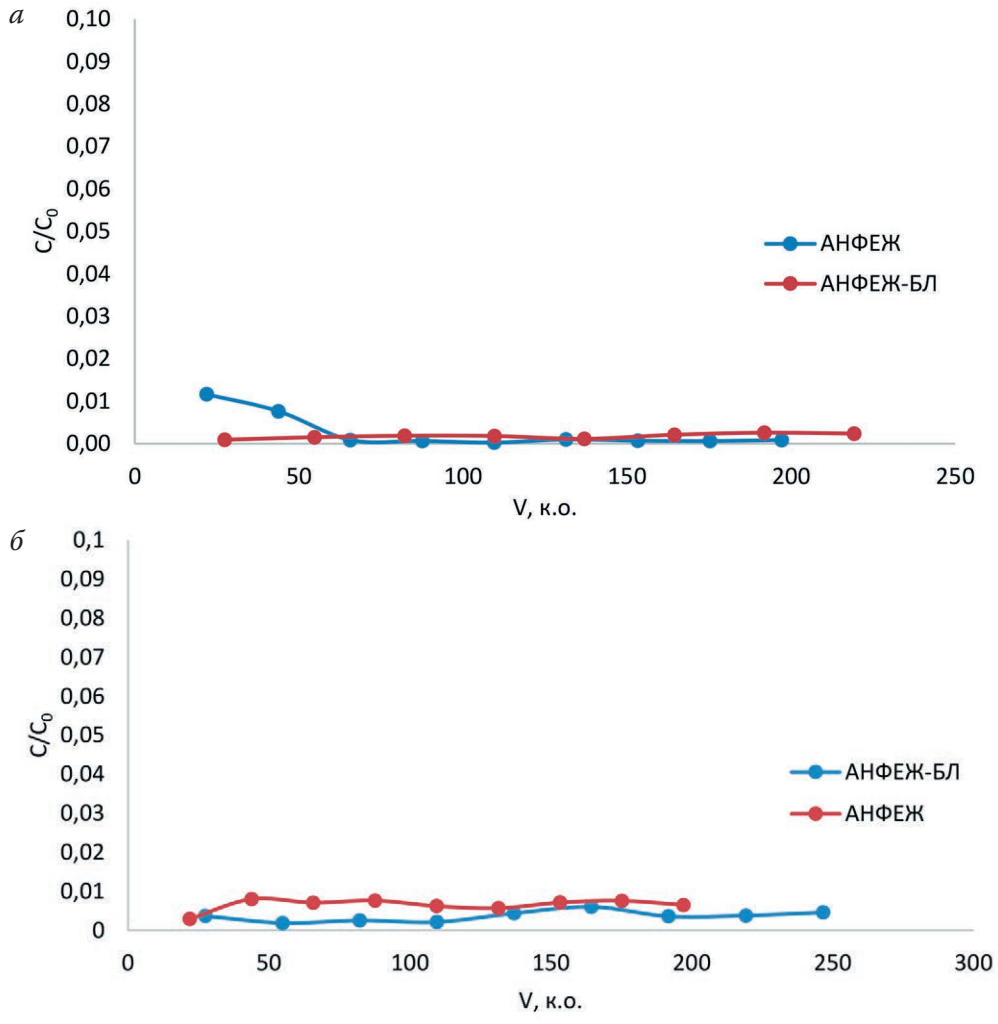


Рис. 4. Выходные кривые сорбции цезия сорбентами АНФЕЖ и АНФЕЖ-БЛ из пробы водопроводной воды (pH = 7,8, начальная концентрация цезия – 0,4 мг/л) при скорости пропускания пробы 2 л/ч (*а*) и 3 л/ч (*б*).
Fig. 4. Breakthrough curves of cesium sorption from tap water by the ANFEZH and ANFEZH-BL sorbents (pH 7,8, C_{Cs} = 0.4 mg/L). Flow rate = 2 L/h (*a*), 3 L/h (*b*).

Таблица 2. Суммарные степени сорбции цезия сорбентами АНФЕЖ и АНФЕЖ-БЛ из 1 л проб воды в различных условиях, %
Table 2. The total degrees of cesium sorption by the ANFEZH and ANFEZH-BL sorbents from 1L water samples at various conditions

Сорбент	АНФЕЖ	АНФЕЖ-БЛ
pH = 2; 1 л/ч	65,0	73,4
pH = 7,8; 1 л/ч	99,8	99,7
pH = 7,8; 2 л/ч	99,7	99,8
pH = 7,8; 3 л/ч	99,3	99,6

Для определения эффективности регистрации Cs-137 проведен следующий эксперимент: в пробу водопроводной воды объемом 1 л добавляли известную активность Cs-137, измеряли скорость счета на гамма-бета-спектрометре, пропускали через колонку с сорбентом АНФЕЖ или АНФЕЖ-БЛ, после чего измеряли элюат и насыщенный сорбент в двух положениях – по гамма-каналу и по бета-каналу (рис. 5). Полученные данные приведены в табл. 3.

а *б*

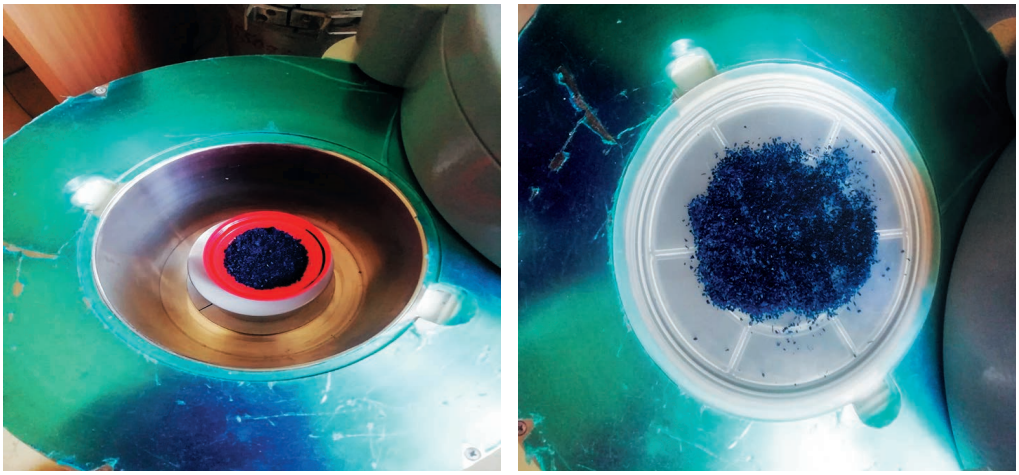


Рис. 5. Внешний вид сорбентов АНФЕЖ и АНФЕЖ-БЛ при измерении на гамма-бета-спектрометре в положениях для регистрации гамма-излучения (*а*) и бета-излучения (*б*).
Fig. 5. A photo of the ANFEZH and ANFEZH-BL sorbents in the gamma beta spectrometer in the positions for registration of gamma (*a*) and beta (*b*) radiation.

Таблица 3. Эффективность регистрации Cs-137 при измерении сорбентов АНФЕЖ и АНФЕЖ-БЛ после концентрирования
Table 3. Counting efficiency of Cs-137 after preconcentration on the ANFEZH and ANFEZH-BL sorbents

Сорбент	АНФЕЖ	АНФЕЖ-БЛ
Степень сорбции цезия, %	99,7	98,1
Эффективность регистрации Cs-137 по гамма-каналу для геометрии Маринелли (1 л), имп/(с*Бк)	0,0237	
Эффективность регистрации Cs-137 при измерении сорбента по гамма-каналу, имп/(с*Бк)	0,0332	0,0608
Эффективность регистрации Cs-137 при измерении сорбента по бета-каналу в стандартной емкости 0,01 л, имп/(с*Бк)	0,149	0,262

Таким образом, сорбент АНФЕЖ-БЛ благодаря меньшей насыпной плотности за счет удаления лигнина из носителя при сопоставимой степени сорбции обеспечивает почти вдвое более высокие эффективности регистрации цезия-137 как по гамма-каналу, так и по бета-каналу. Следовательно, для разработки метода анализа цезия-137 в пробах воды рекомендуется использовать АНФЕЖ-БЛ, скорость пропуска пробы воды допускается как минимум 3 л/ч (соответствует 200 мл/мин*см^2), степень сорбции составляет порядка 99 %, pH пробы рекомендуется в интервале от 4 до 9.

ВЫВОДЫ

В рамках проведенной работы исследованы сорбции цезия сорбентами серии АНФЕЖ, представляющими собой сорбционно-активную фазу феррроцианида железа, нанесенную на древесные опилки (АНФЕЖ) и делигнифицированную целлюлозу (АНФЕЖ-БЛ). Результаты статических экспериментов показали, что сорбенты АНФЕЖ способны эффективно извлекать Cs-137 из водных проб с pH от 4 до 9 (совпадает с диапазоном pH для питьевых вод и характерным для большинства природных вод) с коэффициентами распределения от $1{,}5{\cdot}10^4$ до $2{\cdot}10^5$ мл/г.

По результатам экспериментов по извлечению цезия в динамических условиях установлено, что оба исследованных сорбента извлекают 99,3–99,8 % цезия из проб пресных вод (pH 4–9) при скорости пропуска до 200 мл/мин·см^2. Установлено, что степень сорбции цезия из закисленных до pH = 2 проб составила 65,0 % и 73,4 % для сорбентов АНФЕЖ и АНФЕЖ-БЛ соответственно, что указывает на нежелательность закисления пробы воды в методике анализа. Экспериментально показано, что при сопоставимых сорбционных характеристиках сорбент АНФЕЖ-БЛ на основе делигнифицированной целлюлозы обеспечивает эффективность регистрации гамма- и бета-излучения в 1,8 раза выше, чем сорбент АНФЕЖ, за счет использования основы с меньшей плотностью. Таким образом, сорбент АНФЕЖ-БЛ рекомендуется для сорбционного концентрирования цезия из природных вод в аналитических целях.

Дальнейшее продолжение работ будет нацелено на изучение эффективности сорбционного извлечения цезия из крупных объемов водных проб (более 10 л), а также при больших скоростях фильтрации.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTERESTS

The authors declare no relevant conflict of interests.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection (Users Edition). ICRP Publication 103 (Users Edition) // Annals of the ICRP. 2007. Vol. 37. Iss. 2–4.
2. Мясоедов Б.Ф. Радиоактивное загрязнение окружающей среды и возможности современной радиохимии в области мониторинга // Вопросы радиационной безопасности. 1997. № 1. С. 4–16.
3. Vukovic Z., Sipka V., Todorovic D., Stankovic S. Long lived radionuclides in the ecosystem of the Sava river // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2006. Vol. 268. P. 129–131.

4. Казачёнок Н.Н., Попова И.Я., Мельников В.С., Полянчикова Г.В., Тихова Ю.П., Коновалов К.Г., Копелов А.И. Радиоактивное загрязнение воды озер на территории Южно-Уральской техногенной биогеохимической провинции радиоактивных изотопов // Вода: химия и экология. 2014. № 10. С. 16–22.
5. Казачёнок Н.Н., Попова И.Я., Мельников В.С., Полянчикова Г.В., Тихова Ю.П., Коновалов К.Г., Копелов А.И. 3H, 90Sr, 137Cs, 239,240Pu в системе реки Теча // Вода: химия и экология. 2013. № 11 (65). С. 10–15.
6. Чеботина М.Я., Гусева В.П., Ищенко В.Г., Берзин Д.Л. Исследование накопления радионуклидов озерной лягушкой (pelophylax ridibundus pall.) в водных экосистемах как индикатор антропогенного загрязнения // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2016. № 1. С. 110–119. https://doi.org/ 10.35567/1999-4508-2016-1-9
7. Pike S.M., Buesseler K.O., Breier C.F., Dulaiova H., Stastna K., Sebesta F. Extraction of cesium in seawater of Japan using AMP-PAN resin and quantification via gamma spectroscopy and inductively coupled mass spectrometry // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2013. Vol. 296. Iss. 1. P. 369–374.
8. Yasutaka T., Tsuji H., Kondo Y., Suzuki Y., Takahashi A., Kawamoto T. Rapid quantification of radiocesium dissolved in water by using nonwoven fabric cartridge filters impregnated with potassium zinc ferrocyanide // Journal of Nuclear Science and Technology. 2015. Vol. 52. Iss. 6. P. 792–800.
9. Johansson L., Samuelsson C., Holm E. Adsorption of caesium in urine on copper hexacyanoferrate (II) – A contamination control kit for large in situ use // Radiation Protection Dosimetry. 1999. Vol. 81. Iss. 2. P. 147–152.
10. Shady S.A. Selectivity of cesium from fission radionuclides using resorcinol-formaldehyde and zirconyl-molybdopyrophosphate as ion-exchangers // Journal of Hazardous Materials. 2009. Vol. 167. P. 947–952.
11. Khanchi A.R., Yavari R., Pourazarsa S.K. Preparation and evaluation of composite ion-exchanger for the removal of cesium and strontium // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2007. Vol. 273. Iss. 1. P. 141–145.
12. Ri S.H., Kim Y.N., Im S.J., Choe S.G., Kim C.H. Selective separation of cesium from radioactive liquid waste by potassium copper hexacyanoferrate (II)-clinoptilolite composite // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2023. Vol. 332. P. 2329–2337. https://doi.org/10.1007/s10967-023-08821-8
13. Кутергин А.С., Недобух Т.А., Никифоров А.Ф. Модифицированные сорбенты на основе гранулированного глауконита для очистки природных вод от радионуклидов // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2016. № 1. С. 99–109. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2016-1-8
14. Ноговицына Е.В., Воронина А.В., Бетенеков Н.Д., Никифоров А.Ф. Концентрирование радионуклидов цезия из природных вод и жидких радиоактивных отходов // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2015. № 3. С. 98–104. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2015-3-8
15. Zemskova L., Tokar E., Shlyk D., Egorin A. Sorbents based on Ni(OH)2/chitosan, immobilization of metal hexacyanoferrates, and application for removal of radionuclide Cs from aqueous solutions // Journal of Sol-Gel Science and Technology. 2023. Vol. 108. P. 250–255. https://doi.org/10.1007/s10971-022-05861-6
16. Воронина А.В., Чайкина Т.И., Никифоров А.Ф., Дрикер Б.Н., Вураско А.В., Фролова Е.И. Сорбенты на основе технической целлюлозы для очистки радиоактивно-загрязненных вод и реабилитации природных водоемов // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2013. № 5. С. 45–53. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2013-5-4
17. Septian A., Masud M.A.A., Shin W.S. Potassium nickel hexacyanoferrate–polyacrylonitrile composite for removing cobalt, strontium, and cesium from radioactive laundry wastewater // Clean Soil Air Water. 2024. Vol. 52, Iss. 1. P. 2300057.

18. Ma D., Xue X., Niu M., Wang Y., Luo Q., Zhu X., Li H., Wang D. Improved Na+ adsorption performance and storage mechanism of cobalt hexacyanoferrate/polyaniline composite during the hybrid capacitive deionization process // Separation and Purification Technology. 2024. Vol. 348. P. 127804.
19. Wang P.-H., Chang Y.-R., Chen M.-L., Lo Y.-K., Lee D.-J. Shape stable poly(vinyl alcohol) hydrogels with immobilized metal hexacyanoferrates for cesium removal from waters // Environmental Science and Pollution Research. 2022. Vol. 29. P. 12427–12433.
20. Sharma M. Metal Hexacyanoferrates (MHCFs) and Their Composites Used as Sorbents for Wastewater Treatment // In: Somya A., Khan A. (eds) Ion Exchange Processes for Water and Environment Management. Sustainable Materials and Technology. Springer, Singapore, 2025. https://doi.org/10.1007/978-981-96-3989-2_9
21. Yao C., Dai Y., Chang S., Zhang H. Removal of cesium and strontium for radioactive wastewater by Prussian blue nanorods // Environmental Science and Pollution Research. 2023. V. 30. P. 36807–36823. https://doi.org/10.1007/s11356-022-24618-w

REFERENCES

1. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection (Users Edition). ICRP Publication 103 (Users Edition). *Annals of the ICRP.* 2007. Vol. 37, Iss. 2–4.
2. Myasoedov B.F. Radioactive contamination of the environment and the possibilities of modern radiochemistry in the field of monitoring. *Radiation Safety Issues*. 1997. № 1. P. 4–16. (In Russ.).
3. Vukovic Z., Sipka V., Todorovic D., Stankovic S. Long lived radionuclides in the ecosystem of the Sava river. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2006. Vol. 268. P. 129–131.
4. Kazachenok N.N., Popova I.Ya., Melnikov V.S., Polyanchikova G.V., Tikhova Yu.P., Konovalov K.G., Kopelov A.I. Radioactive contamination of lake waters in the territory of the South Ural technogenic biogeochemical province of radioactive isotopes. *Water: Chemistry and Ecology*. 2014. No. 10. P. 16–22. (In Russ.).
5. Kazachenok N.N., Popova I.Ya., Melnikov V.S., Polyanchikova G.V., Tikhova Yu.P., Konovalov K.G., Kopelov A.I. 3H, 90Sr, 137Cs, 239,240Pu in the Techa river system. *Water: Chemistry and Ecology*. 2013. No. 11 (65). P. 10–15. (In Russ.).
6. Chebotina M.Ya., Guseva V.P., Ishchenko V.G., Berzin D.L. Study of the accumulation of radionuclides by the lake frog (pelophylax ridibundus pall.) in aquatic ecosystems as an indicator of anthropogenic pollution. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management.* 2016. No. 1. P. 110–119. (In Russ.). https://doi.org/ 10.35567/1999-4508-2016-1-9
7. Pike S.M., Buesseler K.O., Breier C.F., Dulaiova H., Stastna K., Sebesta F. Extraction of cesium in seawater of Japan using AMP-PAN resin and quantification via gamma spectroscopy and inductively coupled mass spectrometry. *Journal of Radio/analytical and Nuclear Chemistry.* 2013. Vol. 296. Iss. 1. P. 369–374.
8. Yasutaka T., Tsuji H., Kondo Y., Suzuki Y., Takahashi A., Kawamoto T. Rapid quantification of radiocesium dissolved in water by using nonwoven fabric cartridge filters impregnated with potassium zinc ferrocyanide. *Journal of Nuclear Science and Technology.* 2015. Vol. 52. Iss. 6. P. 792–800.
9. Johansson L., Samuelsson C., Holm E. Adsorption of caesium in urine on copper hexacyanoferrate (II) – A contamination control kit for large in situ use. *Radiation Protection Dosimetry.* 1999. Vol. 81. Iss. 2. P. 147–152.
10. Shady S.A. Selectivity of cesium from fission radionuclides using resorcinol-formaldehyde and zirconyl-molybdopyrophosphate as ion-exchangers. *Journal of Hazardous Materials.* 2009. Vol. 167. P. 947–952.
11. Khanchi A.R., Yavari R., Pourazarsa S.K. Preparation and evaluation of composite ion-exchanger for the removal of cesium and strontium radioisotopes. *Journal of Radio/analytical and Nuclear Chemistry.* 2007. Vol. 273. Iss. 1. P. 141–145.
12. Ri S.H., Kim Y.N., Im S.J., Choe S.G., Kim C.H. Selective separation of cesium from radioactive liquid waste by potassium copper hexacyanoferrate (II)-clinoptilolite composite. *Journal of Radio/analytical and Nuclear Chemistry.* 2023. Vol. 332. P. 2329–2337. https://doi.org/10.1007/s10967-023-08821-8

13. Kutergin A.S., Nedobukh T.A., Nikiforov A.F. Modified sorbents based on granular glauconite for purification of natural waters from radionuclides. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management.* 2016. No. 1. P. 99–109. (In Russ.). https://doi.org/10.35567/1999-4508-2016-1-8
14. Nogovitsyna E.V., Voronina A.V., Betenekov N.D., Nikiforov A.F. Concentration of cesium radionuclides from natural waters and liquid radioactive waste. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management.* 2015. No. 3. P. 98–104. (In Russ.). https://doi.org/10.35567/1999-4508-2015-3-8
15. Zemskova L., Tokar E., Shlyk D., Egorin A. Sorbents based on Ni(OH)2/chitosan, immobilization of metal hexacyanoferrates, and application for removal of radionuclide Cs from aqueous solutions. *Journal of Sol-Gel Science and Technology.* 2023. Vol. 108. P. 250–255. https://doi.org/10.1007/s10971-022-05861-6
16. Voronina A.V., Chaikina T.I., Nikiforov A.F., Driker B.N., Vurasko A.V., Frolova E.I. Sorbents based on technical cellulose for purification of radioactively contaminated waters and rehabilitation of natural reservoirs. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management.* 2013. № 5. P. 45–53. (In Russ.). https://doi.org/10.35567/1999-4508-2013-5-4
17. Septian A., Masud M.A.A., Shin W.S. Potassium nickel hexacyanoferrate–polyacrylonitrile composite for removing cobalt, strontium, and cesium from radioactive laundry wastewater. *Clean Soil Air Water.* 2024. Vol. 52. Iss. 1. P. 2300057.
18. Ma D., Xue X., Niu M., Wang Y., Luo Q., Zhu X., Li H., Wang D. Improved Na+ adsorption performance and storage mechanism of cobalt hexacyanoferrate/polyaniline composite during the hybrid capacitive deionization process. *Separation and Purification Technology.* 2024. Vol. 348. P. 127804.
19. Wang P.-H., Chang Y.-R., Chen M.-L., Lo Y.-K., Lee D.-J. Shape stable poly(vinyl alcohol) hydrogels with immobilized metal hexacyanoferrates for cesium removal from waters. *Environmental Science and Pollution Research.* 2022. Vol. 29. P. 12427–12433.
20. Sharma M. Metal Hexacyanoferrates (MHCFs) and Their Composites Used as Sorbents for Wastewater Treatment // In: Somya A., Khan A. (eds) Ion Exchange Processes for Water and Environment Management. Sustainable Materials and Technology. Springer, Singapore, 2025. https://doi.org/10.1007/978-981-96-3989-2_9
21. Yao C., Dai Y., Chang S., Zhang H. Removal of cesium and strontium for radioactive wastewater by Prussian blue nanorods. *Environmental Science and Pollution Research.* 2023. Vol. 30. P. 36807–36823. https://doi.org/10.1007/s11356-022-24618-w

Сведения об авторах:

Семенищев Владимир Сергеевич, канд. хим. наук, доцент, кафедра радиохимии и прикладной экологии, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19; https://orcid.org/0000-0002-5269-2294**;** e-mail: vovius82@mail.ru

Ремез Виктор Павлович, д-р техн. наук, директор ООО НПП «Эксорб», Россия, 620000, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта, 5; e-mail: sorb@bk.ru

Титова Светлана Михайловна, канд. техн. наук, доцент, кафедра редких металлов и наноматериалов, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19; https://orcid.org/0000-0002-7100-0249; e-mail: avotitms@mail.ru

Денисов Евгений Иванович, д-р техн. наук, профессор, кафедра радиохимии и прикладной экологии, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19; e-mail: e.i.denisov@urfu.ru

Никифоров Александр Федорович, д-р хим. наук, профессор, кафедра радиохимии и прикладной экологии, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19; e-mail: a.f.nikiforov@urfu.ru

About the authors:

Vladimir S. Semenishchev, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Ural Federal University Chair of Radiochemistry and Applied Ecology, ul. Mira, 19, Ekaterinburg, 620002, Russia; https://orcid.org/0000-0002-5269-2294; e-mail: vovius82@mail.ru

Viktor P. Remez, Doctor of Chemical Sciences, Director of Eksorb Ltd., ul. 8 Marta, 5, Ekaterinburg, 620000, Russia; e-mail: sorb@bk.ru

Svetlana M. Titova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Ural Federal University Chair of Rare Metals and Nano/materials, ul. Mira, 19, Ekaterinburg, 620002, Russia; https://orcid.org/0000-0002-7100-0249; e-mail: avotitms@mail.ru

Eugeny I. Denisov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Ural Federal University Chair of Radiochemistry and Applied Ecology, ul. Mira, 19, Ekaterinburg, 620002, Russia; e-mail: e.i.denisov@urfu.ru

Aleksandr F. Nikiforov, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Ural Federal University Chair of Radiochemistry and Applied Ecology, ul. Mira, 19, Ekaterinburg, 620002, Russia; e-mail: a.f.nikiforov@urfu.ru

Поступила в редакцию / Received 01.10.2025.
Поступила после рецензирования / Revised 13.10.2025.
Принята к публикации / Accepted 29.10.2025.

УДК 574.64; 574.635; 504.064 *https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-6-66-79*

Водные растения как фактор биологической деструкции ацетона в воде

В.А. Поклонов ✉

✉ warvir@rambler.ru

Международный независимый эколого-политологический университет, Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Результаты данного исследования необходимы для проектирования биотехнологий по очищению воды от поллютантов. Обнаружено, что некоторые виды макрофитов можно использовать для удаления ацетона из воды. **Методы.** Изучено изменение концентраций ацетона в воде модельных систем (микрокосмов). В микрокосмах инкубировали высшие водные растения *Ceratophyllum demersum* L., *Elodea Canadensis* Mchk., *Utricularia vulgaris* L. Концентрации ацетона составляли 11 мг/л (5 ПДК) и 22 мг/л (10 ПДК). Температура инкубации находилась в диапазоне 20 ± 7 °С, наблюдения продолжались 10 дней (240 ч). Концентрации ацетона измеряли методом хромато-масс-спектрометрии. **Результаты.** Впервые доказано, что концентрации ацетона снижались быстрее в присутствии растений, чем в контрольных микрокосмах, что свидетельствовало о фиторемедиационном потенциале растений. В микрокосмах с *C. demersum* концентрации ацетона составляли значения ниже 2,2 мг/л (1 ПДК) после пяти суток инкубации. Ацетон в концентрации 11 мг/л не оказывал летального или визуально заметного воздействия на *C. demersum*. Установлено, что элодея (*E. canadensis*) более чувствительна (до 20 % отмерших побегов) к ацетону, чем роголистник (*C. demersum*) и пузырчатка (*U. vulgaris*). Самым устойчивым оказался *C. demersum*. В присутствии роголистника (*C. demersum*) снижение концентраций ацетона (ниже 1 ПДК) составило больше 70 % (по сравнению с контролем без растений) во всех микрокосмах спустя 5 суток. Роголистник (отсутствие фитотоксичности) и пузырчатка (5 % и меньше мертвых побегов) сохранили жизнеспособность при загрязнении пресноводной среды ацетоном и могут использоваться для фиторемедиации. Полученные результаты расширяют знания о фитотоксичности ацетона и фиторемедиационном потенциале высших водных растений, что необходимо для разработки фитотехнологий по очищению воды от загрязнений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: химическое загрязнение воды, фиторемедиация, фитотехнологии, фитотоксичность, водные макрофиты, ацетон, микрокосмы.

Финансирование. Работа поддержана текущим институциональным финансированием. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным исследованием получено не было.

Для цитирования: Поклонов В.А. Водные растения как фактор биологической деструкции ацетона в воде // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 6. С. 66–79. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-6-66-79; EDN: WHAZCS

© Поклонов В.А., 2025

Aquatic plants as a factor in decreasing the concentrations of acetone in water

Vladislav A. Poklonov

warvir@rambler.ru

International Independent University of Environmental & Political Sciences, Moscow, Russia

ABSTRACT

Relevance. The results of this study are necessary for the creation of biotechnologies for water purification from pollutants. In this research, the author found that several species of macrophytes can be used to remove acetone from water. **Methods.** The changes in concentration of acetone in the solutions of experimental systems (microcosms) were studied. Higher aquatic plants (*Ceratophyllum demersum* L., *Elodea Canadensis* Mchk., *Utricularia vulgaris* L.) are incubated in microcosms. The concentrations of the acetone were measured with a method of chromatography-mass-spectrometry. Acetone concentrations were 11 mg/L (5 MAC) and 22 mg/L (10 MAC). The incubation temperature was maintained at 20 ± 7 °C, with observations spanning 10 days (240 h). **Results.** The first convincing evidence was obtained that the measured concentrations of acetone decreased in the microcosms much faster than in the control ones without macrophytes. This confirmed the phytoremediation potential of *C. demersum*, *E. canadensis*, *U. vulgaris*. In the presence of *C. demersum*, acetone concentrations were below 2.2 mg/l (1 MAC) after five days of incubation. In this research revealed that exposure to acetone at a concentration of 11 mg/L did not exert a lethal or visually detectable effect on *C. demersum*. In this research revealed found out that *E. canadensis* is more sensitive to acetone than *C. demersum* and *U. vulgaris*. The most resistant macrophyte was *C. demersum.* In the presence of *C. demersum*, the reduction in acetone concentrations was more than 70 % percent (compared to the control without plants) in all microcosms after 5 days. Macrophytes *C. demersum* and *U. vulgaris* retained viability (5 % or less dead shoots) when freshwater environments were polluted with acetone and can be used for phytoremediation. The obtained results expand the knowledge about the phytotoxicity of acetone and the phytoremediation potential of aquatic macrophytes. This is necessary for the development of phytotechnologies for water purification from contaminants.

KEY WORDS: water pollution, phytoremediation, phytotechnology, phytotoxicity, aquatic macrophytes, acetone, microcosms, organic matter, chemical pollution, water resources, pollutants, xenobiotics, fresh water, solvent, maximum allowable concentration.

Funding. This work supported by ongoing institutional funding. No additional grants to carry out or direct this particular research were obtained.

For citation: Poklonov V.A. Aquatic plants as a factor in decreasing the concentrations of acetone in water. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2025. No. 6. P. 66–79. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-6-66-79; EDN: WHAZCS

ВВЕДЕНИЕ

Ацетон – простейший кетон, бесцветная, летучая и легковоспламеняющаяся жидкость, широко используемая в химической промышленности, научно-исследовательских институтах и других учреждениях. Он в основном применяется в качестве растворителя и очищающего средства, для производства

метилметакрилата и бисфенола А. Ацетон – наименее токсичный растворитель, но он усиливает токсичность ацетонитрила и тригалометана [1]. Попадая в окружающую среду, он не только загрязняет воду, но и представляет угрозу здоровью человека, подавляет центральную нервную систему [2]. Поэтому сточные воды, содержащие ацетон, должны быть очищены перед сбросом в водные объекты [3]. Для снижения содержания загрязняющих веществ используют многочисленные методы, такие как усовершенствованные процессы окисления [4, 5], мембранная фильтрация [6], химическое окисление [7, 8], электрокоагуляция [9], фотодеградация [10], коагуляция-флокуляция [11], ионный обмен [12, 13], адсорбция [14] и другие.

Тем не менее эти методы и методики неэффективны и экономически невыгодны для очистки сточных вод, а некоторые из этих методов имеют повышенную трудоемкость, а также ограничения по рабочим температурам, что сказывается на эффективности удаления загрязняющих веществ. Кроме того, использование чрезмерного количества химикатов в некоторых методах очистки вызывает дополнительные экологические проблемы [15].

Фиторемедиация – это метод удаления загрязняющих веществ из окружающей среды с помощью определенных водных и наземных растений, которые способны аккумулировать различные поллютанты [16–18]. Фиторемедиация – экономичная, экологически безопасная и простая в применении фитотехнология для детоксикации загрязнений в сточных водах [19].

Цель настоящей работы – установить динамику концентраций ацетона в водной среде (серии микрокосмов), содержащей водные растения *Ceratophyllum demersum* L., *Elodea canadensis* Mchk. и *Utricularia vulgaris* L.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Побеги водных растений *Ceratophyllum demersum* L. (роголистник темно-зеленый, семейство роголистниковые – *Ceratophyllaceae* G.), *Elodea canadensis* Mchk. (элодея канадская, семейство водокрасовые – *Hydrocharitaceae* Juss.), *Utricularia vulgaris* L. (пузырчатка обыкновенная, семейство пузырчатковые – *Lentibulariaceae* Rich.) собраны в пресноводном водоеме на экологически чистой территории (в Крутовском заказнике).

Выбор растений *C. demersum* и *E. canadensis* связан с проведенными ранее исследованиями. Известно, что они могут выдерживать определенные уровни загрязнения воды органическими растворителями, тяжелыми металлами и поверхностно-активными веществами. Высшие водные растения *C. demersum* и *E. canadensis* являются одними из самых распространенных в мире [20–23].

Пузырчатка обыкновенная распространена в европейской части России, Сибири, Средней Азии, на Кавказе и Дальнем Востоке. Растет в канавах, прудах и других водоемах с медленно текущей водой. В Подмосковье ее особенно много. Пузырчатка встречается на всех континентах, кроме Антарктиды. Роль пузырчатки в жизни природы еще мало изучена. Считается, что растение является санитаром водоемов, т. к. очищает воду от болезнетворных организмов

и обогащает ее кислородом. В связи с этим пузырчатка (*U. vulgaris*) была выбрана в качестве тест-объекта для фиторемедиационных исследований[1].

Растения промывали дистиллированной водой для удаления ила и помещали в лабораторные сосуды (микрокосмы). Эксперименты проводились с 19 пресноводными микрокосмами. Лабораторные (экспериментальные) микрокосмы, доказавшие свою эффективность в предыдущих исследованиях, применяли для биотестирования [20–24].

Предельно допустимая концентрация (ПДК) ацетона в воде водоемов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования составляет 2,2 мг/л[2]. В нашем исследовании в микрокосмы вносили ацетон в концентрации 5 и 10 ПДК, что составляет соответственно 11 мг/л и 22 мг/л (табл. 1).

Таблица 1. Состав микрокосмов
Table 1. Composition of microcosms

№ микрокосма, вид растения	Добавка ацетона 5 ПДК (11 мг), сырая масса побегов, г	Добавка ацетона 10 ПДК (22 мг), сырая масса побегов, г
1A (*C. demersum*)	8,2	–
1B (*C. demersum*)	8,1	–
1C (*C. demersum*)	–	7,7
1D (*C. demersum*)	–	7,8
2A (*E. canadensis*)	6	–
2B (*E. canadensis*)	6,1	–
2C (*E. canadensis*)	–	6,1
2D (*E. canadensis*)	–	6,2
3A (*U. vulgaris*)	9	–
3B (*U. vulgaris*)	9,1	–
3C (*U. vulgaris*)	–	11
3D (*U. vulgaris*)	–	10,5
4A (контроль без макрофитов)	Ацетон без макрофитов	–
4B (контроль без макрофитов)	Ацетон без макрофитов	–
4C (контроль без макрофитов)	–	Ацетон без макрофитов
4D (контроль без макрофитов)	–	Ацетон без макрофитов
5A (контроль с макрофитами *C. demersum*)	9,3	
5B (Контроль с макрофитами *E. canadensis*)	2,0	
5C (Контроль с макрофитами *U. vulgaris*)	4,3	

[1]Kvetok.ru – описания растений по алфавиту. Пузырчатка обыкновенная: описание и размножение [Электронный ресурс]. URL: https://kvetok.ru/rasteniya-dlya-akvariuma-i-vodoemov/puzyrchatka-obyknovennaya-2 (дата обращения: 27.08.2025).
[2]АКЛ Аналитика. Анализ сточных вод: определение ацетона [Электронный ресурс]. URL: https://www.chemanalytica.ru/analiz-stochnykh-vod-opredeleniye-atsetona (дата обращения: 08.07.2025).

Вес внесенных побегов представлен в табл. 1. Каждый сосуд содержал 1 000 мл фильтрованной водопроводной воды. Сосуды № 5А, 5В, 5С использовали с каждым видом растений в качестве контроля без добавления ацетона. Опыты проводили при температуре 20 ± 7 °С в условиях естественного дневного освещения в течение 10 суток.

Вес побегов различался в микрокосмах, т. к. задействованы целые побеги, а не их отдельные части. Если побеги подвергаются излишнему стрессу при фрагментировании на части, чистота эксперимента может нарушаться.

Измерения ацетона в водных микрокосмах проводили с помощью хроматографа-масс-спектрометра LECO Pegasus 4D фирмы LECO (США). Практически все методы хромато-масс-спектрометрии заключаются в детектировании и измерении сигнала конкретного соединения или интегрального параметра. Рекорды чувствительности – 10^{-18} г, 10^{-21} М, т. е. речь идет о нескольких сотнях молекул анализируемого соединения в пробе. Хромато-масс-спектрометрия представляет полную информацию, на базе которой можно принимать природоохранные решения [25].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование, описанное в данной статье, продолжает ранее проведенный комплекс экспериментов по фиторемедиационному потенциалу, чувствительности к поллютантам и определению верхней границы толерантности макрофитов [20–24].

Состояние микрокосмов, в которых ацетон взаимодействовал с макрофитами, после пяти суток инкубации не отличалось от состояния контрольных. Фитотоксичности не наблюдалось. Все макрофиты сохранили жизнеспособность в микрокосмах с обеими концентрациями (11 мг/л и 22 мг/л), занимали весь столб воды. Визуальные наблюдения за растениями показали, что тургор не был снижен.

Характеристики микрокосмов после десяти суток инкубации приведены в табл. 2. Степень негативного воздействия ацетона возрастала с ростом его концентрации в водной среде микрокосмов с *E. canadensis* и *U. vulgaris* (табл. 2).

Все высшие водные растения (*C. demersum*, *E.canadensis*, *U. vulgaris*) демонстрировали способность ускорять деструкцию ацетона в воде (табл. 3).

Была оценена скорость биодеструкции ацетона для первых пяти суток инкубации (первой половины опыта) и для вторых пяти суток инкубации. Наблюдения показали, что ацетон выводился быстрее в первые пять суток инкубации (табл. 4), что свидетельствует о том, что ацетон не является стойким веществом и может легко деструктироваться. Это происходило в абсолютном большинстве микрокосмов с ацетоном (за исключением контроля 4А, 4В).

Скорость вывода ацетона была выше в микрокосмах с его концентрацией 22 мг/л. Интерпретируя полученные данные, можно предположить, что чем выше концентрация ацетона в воде, тем быстрее он удаляется из микрокосма за счет физического испарения и биодеструкции растениями (табл. 4).

Таблица 2. Состояние микрокосмов после 10 суток инкубации
Table 2. State of microcosms after 10 days of incubation

№ микрокосма, вид растения	Добавка ацетона 5 ПДК (11 мг)	Добавка ацетона 10 ПДК (22 мг)
1A (*C. demersum*)	Зеленые растения; без изменений от контроля; занимают всю толщу воды; тургор не снижен	–
1B (*C. demersum*)		–
1C (*C. demersum*)	–	Зеленые растения; занимают всю толщу воды; появление нитчатых водорослей; тургор не снижен
1D (*C. demersum*)	–	
2A (*E. canadensis*)	Занимают всю толщу воды; 15 % бледных побегов	–
2B (*E. canadensis*)	Занимают всю толщу воды; 10 % бледных побегов	–
2C (*E. canadensis*)	–	Занимают всю толщу воды; около 20 % бледных побегов; появление нитчатых водорослей
2D (*E. canadensis*)	–	
3A (*U. vulgaris*)	Занимают всю толщу воды; 2 % бледных побегов	–
3B (*U. vulgaris*)	Занимают всю толщу воды; 3 % бледных побегов	–
3C (*U. vulgaris*)	–	Занимают всю толщу воды, 3 % бледных побегов; появление нитчатых водорослей
3D (*U. vulgaris*)	–	Занимают всю толщу воды, 5 % бледных побегов, появление нитчатых водорослей
4A (контроль без макрофитов)	Чистая вода	–
4B (контроль без макрофитов)	Чистая вода	–
4C (контроль без макрофитов)	–	Чистая вода
4D (контроль без макрофитов)	–	Чистая вода
5A (контроль с макрофитами *C. demersum*)	Растения сохранили жизнеспособность, никаких негативных явлений не наблюдалось	
5B (контроль с макрофитами *E. canadensis*)		
5C (контроль с макрофитами *U. vulgaris*)		

Таблица 3. Концентрация ацетона в микрокосмах спустя 5 суток инкубации
Table 3. Acetone concentration in the microcosm after 5 days of incubation

Номера микрокосмов, названия макрофитов	Добавка ацетона 5 ПДК (11 мг/л), остаток вещества в микрокосмах	Добавка ацетона 10 ПДК (22 мг/л), остаток вещества в микрокосмах
1A (*C. demersum*)	1,89	–
1B (*C. demersum*)	1,12	–
1C (*C. demersum*)	–	1,76
1D (*C. demersum*)	–	2,06
2A (*E. canadensis*)	2,79	–
2B (*E. canadensis*)	2,63	–
2C (*E. canadensis*)	–	4,62
2D (*E. canadensis*)	–	4,01
3A (*U. vulgaris*)	2,51	–
3B (*U. vulgaris*)	2,81	–
3C (*U. vulgaris*)	–	3,02
3D (*U. vulgaris*)	–	3,66
4A (контроль без макрофитов)	5,81	–
4B (контроль без макрофитов)	5,89	–
4C (контроль без макрофитов)	–	6,03
4D (контроль без макрофитов)	–	6,81
5A (контроль с макрофитами *C. demersum*)	–	
5B (контроль с макрофитами *E. canadensis*)	–	
5C (контроль с макрофитами *U. vulgaris*)	–	

Чтобы получить скорость вывода ацетона в первые пять суток, необходимы определенные расчеты (на примере *C. demersum*):

1. Находим разность исходной концентрации ацетона от оставшейся после пяти суток 11 мг – 1,5 мг = 9,5 мг.
2. Делим полученное число на 5 (первых дней) 9,5 мг : 5 = 1,9 мг.
3. Получаем сумму в мг (1,9).
4. Переводим мг в г (1,9 мг = 0,0019 г).
5. Находим молярную массу ацетона (58,08 г/моль).
6. Находим количество молей (0,0019 г : 58,08 г/моль = 0,0000327 моль).
7. Определяем молярную концентрацию (0,0000327 моль/л, или $3{,}27 \times 10^{-5}$ моль/л).

Таблица 4. Скорость вывода ацетона из растворов в первые пять суток инкубации и во вторые пять суток инкубации
Table 4. The rate of acetone removal from solutions in the first five days of incubation and in the second five days of incubation

№ микрокосма	Виды макрофитов в микрокосмах	Скорость вывода ацетона из растворов в первые пять суток инкубации (моль/л в сутки)	Скорость вывода ацетона из растворов во вторые пять суток инкубации (моль/л в сутки)
Опыт с ацетоном 11 мг/л			
1A, 1B	*C. demersum*	$3{,}27 \times 10^{-5}$	$5{,}17 \times 10^{-6}$
2A, 2B	*E. canadensis*	$2{,}84 \times 10^{-5}$	$9{,}3 \times 10^{-9}$
3A, 3B	*U. vulgaris*	$2{,}86 \times 10^{-5}$	$8{,}82 \times 10^{-6}$
4A, 4B	Контроль без растений	$1{,}77 \times 10^{-5}$	$1{,}89 \times 10^{-5}$
Опыт с ацетоном 22 мг/л			
1C, 1D	*C. demersum*	$6{,}9 \times 10^{-5}$	$6{,}54 \times 10^{-6}$
2C, 2D	*E. canadensis*	$6{,}03 \times 10^{-5}$	$1{,}48 \times 10^{-5}$
3C, 3D	*U. vulgaris*	$6{,}37 \times 10^{-5}$	$1{,}14 \times 10^{-5}$
4C, 4D	Контроль без растений	$5{,}37 \times 10^{-5}$	$2{,}06 \times 10^{-5}$

Чтобы получить скорость вывода ацетона во вторые пять суток, необходимо концентрацию, оставшуюся после 5 суток, разделить на 5 (вторых дней), т. е. 1,5 мг : 5 = 0,3 мг. Остальные действия, описанные выше (3–7), идентичны расчетам для первых 5 суток (табл. 4). В итоге получается $5{,}17 \times 10^{-6}$ моль/л. Расчеты были использованы для всех концентраций и всех растений.

Полученные результаты представляют новые данные о толерантности растений к воздействию ацетона, которые могут представлять интерес в будущем в связи с фиторемедиацией загрязненных компонентов окружающей среды.

Нитчатые водоросли были обнаружены в сосудах 1C, 1D, 2C, 2D, 3C, 3D, т. е. во всех микрокосмах с макрофитами с добавлением ацетона 22 мг/л. В контрольных микрокосмах без добавления ацетона рост нитчатых водорослей не наблюдался. Появление нитчатых водорослей может указывать на снижение иммунитета высших водных растений, гибель клеток тканей и появление доступных для водорослей биогенных веществ (табл. 2).

Из данных табл. 3 видно, что наличие водных растений во всех микрокосмах ускоряло снижение концентраций ацетона в воде по сравнению с контрольными микрокосмами без растений. Это означает, что в присутствии макрофитов концентрации ацетона снижались значительно быстрее (микрокосмы с роголистником), чем в контроле (табл. 4, рисунок).

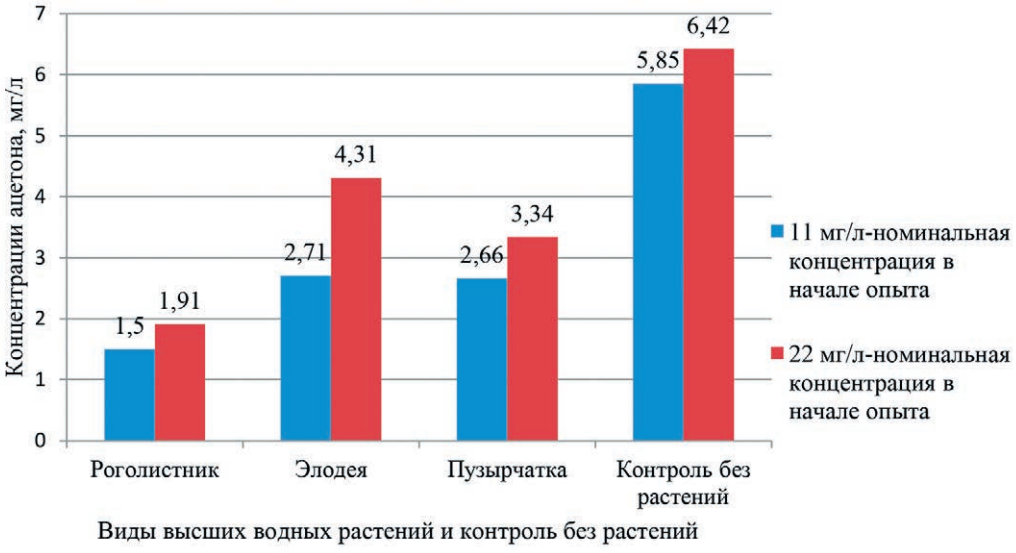


Рисунок. Остаточные концентрации ацетона после 5 суток инкубации.
Figure. Residual concentrations of acetone after 5 days of incubation.

Таблица 5. Средние значения концентраций ацетона (номинальные концентрации 11 мг/л и 22 мг/л) в водной среде микрокосмов после пяти суток инкубации
Table 4. Average values of acetone concentrations (nominal concentrations of 11 mg/l and 22 mg/l) in the aquatic environment of microcosms after five days of incubation

№ микрокосма	Виды макрофитов в микрокосмах	Концентрации ацетона, % от контроля	Концентрации ацетона, мг/л
Опыт с ацетоном 11 мг/л			
1A, 1B	*C. demersum*	25,64	1,50
2A, 2B	*E. canadensis*	45,47	2,71
3A, 3B	*U. vulgaris*	44,80	2,66
4A, 4B	Контроль без растений	100	5,85
Опыт с ацетоном 22 мг/л			
1C, 1D	*C. demersum*	29,84	1,91
2C, 2D	*E. canadensis*	67,34	4,31
3C, 3D	*U. vulgaris*	52,19	3,34
4C, 4D	Контроль без растений	100	6,42

Микрокосмы с присутствием роголистника эффективнее других удаляли ацетон из воды, что в целом согласуется с итогом современного исследования J. Mohan et al. [26]. Кроме того, известно, что водные растения элодея (*E. canadensis*) и пузырчатка (*U. vulgaris*) также могут извлекать различные загрязняющие вещества из воды [27–29].

В результате проведенного эксперимента концентрации ацетона уменьшились во всех микрокосмах и опустились ниже 1 ПДК (2,2 мг/л) в присутствии макрофитов *C. demersum* за 5 суток инкубации (табл. 5), т. е. вода стала безопасной с точки зрения использования водоемов в целях хозяйственно-питьевого и культурно-бытового назначения. Присутствие элодеи (*E. canadensis*) и пузырчатки (*U. vulgaris*) в воде не могло понизить концентрацию ацетона (11 и 22 мг/л) до 1 ПДК после 5 суток инкубации (см. рисунок). На протяжении всего опыта (10 суток) не наблюдалось мутности воды. На десятый день эксперимента в микрокосмах почти совсем не осталось ацетона. Только в контрольных микрокосмах 4C (0,02 мг/л) и 4D (0,03 мг/л) сохранилось его незначительное количество.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В серии лабораторных экспериментов показана способность трех видов высших водных растений (*Ceratophyllum demersum*, *Elodea canadensis*, *Utricularia vulgaris*) ускорять процесс снижения концентрации ацетона в воде спустя пять суток инкубации (табл. 5) до уровня ПДК для *C. demersum* и спустя 10 суток во всех опытах до практически полного отсутствия (ниже 0,01 мг/л).

В настоящем исследовании впервые охарактеризована толерантность *Ceratophyllum demersum*, *Elodea canadensis* и *Utricularia vulgaris* к воздействию ацетона (табл. 2). Установлено, что элодея (*E. canadensis*) более чувствительна к ацетону, чем роголистник (*C. demersum*) и пузырчатка (*U. vulgaris*). В присутствии роголистника (*C. demersum*) снижение концентраций ацетона (ниже 1 ПДК) составило больше 70 % (по сравнению с контролем) во всех микрокосмах спустя 5 суток.

Роголистник (*C. demersum*) и пузырчатка (*U. vulgaris*) сохранили жизнеспособность (5 % и меньше мертвых побегов) при загрязнении пресноводной среды ацетоном (11 мг/л и 22 мг/л) и могут использоваться для фиторемедиации.

Изучение устойчивости водных растений к загрязняющим веществам в экспериментальных биосистемах является необходимым компонентом при планировании научных основ биотехнологий (фиторемедиации) с использованием макрофитов. Таким образом, полученные данные представляют интерес в связи с возможностью определения устойчивости фиторемедиационных систем к максимальному токсическому воздействию на примере ацетона.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ НОРМ

Настоящая статья не содержит исследований с участием людей или животных в качестве объектов исследования.

ETHICS APPROVAL AND CONSENT TO PARTICIPATE

No humans or animals were studied.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTEREST

There is no conflict of interest.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Joshi D.R., Adhikari N. An Overview on Common Organic Solvents and Their Toxicity // Journal of Pharmaceutical Research International. 2019. Vol. 28. No 3. P. 1–18. https://doi.org/10.9734/jpri/2019/v28i330203
2. Mu X., Ding H., Pan W., Zhou Q., Du W., Qiu K., Ma J., Zhang K. Research progress in catalytic oxidation of volatile organic compound acetone // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2021. Vol. 9. Iss. 4. P. 105650. https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105650
3. Mo Y., Li H., Zhou K., Ma X., Guo Y., Wang S., Li L. Acetone adsorption to (BeO) 12,(MgO) 12 and (ZnO) 12 nanoparticles and their graphene composites: A density functional theory (DFT) study // Applied Surface Science. 2019. Vol. 469. P. 962–973. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.11.079
4. Khader E.H., Abbood N.S., Albyati T.N., Mohammed T.J. Performance evaluation of integral process for treatment of oilfield wastewater // AIP Conference Proceedings 2022. No. 1. P. 2443. https://doi.org/10.1063/5.0091914
5. Ali N.S., Majdi H.S., Albayati T.M., Jasim D.J. Adsorption of aniline from aqueous solutions onto a nanoporous material adsorbent: isotherms, kinetics, and mass transfer mechanisms // Water Pro Technologies, 2023. Vol. 18. P. 2136–2150. https://doi.org/10.2166/wpt.2023.132
6. Benosmane N., Boutemeur B., Hamdi S.M., Hamdi M. Removal of phenol from aqueous solution using polymer inclusion membrane based on mixture of CTA and CA // Applied Water Science. 2018. Vol. 8. No. 1. P. 6. https://doi.org/10.1007/s13201-018-0643-8
7. Kumar P., Nikakhtari H., Nemati M., Hill G.A. Oxidation of phenol in a bioremediation medium using Fenton's reagent // Environ. Technol. 2010. Vol. 31. P. 47–52. https://doi.org/10.1080/09593330903338403
8. Khader E.H., Mohammed T.J., Albayati T.M. Comparative performance between rice husk and granular activated carbon for the removal of azo tartrazine dye from aqueous solution // Desalination and Water Treatment. 2021. Vol. 229. P. 372–383. https://doi.org/10.5004/dwt.2021.27374
9. Olya M.E., Pirkarami A. Electrocoagulation for the removal of phenol and aldehyde contaminants from resin effluent. Water Science Techniques. 2013. Vol. 68. P. 1940–1949. https://doi.org/10.2166/wst.2013.439
10. Alardhi S.M., Ali N.S., Saady N.M.C., Zendehboudi S., Salih I.K, Alrubaye J.M., Albayati T.M. Separation techniques in different configurations of hybrid systems via synergetic adsorption and membrane processes for water treatment // Industrial and Engineering Chemistry. 2024. Vol. 130. P. 91–104. https://doi.org/10.1016/j.jiec.2023.09.051
11. Khudhur R.H., Nisreen S.A., Khader E.H., Abbood N.S., Issam K.S., Albayati T.M. Adsorption of anionic azo dye from aqueous wastewater using zeolite NaX as an efficient adsorbent // Desalination and Water Treatment. 2023. Vol. 306. P. 245–252. https://doi.org/10.5004/dwt.2023.29861
12. Caetano M., Valderrama C., Farran A., Cortina J.L. Phenol removal from aqueous solution by adsorption and ion exchange mechanisms onto polymeric resins // Colloid Interface Science. 2009. Vol. 338. P. 402–419. https://doi.org/10.1016/j.jcis.2009.06.062
13. Khader E.H., Mohammed T.J., Adnan S.W. Reduction of oil and COD from produced water by activated carbon, zeolite, and mixed adsorbents in a fixed-bed column // Desalination and Water Treatment. 2021. Vol. 227. P. 216–227. https://doi.org/10.5004/dwt.2021.27295
14. Khader E.H., Khudhur R.H., Abbood N.S., Albayati T.M. Decolourisation of anionic azo dye in industrial wastewater using adsorption process: Investigating operating parameters // Environmental Processes. 2023. Vol. 10. P. 34. https://doi.org/1007/s40710-023-00646-7
15. Khader E.H., Khudhur R.H., Mohammed T.J., Mahdy O.S., Sabri A.A., Mahmood A.S., Albayati T.M. Evaluation of adsorption treatment method for removal of phenol and acetone from

industrial wastewater // Desalination and Water Treatment. 2024. Vol. 317. No 1. P. 100091. https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100091
16. Mohebi Z., Nazari M. Phytoremediation of wastewater using aquatic plants // Journal of Applied Research in Water and Wastewater. 2021. Vol. 8. No 1. P. 50-58. https://doi.org/10.22126/arww.2021.5920.1196
17. Брянцев А.В. Фитоэкстракция поллютантов водными растениями на фитоочистных сооружениях промышленных сточных вод АО «Карельский окатыш» // Экология и промышленность России. 2025. Т. 29. № 2. С. 12–18. https://doi.org/10.18412/1816-0395-2025-2-12-18
18. Самодолов А.П. Биоаккумуляция тяжелых металлов из AMD стоков // Приволжский научный журнал. 2025. Т. 73. № 1. С. 153–159.
19. Bayuo J., Rwiza M.J., Choi J.W., Njau K.N., Mtei K.M. Recent and sustainable advances in phytoremediation of heavy metals from wastewater using aquatic plant species: Green approach // Journal of Environmental Management. 2024. Vol. 370. No 1. P.122523. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122523
20. Poklonov V.A., Ostroumov S.A., Anikina E.V., Erofeeva V.V. Study of interactions between extreme concentrations of organic solvents and freshwater plants: toxicity and tolerance // Russian Journal of General Chemistry. 2024. Vol. 94. No 13. P. 3661–3671. https://doi.org/10.1134/S1070363224130309
21. Poklonov V.A., Glebov V.V., Askarova D.A., Erofeeva V.V., Anikina E.V. Study of the toxicity of synthetic surfactant-containing composite detergents on plant hydrobionts under laboratory conditions // Russian Journal of General Chemistry. 2021. Vol. 91. No 13. P. 2908–2916. https://doi.org/10.1134/S1070363221130193
22. Poklonov V.A., Shestakova T.V., Ostroumov S.A. Phytotoxic effect of heavy metal mixture on macrophytes // Russian Journal of General Chemistry. 2018. Vol. 88. No 13. P. 2879–2883. https://doi.org/10.1134/S107036321813008X
23. Umebese C.E., Motajo A.F.J. Accumulation, tolerance and impact of aluminium, copper and zinc on growth and nitrate reductase activity of *Ceratophyllum demersum* (Hornwort) // Environ. Biol. 2008. No 2. P. 197–200.
24. Solomonova E.A., Ostroumov S.A. Tolerance of an aquatic macrophyte *Potamogeton crispus* L. to sodium dodecyl sulphate // Moscow University Biological Sciences Bulletin. 2007. Vol. 62. No 4. P. 176–179. https://doi.org/10.3103/S0096392507040074
25. Поклонов В.А. 2013. Мутагенные ксенобиотики, тяжелые металлы и поверхностно – активные вещества в почвах и высших водных растениях: дисс. канд. биол. наук. М.: РУДН им. Патриса Лумумбы, 254 с.
26. Mohan J., Pandey A., Singh V. Application of aquatic plant *Ceratophyllum demersum* (L.) in phytoremediation of wastewater // Agricultural Science Digest. 2023. Vol. 43, Issue 5. P. 655–660. https://doi.org/10.18805/ag.D-5443
27. Kumar P., Choudhury D. Hydroponics and Environmental Bioremediation. Switzerland: Springer nature, 2024. 407 p. https://doi.org/10.1007/978-3-031-53258-0_6
28. Zhong L., Wu T., Sun H.J., Ding J., Pang J.W., Zhang L., Ren N.Q., Yang S.S. Recent advances towards micro(nano)plastics research in wetland ecosystems: A systematic review on sources, removal, and ecological impacts // Journal of Hazardous Materials. 2023. Vol. 452. P. 131341. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131341
29. Suudi M., Sururin F., Ardiyanti K. The Ability of Aquatic Carnivorous Plants *Utricularia vulgaris* L. as Heavy Metal Bioremediators // Indonesian Journal of Life Sciences. 2024. Vol. 6. No 2. P. 61–68. https://doi.org/0.54250/ijls.v6i2.196

REFERENCES

1. Joshi D.R., Adhikari N. An Overview on Common Organic Solvents and Their Toxicity. *Journal of Pharmaceutical Research International*. 2019. Vol. 28. No 3. P. 1–18. 2019. https://doi.org/10.9734/jpri/2019/v28i330203
2. Mu X., Ding H., Pan W., Zhou Q., Du W., Qiu K., Ma J., Zhang K. Research progress in catalytic oxidation of volatile organic compound acetone. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2021. Vol. 9, Issue 4. P. 105650. https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105650

3. Mo Y., Li H., Zhou K., Ma X., Guo Y., Wang S., Li L. Acetone adsorption to (BeO) 12,(MgO) 12 and (ZnO) 12 nanoparticles and their graphene composites: A density functional theory (DFT) study. *Applied Surface Science*. 2019. Vol. 469. P. 962–973. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.11.079
4. Khader E.H., Abbood N.S., Albyati T.N., Mohammed T.J. Performance evaluation of integral process for treatment of oilfield wastewater. *In AIP Conference Proceedings 2022*. No 1. P. 2443. https://doi.org/10.1063/5.0091914
5. Ali N.S., Majdi H.S., Albayati T.M., Jasim D.J. Adsorption of aniline from aqueous solutions onto a nanoporous material adsorbent: isotherms, kinetics, and mass transfer mechanisms. *Water Pro Technologies*. 2023. Vol. 18. P. 2136–2150. https://doi.org/10.2166/wpt.2023.132
6. Benosmane N., Boutemeur B., Hamdi S.M., Hamdi M. Removal of phenol from aqueous solution using polymer inclusion membrane based on mixture of CTA and CA. *Applied Water Science*. 2018. Vol. 8. No 1. P. 6. https://doi.org/10.1007/s13201-018-0643-8
7. Kumar P., Nikakhtari H., Nemati M., Hill G.A. Oxidation of phenol in a bioremediation medium using Fenton's reagent. *Environmental Technologies*. 2010. Vol. 31. P. 47–52. https://doi.org/10.1080/09593330903338403
8. Khader E.H., Mohammed T.J., Albayati T.M. Comparative performance between rice husk and granular activated carbon for the removal of azo tartrazine dye from aqueous solution. *Desalination and Water Treatment*. 2021. Vol. 229. P. 372–383. https://doi.org/10.5004/dwt.2021.27374
9. Olya M.E., Pirkarami A. Electrocoagulation for the removal of phenol and aldehyde contaminants from resin effluent. *Water Science Techniques*. 2013. Vol. 68. P. 1940–1949. https://doi.org/10.2166/wst.2013.439
10. Alardhi S.M., Ali N.S., Saady N.M.C., Zendehboudi S., Salih I.K, Alrubaye J.M., Albayati T.M. Separation techniques in different configurations of hybrid systems via synergetic adsorption and membrane processes for water treatment. *Industrial and Engineering Chemistry*. 2024. Vol. 130. P. 91–104. https://doi.org/10.1016/j.jiec.2023.09.051
11. Khudhur R.H., Nisreen S.A., Khader E.H., Abbood N.S., Issam K.S., Albayati T.M. Adsorption of anionic azo dye from aqueous wastewater using zeolite NaX as an efficient adsorbent. *Desalination and Water Treatment.* 2023. Vol. 306. P. 245–252. https://doi.org/10.5004/dwt.2023.29861
12. Caetano M., Valderrama C., Farran A., Cortina J.L. Phenol removal from aqueous solution by adsorption and ion exchange mechanisms onto polymeric resins. *Colloid Interface Science.* 2009. Vol. 338. P. 402–419. https://doi.org/10.1016/j.jcis.2009.06.062
13. Khader E.H., Mohammed T.J., Adnan S.W. Reduction of oil and COD from produced water by activated carbon, zeolite, and mixed adsorbents in a fixed-bed column. *Desalination and Water Treatment*. 2021. Vol. 227. P. 216–227. https://doi.org/10.5004/dwt.2021.27295
14. Khader E.H., Khudhur R.H., Abbood N.S., Albayati T.M. Decolourisation of anionic azo dye in industrial wastewater using adsorption process: Investigating operating parameters. *Environmental Processes*. 2023. Vol. 10. P. 34. https://doi.org/1007/s40710-023-00646-7
15. Khader E.H., Khudhur R.H., Mohammed T.J., Mahdy O.S., Sabri A.A., Mahmood A.S., Albayati T.M. Evaluation of adsorption treatment method for removal of phenol and acetone from industrial wastewater. *Desalination and Water Treatment*. 2024. Vol. 317. No 1. P. 100091. https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100091
16. Mohebi Z., Nazari M. Phytoremediation of wastewater using aquatic plants. *Journal of Applied Research in Water and Wastewater*. 2021. Vol. 8. № 1. P. 50–58. https://doi.org/10.22126/arww.2021.5920.1196
17. Bryancev A.V. Phytoextraction of pollutants by aquatic plants at phytotreatment facilities for industrial wastewater of Karelsky Okatysh JSC. *Ecology and Industry of Russia*. 2025. Vol. 29. No. 2. P. 12–18. https://doi.org/10.18412/1816-0395-2025-2-12-18
18. Samodolov A.P Bioaccumulation of Heavy Metals From AMD Effluents. *Volga Journal of Ecology*. 2025. Vol. 73. No 1. P. 153–159.
19. Bayuo J., Rwiza M.J., Choi J.W., Njau K.N., Mtei K.M. Recent and sustainable advances in phytoremediation of heavy metals from wastewater using aquatic plant species: Green approach. *Journal of Environmental Management*. 2024. Vol. 370. No 1. P.122523. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122523
20. Poklonov V.A., Ostroumov S.A., Anikina E.V., Erofeeva V.V. Study of interactions between extreme concentrations of organic solvents and freshwater plants: toxicity and tolerance.

Russian Journal of General Chemistry. 2024. Vol. 94. No 13. P. 3661–3671. https://doi.org/10.1134/S1070363224130309
21. Poklonov V.A., Glebov V.V., Askarova D.A., Erofeeva V.V., Anikina E.V. Study of the toxicity of synthetic surfactant-containing composite detergents on plant hydrobionts under laboratory conditions. *Russian Journal of General Chemistry*. 2021. Vol. 91. No 13. P. 2908–2916. https://doi.org/10.1134/S1070363221130193
22. Poklonov V.A., Shestakova T.V., Ostroumov S.A. Phytotoxic effect of heavy metal mixture on macrophytes. *Russian Journal of General Chemistry*. 2018. Vol. 88. No 13. P. 2879–2883. https://doi.org/10.1134/S107036321813008X
23. Umebese C.E., Motajo A.F.J. Accumulation, tolerance and impact of aluminium, copper and zinc on growth and nitrate reductase activity of *Ceratophyllum demersum* (Hornwort). *Environ. Biol*. 2008. No 2. P. 197–200.
24. Solomonova E.A., Ostroumov S.A. Tolerance of an aquatic macrophyte *Potamogeton crispus* L. to sodium dodecyl sulphate. *Moscow University Biological Sciences Bulletin*. 2007. Vol. 62. No 4. P. 176–179. https://doi.org/10.3103/S0096392507040074
25. Poklonov V.A. 2013. Mutagenic xenobiotics, heavy metals and surfactants in soils and higher aquatic plants: Thesis for the degree of Candidate of Biological Sciences. M.: RUDN, 254 p.
26. Mohan J., Pandey A., Singh V. Application of aquatic plant *Ceratophyllum demersum* (L.) in phytoremediation of wastewater. *Agricultural Science Digest*. 2023. Vol. 43. Iss. 5. P. 655–660. https://doi.org/10.18805/ag.D-5443
27. Kumar P., Choudhury D. Hydroponics and Environmental Bioremediation. Switzerland: Springer nature, 2024. 407 p. https://doi.org/10.1007/978-3-031-53258-0_6
28. Zhong L., Wu T., Sun H.J., Ding J., Pang J.W., Zhang L., Ren N.Q., Yang S.S. Recent advances towards micro(nano)plastics research in wetland ecosystems: A systematic review on sources, removal, and ecological impacts. *Journal of Hazardous Materials*. 2023. Vol. 452. P. 131341. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131341
29. Suudi M., Sururin F., Ardiyanti K. The Ability of Aquatic Carnivorous Plants *Utricularia vulgaris* L. as Heavy Metal Bioremediators. *Indonesian Journal of Life Sciences*. 2024. Vol. 6. No 2. P. 61–68. https://doi.org/10.54250/ijls.v6i2.196

Сведения об авторе:

Поклонов Владислав Александрович, канд. биол. наук, заведующий лабораторией экологического мониторинга водных объектов МНЭПУ, Международный независимый эколого-политологический университет (МНЭПУ), 117105, Москва, Варшавское шоссе, 23, Россия; eLIBRARY SPIN-код: 6635-8026; https://orcid.org/ 0000-0003-2722-7283; e-mail: warvir@rambler.ru; stolyar.887@mail.ru

About the author:

Vladislav A. Poklonov, Candidate of Biological Sciences, Head of the Laboratory of Environmental Monitoring of Water Bodies of the IIUEPS/MNEPU. International Independent University of Environmental & Political Sciences, 117105, Moscow, 23 Varshavskoye Highway, Russia; eLIBRARY SPIN code: 6635-8026; https://orcid.org/ 0000-0003-2722-7283; e-mail: warvir@rambler.ru; stolyar.887@mail.ru

Поступила в редакцию / Received 01.08.2025.
Поступила после рецензирования / Revised 15.09.2025.
Принята к публикации / Accepted 29.10.2025.

УДК 556.18; 470.26 *https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-6-80-99*

Информационно-аналитическое обеспечение водоохранной деятельности в Калининградской области

Н.А. Цупикова, Л.С. Федоров

leonid.fedorov@klgtu.ru

Калининградский государственный технический университет, г. Калининград, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Целью работы является актуализация сведений о водных объектах Калининградской области. Для повышения достоверности сведений о гидрометрических параметрах водотоков предлагается обратить особое внимание на источники информации, находящиеся в открытом доступе. Это позволит предотвратить нарушения водоохранного законодательства, обусловленные некорректным определением ширины водоохранных зон. **Методы.** Работа основана на трассировке русел водотоков и установлении с использованием картографических и аэрокосмических изображений сложившейся к настоящему времени береговой черты водоемов. **Результаты.** Выявлены существенные расхождения фактических параметров водотоков с официальными данными (до 15–40 % и более), названы основные причины, обусловившие такие различия. Проведенное исследование показало вероятность ошибочного определения ширины водоохранных зон вследствие использования некорректных сведений о протяженности водотоков при хозяйственном освоении территории. Ряд проблем связан с методологическими сложностями типизации водных объектов в их исторически сложившихся категориях. Необходима полноценная ревизия водного фонда Калининградской области, которая позволит создать современный региональный кадастр водных объектов с учетом иерархии гидрографической сети, включая малые водотоки.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: водные ресурсы, актуализация реестров, протяженность водотоков, водоохранная зона, дублирование гидронимов, типизация водотоков.

Финансирование: Исследование выполнено в рамках государственного задания Федерального агентства по рыболовству по теме № 122030900052-6 «Развитие методов оценки допустимой добычи и рыбохозяйственного мониторинга ВБР, ОДУ на которые не устанавливается, во внутренних водоемах Калининградской области».

Для цитирования: Цупикова Н.А., Федоров Л.С. Информационно-аналитическое обеспечение водоохранной деятельности в Калининградской области // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 6. С. 80–99. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-6-80-99; EDN: XFZLON

© Цупикова Н.А., Федоров Л.С., 2025

Information and analytical support for rational water use in Kaliningrad Region

Nadezhda A. Tsupikova, Leonid S. Fedorov
leonid.fedorov@klgtu.ru
Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia

ABSTRACT

Relevance. The aim of the research was to update the information on water bodies of the Kaliningrad region. It was proposed to pay special attention to the publicly available information in order to increase the reliability of data on the hydrometric parameters of watercourses. This would prevent violations of water protection laws caused by incorrect determination of the width of water protection zones. **Methods.** The work is based on tracing the channels of watercourses and establishing the actual coastline of water bodies that have developed to date, using up-to-date cartographic and aerospace images. **Results.** Significant discrepancies between the actual parameters of watercourses (up to 15-40% or more) and the official data were revealed, and the main reasons for such differences were named. The study showed the probability of erroneous and inaccurate determination of the width of water protection zones due to the use of incorrect information on the length of watercourses during economic development of the territory. A number of problems are associated with methodological difficulties in classification of water bodies within their historically established categories. A thoroughgoing revision of the water fund of the Kaliningrad Region will allow creating a modern regional cadaster of water bodies taking into account the hierarchy of the hydrographic network, including small watercourses.

KEYWORDS: water resources, registers updating, length of watercourses, water protection zone, duplication of hydronyms, classification of watercourses.

Funding: The work has been done within the framework of the Federal Agency for Fishery Governmental Assignment on Theme No. 122030900052-6 “Development of methods for assessment of permissible catch and VBR fishery monitoring without no stated ODU on the territory of Kaliningrad Region”.

For citation: Tsupikova N.A., Fedorov L.S. Information and analytical support for rational water use in Kaliningrad Region // *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2025. No. 6. P. 80–99. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-6-80-99; EDN: XFZLON

ВВЕДЕНИЕ

В условиях высокой обводненности территории Калининградской области практически любая хозяйственная деятельность здесь связана с необходимостью оценки ее прямого либо косвенного воздействия на те или иные водные объекты. Кафедрой водных биоресурсов и аквакультуры Калининградского государственного технического университета (КГТУ) на протяжении длительного времени осуществляются рыбохозяйственные исследования водных объектов Калининградской области [1, 2]. В ходе научно-исследовательских работ и образовательной деятельности ученые университета столкнулись с тем, что доступные и широко используемые информационные источники содержат противоречивые и/или некорректные сведения о водных ресурсах региона. Отсутствие достоверной информации о водном фонде не позволяет решать ключевые задачи обеспечения достаточного качества природных вод как среды обитания гидробионтов [3].

Государственный учет водных ресурсов в России ведется в государственном водном реестре (ГВР). Данные ГВР, называвшегося ранее государственным водным кадастром, неоднократно обновлялись, однако за почти столетие, прошедшее с момента его создания, до сих пор в России не удалось достичь его необходимого уровня. ГВР остается неполным, т. е. содержит сведения не обо всех поверхностных водных объектах. Даже в черте крупных городов-мегаполисов малые водотоки и водоемы не нашли должного отражения в водном реестре, и вопрос об их инвентаризации еще не решен [4, 5]. Кроме того, обычный порядок установления границ водоохранных зон, а также прибрежных защитных полос и зон санитарной охраны источников водоснабжения не предусматривает проведения комплексного геоинформационного анализа территории [6–8].

Согласно Водному кодексу (ВК РФ) данные о водных объектах вносятся в государственный водный реестр уполномоченным федеральным органом исполнительной власти (ст. 31, п. 10). Таковым органом является Федеральное агентство водных ресурсов, которому ряд ведомств (Министерство сельского хозяйства Российской Федерации, Федеральная регистрационная служба, Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды и др.), в соответствии с постановлением Правительства РФ от 28.04.2007 г. № 253 «О порядке ведения государственного водного реестра», передали сведения о водных объектах, находящихся в сфере их профессиональной компетенции.

Поскольку во многих организациях государственный водный кадастр велся с рядом нарушений, вследствие чего по многим водным объектам данные отсутствовали, а по другим были неполными, то при передаче соответствующих сведений в Федеральное агентство водных ресурсов возникли сложности с формированием и ведением ГВР как информационного ресурса, содержащего полные и корректные сведения о водном фонде. В итоге полная и достоверная информация об особенностях гидрологического режима водных объектов, их физико-географических, морфометрических и других характеристиках доступна лишь для незначительной доли водных объектов Российской Федерации [9].

Анализ информации, имеющейся в официальных общедоступных источниках, выявил систематические несоответствия и противоречия опубликованных данных (ГВР, Реестр зарегистрированных в АГКГН географических названий объектов на 15.12.2022 Калининградская область, карта «Водные ресурсы Калининградской области». 2007. М 1:100 000. Подробная топографическая карта Калининградской области 2001. М 1:25 000, Топографическая карта Калининградской области ГУГК СК-63 1955 М 1:25 000 и комплект топографических карт Калининградской области N-34 1976–1994 гг. М 1:100 000; М 1:50 000). Это определило необходимость начать работу по актуализации данных и их корректировке, вылившуюся в полноценную ревизию водного фонда Калининградской области и создание регионального кадастра водных объектов с учетом иерархии гидрографической сети, включая малые водотоки.

Несомненная актуальность и своевременность такой работы подтверждается тем, что в октябре 2023 г. было объявлено о проведении в России экспе-

римента с единым информационным ресурсом, в котором будут содержаться сведения обо всех водных объектах, в т. ч. подземных водах. На примере Тульской области уже создан макет цифрового реестра, в который загружена информация почти по 500 источникам питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения[1].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

С целью уточнения конфигурации русел и основных морфометрических характеристик водотоков использовалась следующая схема проработки материала [10]. Для идентификации водных объектов, имеющих географические названия, использовались общедоступные топографические карты: Подробная топографическая карта Калининградской области 2001 М 1:25 000, Топографическая карта Калининградской области ГУГК СК-63 1955 М 1:25 000 и Комплект топографических карт Калининградской области N-34 1976–1994 гг. М 1:100 000; М 1:50 000. Водотоки, не имеющие географических названий, но которым присвоены мелиоративные шифры, идентифицировались по карте «Водные ресурсы Калининградской области». 2007. М 1:100 000 и по карте «Городской округ «Город Калининград». 2013. М 1:10 000.

Нанесение русел водотоков и контуров водоемов осуществлялось на электронную карту на основе спутниковых снимков. В качестве базового ресурса использовались различные картографические сервисы, предпочтение отдавалось платформам, на которых присутствовали спутниковые снимки, обеспечивающие достаточное качество изображения для большей части территории Калининградской области. Современные методы высокоточного картографирования поверхностных вод, основанные на спутниковых данных, позволяют выявлять долгосрочные изменения в конфигурации и площади водных объектов [12, 13], что критично для создания актуальных кадастров и эффективного управления водными ресурсами.

Русла водотоков наносились по направлению от устья к истоку в режиме ломаной линии с точностью, максимально отражающей их конфигурацию. Количество узлов на единицу расстояния выбиралось произвольно, в зависимости от степени извилистости русел. Для сильно меандрирующих водных объектов плотность узлов линии достигала более 450 на 1 км протяженности русла, в то время как для слабо меандрирующих была существенно ниже, как указано в табл. 1.

В результате проработки материала формируется электронный ресурс, позволяющий с точностью, существенно превышающей точность общедоступных топографических карт, без каких-либо дополнительных измерений получить следующие параметры водотоков: географические координаты устья; местоположение устья относительно принимающего водотока (расстояние от устья); протяженность исследуемого водотока; бассейновая принадлежность. К настоящему времени уточнены параметры более чем 2,5 тыс. водных объектов.

[1] В России проведут эксперимент с единым информационным ресурсом водных объектов // Российская газета. [Электр. ресурс]. URL: https://rg.ru/2023/10/16/v-rossii-provedut-eksperiment-s-edinym-informacionnym-resursom-vodnyh-obektov.html (дата обращения: 07.07.2024).

Таблица 1. Плотность узлов при прорисовке водотоков (примеры)
Table 1. Density of nodes when performing watercourses trace drawing (examples)

Типы извилистости русел	Коэффициент извилистости[2]	Водоток	Длина водотока, км	Плотность узлов, ед/км	
				для водотока	средняя для типа
Относительно прямолинейные	< 1,10	Канал М-103	0,7	24	19
		Река Шлюзовая	7,4	42	
		Полесский канал	18,0	9	
		Приморский канал	4,95	6	
		Хлебный канал	4,95	9	
Очень слабо извилистые	1,10–1,20	Река Алейка	12,1	42	52
		Восточный канал	8,0	15	
		Западный канал	15,0	21	
		Река Мельничная	11,7	26	
		Немонинский канал	6,8	42	
Слабо извилистые	1,21–1,40	Река Ближняя	3,8	72	66
		Река Куровка	16,3	90	
		Река Славинка	7,8	73	
		Река Щучья	12,0	223	
		Река Мучная	13,7	44	
Умеренно извилистые	1,41–1,60	Река Канава Шумная	9,8	112	71
		Река Нельма	34,8	37	
		Ручей ЗФР-12-1	9,0	36	
		Река Чистая	9,6	85	
		Река Медвежья	10,0	42	
Извилистые	1,61–1,80	Ручей ЗФР-12	13,0	31	75
		Ручей ФР-8	20,5	74	
		Река Майская	39,7	102	
		Река Болотница	4,5	110	
		Ручей БМ-8	5,4	61	
Сильно извилистые	1,81–2,00	Река Резвая	43,4	116	88
		Река Свобода	37,0	92	
		Река Инструч	115,2	147	
		Канал ЗФР-6а	3,8	40	
		Река Прохладная	84,0	90	
Чрезвычайно извилистые	> 2,00	Река Бударка	18,25	195	120
		Река Злая	62,9	187	
		Река Голубая	75,3	96	
		Река Узор	11,1	77	
		Ручей ПВ-2	8,0	82	

[2] Михайлов В.Н., Добролюбов С.А. Гидрология: учебник для вузов. М.; Берлин: Директ-Медиа, 2017. 752 с.

Водоемы оконтуривались по урезу воды в режиме многоугольника. Для них автоматически получаемыми из электронного ресурса параметрами являются площадь акватории и протяженность береговой линии. При необходимости пользователи могут легко вычислить коэффициент изрезанности береговой линии водного объекта и путем простейших расчетов получить коэффициент извилистости русла.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Неточности, связанные с естественными изменениями конфигурации русел водных объектов (меандрирование)

Интеграция кадастровых данных в пространственные базы данных водных объектов повышает их надежность для управления ресурсами [14]. В процессе создания указанного электронного ресурса, максимально соответствующего действительному состоянию гидрографической сети региона, и при сопоставлении сведений о параметрах водотоков с официальными данными были выявлены существенные расхождения.

Фактическая длина водотоков при измерениях возрастала до 15–40 % и более относительно традиционно указываемых значений, что в абсолютных показателях могло достигать нескольких десятков километров, как показано в табл. 2.

Таблица 2. Примеры увеличения протяженности водотоков в ходе работы над электронным ресурсом
Table 2. Examples of increasing the length of watercourses during work on an electronic resource

Водоток	Протяженность, км		Разность	
	согласно данным ГВР	согласно результатам промеров по спутниковой карте	км	%
р. Бородинка	63	89,0	26,0	41,3
р. Инструч	101	115,2	14,2	14,1
р. Корневка	42	56,7	14,7	35,0
р. Луговая	37	43,5	6,5	17,6
р. Майская	29	39,7	10,7	36,9
р. Писса	98	117,3	19,3	19,7
р. Прохладная	77	84,0	7,0	9,1
р. Путиловка	58	74,5	16,5	28,4
р. Швента	22	26,1	4,1	18,6

Очевидно, что некоторые различия в протяженности водотоков обусловлены нарушением геометрической точности при обобщении извилистых рек. В связи с тем, что водотоки локализованы по линиям русла, для них наиболее существенны геометрические аспекты генерализации, проявляющиеся

в упрощении или спрямлении очертаний русла. Как следствие, уменьшение протяженности реки в результате исключения мелких извилин приводит к недоучету меандров в длине реки и несовпадению линии русла водотока на картах. Кроме того, реки, в отличие от озер и водохранилищ, представляют собой более «живую» и динамичную систему, деятельность которой под воздействием потока характеризуется постепенным изменением конфигурации русла, особенно интенсивным на равнинах. Ретроспективный картографический анализ позволил выявить образование новых меандров и отшнуровывание тех, что обнаруживались на более ранних топографических картах.

Например, на рис. 1 показано, что при сравнении конфигурации русла р. Швента, нанесенного по спутниковым снимкам (красная линия), с топографической картой заметно нарушение геометрической точности картографического изображения, смещение линии русла. Такие неточности в значительной степени и являются причиной ошибок в определении протяженности водотоков. В частности, протяженность р. Швента по данным ГВР составляет 22 км, согласно промеру по спутниковым снимкам – 26,1 км.

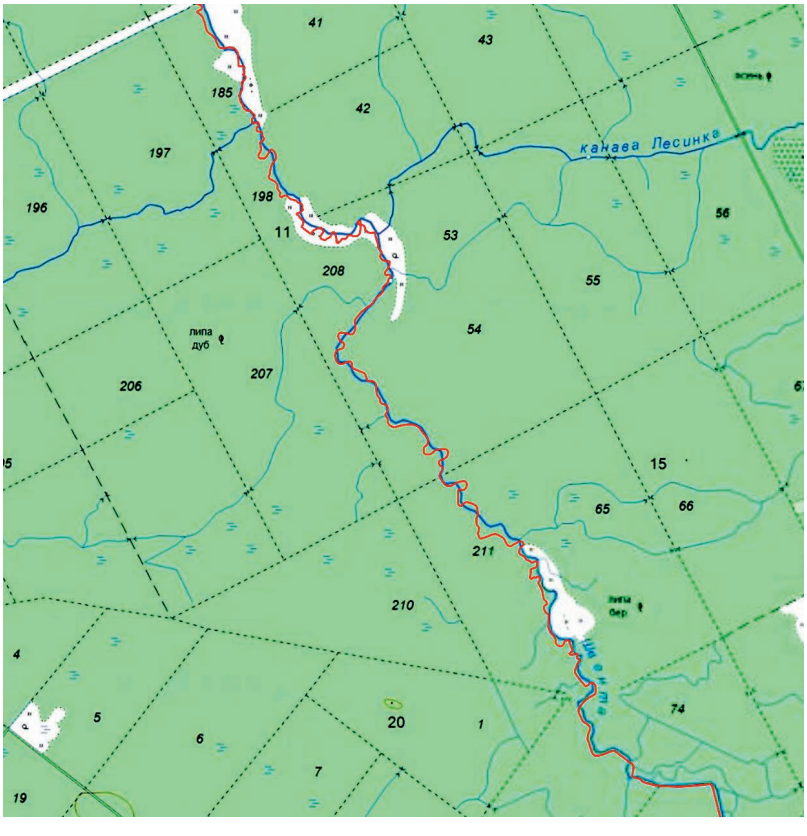


Рис. 1. Пример изменения конфигурации русла и недоучета меандров р. Швента.
Fig. 1. Example of changes in channel configuration and underestimation of the Shventa River meanders.

С целью снижения антропогенного воздействия на водные объекты, рассматриваемые в том числе как среда обитания водных биологических ресурсов, федеральным законодательством (ст. 65 ВК РФ) введено понятие «водоохранная зона водного объекта» (ВОЗ) и разработан комплекс ограничений хозяйственной деятельности в пределах ВОЗ. Для рек и ручьев ширина водоохранной зоны устанавливается в зависимости от протяженности водотока. Использование неточной информации о протяженности водотока влечет за собой некорректное определение ширины ВОЗ и, как следствие, нарушение водоохранного законодательства.

В ряде случаев фактически бóльшая протяженность водных объектов относительно официальных данных определяет необходимость увеличения ширины ВОЗ и, как результат, – расширение территории, на которой, в соответствии с ВК РФ, должна ограничиваться хозяйственная деятельность. Для ручьев и мельчайших рек, длина которых согласно официальным источникам не превышает 10 км, требованиями п. 4 ст. 65 ВК РФ установлены водоохранные зоны шириной 50 м. Однако результаты промеров по спутниковым снимкам свидетельствуют о необходимости предусмотреть увеличение ширины водоохранной зоны некоторых водотоков Калининградской области до 100 м (табл. 3).

Таблица 3. Примеры необходимости увеличения ширины водоохранной зоны в соответствии с корректировкой реальной протяженности водотоков
Table 3. Examples of the need to increase the water protection zone width in accordance with the update of the watercourses actual length

Водоток	Протяженность, км		Водоохранная зона, м		Вероятная причина
	согласно официальным источникам	согласно результатам промеров по спутниковой карте	существующая	необходимая	
р. Буда (приток р. Полная)	9,2	11,0	50	100	Меандрирование
р. Канава Дубовая	9,0	10,6	50	100	Неточность измерения
р. Колечко (приток р. Гремячья)	9,0	10,5	50	100	Меандрирование
р. Кривая (приток р. Запрудная)	6,9	10,1	50	100	Меандрирование
р. Полная	8,8	10,4	50	100	Меандрирование

В то же время завышенные значения длин водотоков вызывают неоправданную жесткость ограничений хозяйственной деятельности либо сокраща-

ют возможности использования земель [15]. В частности, ряд самых малых рек Калининградской области, длина которых, согласно официальным источникам, составляет от 10 до 25 км, фактически оказались мельчайшими по результатам промеров, выполненных по спутниковым картам. Как показано в табл. 4, с учетом того, что их реальная длина в настоящий момент не превышает 10 км, ширина их водоохранных зон, в соответствии с положениями п. 4 ст. 65 ВК РФ, должна составлять не 100, а 50 м.

Таблица 4. Примеры возможности уменьшения ширины водоохранной зоны в соответствии с корректировкой реальной протяженности водотоков
Table 4. Examples of the possibility to reduce the water protection zone width in compliance with the update of the watercourses actual length

Водоток	Протяженность, км		Водоохранная зона, м		Вероятная причина
	согласно официальным источникам	согласно результатам промеров по спутниковой карте	существующая	необходимая	
р. Велийка	12,0	9,9	100	50	Неточность измерения
р. Гнилая	13,0	9,9	100	50	Причина неясна
р. Канава Шумная	12,0	9,8	100	50	Неточность измерения
р. Мельничная	10,0	9,8	100	50	Округление
р. Нерпа	13,9	9,0	100	50	Ошибка идентификации русла одноименных реки и канала, берущих начало в одной густой мелиоративной сети, но текущих в противоположных направлениях и относящихся к различным суббассейнам
р. Подлиповка	11,0	9,9	100	50	Возможна ошибка идентификации русла в верховьях
р. Рыбная	10,0	9,8	100	50	Округление
р. Старица	15,0	9,0	100	50	Причина неясна

Возможно, в отдельных случаях невольное завышение длины русел водотоков происходило за счет математического округления значений (например, разночтения по картам и в официальных источниках для р. Мельничной (приток кан. Западного) составляют 9,8 км и 10 км соответственно).

Неточности, обусловленные антропогенными изменениями конфигурации русел водных объектов

Хозяйственное освоение территории Калининградской области, в том числе активное дорожное строительство, реконструкция мелиоративной сети и пр., приводят к реконфигурации русел и изменению протяженности водотоков. В качестве примера можно привести реконструкцию русла канала ФР-17 (бассейн р. Прохладной) при сооружении новой ветки железной дороги (рис. 2).



Рис. 2. Пример изменения конфигурации русла в ходе хозяйственной деятельности.
Fig. 2. Example of a change in channel configuration due to economic activity.

В результате переноса участка русла канала изменилась не только его конфигурация, но и протяженность водотока – она увеличилась с 3,8 км до 4,1 км.

В ряде случаев [16–19] при увеличении пахотных площадей верховья мельчайших водотоков уничтожаются (рис. 3).



Рис. 3. Пример сокращения протяженности русла водотока в результате распашки земель.
Fig. 3. Example of reduction in the length of a watercourse as a result of land cultivation.

Иногда хозяйственная деятельность приводит не только к изменению конфигурации русел и протяженности водотоков, но и к принципиальным изменениям гидрографической сети региона и перенаправлению отдельных водотоков в другие водосборные бассейны. Например, целостность русла р. Нагорной (приток р. Инструч) была нарушена в верхнем течении, и ее бывшие верховья направили в руч. Малый (приток р. Тыльжа), одновременно заметно увеличив его длину, что хорошо видно на Топографической карте Калининградской области ГУГК СК-63 1955 М 1:25 000 и Подробной топографической карте Калининградской области 2001 М 1:25 000, а также на спутниковом снимке (рис. 4).

а *б*

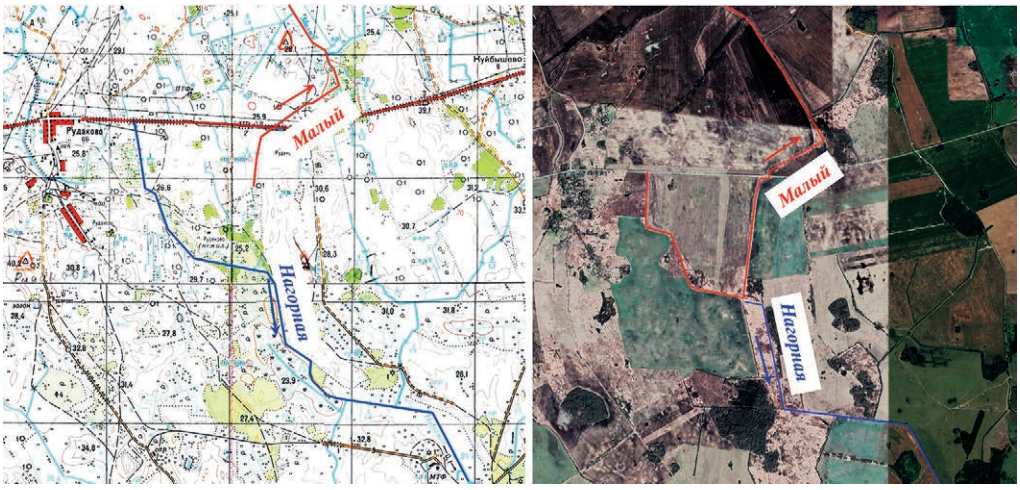


Рис. 4. Пример изменения (спрямления) русел и перераспределения стока верховьев р. Нагорной в руч. Малый: *а* – на топографической карте СК-63, *б* – на спутниковом снимке.
Fig. 4. Example of channel changing (rectification) and partial streamflow redistribution of the upper reaches of the Nagornaya River into the Maly stream: *a* is SK-63 topographic map, *б* is a satellite image.

Особенности гидронимов и их дублирование

Зачастую чрезвычайно сложная гидрографическая сеть Калининградской области, местами перегруженная мельчайшими водотоками, в т. ч. каналами мелиоративного и дренажного назначения, создает объективные трудности для правильной идентификации их русел. Например, для отдельных водотоков характерна двусточность, при которой река числится как единый водоток, и при распадении на рукава отдельный водный объект на карте и в документах не выделяют.

Так, согласно реестру географических названий, р. Канава Долгая является притоком первого порядка р. Преголя, но, согласно топографической карте Калининградской области (2001, М 1:25 000), течет одновременно в двух направлениях: южный рукав действительно впадает в р. Преголя, а северный –

в р. Славную (приток кан. Западного), т. е. фактически относится к Куршскому заливу. Западный участок («верховья») р. Болотница, которая, согласно Реестру географических названий, является притоком р. Дейма, на самом деле – приток второго порядка кан. Полесского.

Дублирование гидронимов также затрудняет работу с картами. Так, из данных табл. 5 следует, что на территории Калининградской области имеются две реки, носящие название Славная (одна является притоком кан. Западного, другая – притоком р. Зеленоградки, причем обе относятся к бассейну рек Куршского залива), еще две реки называются Мельничная (одна – приток кан. Западного, другая – впадает в Вислинский залив) и т. д.

Таблица 5. Примеры дублирования гидронимов в Калининградской области
Table 5. Examples of hydronyms duplication in Kaliningrad Region

Водоток	Речной бассейн	Местоположение устья
р. Гурьевка	Бассейн рек побережья Куршского залива	Куршский залив
	Бассейн р. Преголя	16,7 км по правому берегу р. Преголя
руч. Дальний	Бассейн р. Писса	оз. Виштынецкое
	Бассейн р. Преголя	15,5 км по левому берегу р. Преголя
р. Дубовка	Бассейн рек побережья Куршского залива	20,6 км по левому берегу р. Швента
	Бассейн р. Шешупе	52,3 км по левому берегу р. Шешупе
р. Завитая	Бассейн рек побережья Куршского залива	1,72 км по левому берегу р. Залесинка
	Бассейн р. Инструч	43,2 км по левому берегу р. Инструч
р. Запрудная	Бассейн р. Лава	13,6 км по левому берегу р. Стоговка
		39,8 км по левому берегу р. Лава

Как и в любом документе, в реестре зарегистрированных в АГКГН географических названий можно обнаружить ошибки, сделанные вследствие сложности прочтения топографических карт без использования спутниковых снимков, которые только и позволяют с достаточно высокой степенью достоверности определить как местонахождение устьев, так и реальную конфигурацию русел водотоков. Например, в соответствии с реестром, р. Дубовка (регистрационный номер 0633461) впадает в канаву Высоковку бассейна р. Преголи, а канава Короткая (регистрационный номер 0633647) – в р. Каменку бассейна р. Дейма, тогда как на самом деле оба водотока являются левобережными притоками первого порядка р. Швента, принадлежащей к бассейну побережья Куршского залива.

Терминологические разночтения в классификации водных объектов

В ходе исследований периодически возникают методологические сложности, связанные с типизацией водных объектов [20]. В частности, в отдельных документах[3] встречаются водные объекты, отнесенные к канавам (причем на топографических картах слово «канава» написано со строчной буквы, что, видимо, предполагает тип водного объекта). В то же время российские нормативные документы не предусматривают такой категории. Согласно ст. 5 п. 2 ВК РФ к водотокам относятся реки, ручьи, каналы; в ГОСТ 17.1.1.02-77 «Охрана природы. Гидросфера. Классификация водных объектов» виды водотоков включают реку, рукав, ручей, канал.

Вероятно, названия водотоков с первым словом «канава» сложились исторически, когда в прошлом канавой называли длинный, неглубокий и неширокий ров, например, Водоотводный (ранее Обводной) канал вдоль центральной излучины Москвы-реки[4,5,6]. Вместе с тем, в соответствии со ст. 1 ВК РФ, водным объектом называют природные или искусственные водоемы и водотоки, постоянное или временное сосредоточение вод в которых имеет характерные формы и признаки водного режима, т. е. в них наблюдается изменение во времени уровней, расхода и объема воды. Постепенно данное понятие трансформировалось в небольшое искусственное русло, часто временное, предназначенное для отвода по нему вод[7], т. е. по сути превратилось в своеобразный, редко применяемый и отсутствующий в правовом поле синоним термина «канал».

Не исключено, что в Калининградской области слово «канава» в названии ряда водотоков стало результатом дословного перевода с немецкого языка при переименовании водных объектов. Целый ряд наименований водотоков на довоенных немецких картах в своем названии содержал слово «грабен» (Graben), что в переводе на русский обозначает «канава». При этом в одних случаях немецкое название полностью переводилось на русский (Раушен-грабен – Канава Шумная, Руссен-грабен – Канава Русская); в других случаях русские названия, вероятно, давались по созвучию (Штрадик-грабен – Канава Страдная, Шиллупис-грабен – Канава Шиловка).

Не менее важной и сложной проблемой является отнесение водотока к категориям рек, ручьев или каналов, что часто вызывает разночтения среди водопользователей, т. к. это существенно влияет на ширину водоохранной зоны. Неверная идентификация водного объекта может приводить к определению

[3] Реестр зарегистрированных в АГКГН географических названий объектов на 15.12.2022 Калининградская область, Топографическая карта Калининградской области ГУГК СК-63 1955 М 1:25 000, Подробная топографическая карта Калининградской области 2001 М 1:25 000.
[4] Толковый словарь русского языка: в 4 т. Т. 1: А – Кюрины / под ред. Д.Н. Ушакова. М.: Сов. энцикл.; ОГИЗ, 1935. 1567 с.
[5] Даль В.И. Толковый словарь живого великорусского языка. [Электр. ресурс]. URL: https://slovardalja.net/ (дата обращения: 16.10.2024).
[6] Толковый словарь русского языка. С.И. Ожегов, Н.Ю. Шведова. [Электр. ресурс]. URL: https://ozhegov.info/slovar/ (дата обращения: 16.10.2024).
[7] Лопух П.С., Токарчук О.В. Гидрология. Словарь терминов и понятий. Минск: БГУ, 2021. 41 с.

границ водоохранных зон в уменьшенном размере и, в конечном итоге, способствовать возникновению экологических проблем на территории водосбора.

Ситуацию усугубляет отсутствие четких формулировок данных видов водотоков в действующих российских нормативных документах. ГОСТ 19179-73[8] приводит только определение реки как «водотока значительных размеров, питающегося атмосферными осадками со своего водосбора и имеющего четко выраженное русло», не оговаривая при этом особенностей его происхождения или морфометрических характеристик.

Если обратиться к БРЭ[9], в ней даны определения соответствующих водотоков лишь в самой общей форме, но они позволяют выделить каналы как водотоки искусственного происхождения, как указано в табл. 6.

Таблица 6. Определение основных водотоков согласно Большой российской энциклопедии
Table 6. Definitions of main watercourses types pursuant to the Great Russian Encyclopedia

Вид водотока	Определение
Реки	Водные потоки, текущие в естественных руслах и питающиеся за счет поверхностного и подземного стока с их бассейнов
Канал	Искусственное русло (водовод) правильной формы с безнапорным движением воды, устроенное в грунте. Канал (в гидротехнике) сооружают в открытой выемке или в насыпи (при пересечении балок, оврагов и др.), иногда – в полувыемке-полунасыпи
Ручей	Небольшой постоянный или временный водный поток, образованный отеканием по руслу талых или дождевых вод или в результате выхода на земную поверхность подземных вод

Определенных критериев для отличия ручья от реки не существует, обычно[10] к ручьям относят водотоки длиной 3–5 км и/или с площадью водосборного бассейна менее 50 км^2. Другие авторы называют ручьями водотоки протяженностью до 10 км, имеющие неустойчивый режим[11]. Ручьи характеризуются извилистым руслом, узкой поймой, слабо выраженной долиной[12]. Часто русла ручьев расположены на дне оврагов или балок, а их гидрологический режим в большей степени, чем у рек, определяется влиянием окружающей местности.

По мнению авторов, отдельные водотоки на территории Калининградской области, которые в ГВР числятся как каналы, на самом деле с гидрологической

[8] ГОСТ 19179-73 «Гидрология суши. Термины и определения». М.: Издательство стандартов, 1988. 36 с.
[9] Большая российская энциклопедия 2004–2017. {Электр. ресурс]. URL: https://old.bigenc.ru/ (дата обращения: 16.10.2024).
[10] Михайлов В.Н., Добролюбов С.А. Гидрология: учебник для вузов. М.; Берлин: Директ-Медиа, 2017. 752 с. ISBN 978-5-4475-4463-8.
[11] Каледа И.А., Денисова Н.А., Круглов Л.В. Гидрология и гидротехнические сооружения: учеб. пособие / под общ. ред. Ю.П. Скачкова. Пенза: ПГУАС, 2014. 140 с.
[12] Географический энциклопедический словарь. Понятия и термины / ред.: Э.Б. Алаев и др. Москва: Советская энциклопедия, 1988 г. 456 с.

точки зрения правильнее относить к категории рек или ручьев в связи с тем, что их русла имеют признаки естественного происхождения: они непрямолинейны, не изломаны в плане и не спрямлены, в отличие от типичной конфигурации каналов (рис. 5). Кроме того, уклон их русла обычно довольно большой по сравнению с каналами.



Рис. 5. Пример каналов с руслами естественного происхождения.
Fig. 6. Example of channels with natural streambeds.

Ширина водоохранной зоны каналов, в отличие от ВОЗ рек и ручьев, не зависит от их протяженности, а согласно ВК РФ приравнивается к ширине полосы отвода канала (техническая характеристика – полоса ухода за гидротехническим сооружением). Как показывает практика, для большинства каналов устанавливается ширина полосы отвода (а следовательно, и ширина ВОЗ) всего 5 м, в то время как даже для мельчайших рек и ручьев протяженностью до 10 км ширина ВОЗ составляет 50 м. Уточнение ширины ВОЗ способствует улучшению условий для поддержания биологического разнообразия водного объекта [21].

Таким образом, определение типа естественного водотока термином «канал» приводит к многократному на всем его протяжении сокращению ширины полосы суши (ВОЗ), на которой предусмотрен ряд ограничений хозяйственной деятельности в целях предотвращения ухудшения состояния водного объекта, в т. ч. и как среды обитания водных биологических ресурсов.

Выводы

Естественные изменения конфигурации русел водных объектов, такие как меандрирование, наряду с антропогенными преобразованиями, включая реконструкцию и распашку земель, приводят к расхождениям между официальными данными о протяженности водотоков и результатами измерений по спутниковым снимкам, а также к изменениям их конфигурации и перераспределению стока. Это снижает точность определения водоохранных зон, затрудняет соблюдение законодательства и требует регулярного обновления кадастровых данных для предотвращения экологических нарушений.

Дублирование гидронимов и трудность идентификации русел в густой гидрографической сети региона усложняют картографирование и управление водными ресурсами, подчеркивая необходимость интеграции спутниковых данных для верификации реестров. Терминологические разночтения в классификации водных объектов, включая отнесение естественных водотоков к каналам, приводят к занижению ширины водоохранных зон и потенциальному негативному воздействию на биоразнообразие, что диктует необходимость уточнения критериев типизации на основе морфометрических признаков.

Авторы считают необходимым привести типизацию водных объектов к стандартному виду, отказаться от не предусмотренных российскими нормативными актами типов объектов («канав») и проработать правила таксации водотоков по категориям «ручей» и «канал», основываясь на объективных признаках и не допуская их иного толкования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представляется насущной необходимостью создание актуального и общедоступного кадастра водных объектов Калининградской области. Содержащиеся в нем сведения окажут влияние на научно обоснованное установление границ водоохранных зон водотоков, подлежащих использованию в хозяйственной деятельности.

Разрабатываемый авторами кадастр будет включать следующий набор сведений о каждом водном объекте:

– наименование водного объекта;

– бассейн и (если релевантно) подбассейн, к которому он принадлежит, тип водного объекта;

– другие варианты названий;

– местоположение устья, включая его географические координаты и словесное описание;

– протяженность водотока общая и в пределах Калининградской области (для трансграничных водотоков);

– примечания.

Таким образом, подобный документ предоставит специалистам, занятым научно-исследовательской, проектной, организационно-управленческой, экспертно-аналитической, педагогической и культурно-просветительской деятельностью, мощный аналитический инструмент для выполнения разнообразных работ на водных объектах.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов с кем-либо.

CONFLICT OF INTEREST

There is no conflict of interest.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алдушин А.В., Алдушина Ю.К. Характеристика нерестового хода рыб рек бассейна Вислинского залива на примере реки Прохладной // Известия КГТУ. 2024. № 72. С. 11–25. https://doi.org/10.46845/1997-3071-2024-72-11-25
2. Алдушин А.В., Новожилов О.А. Гидроакустическая оценка условий нерестовых миграций рыб на примере реки Прохладной Калининградской области // Рыбное хозяйство. 2023. № 6. С. 110–113. https://doi.org/10.37663/0131-6184-2023-6-110-114
3. Rodell M., Famiglietti J., Wiese D., Reager J.T., Beaudoing H., Landerer F., Lo M.-H. Emerging trends in global freshwater availability // Nature. 2018. Vol. 557. P. 651–659. https://doi.org/10.1038/s41586-018-0123-1
4. Бударагина Л.В., Тищенко С.В. Становление и развитие государственного водного реестра в России // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Право. 2016. № 4 (27). С. 208–213. EDN: XAGXON.
5. Магрицкий Д.В. Проблемы обеспечения гидрологической информацией научно-прикладной деятельности и предложения по их решению на примере Северо-Востока АТР // География: развитие науки и образования : сб. ст. по материалам ежегод. междунар. науч.-практ. конф. LXXIV Герценовские чтения, Санкт-Петербург, 21–23 апр. 2021 г. / отв. ред. С.И. Богданов, Д.А. Субетто, А.Н. Паранина. Т. 1. Санкт-Петербург : РГПУ им. А. И. Герцена, 2021. С. 123–127. EDN: YRRUZK.
6. Чилингер Л.Н. Разработка методики установления границ зон с особым водным режимом: автореф. дис. … канд. техн. наук : 25.00.26. Новосибирск, 2020. 20 с.
7. Stutter M., Baggaley N., Ó Huallacháin D., Wang C. The utility of spatial data to delineate river riparian functions and management zones: A review // Science of the Total Environment. 2021. Vol. 757. Article 143982. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143982
8. Buttle J. Rethinking the donut: The case for hydrologically relevant buffer zones // Hydrological Processes. 2002. Vol. 16. P. 3093–3096. https://doi.org/10.1002/hyp.5066
9. Жерелина И.В., Жоров В.А., Постнова И.С., Поломошнова Н.В., Брютова О.В. Опыт и проблемы применения на практике сведений, включенных в государственный водный реестр // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 5. С. 5–20. https://doi.org/10.35567/19994508-2024-5-5-20
10. Janczewska N., Matysik M., Absalon D. Verification of the consistency of surface water spatial databases and their importance for water management in Poland // Journal of Hydrology: Regional Studies. 2023. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101486
11. Pekel J.-F., Cottam A., Gorelick N., Belward A. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes // Nature. 2016. Vol. 540. https://doi.org/10.1038/nature20584
12. Musa Z., Popescu I., Mynett A. A review of applications of satellite SAR, optical, altimetry and DEM data for surface water modelling, mapping and parameter estimation // Hydrology and Earth System Sciences. 2015. Vol. 19. P. 3755–3769. https://doi.org/10.5194/hessd-12-4857-2015
13. Mivšek E., Žvokelj B., Kete P., Globokar T. Actual use of water(side) land and land cadaster // Geodetski Vestnik. 2012. Vol. 56. P. 663–673. https://doi.org/10.15292/GEODETSKI-VESTNIK.2012.04.663-673
14. Janczewska N., Matysik M., Absalon D., Bieda A. Surface Flowing Waters Covered Areas From the Cadastre Database as a Source for the National Spatial Water Database – Case Study // Transactions in GIS. 2025. Vol. 29. https://doi.org/10.1111/tgis.70055
15. Гаевская Е.Ю., Вагина О.В. К вопросу об установлении водоохранных зон и прибрежных защитных полос водных объектов // Бизнес, менеджмент и право. 2020. № 4 (48). С. 34–37. EDN: IPJNHF.

16. Golosov V., Panin A. Century-scale stream network dynamics in the Russian Plain in response to climate and land use change // Catena. 2006. Vol. 66. P. 74–92. https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.07.011
17. Riley W., Potter E., Biggs J., Collins A., Jarvie H., Jones I., Kelly-Quinn M., Ormerod S., Sear D., Wilby R., Broadmeadow S., Brown C., Chanin P., Copp G., Cowx I., Grogan A., Hornby D., Huggett D., Kelly M., Naura M., Newman J., Siriwardena G. Small Water Bodies in Great Britain and Ireland: Ecosystem function, human-generated degradation, and options for restorative action // Science of the Total Environment. 2018. Vol. 645. P. 1598–1616. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.243
18. Julian J., Wilgruber N., De Beurs K., Mayer P., Jawarneh R. Long-term impacts of land cover changes on stream channel loss // Science of the Total Environment. 2015. Vol. 537. P. 399–410. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.07.147
19. Roy S., Sahu A. Effect of land cover on channel form adjustment of headwater streams in a lateritic belt of West Bengal (India) // International Soil and Water Conservation Research. 2016. Vol. 4. P. 267–277. https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2016.09.002
20. Кутявина Т.И., Ашихмина Т.Я. Современное состояние и проблемы мониторинга поверхностных водных объектов России (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 2. С. 13–21. https://doi.org/10.25750/1995-4301-2021-2-013-021
21. Arif M., Tahir M., Jie Z., Changxiao L. Impacts of riparian width and stream channel width on ecological networks in main waterways and tributaries // Science of the Total Environment. 2021. Vol. 792. Article 148457. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148457

REFERENCES

1. Aldushin A.V., Aldushina Y.K. Characteristics of the Vislin Bay basin rivers' fish spawning run with the Prokhladnaya River as an example. *Newsletters of Kaliningrad state Technical University*. 2024. No. 72. P. 11–25. https://doi.org/10.46845/1997-3071-2024-72-11-25
2. Aldushin A.V., Novozhilov O.A. Hydro/acustic assessment of the fish spawning migration conditions with the Kaliningrad Region Prokhladnaya River as an example. *Fishery Sector*. 2023. No. 6. P. 110–113. https://doi.org/10.37663/0131-6184-2023-6-110-114
3. Rodell M., Famiglietti J., Wiese D., Reager J.T., Beaudoing H., Landerer F., Lo M.-H. Emerging trends in global freshwater availability. *Nature.* 2018. Vol. 557. P. 651–659. https://doi.org/10.1038/s41586-018-0123-1
4. Budargina L.V., Tishchenko S.V. Formation and development of the State Water Register in Russia. *Newsletters of Voronezh State University*. Series: Law. 2016. No. 4 (27). P. 208–213. EDN: XAGXON.
5. Magritskiy D.V. Problems of providing adequate hydrological information for applied science activities and proposals of their solution with ATR Northeast as an example. Geography: development of science and education: proceedings of the annual international scientific/practical conference. LXXIV Herzen Readings, Saint-Petersburg, April 21–23, 2021. Edited by S.I. Bogdanov, D.A. Subetto, A.N. Paranin. Vol. 1. Saint-Petersburg: A.I. Herzen Russian State Pedagogical University, 2021. P. 123–127. EDN: YRRUZK.
6. Chilinger L.N. Development of the zones of special water regime delimitation methods : abstract of the technical science candidate thesis : 25.00.26. Novosibirsk, 2020. 20 p.
7. Stutter M., Baggaley N., Ó Huallacháin D., Wang C. The utility of spatial data to delineate river riparian functions and management zones: A review. *Science of the Total Environment.* 2021. Vol. 757. Article 143982. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143982
8. Buttle J. Rethinking the donut: The case for hydrologically relevant buffer zones. *Hydrological Processes.* 2002. Vol. 16. P. 3093–3096. https://doi.org/10.1002/hyp.5066
9. Zherelina I.V., Zhorov V.A., Posnova I.S., Polomoshnova N.V., Bryutova O.V. Experience and problems concerning practical application of the date included into State Water Register. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management.* 2024. No. 5. P. 5–20. https://doi.org/10.35567/19994508-2024-5-5-20

10. Janczewska N., Matysik M., Absalon D. Verification of the consistency of surface water spatial databases and their importance for water management in Poland. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 2023. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101486
11. Pekel J.-F., Cottam A., Gorelick N., Belward A. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature.* 2016. Vol. 540. https://doi.org/10.1038/nature20584
12. Musa Z., Popescu I., Mynett A. A review of applications of satellite SAR, optical, altimetry and DEM data for surface water modelling, mapping and parameter estimation. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2015. Vol. 19. P. 3755–3769. https://doi.org/10.5194/hessd-12-4857-2015
13. Mivšek E., Žvokelj B., Kete P., Globokar T. Actual use of water(side) land and land cadaster. *Geodetski Vestnik.* 2012. Vol. 56. P. 663–673. https://doi.org/10.15292/GEODETSKI-VESTNIK.2012.04.663-673
14. Janczewska N., Matysik M., Absalon D., Bieda A. Surface Flowing Waters Covered Areas From the Cadaster Database as a Source for the National Spatial Water Database – Case Study. *Transactions in GIS*. 2025. Vol. 29. https://doi.org/10.1111/tgis.70055
15. Gayevskaya E.Y., Vagina O.V. On the issue of the water bodies water-protection zones and bank-protection stripes establishment. *Business, management, and law*. 2020. No. 4 (48). P. 34–37. EDN: IPJNHF.
16. Golosov V., Panin A. Century-scale stream network dynamics in the Russian Plain in response to climate and land use change. *Catena.* 2006. Vol. 66. P. 74–92. https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.07.011
17. Riley W., Potter E., Biggs J., Collins A., Jarvie H., Jones I., Kelly-Quinn M., Ormerod S., Sear D., Wilby R., Broadmeadow S., Brown C., Chanin P., Copp G., Cowx I., Grogan A., Hornby D., Huggett D., Kelly M., Naura M., Newman J., Siriwardena G. Small Water Bodies in Great Britain and Ireland: Ecosystem function, human-generated degradation, and options for restorative action. *Science of the Total Environment*. 2018. Vol. 645. P. 1598–1616. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.243
18. Julian J., Wilgruber N., De Beurs K., Mayer P., Jawarneh R. Long-term impacts of land cover changes on stream channel loss. *Science of the Total Environment*. 2015. Vol. 537. P. 399–410. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.07.147
19. Roy S., Sahu A. Effect of land cover on channel form adjustment of headwater streams in a lateritic belt of West Bengal (India). *International Soil and Water Conservation Research.* 2016. Vol. 4. P. 267–277. https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2016.09.002
20. Kutyavina T.I., Ashikhmina T.Y. Current state and problems of the Russian surface water bodies monitoring (review). *Theoretical and applied ecology*. 2021. No. 2. P. 13–21. https://doi.org/10.25750/1995-4301-2021-2-013-021
21. Arif M., Tahir M., Jie Z., Changxiao L. Impacts of riparian width and stream channel width on ecological networks in main waterways and tributaries. *Science of the Total Environment.* 2021. Vol. 792. Article 148457. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148457

Сведения об авторах:

Цупикова Надежда Александровна, канд. геол.-минерал. наук, доцент, Калининградский государственный технический университет, 236022, Россия, г. Калининград, Советский проспект, 1; https://orcid.org/0009-0006-9823-5810; e-mail: tsoupikova@klgtu.ru

Федоров Леонид Станиславович, канд. биол. наук, доцент, Калининградский государственный технический университет, 236022, Россия, г. Калининград, Советский проспект, 1; https://orcid.org/0009-0001-0092-8939; e-mail: leonid.fedorov@klgtu.ru

About the authors:

Nadezhda A. Tsupikova, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Associate Professor, Kaliningrad state technical university, Russia, 236022, Kaliningrad, Sovetsky Prospekt. 1; https://orcid.org/0009-0006-9823-5810; e-mail: tsoupikova@klgtu.ru

Leonid S. Fedorov, Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Kaliningrad state technical university, Russia, 236022, Kaliningrad, Sovetsky Prospekt 1; https://orcid.org/0009-0001-0092-8939; e-mail: leonid.fedorov@klgtu.ru

Поступила в редакцию / Received 09.10.2025.
Поступила после рецензирования / Revised 07.11.2025.
Принята к публикации / Accepted 11.11.2025.

Указатель статей, опубликованных в журнале «Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление» в 2025 году

№ 1

1. Филимонов В.Ю., Ловцкая О.В. Полуэмпирический метод расчета диффузного стока консервативных загрязнителей на участках малых равнинных рек. Сообщение 1. Восстановление полного массового расхода загрязнителей // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 1. С. 5–23. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-1-5-23; EDN: BBABKI

Filimonov V.Y., Lovtskaya O.V. Semi-empirical method for calculating diffuse runoff of conservative pollutants in small rivers: 1. Method for reconstructing the total mass flow rate. Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management. 2025. No. 1. P. 5–23. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-1-5-23; EDN: BBABKI

АННОТАЦИЯ

Качество речной воды является важнейшим фактором обеспечения экологической безопасности и рационального природопользования. Диффузионный сток загрязнителей рек представляет наибольшую опасность, поскольку является неконтролируемым и нерегулируемым. В представленной работе предложен метод расчета полного массового расхода консервативных загрязнителей, поступающих в водоток с участка водосбора. На основе интегрального представления стационарного одномерного уравнения переноса загрязнителя предложен метод расчета пространственного распределения полного массового расхода консервативных загрязняющих веществ. Применение метода нелинейной глобальной оптимизации позволило определить как значение полного массового расхода загрязняющего вещества на исследуемой территории, так и величину числа Пекле, входящего в уравнение адвекции-диффузии. На основе метода Монте-Карло показана устойчивость полученных результатов относительно случайных отклонений значений концентрации, когда неизвестные параметры определяются как средние из тысячи возможных реализаций.

2. Болгов М.В. О функции распределения наполнений и сбросов при расчетах регулирования стока методом стохастического динамического программирования // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 1. С. 24–39. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-1-24-39; EDN: DHBBEB

Bolgov M.V. On the function of fillings and discharges distribution in calculations of flow regulation by stochastic dynamic programming. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2025. No. 1. P. 24–39. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-1-24-39; EDN: DHBBEB

АННОТАЦИЯ

В статье проанализирована проблема управления водными ресурсами в условиях нарушения стационарности временных рядов стока. Предложено рассматривать нарушенные гидрологические ряды в виде набора условно-стационарных периодов. Поиск опти-

мального управления для каждого периода осуществляется методом стохастического динамического программирования. Для получения функции распределения наполнений и сбросов предложен итерационный алгоритм решения системы уравнений, связывающих искомые вероятности для всех расчетных интервалов. Метод реализован на примере управления водными ресурсами Цимлянского водохранилища и позволяет рассчитывать характеристики отдачи водохранилища при задаваемых сценарным образом значениях параметров притока для будущих климатических ситуаций.

3. Артыкова Ф.Я., Калабаев С.Б. Долгосрочные фазовые изменения озер Южного Приаралья // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 1. С. 40–56. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-1-40-56; EDN: FMYLKP

Artykova F.Y., Kalabaev S.B. Long term phase changes in the South Aral Sea zone lakes. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies. Management.* 2025. No. 1. P. 40–56. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-1-40-56; EDN: FMYLKP

АННОТАЦИЯ

Подробное изучение гидрологического режима озер Южного Приаралья является актуальной задачей, однако следует отметить, что этот вопрос осложняется отсутствием систематических наблюдений. В настоящее время по космическим снимкам можно получить информацию о водных объектах в труднодоступных районах. В исследовании выполнено картирование шести озер, расположенных на территории Южного Приаралья. В работе использованы гидрологические расчеты, методы дистанционного зондирования Земли, методы water index для дешифрирования спутниковых снимков. Проанализированы методы декодирования космических изображений NDWI, MNDWI для определения площади поверхности озер. Расчеты показали сокращение площади озер от 28,92 % до 93,3 %. В ходе исследований установлено, что озера Муйнак, Сарибас, Междуручье и Даукуль трансформировались в сезонные озера, а озера Судочье, Джылтырбас пока остаются постоянными.

4. Землянскова А.А., Шихов А.Н., Макарьева О.М., Никитина П.А. Закономерности распространения наледей подземных вод, их связь с формированием речного стока и опасных явлений в Магаданской области // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. №. С. 57–75. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-1-57-75; EDN: HCRGCT

Zemlianskova A.A., Shikhov A.N., Makarieva O.M., Nikitina P.A. The patterns of spring aufeis distribution, their relation with river runoff formation and hazardous phenomena in the Magadan region. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2025. No. 1. P. 57–75. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-1-57-75; EDN: HCRGCT

АННОТАЦИЯ

В связи с активным освоением Магаданской области возникла потребность региональной оценки современного состояния и развития наледных процессов, в т. ч. их влияния на гидрологический режим рек и опасные природные явления. На основе анализа спутниковых снимков Landsat за период 2013–2019 гг. оценено количество и общая площадь наледей подземных вод на территории Магаданской области. Разработан актуаль-

ный каталог наледей подземных вод Магаданской области. Проведен расчет, картирование и анализ закономерностей формирования наледных характеристик. Разработаны карты наледности Магаданской области, проведена оценка вклада наледного стока в сток рек частных водосборов р. Колымы и бассейнов рек Охотского моря в различные фазы гидрологического режима.

5. Волчек А.А., Дашкевич Д.Н., Кухаревич М.Ф., Парфомук С.И., Сидак С.В., Шешко Н.Н., Шпендик Н.Н. Оценка допустимого отбора речных вод пойменными рыбхозами Белорусского Полесья // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 1. С. 76–99. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-1-76-99; EDN: JXWXYZ

Volchek A.A., Dashkevich D.N., Kukharevich M.F., Parfomuk S.I., Sidak S.V., Sheshko N.N., Shpendik N.N. Assessment of permissible withdrawal of river waters by floodplain fish farms of the Belarusian Polesie. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2025. No. 1. P. 76–99. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-1-76-99; EDN: JXWXYZ

АННОТАЦИЯ

В статье представлены результаты комплексного исследования влияния рыбхозов, расположенных в поймах рек Белорусского Полесья, на речной сток. Выполнены расчеты гидрологических характеристик для створов выше и ниже участков изъятия воды, построены поперечные профили. Определены минимальные среднемесячные расходы воды 95 % вероятности превышения и экологический сток с учетом внутригодового распределения стока различной обеспеченности. Построены математические модели для участков рек, позволяющие определить скорости течения и расходы воды в зависимости от средней глубины воды в створе, а также объемы допустимого изъятия воды из рек, используемых для нужд рыбхозов при обеспечении условия сохранения экологического стока.

6. Д.Г. Баубекова, Е.В. Колмыков, Е.М. Мелик-Багдасаров. Динамика микробных сообществ в условиях активной хозяйственной деятельности в акватории Северного Каспия // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 1. С. 100–117. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-1-100-117; EDN: NJMDPU

Baubekova D.G., Kolmykov E.V., Melik-Bagdasarov E.M. Dynamics of microbial communities under conditions of active economic activity in the water area of the North Caspian. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2025. No. 1. P. 100–117. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-1-100-117; EDN: NJMDPU

АННОТАЦИЯ

Микробные сообщества относятся к постоянным компонентам водных биоценозов любого водоема. Обладая широким диапазоном адаптационных возможностей, бактериоценозы способны быстро реагировать на смену экологических условий, в полной мере отражая функционирование экосистемы населяемого ими водоема. Представлены данные по динамике микробных сообществ в условиях активной хозяйственной деятельности в акватории Северного Каспия в рамках экологического мониторинга.

7. Елисеев А.А., Силкин К.Ю. Экологическое состояние Воронежского водохранилища (обзор научных публикаций) // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 1. С. 118–130. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-1-118-130; EDN: NWNWDS

E**liseev A.A., Silkin K.Y.** Ecological status of Voronezh reservoir (review of scientific publications). *Water Management of Russia: Problems, Technologies, Management.* 2025. No. 1. P. 118–130. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-1-118-130; EDN: NWNWDS

АННОТАЦИЯ

В статье представлен обзор научных публикаций об экологических проблемах Воронежского водохранилища. Авторами предпринята попытка проанализировать публикации, основанные на результатах научных исследований водоема, а также предложить варианты решения экологических проблем. Данный обзор может быть полезным не только при планировании дальнейших работ по изучению состояния Воронежского водохранилища, но и при подготовке практических мероприятий по его улучшению.

№ 2

8. Филимонов В.Ю., Ловцкая О.В. Полуэмпирический метод расчета диффузного стока консервативных загрязнителей на участках малых равнинных рек. Сообщение 2. Влияние числа измерений на результаты расчета обратной задачи // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 2. С. 5–18. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-2-5-18; EDN: SGQHKD

Filimonov V.Y., Lovtskaya O.V. Semi-empirical method for calculating diffuse runoff of conservative pollutants in small rivers: 2. Influence of the number of measurements on the results of the inverse problem calculation. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management.* 2025 No. 2. P. 5–18. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-2-5-18; EDN: SGQHKD

АННОТАЦИЯ

При решении обратных задач восстановления пространственного распределения расходных характеристик диффузного стока загрязнителей на участках малых рек неизбежно возникает вопрос, связанный с необходимым числом расчетных точек. Однако в настоящее время влияние числа расчетных точек на устойчивость решения обратных задач для уравнения переноса консервативных загрязнителей мало изучено, хотя этот вопрос является ключевым при сопоставлении данных математического расчета и натурных измерений. В представленной работе проведен анализ влияния числа измерений концентрации растворенного загрязнителя на величину его полного массового расхода в процессе диффузного стока на участках малых рек. В ходе реализации численного эксперимента для заданного набора тестовых функций установлено, что устойчивые значения искомых параметров (полный массовый расход и число Пекле) зависят от количества расчетных точек, определяющих пространственное распределение концентрации загрязнителя на исследуемом участке. Проанализирована зависимость значений искомых параметров от числа расчетных точек для результатов натурных измерений.

9. Лавров С.А. Влияние климатических изменений на влажность почвы // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 2. С. 19–39. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-2-19-39; EDN: WDLJOS

Lavrov S.A. The effect of climate change on soil moisture. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management.* 2025. No. 2. P. 19–39. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-2-19-39; EDN: WDLJOS

АННОТАЦИЯ

Влажность почв является важнейшей гидрофизической характеристикой при описании и расчетах инфильтрационных потерь дождевого и весеннего стока, испарения. Динамика увлажнения почв неразрывно связана с изменением климатических характеристик, одновременно влажность является значимым компонентом климата, поскольку она определяет исходящие конвективные потоки тепла и влаги с поверхности суши в атмосферу, формирующие климат планеты. В ходе анализа экспериментальных данных установлено, что в период 1960–1990 гг. наблюдался повсеместный рост влажности почв на европейской части России как в летний, так и в осенний сезоны. В последующем, вплоть до настоящего времени, положительные тренды изменчивости влагозапасов сменились отрицательными или их величина значительно упала.

10. Зуев В.В., Уйманова В.А., Вершинин Д.А., Павлинский А.В. Оценка изменений характеристик ледового режима Нижнего Енисея в современных климатических условиях // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 2. С. 40–51. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-2-40-51; EDN: XLKNIM

Zuev V.V., Uymanova V.A., Vershinin D.A., Pavlinsky A.V. Assessment of changes in the characteristics of the ice regime of the Lower Yenisei in contemporary climatic conditions. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management.* 2025. No. 2. P. 40–51. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-2-40-51; EDN: XLKNIM

АННОТАЦИЯ

Нижний Енисей является частью территории Российской Арктики, которая в современных климатических условиях становится все более чувствительной к их изменениям. В статье отражен методический подход в выделении трендовых составляющих за периоды наблюдений в 1938–1975 гг. и 1976–2021 гг., а также выявлено направление изменения продолжительности ледовых явлений и ледостава с проверкой уравнения тренда на статистическую однородность. Установлено, что ледовые явления после 1975 г. стали наступать позже и заканчиваться раньше в среднем на 2–3 дня; ледостав стал наступать позже на 3–5 дней, разрушаться раньше на неделю. Анализ максимальных уровней воды в фазу вскрытия выявил, что эти показатели имеют тренд на снижение. Анализ изменчивости продолжительности ледовых явлений и ледостава обнаружил, что обе характеристики уменьшаются после 1975 г.

11. Дубов Н.Д., Розенталь О.М. Статистические характеристики грунтовых вод Теплостанской возвышенности Москвы // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 2. С. 52–71. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-2-52-71; EDN: ZQOSDC

Dubov N.D., Rozental O.M. Statistical characteristics of groundwater in the Teplostanskaya Upland of Moscow. *Water Management of Russia: Problems, Technol-*

ogies, Management. 2025. No. 2. P. 52–71. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-2-52-71; EDN: ZQOSDC.

АННОТАЦИЯ

В статье представлены результаты геостатистического исследования грунтовых вод Юго-Западного административного округа Москвы, проведенного в целях выявления возможностей и рисков подземного водопользования. Обнаружена высокая парная корреляция (r = 0,94) концентрации ряда загрязняющих веществ, например Al с Mn, NO_3. Причиной этого предположительно являются совместные сбросы указанных веществ промышленными предприятиями Москвы с одновременным проникновением сточных вод в грунт, сочетающимся с их массопереносом. Исследовано образование гидрохимических «фаций» рассматриваемого участка Теплостанской возвышенности в разные годы: наблюдение за темпом их деформации позволило получить картографическую информацию о формировании качества грунтовых вод и возможности их хозяйственного использования.

12. Жуков И.А., Айбулатов Д.Н. Изменения годового модуля стока малых рек российской части бассейна реки Урал // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 2. С. 72–89. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-2-72–89; EDN: OTQQSR

Zhukov I.A., Aybulatov D.N. Changes in the annual runoff module of small rivers in the Russian part of the Ural River basin. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2025. No. 2. P. 72–89. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-2-72–89; EDN: OTQQSR

АННОТАЦИЯ

В настоящее время основные исследования модуля стока и динамики его изменений ведутся на средних и больших реках российской части бассейна реки Урал, изученность же модуля стока малых рек этого бассейна крайне мала. Учитывая возрастающее ухудшение экологического состояния рек, влияющее в первую очередь на годовой модуль стока воды, именно на малых реках изучение процессов его формирования, изменчивости и внутригодовых изменений становится важнейшей задачей гидрологии. Рассмотрены изменения модуля стока воды малых рек в бассейне реки Урал при практически полном отсутствии изученности его изменений. Проанализированы характеристики модуля стока малых рек до и после начала глобальных гидрологических изменений. Выявлены пространственно-временные тенденции в изменении модуля стока воды малых рек бассейна Урала.

13. Бондарев В.П., Завадский А.С., Чаленко В.А. Экспертное и общественное мнение по оценке гидрологической ситуации в рамках Якутского водохозяйственного узла // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 2. С. 90–106. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-2-90-106; EDN: XFFMVA

Bondarev V.P., Zavadskiy A.S., Chalenko V.A. Expert and social assessmentof hydrological situation within the framework of Yakut water-economic hub. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2025. No. 2. P. 90–106. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-2-90-106; EDN: XFFMVA

АННОТАЦИЯ

Острота проблем управления гидрологическими и русловыми процессами и оценки социальных последствий водопользования на реках неуклонно возрастает. Для выявления экспертного и общественного мнения относительно управления гидрологическими и русловыми процессами проведен опрос ведущих специалистов данной сферы, а также интервью местного населения, попадающего под воздействие этих негативных процессов. Изучение экспертного мнения позволило выявить основные болевые точки, связанные с негативным воздействием гидрологических и русловых процессов.

№ 3

14. Католиков В.М., Католикова Н.И., Петровская О.А. Методика оценки потенциальной опасности плановых деформаций речных русел // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 3. С. 7–20. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-3-7-20; EDN: ONCNPW

Katolikov V.M., Katolikova N.I., Petrovskaya O.A. Methodology for assessing the potential danger of horizontal deformations of river channels. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management.* 2025. No. 3. P. 7–20. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-3-7-20; EDN: ONCNPW

АННОТАЦИЯ

В данной работе предложена методика экспертной оценки опасности горизонтальных деформаций берегов речных русел вблизи населенных пунктов, обусловленных естественными русловыми процессами и не связанных с влиянием каких-либо гидротехнических сооружений. Методика позволяет на качественном уровне оценить степень опасности размыва речных берегов на основе установленного по космическим снимкам типа руслового процесса и морфологической принадлежности участка деформаций.

15. Орлова А.Ю., Богомолов А.В., Лучников А.И., Ляхин Ю.С., Антонова М.В. Особенности формирования качества воды Аргазинского водохранилища в периоды низких уровней // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 3. С. 21–34. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-3-21-34; EDN: OTQQSR

Orlova A.Y., Bogomolov A.V., Luchnikov A.I., Lyakhin Y.S., Antonova M.V. Features of the formation of the Argazinsky reservoir water quality during the low-level periods. *Water Management of Russia: Problems, Technologies, Management.* 2025. No. 3. P. 21–34. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-3-21-34; EDN: OTQQSR

АННОТАЦИЯ

На примере Аргазинского водохранилища рассмотрены экологические последствия снижения уровня водохранилища многолетнего регулирования, расположенного на территории горнопромышленного техногенеза. Цель исследования – описание процессов, оказывающих влияние на качество воды, и оценка масштабов возможного загрязнения водохранилища в периоды его низких уровней. Установлено, что сработка водохранилища ниже 2,5 м от нормального подпорного уровня приводит к осушению техногенных донных отложений. В зоне осушки протекают процессы гипергенных преобразований сульфидсодержащих отложений, приводящие к выносу загрязняющих веществ в водоем.

Основной поток загрязняющих веществ в водохранилище транспортирует сток р. Миасс, в связи с чем расход и содержание поллютантов в реке являются определяющими факторами загрязнения питьевого источника.

16. Самойлова С.Ю., Казанцева В.А. Динамика наводнений на Оби в черте города Барнаула // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 3. С. 35–49. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-3-35-49; EDN: SGQHKD

Samoilova S.Y., Kazantseva V.A. Flood dynamics on the Ob River at the city of Barnaul. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management.* 2025. No. 3. P. 35–49. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-3-35-49; EDN: SGQHKD

АННОТАЦИЯ

Актуальность работы обусловлена увеличением материального ущерба, связанного с наводнениями при половодьях и дождевых паводках на р. Оби, которые наблюдаются регулярно. Статистический и историко-географический анализ наводнений за период наблюдений дает представление об изменении их повторяемости, генезиса, класса опасности под влиянием климатических изменений. За период с 1894 по 2020 год наблюдается общее снижение максимальных уровней воды. Установлено, что с началом климатических изменений частота наводнений снизилась вдвое, а наводнение обеспеченностью ниже 10 % наблюдалось только однажды, в результате дождевого паводка в 2014 г. Более половины наводнений в черте г. Барнаула происходит от снеготаяния в период половодья, однако после 1976 г. доля таких наводнений уменьшилась. В то же время вдвое выросла доля быстроразвивающихся наводнений вследствие дождевых паводков.

17. Семенова А.А., Гончаров А.В., Георгиади А.Г., Милюкова И.П. Влияние климатического снижения весеннего стока и гидротехнического регулирования на условия воспроизводства рыб Азово-Донского рыбохозяйственного района (на примере участка поймы у станицы Раздорской) // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 3. С. 50–63. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-3-50-63; EDN: NWNWDS

Semenova A.A., Goncharov A.V., Georgiadi A.G., Milyukova I.P. The spring runoff climatic decrease and hydraulic engineering regulation impact on the fish reproduction conditions in the Azov-Don fishery area (the floodplain area near the village of Razdorskaya as a study case). *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management.* 2025. No. 3. P. 50–63. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-3-50-63; EDN: NWNWDS

АННОТАЦИЯ

Цель исследования – оценить роль гидротехнического регулирования, а также климатического снижения весеннего стока р. Дон и степень его влияния на воспроизводство рыб Азово-Донского рыбохозяйственного района. Применен методологический подход, позволивший впервые отдельно оценить влияние Цимлянского гидроузла на воспроизводство рыб на Нижнем Дону, с одной стороны, и климатического снижения весеннего стока – с другой. Результаты показали, что влияние климата меньше, чем влияние водохранилища, но сопоставимо с ним. Площади пойменных нерестилищ (в районе исследования) под воздействием водохранилища уменьшаются в 2,9 раза, а под влиянием климатического снижения весеннего стока – в 2,1 раза.

18. Алита С.Л., Атабиева Ф.А. Региональные предельно допустимые концентрации молибдена для водных объектов бассейна реки Терек // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 3. С. 64–73. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-3-64-73; EDN: MBYCA

Alita S.L., Atabieva F.A. Regional maximal permissible molybdenum concentrations for water bodies in the Terek River basin. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2025. No. 3. P. 64–73. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-3-64-73; EDN: MBYCA

АННОТАЦИЯ

Представлен статистический анализ многолетних данных по уровню содержания соединений молибдена – одного из приоритетных загрязняющих веществ двойного генезиса в воде рек бассейна Терека, обоснована разработка региональных предельно допустимых концентраций ($ПДК_{рег}$) по его соединениям. Актуальность исследования объясняется тем, что не всегда концентрации химических веществ в воде поверхностных водных объектов, сформировавшиеся под влиянием природных факторов, соответствуют требованиям гигиенических или рыбохозяйственных нормативов. Разработка и принятие региональных ПДК в таких ситуациях имеет большое значение для улучшения эффективности водоохранных мероприятий.

19. Душенко Н.А., Головачева М.М., Капустин М.В., Суртаева К.С. Применение нейросетевого моделирования для идентификации водоемов в бассейнах рек по данным дистанционного зондирования Земли // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 3. С. 74–94. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-3-74-94, EDN: XFFMVA

Dushenko N.A., Golovacheva M.M., Kapustin M.V., Surtayeva K.S. Application of neural network modeling for identification of water bodies in river basins using Earth satellite remote sensing data. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2025. No. 3. P. 74–94. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-3-74-94; EDN: XFFMVA

АННОТАЦИЯ

Эффективность государственного управления водными ресурсами в значительной степени определяют полнота и актуальность информации о водных объектах бассейнов рек. В статье представлена методология сегментации водоемов в бассейнах рек по данным дистанционного зондирования Земли из космоса с применением нейронных сетей и определения с помощью полученных результатов площадей водоемов и объемов потерь на дополнительное испарение с их поверхности в бассейне р. Урал. Приведены основные результаты обучения и сравнения эффективности сверточной и трансформерной нейронных сетей, сегментирующих водные объекты. С помощью наиболее эффективной нейронной сети осуществлена сегментация данных дистанционного зондирования Земли для российской части трансграничного бассейна р. Урал. Сформирована база данных сведений о водоемах в разрезе бассейновых округов, бассейнов рек, водохозяйственных участков, административно-территориальных единиц, а также сведений о местоположении водоемов и их площадях, слоях осадков и испарения с водной поверхности.

20. Валек Н.А., Благинин В.А., Соколова Е.В. Водохозяйственная наука: инструментарий определения исследовательских фронтов // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 3. С. 95–114. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-3-95-114; EDN: ZQOSDC

Valek N.A., Blaginin V.A., Sokolova E.V. Water science: Suite of tools for identification of research fronts // Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management. 2025. No. 3. C. 95–114. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-3-95-114; EDN: ZQOSDC

АННОТАЦИЯ

Выявление ведущих востребованных научных направлений (связанных с вызовами времени, целями устойчивого развития), подготовка обзоров по мировым тенденциям развития любой области научного знания, отрасли экономики в целом – все это является актуальной научной задачей и имеет практическую значимость для исследователей и организаций, принимающих управленческие решения по финансированию научных проектов. Понимание текущих трендов позволяет определить, какие научные направления заслуживают внимания, какие исследовательские тренды будут оказывать наибольшее влияние на социально-экономическое развитие страны. Предложены способы выявления востребованных научных направлений (исследовательских фронтов) с помощью современного наукометрического инструментария. На примере ведущих водохозяйственных изданий выявлены актуальные научные тематики, соответствующие вызовам времени. Акцентирована необходимость постоянного мониторинга ключевых направлений и технологий, развивающихся в мировых топах.

№ 4

21. Никитина О.И., Косолапов А.Е. Вододеление в трансграничных бассейнах рек с учетом экологического стока (на примере бассейна реки Урал) // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 4. С. 5–24. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-4-5-24; EDN: XLKNIM

Nikitina O.I., Kosolapov A.E. Transboundary water allocation and environmental flows (Ural River basin case study). *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management.* No. 4. P. 5–24. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-4-5-24; EDN: XLKNIM

АННОТАЦИЯ

Исследование посвящено разработке научно обоснованных подходов к трансграничному распределению стока в бассейне р. Урал с учетом экосистемных потребностей и международного опыта по сохранению водных экосистем. В условиях усиливающейся конкуренции за водные ресурсы и климатических изменений все более актуален переход от распределения фиксированных объемов воды к гибким и экосистемно ориентированным решениям. На основе анализа международной практики, положений действующего соглашения о совместном использовании и охране водных объектов в бассейне р. Урал и оценки состояния его водных экосистем показана необходимость пересмотра устоявшихся механизмов распределения водных ресурсов. Предложен подход к обоснованию экологического стока как ключевого элемента в системе распределения трансграничных

водных ресурсов. На основе оценки состояния экосистем бассейна р. Урал сформулированы цели реализации экологического стока, включающие резервирование части стока для поддержания и восстановления экосистем, адаптацию к климатическим изменениям и сохранение биоразнообразия. Определены оценочные объемы экологического стока вблизи границы России и Казахстана, которые могут служить основой при планировании совместных решений по распределению водных ресурсов с учетом экосистемных потребностей.

22. Селезнева А.В., Селезнев В.А. Повышение уровня воды Куйбышевского водохранилища в условиях климатических изменений // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 4. С. 25–43. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-4-25-43; EDN: EXMLTZ

Selezneva A.V., Seleznev V.A. The Kuibyshev Reservoir water level increasing in the context of the climate change. *Water management of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2025. No. 4. P. 25–43. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-4-25-43; EDN: EXMLTZ

АННОТАЦИЯ

В условиях глобального потепления климата оценка изменения гидрологического режима водохранилищ Волжско-Камского каскада, используемых для хозяйственно-питьевого водоснабжения, рыбного хозяйства и рекреации, весьма актуальна. В качестве объекта исследования выбрано самое крупное в каскаде Куйбышевское водохранилище с сезонным регулированием водного стока Волги. Основная цель – количественная оценка межгодовых и сезонных изменений уровня воды водохранилища за период 1958–2024 гг. Установлена устойчивая тенденция повышения среднего уровня воды Куйбышевского водохранилища за счет увеличения уровня воды в зимнюю межень и весеннее половодье. Основным фактором повышения уровня воды является смена режима сезонного регулирования водного стока Волги в створе Жигулевского гидроузла. Изменения уровня воды в период зимней межени и в начале весеннего половодья привели к изменению морфометрических характеристик Куйбышевского водохранилища.

23. Седова Е.Ю., Самойлова С.Ю. Изменение ресурсов речного стока под влиянием природно-климатических и антропогенных факторов (на примере р. Чумыш) // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 4. С. 44–60. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-4-44-60; EDN: GBQHFO

Sedova E.Y., Samoylova S.Y. Changes in river flow resources under the influence of natural, climatic and anthropogenic factors (the Chumysh River as a study case). *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. No. 4. P. 44–60. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-4-44-60; EDN: GBQHFO

АННОТАЦИЯ

В условиях глобальных климатических изменений особую значимость приобретает изучение динамики водного режима рек как одного из ключевых компонентов состояния водных ресурсов. Целью исследования является выявление особенностей многолетней динамики стока р. Чумыш в условиях изменяющегося климата и антропогенного воздействия с акцентом на внутригодовое перераспределение стока. Установлено статистически значимое повышение температуры воздуха, особенно выраженное в холодный период,

что сопровождается увеличением зимнего стока, снижением объемов весеннего половодья и максимальных расходов воды. Следствием этого является рост коэффициентов естественной зарегулированности. Полученные данные подтверждают преобладающее влияние климатических факторов и могут быть использованы при разработке мер адаптации водного объекта к климатическим изменениям.

24. Косинова И.И., Лисецкий Ф.Н., Бударина В.А. Эколого-гидрогеохимическая оценка подземных вод разнотипных по антропогенной нагрузке сельских поселений Белгородской области // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 4. С. 61–74. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-4-61-74; EDN: OHIZSZ

Kosinova I.I., Lisetskiy F.N., Budarina V.A. Ecological and hydrogeochemical assessment of groundwater for rural settlements of the Belgorod region with different types ofanthropogenic load. *Water Management of Russia: Problems, Technologies, Management.* 2025. No. 4. P. 61–74. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-4-61-74; EDN: OHIZSZ

АННОТАЦИЯ

Проблема взаимовлияния поверхностных и подземных вод приобретает особую значимость для агропромышленных регионов, в которых происходит интенсивная эксплуатация водоносных горизонтов как для хозяйственного и питьевого водоснабжения, так и при дренировании воды в зоне действия горнодобывающих предприятий. Именно к таким регионам относится Белгородская область, для которой проведена сравнительная эколого-гидрогеохимическая оценка подземных вод в двух контрастных сельских поселениях с сильной техногенной нагрузкой и фоновой территорией, где доминирует агропромышленное производство. Установлено, что влияние разных типов антропогенных нагрузок и их интенсивности проявляется в изменении природного режима водоносных горизонтов, скорости процессов выщелачивания и дальнейшего загрязнения, что определяет целесообразность разработки и внедрения дифференцированных комплексов мероприятий для поддержания качества подземных вод.

25. Марков М.Л., Гуревич Е.В., Иванова С.А. Оценка влияния урбанизации водосбора на водный баланс и водообмен Суздальских озер Санкт-Петербурга // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 4. С. 75–93. https:// doi.org/10.35567/19994508-2025-4-75-93; EDN: YWJSEM

Markov M.L., Gurevich E.V., Ivanova S.A. Assessment of urbanization impact on water balance and water exchange of Suzdal lakes in St. Petersburg. *Water Management of Russia: Problems, Technologies, Management.* 2025. No. 4. P. 75–93. (in Russian). https://doi.org/10.35567/19994508-2025-4-75-93; EDN: YWJSEM

АННОТАЦИЯ

Гидрологическое исследование посвящено изучению причин происходящего сокращения естественных водных ресурсов и водообмена Суздальских озер на территории Санкт-Петербурга. Оценка изменений характеристик водного режима и водообмена выполнена с помощью статистических методов анализа гидрометеорологических характеристик. Выявлены климатообусловленные и антропогенные причины происходящего снижения естественных водных ресурсов водоемов в летний меженный период.

26. Бегдай И.В., Мишвелов Е.Г., Харин К.В., Шкарет К.Ю. Эколого-геохимическая оценка состояния реки Уруп в зоне действия Урупского ГОК // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 4. С. 94–110. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-4-94-110; EDN: EDCYVU

Begday I.V., Mishvelov E.G., Kharin K.V., Shkarlet K.Yu. Ecological and geochemical assessment of the state of the Urup River in the area of the Urupsky Mining and Processing Plant. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management.* 2025. No. 4. P. 94–110. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-4-94-110; EDN: EDCYVU

АННОТАЦИЯ

Статья посвящена комплексной эколого-геохимической оценке состояния р. Уруп в зоне влияния отработанного хвостохранилища Урупского горно-обогатительного комбината. Актуальность исследования обусловлена долгосрочным негативным воздействием хвостохранилища на водную экосистему, что проявляется в накоплении тяжелых металлов в воде и донных отложениях, а также в ухудшении качества воды, используемой для водоснабжения и рыбохозяйственной деятельности. Установлено значительное превышение предельно допустимых концентраций тяжелых металлов в воде, класс качества воды варьировал от VII («чрезвычайно грязная») вблизи хвостохранилища до V («грязная») на удаленных участках. Выводы исследования подчеркивают необходимость постоянного мониторинга и внедрения мер по снижению техногенной нагрузки.

№ 5

27. Болгов М.В., Денисова И.С., Трубецкова М.Д. Определение расчетных гидрологических характеристик при отсутствии данных наблюдений методами математического моделирования // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 5. С. 7–22. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-5-7-22; EDN: WDLJOS

Bolgov M.V., Denisova I.S., Tubetskova M.D. Determination of design hydrological characteristics in the absence of observational data using mathematical modeling methods. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2025. No. 5. P. 7–22. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-5-7-22; EDN: WDLJOS

АННОТАЦИЯ

Расчет величин стока с естественных и урбанизированных ландшафтов осуществляется на основе гидрологических характеристик и сведений о состоянии поверхности водосборов. Если состояние водосбора можно оценить по различным картографическим источникам, дистанционным методам зондирования, цифровым моделям и т. д., то для определения характеристик стока необходимо реализовывать различные процедуры обобщения данных мониторинга в зависимости от гидрометеорологической изученности территории. Инженерные методы гидрологического расчета хорошо известны и стандартизированы, однако при определении характеристик смыва загрязняющих веществ возникает необходимость получения детальных оценок, и эта задача может решаться методами математического моделирования стока. Такие методы пред-

ложены на основе специальных подходов к обработке данных наблюдений, рассматриваемых на примере расчета половодного и паводочного стока в бассейне р. Казанки. Получены расчетные значения слоев паводочного и половодного стока. Предложен расчетный график дождя и определены другие параметры, необходимые для последующего расчета смыва и эрозии почв.

28. Дубов Н.Д., Крохин Г.Б., Розенталь О.М. Влияние характеристик состава подземного сброса на качество воды Москвы-реки // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 5. С. 23–38. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-5-23-38; EDN: XPIIGM

Dubov N.D., Krokhin G.B., Rozental O.M. Influence of the groundwater runoff composition characteristics on the Moskva River water. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2025. No. 5. P. 23–38. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-5-23-38; EDN: XPIIGM

АННОТАЦИЯ

Природная взаимосвязь между подземными и поверхностными водами нередко нарушается на урбанизированных территориях вследствие техногенно загрязненных сбросов на рельеф местности. Вовлекаясь в процессы инфильтрации, они загрязняют водоносные горизонты, а при последующем подземном стоке – также и поверхностные водные объекты. В результате, в частности, снижается качество воды Москвы-реки – крупнейшего водоисточника столицы. Поэтому актуально обнаружение зон повышенных промышленных и бытовых сбросов на рельеф. Обнаружены причинно-следственные связи концентрации нефтепродуктов и фенолов, исследуемых на прибрежных скважинах ЮЗАО Москвы и на расположенном ниже створе Бабьегор Москвы-реки. Разработаны новые подходы к выявлению зон сбросов отходов производства и потребления на рельеф.

29. Яковлев П.И. Некоторые особенности формирования минимального меженного и подземного стоков рек в верхней части бассейна Западной Двины // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 5. С. 39–58; https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-5-39-58; EDN: VMBYCA

Yakovlev P.I. Some particular features of the rivers' minimal low-water and groundwater runoff in the Zapadnaya Dvina River basin upstream part. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2025. No. 5. P. 39–58; https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-5-39-58; EDN: VMBYCA

АННОТАЦИЯ

Приведенные в статье новые гидрологические и гидрогеологические материалы подтверждают научные выводы, сделанные более 50 лет назад. Проведен сбор и анализ данных, содержащихся в монографиях и отчетах научных и производственных организаций разных ведомств. Анализ гидрографов речного стока за разные по водности годы выявил зависимость меженного летнего стока исследуемых рек от объема и интенсивности предыдущего весеннего половодья и количества атмосферных осадков, выпадающих в теплый период.

30. Семенова А.А., Горелиц О.В. Гидрологические условия воспроизводства полупроходных рыб (на примере леща) Нижней Волги при изменении климата и регулировании стока // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 5. С. 59–76. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-5-59-76; EDN: VSORKD

Semenova A.A., Gorelits O.V. Hydrological conditions of reproduction of semi-aquatic fish of the Lower Volga under climate change and flow regulation (with Bream as a study case). *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management.* 2025. No. 5. P. 59–76. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-4-59-76; EDN: VSORKD

АННОТАЦИЯ

Цель исследования – оценить роль климатического и антропогенного воздействий на воспроизводство полупроходных рыб Волго-Каспийского рыбохозяйственного района. Проведена оценка характеристик водного стока и других параметров, определяющих условия нереста полупроходных видов рыб (на примере леща) в естественных условиях и в период зарегулированного стока. Предложены меры по восстановлению рыбного хозяйства данного района.

31. Селезнев В.А., Селезнева А.В. Влияние гидрометеорологических условий на процесс «цветения» вод в Куйбышевском водохранилище // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 5. С. 77–96. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-5-77-96; EDN: DESLZA

Seleznev V.A., Selezneva A.V. Influence of hydrometeorological conditions on the process of water blooming in the Kuibyshev reservoir. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2025. No. 5. P. 77–96. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-5-77-96; EDN: DESLZA

АННОТАЦИЯ

В условиях глобального потепления климата усиливается интерес к оценке влияния гидрометеорологических факторов на развитие процесса «цветения» вод. Комплексные наблюдения проведены на Приплотинном плесе Куйбышевского водохранилища в летний период 2016–2021 гг. Установлено, что основными факторами, влияющими на содержание хлорофилла *a*, являются температура воды и погодные условия. Сделан вывод о том, что при дальнейшем повышении температуры воды Куйбышевского водохранилища в условиях глобального потепления климата процесс «цветения» вод будет усиливаться, что может нарушить экологическую устойчивость экосистемы водоема и создать риски для комплексного водопользования.

32. Волкова Н.А. Повышение качества гидрологического прогнозирования на основе снижения информационной критичности нечетких оценок показателей стока рек // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 5. С. 97–118. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-5-97-118; EDN: OLGVLN

Volkova N.A. Improving the quality of hydrological forecasting by reducing the information criticality of fuzzy estimates of river runoff indicators. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management.* 2025. No. 5. P. 97–118. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-5-97-118; EDN: OLGVLN

АННОТАЦИЯ

Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения точности прогнозирования стока воды, что имеет ключевое значение для управления водными ресурсами, гидроэнергетики и предотвращения паводковых рисков. Предложены методы снижения неопределенности прогнозов, основанные на двух направлениях: оптимизации математической модели за счет исключения малозначимых гидрометеорологических показателей и повышении точности вероятностных оценок ключевых факторов. Разработан комбинированный метод снижения неопределенности, интегрирующий анализ информационной критичности и оптимизацию модели. Результаты показывают, что применение данного подхода позволяет минимизировать ошибки прогнозирования за счет рационального использования данных и учета нечетких оценок. Исследование вносит вклад в развитие методов гидрологического прогнозирования, предлагая практические инструменты для повышения их точности.

№ 6

33. Косолапова Н.А., Матвеева Л.Г., Каплюк Е.В. Стратегические фронтиры индустриального ландшафта макрорегиона: кейс водных ресурсов // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 6. С. 5–25. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-6-5-25; EDN: DRSCYB

Kosolapova N.A., Matveeva L.G., Kaplyuk E.A. Strategic frontiers of the macro/region industrial landscape: the case of water resources. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2025. No. 6. P. 5–25. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-6-5-25; EDN: DRSCYB

АННОТАЦИЯ

Усиливающаяся под негативным воздействием внешних факторов социально-эколого-экономическая асимметрия регионов приводит не только к снижению их резильентности и устойчивости к внешним шокам, разбалансированности структуры индустриальных ландшафтов, но также к неравномерности динамики их системообразующих секторов, в т. ч. и водохозяйственного комплекса. Поскольку водохозяйственный комплекс является одновременно инфраструктурной и производственной системой, речь идет как о тактическом значении водных ресурсов, так и об их определяющей роли в качестве стратегического ресурса. В контексте тактического управления важное значение имеет текущее состояние водного бассейна региона, в стратегическом аспекте – научно обоснованные прогнозы необходимых для развития региона запасов воды. Для разработки концепции стратегического управления развитием индустриального ландшафта региона и его водохозяйственного комплекса методологическая база исследования сформирована путем конвергенции ряда теорий и подходов – регионально-бассейнового, сбалансированного роста, системно-динамического и ресурсно-целевого – для создания многоуровневой системы управления использованием ресурсного потенциала макрорегиона и входящих в состав его регионов водохозяйственных комплексов. Определен вклад авторов в развитие теорий пространственного индустриального развития на основе исследования водных ресурсов как важного элемента индустриального ландшафта региона и ключевой составляющей стратегии сбалансированного развития, обусловленного тесной корреляцией производственной и водохозяйственной систем. С использованием инструментария системной динамики выявлены структурные сдвиги в объемах водных ресурсов в разрезе специализаций регионов Южного федерального округа, которые могут служить основой

при принятии стратегических управленческих решений по рациональному водопользованию и эффективному использованию ресурсов водного бассейна региона.

34. Гирло Е.М., Чалов С.Р., Харченко С.В. Оценка поступления взвешенного вещества в реки методом трассировки источников наносов для решения задач управления урбанизированным водосбором // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 6. С. 26–51. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-6-26-51; EDN: GFXBAL

Girlo E.M., Chalov S.R., Kharchenko S.V. Opportunities and Prospects of Suspended Sediment Source Tracing for Urban Catchment Management. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management.* 2025. No. 6. P. 26–51. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-6-26-51; EDN: GFXBAL

АННОТАЦИЯ

Оценка вклада разных источников (процессов, территорий) в загрязнение рек, в частности взвесями, является важнейшей составляющей выработки мероприятий для снижения негативного воздействия на речную систему. В России эта методика только получает развитие, хотя давно является ключевой в городском хозяйстве многих стран. В статье представлен анализ применения метода трассировки источников наносов (еще известного как «фингерпринтинг» от англ. fingerprinting) и его адаптация для урбанизированного водосбора с применением разных статистических алгоритмов, анализируются типовые источники загрязнения городских рек. Метод апробирован для бассейна р. Сетуни, расположенного в московской агломерации, и основан на отборе проб субстратов в источниках и в контрольной точке, лабораторном анализе на содержание макро- и микроэлементов во взвешенных наносах, выборе репрезентативных трассеров, а также непосредственно моделирования долевого вклада источников с использованием статистических моделей сепарации смеси, таких как FingerPro, simmr, MixSIAR, Sed_SAT, SIFT. Предложена унификация терминов, используемых при реализации данного метода. Рассмотрены результаты трехчленного деления проб на водосборе: почвы на участках открытого грунта, дорожная пыль, береговая эрозия. Сделан вывод о том, что в большинстве урбанизированных бассейнов основным источником взвеси являются береговые уступы, а процесс эрозии берегов – ключевым фактором формирования взвеси, что определяет актуальность мер по стабилизации береговой линии.

35. Семенищев В.С., Ремез В.П., Титова С.М., Денисов Е.И., Никифоров А.Ф. Ферроцианидные сорбенты на основе целлюлозы для концентрирования Cs-137 из природных вод // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 6. С. 52–61. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-6-52-65; EDN: YZEOTI

Semenishchev V.S., Remez V.P., Titova S.M., Denisov E.I., Nikiforov A.F. The ferrocyanide sorbents based on cellulose for preconcentration of cesium-137 from natural water. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management.* 20025. No. 6. P. 52–61. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-6-52-65; EDN: YZEOTI

АННОТАЦИЯ

Обеспечение радиационной безопасности населения требует создания высокочувствительных методик определения природных и техногенных радионуклидов в воздухе, воде и пищевых продуктах. Для оперативного контроля удельной активности Cs-137 в природных водах применяются сорбенты на основе ферроцианидов переходных ме-

таллов. В данной работе представлено исследование сорбции цезия сорбентами серии АНФЕЖ, представляющими сорбционно-активную фазу ферроцианида железа, нанесенную на древесные опилки и делигнифицированную целлюлозу. Результаты статических экспериментов показали, что сорбенты АНФЕЖ способны извлекать Cs-137 из водных проб с pH от 4 до 9 с коэффициентами распределения от $1{,}5{\cdot}10^4$ до $2{\cdot}10^5$ мл/г. По результатам экспериментов по извлечению цезия в динамических условиях установлено, что оба исследованных сорбента извлекают порядка 99 % цезия из проб пресных вод (pH 4–9) при скорости пропускания до 200 мл/мин·см^2. При сопоставимых сорбционных характеристиках сорбент АНФЕЖ-БЛ на основе делигнифицированной целлюлозы обеспечивает эффективность регистрации гамма- и бета-излучения в 1,8 раза выше, чем сорбент АНФЕЖ, за счет использования основы с меньшей плотностью.

36. Поклонов В.А. Водные растения как фактор биологической деструкции ацетона в воде // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 6. С. 66–79. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-6-66-79; EDN: WHAZCS

Poklonov V.A. Aquatic plants as a factor in decreasing the concentrations of acetone in water. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2025. No. 6. P. 66–79. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-6-66-79; EDN: WHAZCS

АННОТАЦИЯ

Результаты данного исследования необходимы для проектирования биотехнологий по очищению воды от поллютантов. Обнаружено, что некоторые виды макрофитов можно использовать для удаления ацетона из воды. Изучено изменение концентраций ацетона в воде модельных систем (микрокосмов). Концентрации ацетона измеряли методом хромато-масс-спектрометрии. Впервые доказано, что концентрации ацетона снижались быстрее в присутствии растений, чем в контрольных микрокосмах, что свидетельствовало о фиторемедиационном потенциале растений. В микрокосмах с *C. demersum* концентрации ацетона составляли значения ниже 2,2 мг/л (1 ПДК) после пяти суток инкубации. Ацетон в концентрации 11 мг/л не оказывал летального или визуально заметного воздействия на *C. demersum*. Установлено, что элодея (*E. canadensis*) более чувствительна (до 20 % отмерших побегов) к ацетону, чем роголистник (*C. demersum*) и пузырчатка (*U. vulgaris*). Самым устойчивым оказался *C. demersum*. В присутствии роголистника (*C. demersum*) снижение концентраций ацетона (ниже 1 ПДК) составило больше 70 % (по сравнению с контролем без растений) во всех микрокосмах спустя 5 суток. Роголистник (отсутствие фитотоксичности) и пузырчатка (5 % и меньше мертвых побегов) сохранили жизнеспособность при загрязнении пресноводной среды ацетоном и могут использоваться для фиторемедиации. Полученные результаты расширяют знания о фитотоксичности ацетона и фиторемедиационном потенциале высших водных растений, что необходимо для разработки фитотехнологий по очищению воды от загрязнений.

37. Цупикова Н.А., Федоров Л.С. Информационно-аналитическое обеспечение водоохранной деятельности в Калининградской области // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 6. С. 80–99. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-6-80-99; EDN: XFZLON

Tsupikova N.A., Fedorov L.S. Information and analytical support for rational water use in Kaliningrad Region. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2025. No. 6. P. 80–99. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2025-6-80-99; EDN: XFZLON

АННОТАЦИЯ

Целью работы является актуализация сведений о водных объектах Калининградской области. Для повышения достоверности сведений о гидрометрических параметрах водотоков предлагается обратить особое внимание на источники информации, находящиеся в открытом доступе. Это позволит предотвратить нарушения водоохранного законодательства, обусловленные некорректным определением ширины водоохранных зон. Работа основана на трассировке русел водотоков и установлении с использованием картографических и аэрокосмических изображений сложившейся к настоящему времени береговой черты водоемов. Выявлены существенные расхождения фактических параметров водотоков с официальными данными (до 15–40 % и более), названы основные причины, обусловившие такие различия. Проведенное исследование показало вероятность ошибочного определения ширины водоохранных зон вследствие использования некорректных сведений о протяженности водотоков при хозяйственном освоении территории. Ряд проблем связан с методологическими сложностями типизации водных объектов в их исторически сложившихся категориях. Необходима полноценная ревизия водного фонда Калининградской области, которая позволит создать современный региональный кадастр водных объектов с учетом иерархии гидрографической сети, включая малые водотоки.

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 16–24 thousand of characters with blanks, not more than 20 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.

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 0,4–0,6 авторского листа (16–24 тыс. знаков с пробелами, не более 20 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
Перевод А.Б. Кочев, И.А. Софронова
Подписано в печать 01.12.2025. Дата выхода в свет 15.12.2025.
Формат 70x100 $^{1}/_{16}$. Усл. печ. л. 7,5. Тираж 200 экз. Цена свободная.
Отпечатано в типографии ООО «ДжиЛайм»,
юридический адрес: 620078, г. Екатеринбург, ул. Мира 37-25.
Тел.: +7(343)362-42-28, www.glime.ru, e-mail: g_lime@mail.ru

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

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук

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

The journal is included into the List of the scientific journals and editions subject to peer-review where the main scientific outcomes of the thesis for academic degrees of doctors and candidates of sciences are to be published

Индекс / Index 39076

