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

ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО РОССИИ:

ПРОБЛЕМЫ, ТЕХНОЛОГИИ, УПРАВЛЕНИЕ

научно-практический журнал

№ 2, 2026

WATER SECTOR OF RUSSIA:

PROBLEMS, TECHNOLOGIES, MANAGEMENT

scietific | practical journal

No. 2, 2026

РОСВОДРЕСУРСЫ
ИЗДАНИЕ ЖУРНАЛА ВЫПОЛНЯЕТСЯ В РАМКАХ ГОСУДАРСТВЕННОГО (МУНИЦИПАЛЬНОГО) ЗАДАНИЯ

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

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

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

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

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

ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО РОССИИ:

ПРОБЛЕМЫ, ТЕХНОЛОГИИ, УПРАВЛЕНИЕ

научно-практический журнал

WATER SECTOR OF RUSSIA:

PROBLEMS, TECHNOLOGIES, MANAGEMENT

scientific/practical journal

№ 2, 2026

Журнал входит в список ВАК,

Белый список научных журналов, RSCI, ядро РИНЦ

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

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

EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

УПРАВЛЕНИЕ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫМ КОМПЛЕКСОМ

Моделирование пространственного распределения среднемноголетнего испарения с водной поверхности в центральной части Европейской территории России
С. А. Лавров, С. А. Иванова 5

Особенности формирования концентраций и потоков метана в акватории карбонового полигона «Цимлянское водохранилище»
Е. В. Усова, Л. Ю. Дмитрик, Е. Л. Анпилова, Ю. А. Федоров, Д. Н. Гарькуша, М. А. Верещагин, Е. Р. Чернышенко 32

Использование данных сетевых наблюдений для характеристики транспорта взвешенных наносов на примере участка Верхней Лены
Д. И. Школьный, А. С. Цыпленков, Л. А. Турыкин, П. П. Головлев 63

Минимальный летний модуль стока воды малых рек бассейна реки Урал
И. А. Жуков 84

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Антропогенное воздействие на реку Исеть (Свердловская область)
С. Ю. Скрипченко, К. А. Наливайко, В. С. Семенищев, М. С. Скрипченко, А. А. Ульянова 104

О соединениях меди в бассейне реки Терек и необходимости введения региональных ПДК
Ф. А. Атабиева, А. С. Отарова, В. В. Селина 122

CONTENT

WATER/ECONOMIC SECTOR MANAGEMENT

Modelling of the spatial distribution of average many-year evaporation from water surface in the central part of the European territory of Russia
S. A. Lavrov, S. A. Ivanova 5

Special features of the methane concentrations and flows' formation in the "Tsymlyansk Reservoir" carbon range water area
E. V. Usova, L. Y. Dmitrik, E. L. Anpilova , Y. A. Fedorov, D. N. Garkusha, M. A. Vereshchagin , E. R. Chernyshenko 32

Characteristics of Suspended Sediment Transport of the Upper Lena River using gauging network observations
D. I. Shkolnyi, A. S. Tsyplenkov , L. A. Turykin, P. P. Golovlev 63

Minimum summer runoff module of small rivers in the Ural River basin
I. A. Zhukov 84

ECOLOGICAL ASPECTS OF WATER/ECONOMIC ACTIVITIES

Anthropogenic impact on the Iset River (Sverdlovsk region)
S. Y. Skripchenko, K. A. Nalivaiko, V. S. Semenishchev, M. S.Skripchenko, A. A. Ulianova 104

The content of copper compounds in the Terek River basin and the need to introduce regional maximum permissible concentrations
F. A. Atabieva, A. S. Otarova, V. V. Selina 122

УДК 556.132.2; 556.132.6; 556.013
https://doi.org/10.35567/19994508-2026-2-5-31
Оригинальная статья / Original paper

Моделирование пространственного распределения среднемноголетнего испарения с водной поверхности в центральной части Европейской территории России

С. А. Лавров, С. А. Иванова
sergey_lavrov_50@mail.ru
Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Изучение пространственного распределения испарения с поверхности воды становится все более актуальным направлением исследований при наблюдаемых климатических изменениях. Очевидна необходимость использовать для пространственных обобщений более точные методы, учитывающие все многообразие природных факторов формирования данного процесса. **Методы.** Для расширения базы данных для пространственных обобщений испарения применена методика реанализа, основанная на использовании в расчетах физико-математической модели вертикального тепловлагопереноса в водной среде. Модель откалибрована по данным наблюдений за испарением с помощью ГГИ-3000 на 35 площадках центральной части Европейской территории России. **Результаты.** По данным о среднесуточных значениях метеоэлементов на пространственной сетке в местах расположения 105 метеостанций рассчитаны средние многолетние величины испарения с поверхности воды за период 2000–2020 гг. Построены карты распределения испарения для центральной части Европейской территории России. Обобщены результаты пространственного моделирования, получен ряд закономерностей, связывающих величину среднемноголетнего испарения с поверхности воды с температурой воздуха и скоростью ветра теплого периода. Проанализирована изменчивость коэффициентов перехода от величины испарения, измеренного с помощью ГГИ-3000, к испарению с поверхности малых водоемов и установлено, что они подвержены климатическим изменениям.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: водная поверхность, испарение, математическое моделирование, реанализ, пространственная изменчивость, картирование, влияние метеофакторов

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Лавров С. А., Иванова С. А. Моделирование пространственного распределения среднемноголетнего испарения с водной поверхности в центральной части Европейской территории России // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2026. № 2. С. 5–31. https://doi.org/10.35567/19994508-2026-2-5-31; EDN: GIYUGR

© Лавров С. А., Иванова С. А., 2026

Modelling of the spatial distribution of average many-year evaporation from water surface in the central part of the European territory of Russia

Sergey A. Lavrov ✉, **Svetlana A. Ivanova**
✉ sergey_lavrov_50@mail.ru

State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia

ABSTRACT

Relevance. Studying of spatial distribution of evaporation from water surface is becoming a rather topical thing in the conditions of the observed clime changes. In this connection it is quite evident that the use of more precise methods taking into account all diversity of natural factors of the above process formation is necessary **Methods.** We used the re-analysis methods to extend the database for the evaporation spatial generalization. These methods are based on the use of physical/mathematical model of vertical hydrothermal transfer in water medium. The model was calibrated according the data of observations of evaporation with GGI-3000 at 35 plots of the central part of the European territory of Russia. **Results.** We have calculate average ay-year values of evaporation from water period over the 2000–2020 period according to data on average daily values of meteorological elements on a spatial network at the plots of 105 meteorological stations. The maps of evaporation distribution for the central part of the European territory of Russia have been plotted. Results of spatial modelling were generalized and we obtained a number of regularities connecting the value of average many-year evaporation from water surface with air temperature and wind speed of the warm season. We have analyzed the variability of the transition coefficients from the evaporation value gauged with GGI-3000 to the evaporation from the small water bodies surfaces and have stated that they are subjected to climatic changes.

KEYWORDS: water surface, evaporation, mathematical modelling, re-analysis, spatial variability, mapping, meteorological factors impact

FOR CITATION: Lavrov S. A., Ivanova S. A. Modelling of the spatial distribution of average many-year evaporation from water surface in the central part of the European territory of Russia. Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management. 2026. No. 2. P. 5–31. https://doi.org/10.35567/19994508-2026-2-5-31; EDN: GIYUGR

ВВЕДЕНИЕ

Точные пространственные оценки испарения с поверхности воды имеют большую практическую значимость. Картированием информации об испарении занимаются довольно давно. Еще в 1944 г. в Государственном гидрологическом институте В. К. Давыдовым, под редакцией Б. Д. Зайкова, была подготовлена карта «Испарение с водной поверхности в Европейской части СССР» [1]. Наиболее известной и широко используемой является карта о средней многолетней величине испарения с водной по-

верхности испарительного бассейна площадью 20 м^2, приведенная в Указаниях по расчету испарения с поверхности водоемов[1]. В последнее время А. Н. Постниковым была подготовлена карта о среднем многолетнем испарении с поверхности природных водоемов за безледоставный период на территории России [2]. Необходимо отметить, что построение всех этих карт осуществлялось на основе упрощенных расчетных методов. В Указаниях испарение рассчитано по формуле Государственного гидрологического института (ГГИ), а А. Н. Постниковым – по формуле, полученной на основе использования метода теплового баланса.

В зарубежной практике при исследованиях пространственного распределения испарения наиболее популярными являются методы расчета, основанные на подходе Пенмана и использовании соотношения Боуэна для определения энергетического баланса водных объектов [3, 4]. В некоторых исследованиях применяются регрессионные модели и искусственные нейронные сети для оценки испарения на основе климатических данных [3]. Перечисленные выше методы расчета отражают лишь отдельные стороны многофакторного процесса испарения и носят приближенный характер. Ввиду этого становится весьма актуальной разработка для пространственных обобщений более точных методов, учитывающих все многообразие природных факторов формирования данного процесса.

В настоящей работе предпринята попытка применить для расчета испарения с водной поверхности разработанную авторами физически обоснованную математическую модель процессов формирования стока – «ГГИ – ГИДРОФИЗИКА» (свидетельство о государственной регистрации № 2025697103), подробно представленную в работах [5, 6]. Модель описывает практически все физические процессы формирования испарения за многолетний период, что позволяет учесть в т. ч. и произошедшие за последние десятилетия факторы влияния климатических изменений.

В последние годы растет роль новых источников информации о современном состоянии водных объектов и тенденциях изменения их характеристик как в пространстве, так и во времени. Это прежде всего связано с сокращением сети наблюдений и с серьезными проблемами заполнения пропусков при обобщении наблюдений за многими гидрологическими характеристиками. В полной мере это относится и к наблюдениям за испарением с водной поверхности. Ввиду данных обстоятельств весьма популярными становятся методы реанализа, позволяющие по метеонаблюдениям восстановить информацию об испарении при отсутствии системы измерения данной составляющей водного и теплового баланса. При этом используются математические модели различной сложности. Впервые для этой цели применена модель «ГГИ – ГИДРОФИЗИКА».

1 Указания по расчету испарения с поверхности водоемов. Л.: Гидрометеоиздат, 1969. 84 с.

Успешное использование математических моделей невозможно без их тестирования по данным наблюдений, т. е. решение задач, связанных с расширением знаний о пространственных закономерностях испарения, носит комплексный характер, основанный как на результатах измерений на сети наблюдений, так и на теоретических обобщениях, полученных различными расчетными методами. При этом необходимо учитывать тот факт, что в случае испарения с водной поверхности практически единственным массовым способом измерения является применение испарителей ГГИ-3000. Информация, полученная на основе данного прибора, не может напрямую использоваться для определения испарения с реальных водных объектов. Для этих целей применяются коэффициенты перехода. Однако методы их определения разработаны около пятидесяти лет назад на основе имевшейся в ту пору экспериментальной информации [7]. Поэтому для правильной интерпретации полученных результатов оценки испарения, базирующейся на наблюдениях с помощью испарителей ГГИ-3000, актуально уточнение коэффициентов перехода с учетом данных, полученных в последующий период.

В качестве объекта исследований выбрана центральная часть Европейской территории России (ЕТР) в пределах от 45 до 61,5° с. ш. и 31,5–61° в. д. Выбор данной территории в основном обусловлен расположением на ней бассейна р. Волги – важнейшего водохозяйственного и гидрологического объекта России. Проведен расчет среднемноголетних значений испарения с поверхности воды за период 2000–2020 гг. Обобщения за данный период не столь многочисленны из-за резкого сокращения наблюдательной базы.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Как показывают многолетние исследования, процессы испарения, их изменчивость в пространстве и времени в первую очередь обусловлены метеорологическими условиями. При этом сеть метеонаблюдений намного плотнее, чем сеть наблюдений за различными составляющими испарения. Метеонаблюдения на исследуемой территории проводились на 104 метеостанциях, а измерение испарения только на 35. Данное обстоятельство дает возможность получать дополнительную пространственную информацию об этой гидрологической характеристике, используя методологию реанализа, основанную на математическом моделировании вышеназванных процессов по данным о метеоэлементах.

Метод реанализа представляет собой двухшаговый процесс. На первом, называемом ассимиляцией данных, математическая модель изучаемой системы калибруется по всей имеющейся наблюдаемой информации за вход-

ными и выходными параметрами и характеристиками модели. Как правило, круг подобных наблюдений немногочислен, что накладывает некоторые ограничения на точность калибровки. В нашем случае это совокупность метеорологической и гидрологической информации в точках наблюдения. При этом необходимо добиться максимальной сходимости расчетных и измеренных характеристик.

Далее проводится реанализ, т. е. по откалиброванной модели рассчитываются величины испарения в узлах задания исходной информации. Расчеты могут проводиться как на регулярной, так и на нерегулярной пространственной сетке. Например, на неравномерной сетке расположения метеостанций, густота которых заметно превышает сеть наблюдений за испарением. Широко используется вариант реанализа на регулярной пространственной сетке. В этом случае в узлах данной сетки должна быть представлена вся необходимая для моделирования метеорологическая информация. Но, как правило, она отсутствует или получена также на основе реанализа результатов метеонаблюдений. Ввиду этого возникают вопросы к точности такого двойного реанализа. В каком случае точность расчета испарения в узлах сетки будет выше – при модельных расчетах, на основе восстановленных метеоданных или полученных методами пространственной интерполяции модельных данных об испарении в местах расположения метеостанций? Данный вопрос требует специального изучения.

Ключевую роль в реанализе играет моделирование. Основными уравнениями для расчета испарения с поверхности воды являются уравнения теплового баланса и турбулентной диффузии, дополненные системой дифференциальных уравнений, описывающих процессы тепловлагопереноса в водной толще. Подробное описание всех уравнений математической модели дано в работах [5, 6].

Моделирование вертикального тепловлагопереноса осуществляется на водной колонке глубиной 10 м. Расчетный шаг по вертикали составляет 1 см. Расчеты испарения за многолетний период проводятся с шагом по времени 1 ч. В качестве исходной информации для математического моделирования используются суточные значения метеоэлементов на высоте 2 м (температура воздуха, осадки, скорость ветра, упругость водяного пара), а также данные о нижней и верхней облачности. Набор параметров для расчета характеристик солнечной радиации включает солнечное склонение, широту в расчетной точке, общую и нижнюю облачность, альбедо водной поверхности.

На первом шаге реанализа (ассимиляции данных) используемая математическая модель испарения калибруется по всем имеющимся для территории наблюдениям. В случае реанализа испарения с поверхности воды

стоит проблема выбора наиболее пригодных для калибровки модели рядов наблюдения как за величиной испарения, так и за сопутствующими метеорологическими параметрами. Для достижения максимальной точности сопоставления измеренных и расчетных значений необходимо, чтобы получаемые данные о метеорологических характеристиках были максимально приближены к площадкам, где проводятся измерения испарения. На практике существует больший или меньший пространственный разрыв между локациями этих двух видов наблюдения.

Второй проблемой калибровки является выбор вида инструментальных наблюдений за испарением с водной поверхности – с помощью испарительного бассейна площадью 20 м^2 или испарителя ГГИ-3000. Известно, что испарительный бассейн площадью 20 м^2 признан Всемирной метеорологической организацией (ВМО) международным эталонным прибором, характеризующим испарение с небольших озер и водохранилищ, которому практически не присущи искажения в измерениях, вызванные процессами в окружающих испаритель почвогрунтах. Данный факт по своей физической сути сближает процессы измерения в бассейне и расчетов по используемой пространственно-одномерной модели. Однако, несмотря на достоинства данной методики измерений, у нее имеется существенный недостаток, который не позволяет в полной мере использовать бассейн площадью 20 м^2 для целей калибровки математической модели. Этот недостаток связан с относительной малочисленностью рядов наблюдения в различных природных зонах, особенно в последнее время. Наблюдения за испарением с водной поверхности с использованием испарительного бассейна 20 м^2 в настоящее время производятся всего на четырех станциях ЕТР.

Исходя из вышесказанного для тестирования и калибровки математической модели были использованы наблюдения на испарителе ГГИ-3000 как наиболее многочисленные и тесно связанные с метеонаблюдениями. На Европейской территории России наблюдения производились на 54 станциях.

Необходимо также подчеркнуть, что процесс тестирования и калибровки математической модели проводился на трех уровнях. На первом и втором сопоставлялись данные расчета и измерения внутригодового и многолетнего хода испарения. Результаты сопоставлений подробно описаны в работе [6]. Коэффициенты корреляции между расчетными и измеренными величинами испарения лежат в пределах 0,7÷0,9. Стандартные ошибки расчета составляют менее 10 %, т. е. сходимость результатов довольно высокая. Динамика испарения с водной поверхности имеет сложный характер, и математическая модель правильно ее описывает [6].

Третий уровень сопоставлений включает в себя сравнение среднемноголетних значений испарения. Для центральной части ЕТР было отобрано 35 пунктов наблюдения за испарением и сопутствующими метеоданными. В процессе калибровки получены оптимальные значения параметров математической модели, которые потом использовались без изменений во всей расчетной области. К таким параметрам относятся, прежде всего, шероховатость подстилающей поверхности, альбедо, коэффициенты поглощения радиации и характеристики теплообмена в водной среде. В результате при переходе от одной точки к другой в расчетах изменялись лишь среднесуточные ряды наблюдений за метеоэлементами (температура воздуха, давление пара, скорость ветра, а также общая и нижняя облачность). Изменялось также значение широты местности, которое использовалось при определении радиационных характеристик.

На рис. 1 приведена диаграмма, отражающая итоговый результат сопоставления расчетных ($E_р$) и измеренных ($E_и$) среднемноголетних значений испарения после выполнения процедуры калибровки.

Уравнение связи между расчетными и измеренными значениями следующее:

$$E_р = 0{,}999E_и\,, \qquad R^2 = 0{,}97. \tag{1}$$

Средняя стандартная ошибка расчета составляет 6 %.

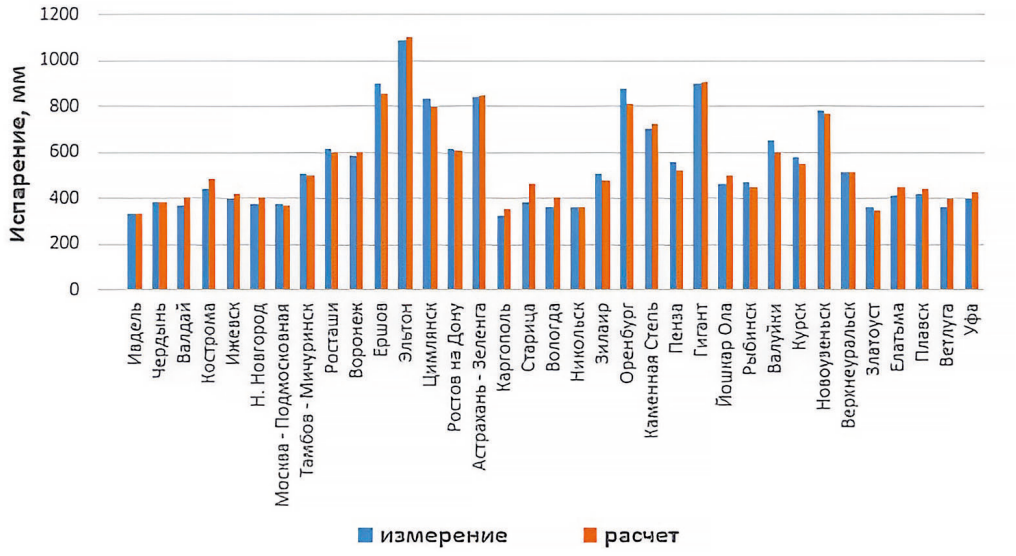


Рис. 1. Сопоставление измеренных и расчетных среднемноголетних значений испарения с поверхности воды для периода 2000–2020 гг. на ряде станций Европейской территории России

Fig. 1. Comparison of the calculated and pre-designed average many-year values of evaporation rom water surface for the 2000–2020 period at a number of stations of the European territory of Russia

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Несмотря на некоторые погрешности расчета, довольно высокая степень схождения модельных и измеренных среднемноголетних величин испарения позволяет восстановить значения данной характеристики в местах проведения метеорологических измерений. На рис. 2 приведена карта с пространственным распределением расчетных среднемноголетних значений испарения в исследуемой области. Карта построена в среде QGIS по данным расчета испарения в узлах расположения метеостанций.

Как показал дополнительный анализ результатов моделирования, величина испарения в первую очередь зависит от метеоусловий и широтного

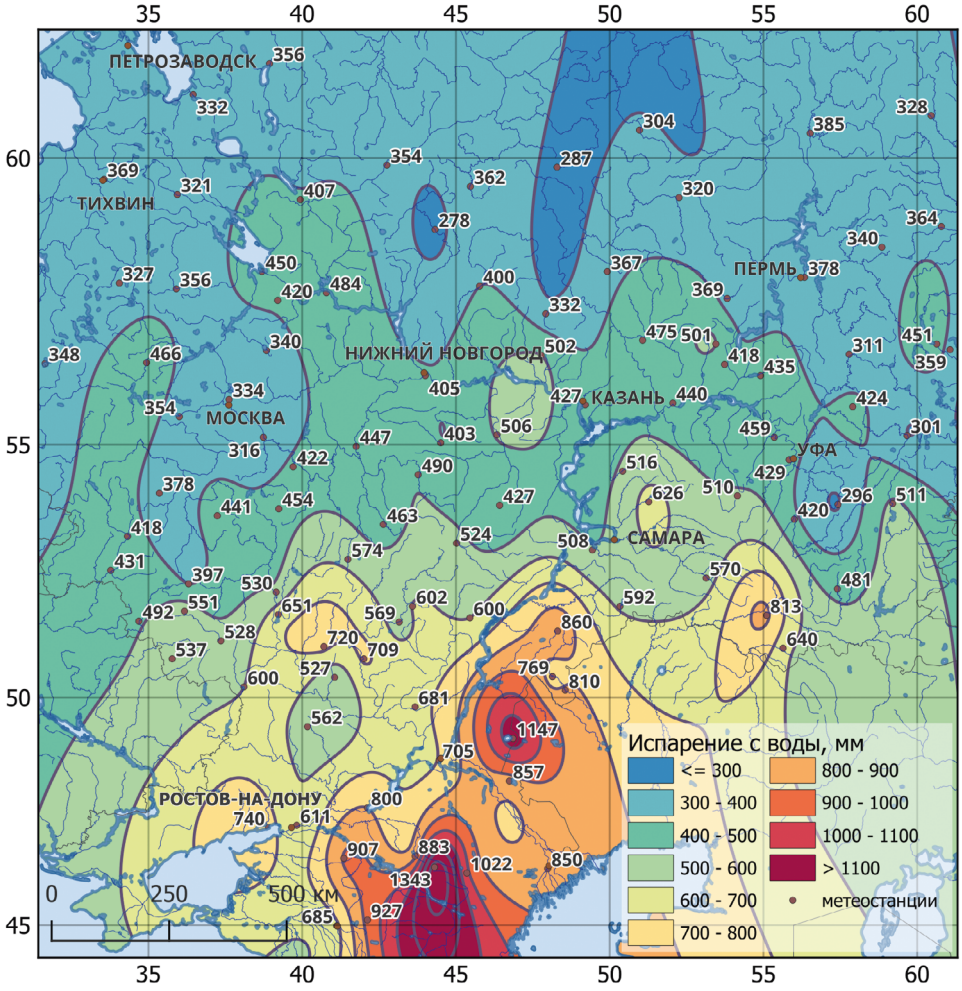


Рис. 2. Пространственное распределение расчетных среднемноголетних значений испарения за период с 2000 по 2020 г.

Fig. 2. Spatial distribution of designed average many-year evaporation values over the period from 2000 to 2020

расположения местности. Наиболее сходными являются пространственные поля испарения и температуры. В рамках проведенной работы исследованы корреляционные зависимости между расчетными среднемноголетними величинами испарения ($E_р$) и основными метеорологическими переменными за теплый период года, температурой воздуха, давлением водяного пара и скоростью ветра, а также общей и нижней облачностью. Как показал статистический анализ наиболее тесная зависимость наблюдается между испарением и температурой теплого периода ($T_{ТП}$), с коэффициентом корреляции $R = 0{,}9$ (рис. 3).

Уравнение данной связи (2) носит экспоненциальный характер, что обусловлено подобным видом зависимости давления насыщенного пара испаряющей водной поверхности от ее температуры:

$$E_р = 40{,}4 \exp(0{,}2T_{ТП}). \quad (2)$$

При проведении расчетов по формуле (2) стандартная ошибка составила 15 %.

Из статистического анализа также следует, что коэффициент корреляции между среднемноголетними значениями $E_р$ и скоростью ветра ($v_{ТП}$) равен 0,74, а между испарением и давлением пара в атмосфере подобная связь практически не выявлена. Наблюдается также довольно высокая обратная

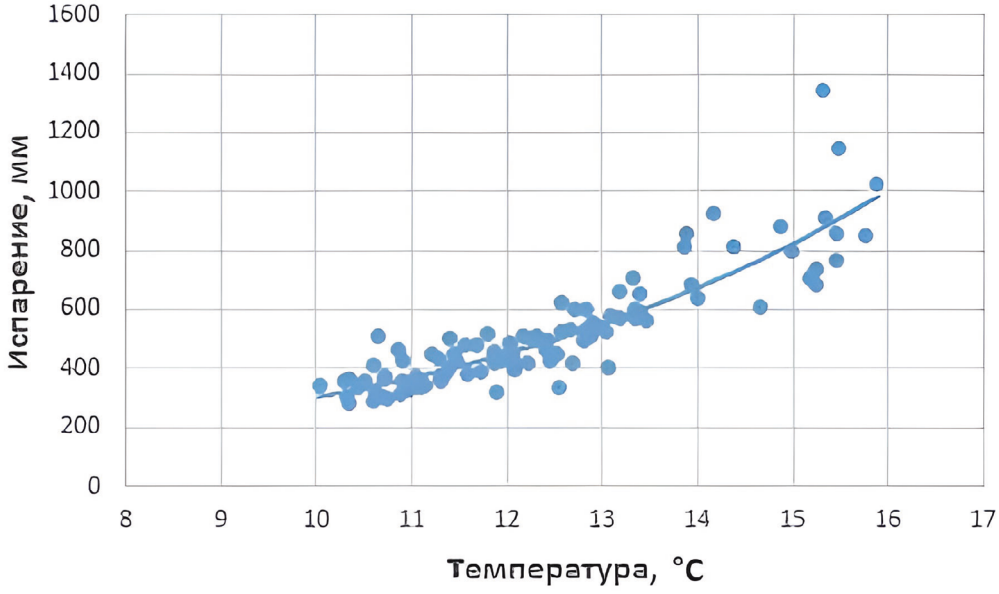


Рис. 3. Зависимость между расчетными среднемноголетними величинами испарения с воды и температурой воздуха теплого периода года

Fig. 3. Dependence between pre-designed average many-year evaporation values from water surface and air temperature of a warm season

корреляционная связь между испарением и показателями общей и нижней облачности (R = 0,75 и 0,7). Однако данные характеристики находятся в сильной обратной зависимости от температуры воздуха с коэффициентом корреляции больше 0,8, поэтому выявить индивидуальное влияние данных факторов довольно трудно.

Однако, как следует из полученных результатов, температура не является единственным фактором формирования пространственного распределения испарения. Поэтому по методу множественной линейной регрессии было построено уравнение связи между среднемноголетними значениями испарения, температуры воздуха и скорости ветра ($v_{ТП}$) теплого периода, еще одной из важнейших переменных, используемых при расчетах испарения.

Учитывая экспоненциальный характер зависимости $E_р$ от температуры, в качестве переменной вместо испарения в регрессионном анализе использовался логарифм его величины. В этом случае получено следующее расчетное уравнение:

$$E_р = \exp(0{,}16T_{ТП} + 0{,}22\ v_{ТП} + 3{,}7). \quad (3)$$

Коэффициент корреляции подобной связи равен 0,97, а стандартная ошибка составляет 8 %.

Использование в качестве переменных метеоданных средней температуры и скорости ветра теплого периода вносит некоторую неопределенность в метод расчета данных характеристик. В модели «ГГИ – ГИДРОФИЗИКА» под теплым периодом понимается период с отсутствием снежного покрова, а в работе А. Н. Постникова [2] к теплому периоду относятся те месяцы, средние значения температуры для которых больше нуля. Чтобы исключить трудности с определением данных характеристик, в проведенном нами исследовании в качестве переменных использованы средние метеоданные за пять самых теплых месяцев года, с мая по сентябрь ($T_{5М}$ и $v_{5М}$). Получены следующие уравнения связи, аналогичные (2) и (3):

$$E_р = 61{,}3\ \exp(0{,}12T_{5М}), \quad (4)$$

$$E_р = \exp(0{,}1T_{5М} + 0{,}22\ v_{5М} + 4). \quad (5)$$

Коэффициенты корреляции данных связей, соответственно, равны 0,93 и 0,99, а стандартная ошибка расчета составляет 13 % и 7 %. Таким образом, использование в качестве переменных метеоданных их средних значений за пять месяцев увеличивает точность расчетов и упрощает подготовку исходной информации.

Кроме анализа многолетних характеристик испарения с водной поверхности также были рассмотрены и ежегодные данные об испарении и их

связь со средней температурой воздуха и скоростью ветра теплого периода. Коэффициент корреляции в этом случае составляет 0,76, а стандартная ошибка расчетов по уравнению регрессии – 85 %, т. е. использование подобной информации в расчетах нецелесообразно.

Однако применение метода множественной линейной регрессии для анализа ежегодных средних данных за пять самых теплых месяцев года об испарении, температуре и скорости ветра ($T_{Г5м}$ и $v_{Г5м}$) позволяет значительно повысить точность расчета. В этом случае уравнение, аналогичное (5), имеет вид:

$$E_Р = \exp(0{,}07T_{Г5М} + 0{,}22\ v_{Г5м} + 4). \quad (6)$$

Коэффициент корреляции данной связи равен 0,92, а стандартная ошибка расчета составляет 12 %: точность расчетов значительно повысилась по сравнению с использованием только одной переменной – температуры.

Известно, что климатические характеристики, такие как потоки солнечной радиации и температура воздуха, имеют сильную широтную зависимость и, соответственно, величина испарения также зависит от значений северной широты местности (φ). Коэффициент корреляции полученной связи (7) равен 0,85, а стандартная ошибка расчета составляет 17 %:

$$E_Р = 22974\ \exp(-0{,}07\varphi). \quad (7)$$

Формулы (2) – (7) не являются универсальными, т. к. получены только для исследованной в рамках данной работы территории. Несмотря на то, что их вид отражает физические закономерности формирования испарения с поверхности воды под действием таких основных метеоэлементов, как температура воздуха и скорость ветра, полученные формулы в некоторой степени обусловлены и пространственными закономерностями распределения метеофакторов на Европейской территории России. При этом математическая модель была откалибрована лишь по экспериментальным данным, полученным на этой территории.

Использование полученных выше расчетных формул для определения испарения с поверхности воды позволяет применять упрощенную методику реанализа на регулярной пространственной сетке. Для этой цели необходима соответствующая информация в ее узлах. Для расчетов испарения за период 2000–2020 гг. использовались данные о температуре воздуха из глобального архива метеоданных Уиллмотта и Мацууры с сайта[2]. Среднемесячные значения температуры воздуха на метеостанциях были интерполированы в пространственную сетку 0,5° широты × 0,5° долготы. При реанализе использована формула (4), связывающая величину среднемно-

2 Электронный ресурс. URL: http://climate.geog.udel.edu/~climate/html_pages/archive.html

голетнего испарения с температурой воздуха, усредненной за пять теплых месяцев. К сожалению, мы не располагаем базой данных о сеточных значениях скорости ветра на ЕТР, поэтому нет возможности использовать для реанализа более точную формулу (5) при расчетах испарения с водной поверхности.

На рис. 4 приведена полученная при использовании подобной методики реанализа на регулярной пространственной сетке карта среднемноголет-

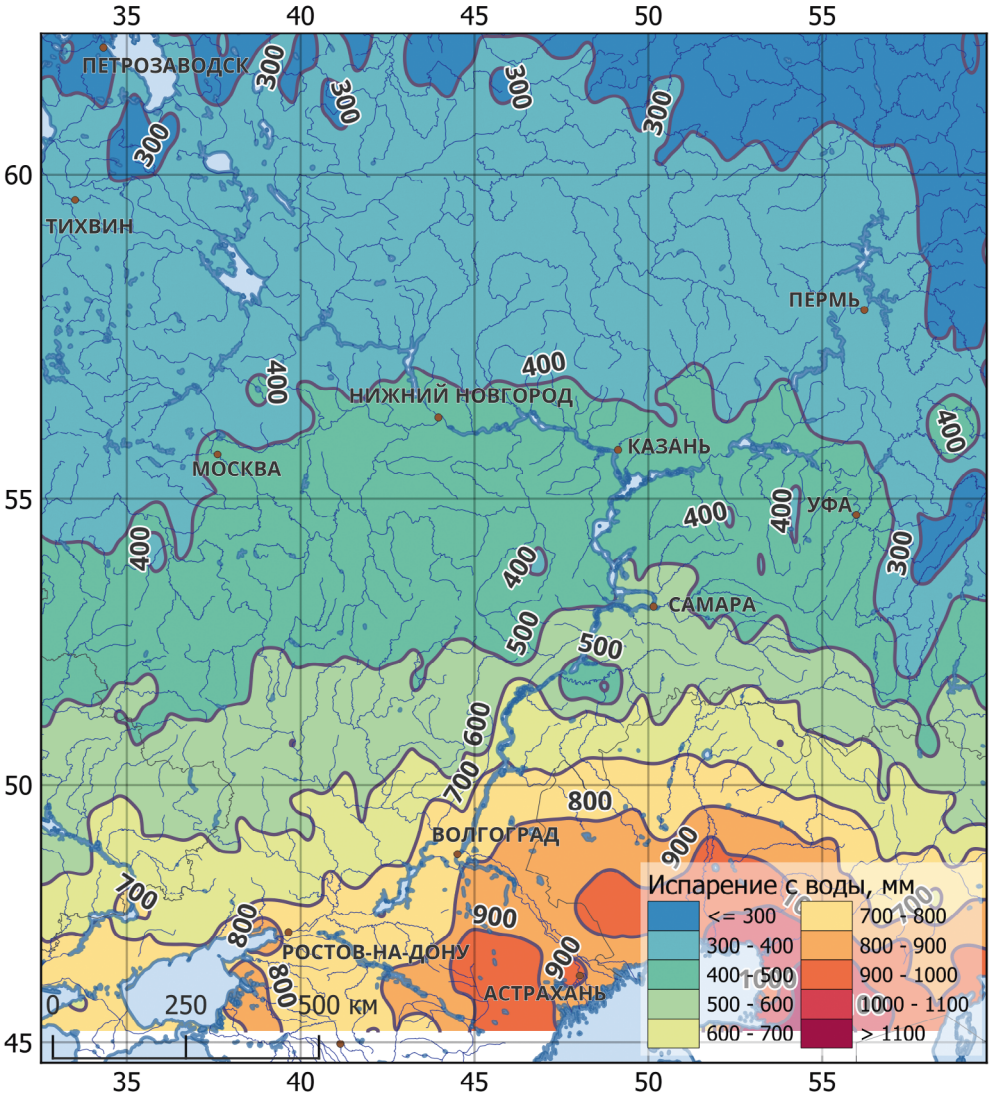


Рис. 4. Пространственное распределением расчетных среднемноголетних значений испарения с поверхности воды

Fig. 4. Spatial distribution of pre-designed average many-year values of evaporation from water surface

них значений испарения. При сопоставлении карты на рис. 4 с картой на рис. 2 выявляются заметные различия, что обусловлено как отсутствием учета скорости ветра в расчетах, так и отличием в методиках реанализа. В первом случае (рис. 2) расчеты испарения проводили по данным измерения метеоэлементов в узлах расположения метеостанций, а во втором (рис. 4) – по данным их предварительного реанализа в узлах регулярной сетки. Учитывая нелинейность связи испарения с температурой воздуха, методы аппроксимации данной характеристики на неохваченных наблюдениями территориях могут заметно повлиять на расчетную величину испарения. К тому же, как показали сопоставления среднемесячных температур, измеренных и полученных в результате предварительного реанализа, заметные расхождения между ними иногда достигают 1 °С. Таким образом, проблема выбора метода реанализа связана с точностью расчета пространственных характеристик испарения и требует дополнительных исследований.

Выполнена оценка средней величины испарения с водной поверхности на исследованной территории, лежащей в пределах от 45 до 61,5° с. ш. и 31,5–61° в. д. По данным реанализа на регулярной сетке (рис. 4) эта величина составляет 524 мм/год, при коэффициенте вариации, равном 40 %. Средняя величина расчетных значений в узлах расположения метеостанций – 514 мм/год, т. е. отклонение менее 2 %. При этом среднее измеренное испарение на 35 пунктах наблюдения, используемых при калибровке математической модели, равно 544 мм/год. Это всего на 4 % превышает сеточное среднее значение. Полученные выше данные указывают на достаточно высокую степень точности примененной для оценки среднемноголетних пространственных характеристик испарения с водной поверхности методики реанализа.

Проблемы использования результатов расчета. Переходные коэффициенты

Представленные выше модельные расчеты испарения относятся, по существу, к реанализу результатов наблюдений на испарителе ГГИ-3000. Данные, полученные наземными испарителями, не могут напрямую использоваться для описания испарения с естественных водоемов. Уже с начала использования метода испарителей небольшого размера, в т. ч. ГГИ-3000, стало ясно, что из-за разницы тепловых режимов водной среды в испарителе и в более крупных водоемах в измеряемую величину вносятся определенные искажения. Для испарительного бассейна площадью 20 м^2 данные искажения минимальны, поэтому он признан эталонным прибором для измерения испарения. Исходя из этих обстоятельств существует проблема перехода от испарения, измеренного в испарителе (в нашем случае

откалиброванного по данным испарителя), к наблюдаемому с поверхности бассейна. Для этой цели широко используются так называемые коэффициенты перехода. Основы методики их расчетов были разработаны В. И. Кузнецовым [8, 9], дополнены А. Р. Константиновым [10], П. П. Кузьминым [7] и В. С. Голубевым [11]. Следует также упомянуть более позднюю работу В. С. Вуглинского [12], где данная методика получила свое дальнейшее развитие.

В общем виде формула перехода от величины испарения ($E_{0,3}$) с испарителя ГГИ-3000 к испарению с поверхности бассейна (E_{20}) выглядит следующим образом:

$$E_{20} = \alpha E_{0,3}. \quad (8)$$

В работе [7] отмечено, что следует различать три вида переходного коэффициента α: фактический (вычисленный за отдельные месяцы), региональный (осредненный за все годы наблюдений в данном пункте) и глобальный (осредненный по всем пунктам наблюдения региональный коэффициент).

Для целей данного исследования наибольший интерес представляют региональные коэффициенты перехода от одних среднемноголетних данных к другим. В работе В. И. Кузнецова [8] представлена формула для перехода показаний испарения, полученных на ГТИ-3000, на показания с бассейна в виде:

$$\alpha = rK_t, \quad (9)$$

где r – инструментальный коэффициент испарителя;

K_t – коэффициент, зависящий от теплового режима водной среды и учитывающий разницу в температурах поверхности воды в бассейне и испарителе.

$$K_t = (e_{20} - e_2) / (e_{0,3} - e_2), \quad (10)$$

где e_{20}, $e_{0,3}$ – упругость насыщенного водяного пара, вычисленная по температуре поверхности воды в бассейне и испарителе;

e_2 – упругость водяного пара на высоте 2 м.

В. И. Кузнецов [8] полагал, что инструментальный коэффициент испарителя зависит от турбулизирующего влияния бортиков, потерь на испарение со смоченных стенок и адвективного относа пара с испаряющей поверхности. Средняя величина коэффициента r для континентальных испарителей определена им равной 0,75, но в каждом конкретном случае наблюдаются отклонения, зависящие от метеорологических условий. По мнению П. П. Кузьмина подход В. И. Кузнецова излишне сложен и приводит к заметным ошибкам вычисления. Поэтому для расчета региональных коэффициентов ($\alpha_{ср}$) П. П. Кузьмин [6] предлагает формулу (11), опираясь только на средние пока-

зания испарителя ГГИ-3000 и полагая, что переходный коэффициент слабо зависит от метеоусловий, изменчивость которых уже проявляется при формировании среднемесячной величины испарения $E_{0,3ср}$:

$$\alpha_{ср} = 0,98 - 0,0007E_{0,3ср}. \quad (11)$$

Из работы П. П. Кузьмина следует, что коэффициент корреляции данной связи равен 0,79, а стандартная ошибка составляет 6,5 %.

Формула (11) привлекательна тем, что отражает линейный характер зависимости от среднего значения испарения, которое определяется в единицах мм/мес, т. е. она пригодна для использования в любом диапазоне осреднения по времени.

В работе [10] представлена методика расчета переходных коэффициентов, основанная на их зависимости от температуры и влажности воздуха. Там же приведены номограммы для определения средних величин коэффициентов перехода за теплый сезон по данным о среднегодовой температуре и упругости водяного пара. Использование номограмм усложняет применение данной методики в пространственных обобщениях.

В. С. Голубев [11], так же как и П. П. Кузьмин, предложил использовать для расчета α средние скорости испарения за конкретный месяц (мм/сут):

$$\alpha_{ср} = 1 - 0,063E_{0,3ср}^{0,6}. \quad (12)$$

Однако данное уравнение нелинейно относительно $E_{0,3ср}$, поэтому имеются трудности с усреднением коэффициента перехода за длительные интервалы времени.

В исследовании [13] В. С. Голубев предложил свою формулу для перехода сезонных величин испарения с ГГИ-3000 к испарению в бассейне, используя дополнительно информацию о широте пункта наблюдений (φ) в градусах и продолжительности сезона наблюдений (τ) в сутках:

$$E_{20} = 0,47E_{0,3} + 1,6\tau - 1,2\varphi + 54. \quad (13)$$

Учитывая, что продолжительность сезона наблюдений и широта связаны с величиной испарения $E_{0,3}$, формула (13) отражает зависимость переходных коэффициентов от величины испарения с ГГИ-3000, только в более сложном виде.

Анализируя изложенное выше, делаем вывод, что для поставленной в данной работе задачи могут быть использованы методики определения региональных коэффициентов перехода, предложенные П. П. Кузьминым и В. С. Голубевым.

Формула (11) была получена на основе данных сравнительных измерений испарения на 15 станциях по программе ВМО, в т. ч. на двух отечественных станциях (Валдай и Дубовка). Работа [7] опубликована в 1979 г., когда проблемы климатических изменений и их влияния на гидрологические процессы еще не стояли. Анализ наблюдений за испарением с поверхности воды в 1960–1990 гг. показал, что, несмотря на потепление климата, зафиксирован отрицательный тренд данной характеристики почти повсеместно на Европейской территории России и в других странах мира [14–16]. Эффект получил название «парадокс испарения». Детальное изучение динамики метеоданных в районах исследования и математическое моделирование показало, что эффект повышения температуры воздуха в значительной степени скомпенсирован существенным снижением скорости ветра в ряде регионов России, Австралии, Китая, США [6, 17–21].

С целью определения влияния климатических изменений на коэффициент перехода, авторами статьи проанализированы совместные многолетние тренды испарения, измеренного с помощью ГГИ-3000, бассейна и коэффициента α. Для этого использовали все доступные в настоящее время данные наблюдений на станциях Салехард, Валдай, Ершов, Цимлянск, Чердынь, Нижнедевицк, Рыбинск и Вязовые. Относительные месячные величины испарения и коэффициентов перехода рассчитаны по формуле:

$$K_i = X_i / X_{ср}, \qquad (14)$$

где X_i – значение исследуемого ряда в i-м году наблюдений;

$X_{ср}$ – среднее многолетнее значение за весь период наблюдений.

Выполненные сопоставления показали, что тренды относительных величин месячного испарения и коэффициентов перехода находятся в противофазе (рис. 5).

Данные закономерности отмечены для всех исследованных станций с мая по сентябрь. При этом зачастую в противофазе находятся даже сезонные изменения испарения и коэффициента α. Как видно из рис. 5, в период, когда почти повсеместно в бассейне Волги наблюдалось падение испарения с поверхности воды, переходные коэффициенты росли, что зачастую не учитывалось в практических расчетах. Наиболее ярко эта тенденция проявляется для Цимлянска. Коэффициент корреляции между месячными значениями испарения и коэффициентом перехода для этой станции лежит в пределах от −0,75 до −0,8.

В табл. 1 приведены данные расчета коэффициентов перехода за различные периоды наблюдений. При этом значения коэффициентов первого периода, относящиеся к 1950–1960 гг., взяты из работы В. И. Кузнецова [9]. В последующий период, до 1990 г., повсеместно наблюдается рост пере-

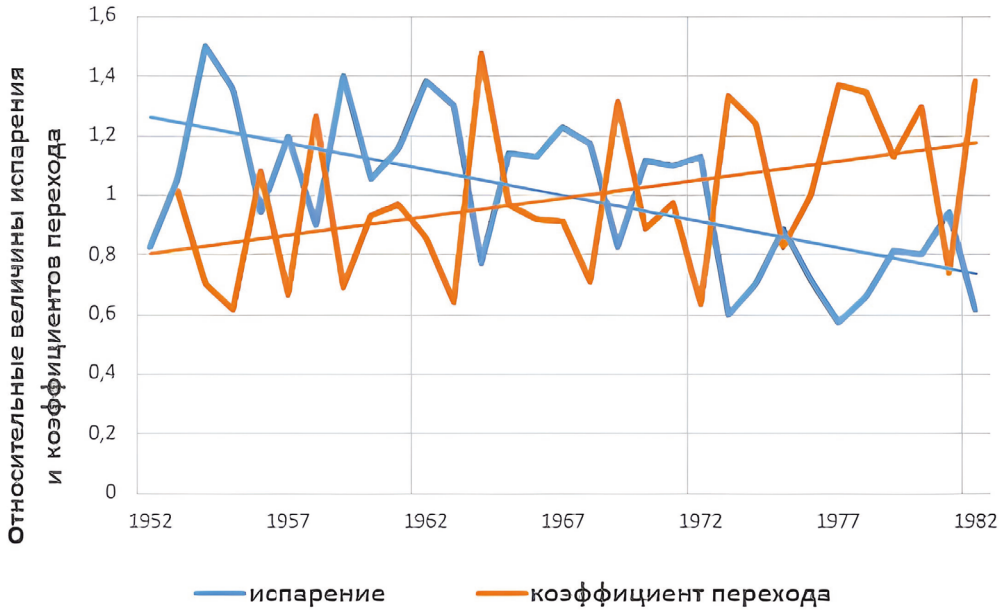


Рис. 5. Динамика относительных величин месячного испарения и коэффициентов перехода для станции Цимлянск (июль)

Fig. 5. Dynamics of relative values of monthly evaporation and transition coefficients for Tsimlyansk station (July)

ходных коэффициентов. Совместные наблюдения за испарением из бассейна и ГГИ-3000 после 1990-х годов проводились лишь на трех площадках – Ершов, Нижнедевицк и Вязовые. Причем в Ершове при росте испарения отмечалось падение переходных коэффициентов.

Более детальный анализ результатов наблюдений на площадках ВБС Нижнедевицкая и Вязовые в последние десятилетия показывает, что переходные коэффициенты в этот период претерпевают значительные колебания. До 1973 г. для станции Вязовые средняя величина коэффициента перехода была равна 0,9, а в период 1973–2003 гг. $\alpha = 1{,}1$. При этом коэффициент вариации данной характеристики увеличился с 0,2 до 0,4. Однако значительный рост испарения в июне, который наблюдался с 2000 по 2015 г., привел к явному падению коэффициента перехода в этот же период. На Нижнедевицкой станции также отмечаются значительные колебания коэффициента α, причем в 2006–2007 гг. он становится меньше, чем в период 1956–1967 гг. Затем вновь наблюдается скачок до значений больше 1.

Следует также рассмотреть еще один важный аспект, вытекающий из анализа полученной информации. В работе [9] при обобщениях не использовались данные для станций Нижнедевицкая и Рыбинск в том случае, когда коэффициент α превышал 1, они были отнесены к «сомнительным» в период наблюдений 1950–1960 гг. При анализе информации, полученной в последующие годы, как было показано выше, на станциях Нижнедевиц-

Таблица 1. Среднемноголетние месячные значения переходных коэффициентов за различные периоды наблюдений

Table 1. Average many-year values of transitional coefficients over the different observation periods

Станция	Период наблюдений, гг.,	Месяц						
		май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	средний
Цимлянск	1954–1967	0,87	0,76	0,75	0,75	0,84	0,97	0,81
	1968–1987	0,81	0,94	0,89	0,91	0,97	1,04	0,93
Ершов	1952–1967	0,79	0,74	0,75	0,76	0,77	0,79	0,77
	1968–1990	0,85	0,82	0,84	0,87	0,88	0,94	0,87
	1991–2020	0,77	0,79	0,8	0,78	0,84	0,88	0,81
Чердынь	1952–1967	0,83	0,87	0,86	0,9	0,88	–	0,87
	1968–1989	0,83	0,87	0,92	0,99	0,97	1,07	0,94
Валдай	1948–1968	0,96	0,97	0,95	0,95	0,95	0,94	0,95
	1969–1989	0,99	1,03	1,03	0,95	0,88	–	0,98
Рыбинск	1965–1968	0,93	0,92	0,96	0,91	1,1	1,19	1,00
	1969–1987	0,92	0,97	1,03	1,02	1,05	1,1	1,02
Нижнедевицк	1956–1967	0,83	0,96	0,95	0,93	0,95	0,96	0,93
	1968–1990	1,01	1,03	1,1	1,07	1,04	1,02	1,05
	1991–2012	1,01	1,02	1,04	1,1	1,07	1,1	1,06
Вязовые	1952–1966	0,86	0,87	0,91	0,94	0,98	0,97	0,92
	1967–1990	0,95	1,00	1,04	1,04	1,01	1,01	1,01
	1991–2020	1,04	1,07	1,07	1,02	1,04	1,04	1,05
Салехард	1961–1966	–	1,03	1,06	1,06	1,09	–	1,06
	1967–1987	–	1,2	1,06	1,03	1,11	–	1,11

кая, Рыбинск и Вязовые к такой «сомнительной» информации можно отнести больше половины месячных данных о коэффициенте перехода. Заметим, что в табл. 1 для названных стаций даже среднемноголетние значения превышают 1, т. е. испарение с бассейна больше, чем с ГГИ-3000. Основными причинами данного явления могут быть климатические изменения, факторы взаимного расположения данных приборов на местности и особенности их установки в почвенном покрове, погрешности измерений, а также неисправность оборудования.

В соответствии с формулой (9) коэффициент перехода представляет произведение инструментального коэффициента r, значения которого по В. И. Кузнецову [8, 9] меньше 1, и коэффициента K_t, зависящего от среднемесячной разности температур поверхности воды в испарителе ($t_{0,3}$) и бассейне (t_{20}). Судя по данным наблюдений, температура в бассейне выше, чем

в испарителе, из-за меньшего воздействия теплового режима окружающего бассейн грунта. Поэтому коэффициент K_t больше 1. В. И. Кузнецов установил [9], что зависимость между среднемесячной температурой воды в бассейне и испарителе является прямолинейной и выражается уравнением:

$$t_{20} = \gamma t_{0,3} + \lambda. \quad (15)$$

Для континентальных испарительных станций λ равно единице, а γ меняется в пределах 0,94–1. Значения этой характеристики картированы.

Авторами статьи по методике В. И. Кузнецова построена зависимость t_{20} от $t_{0,3}$ для Нижнедевицкой станции за период 1998–2012 гг. Оказалось, что параметры зависимости (15) имеют значения λ = 1,1 и γ = 1,01, т. е. выходят за рамки обозначенных в работе [9] значений. По полученным авторами статьи данным об α и K_t по формуле (9) были рассчитаны инструментальные коэффициенты испарителя *r*, которые в большинстве своем превышали 1, что также расходится с результатами работы [9], в рамках которой при анализе инструментальной составляющей привлекалась метеоинформация о скорости ветра, давлении пара и температуре в месте расположения испарителя и бассейна. Полученные при этом коэффициенты всегда были меньше 1. Не исключено, что специфика взаимного расположения бассейна и испарителя может изменить воздушные потоки пара таким образом, что инструментальный коэффициент будет превышать единицу. Слишком много совместных измерений испарения приводят к подобным результатам. В противном случае подобные результаты являются погрешностями измерений или методическими ошибками организации наблюдений.

В настоящее время можно констатировать лишь тот факт, что методические основы перехода от испарения с испарителя к бассейну, разработанные более 50 лет назад, требуют корректировки с учетом климатических изменений. При этом необходима тщательная ревизия результатов наблюдений за тот же период с целью определения надежности экспериментальной информации. Целесообразно провести дополнительные, более детальные исследования данного аспекта проблемы перехода от испарения с ГГИ-3000 к бассейну 20 м^2 и далее к более крупным водоемам. Пока что наблюдения с испарителя ГГИ-3000 остаются практически единственным источником информации о реальном испарении с водоемов.

Рассмотрев сложные аспекты перевода данных с испарителей на небольшие водоемы, аналогом которых является бассейн площадью 20 м^2, авторы данной статьи пришли к выводу о целесообразности использования подхода П. П. Кузьмина [7] и его формулы (11). Во-первых, как уже упоминалось выше, она носит линейный характер зависимости переходных коэффициентов от испарения, что позволяет использовать ее для любых

многолетних интервалов времени. Во-вторых, в некотором роде эта формула отслеживает влияние климатических изменений испарения на коэффициент α. В соответствии с ней при падении испарения наблюдается рост переходных коэффициентов, и наоборот. Однако данная формула была получена до 1979 г. по наблюдениям тех лет, поэтому ее необходимо проверить с учетом последующей информации. В ходе проведенного исследования авторами статьи для восьми станций рассчитаны среднемноголетние месячные значения испарения и переходных коэффициентов для всего периода наблюдений. Общие периоды наблюдений отражены в табл. 1. В табл. 2 представлены среднемноголетние месячные значения испарения (ГГИ-3000), переходного коэффициента и коэффициента корреляции между ними.

Таблица 2. Среднемноголетние месячные значения испарения ($E_{0,3ср}$) (ГГИ-3000), переходного коэффициента ($\alpha_{ср}$) и квадрата коэффициента корреляции между ними для ежегодных значений

Table 2. Average many –year values of evaporation ($E_{0,3ср}$) and (ГГИ-3000), transition coefficient ($\alpha_{ср}$) and squared coefficient of correlation between them for early values

Станция	Месяц								
	май			июнь			июль		
	$E_{0,3ср}$	$\alpha_{ср}$	R^2	$E_{0,3ср}$	$\alpha_{ср}$	R^2	$E_{0,3ср}$	$\alpha_{ср}$	R^2
Цимлянск	135	0,81	0,6	175	0,88	0,6	207	0,8	0,66
Ершов	147	0,8	0,2	191	0,79	0,2	208	0,8	0,44
Чердынь	96	0,84	0,2	107	0,85	0,2	105	0,9	0,4
Валдай	73	0,97	0,2	88	1	0,1	90	1	0,17
Рыбинск	98	0,94	0	122	0,97	0	108	1	0
Нижнедевицк	95	0,99	0,14	113	1,01	0,14	116	1,05	0,53
Вязовые	106	0,97	0,35	117	1	0,39	117	1,03	0,31
Салехард	–	–	–	83	1,15	0,31	93	1,4	0,42
Цимлянск	192	0,9	0,62	125	0,91	0,57	62	1	0,44
Ершов	182	0,8	0,44	122	0,83	0,42	60	0,88	0,17
Чердынь	78	1	0,35	39	0,94	0,02	25	1,03	0,27
Валдай	77	0,9	0,14	44	0,9	0,16	–	–	–
Рыбинск	108	1	0,08	69	1,06	0,13	39	1,1	0
Нижнедевицк	106	1,06	0,48	71	1,05	0,38	37	1,05	0,23
Вязовые	102	1,01	0,23	65	1	0,24	37	1,03	0,3
Салехард	56	1,06	0,35	27	1,09	0,54	–	–	–

Как следует из табл. 2, для большинства станций степень связи данных характеристик довольно низкая. По результатам расчета по методике П. П. Кузьмина построена аналогичная связь (11), коэффициенты которой

отличаются от полученной в работе [7]. Причем коэффициент корреляции новой связи *(R* = 0,62) ниже, чем у (11) (*R* = 0,79). Однако, если исключить из анализа данные станций Нижнедевицкая, Рыбинск и Вязовые, то параметры новой связи будут почти такие же, как у формулы П. П. Кузьмина, т. е. полученная на этих станциях информация не вписывается в разработанные ранее схемы В. И. Кузнецова и П. П. Кузьмина. По-видимому, данные схемы требуют корректировки.

В нашей работе мы опирались на информацию о сезонных величинах испарения. Поэтому была построена корреляционная зависимость между сезонными значениями испарения с бассейна (E^{c}_{20}) и с ГГИ-3000 ($E^{c}_{0,3}$) для всех лет наблюдений на восьми станциях (рис. 6). Данная зависимость хорошо описывается уравнением:

$$E^{c}_{20} = E^{c}_{0,3}(1{,}15 - 0{,}0004E^{c}_{0,3}). \qquad (16)$$

Коэффициент корреляции данной связи равен 0,9, т. е. довольно высокий. При этом стандартная ошибка расчета тоже высокая – 13 %. При расчетах по формуле П. П. Кузьмина (15) ошибка в два раза меньше. Однако при ее выводе использовались данные, полученные только до 1972 г., и, как указывалось выше, только два пункта наблюдений расположены на территории России.

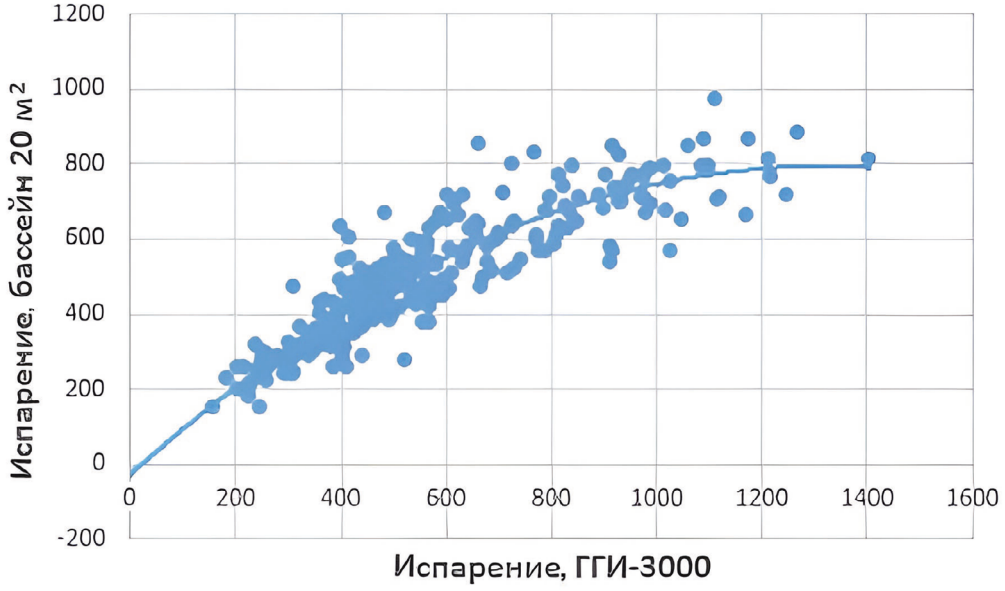


Рис. 6. Зависимость между сезонными значениями испарения с бассейна и с ГГИ-3000

Fig. 6. Dependence between season values of evaporation from the pool and from GTI -3000

В скобках формулы (16) находится выражение для расчета α^c сезонных значений испарения, которая имеет тот же вид, что и (11), но с другими коэффициентами:

$$\alpha^c = 1{,}15 - 0{,}0004E^c_{03}. \quad (17)$$

Это связано с тем, что для расчета коэффициентов перехода по формуле (11) необходима информация о многолетних среднемесячных значениях, а по формуле (17) – о сезонных.

Проведены также расчеты сезонных величин испарения с бассейна для всех лет наблюдений и станций по формуле В. С. Голубева (13) [22]. Коэффициент корреляции с наблюденными данными составил 0,88, т. е. немного ниже, чем по формуле (16). Стандартная ошибка расчета при этом равна 17 % – более высокая, чем при расчетах по (16). Формула В. С. Голубева уступает по точности полученному авторами уравнению. Сопоставлены и средние значения сезонных коэффициентов перехода для восьми вышеназванных пунктов наблюдения. При этом коэффициент перехода для метода В. С. Голубева рассчитывался путем деления испарения с бассейна, полученного по формуле (13), на величину испарения с ГГИ-3000. В табл. 3 приведены результаты сопоставления средних сезонных величин коэффициентов перехода, полученных на основе результатов наблюдения по методике В. С. Голубева и по формуле (17). В подавляющем большинстве случаев результаты расчета по формуле (17) ближе к экспериментальным данным.

Таблица 3. Среднемноголетние сезонные величины коэффициентов перехода α с испарения, измеренного на ГГИ-3000 на испарение с бассейна площадью 20 м² и стандартные ошибки их определения δ, полученные на основе расчетов по методике В. С. Голубева [13] и формуле (17)

Table 3. Average many-year values of coefficients of transition from α evaporation, gauged at GTI-3000 to δ evaporation from a 200 m² pool and standard errors of their definition, obtained according V. S. Golubev calculation methods [13] and according formula (17)

Пункт наблюдения	Данные наблюдений	Расчет по методике В. С. Голубева		По формуле (17)	
	α	α	δ, %	α	δ, %
Цимлянск	0,82	0,77	15	0,81	13
Ершов	0,79	0,75	12	0,79	10
Чердынь	0,96	1,15	21	0,99	15
Валдай	0,94	1,09	19	1,00	10
Рыбинск	0,99	0,93	9	0,95	7
Нижнедевицк	0,99	0,96	15	0,95	15
Вязовые	1,02	0,95	19	0,95	19
Салехард	1,03	1,40	34	1,05	15
Среднее	**0,94**	**1**	**18**	**0,94**	**13**

Коэффициент корреляции между измеренными и расчетными данными для авторской формулы равен 0,85, для уравнения В. С. Голубева – 0,7. Этот факт можно объяснить тем, что формула (13) была разработана более 40 лет назад и в ней не учтены новые данные наблюдений. Однако модернизировать ее довольно сложно. В работе [13], где она приведена, нет информации о пунктах наблюдения и рядах данных, на основе которых формула выведена. Ничего не сказано и о методике ее получения, поэтому в расчетах рекомендуется использовать формулу (17).

Отметим также, что средние значения коэффициентов перехода для всех анализируемых станций, которые являются глобальными для изучаемой территории, совпадают для данных наблюдений и расчетов по формуле (17) и равны 0,94. Близость глобальных коэффициентов к единице приводит к выводу, что в современных условиях средняя величина испарения с небольших водоемов на анализируемой территории близка измеренной с помощью испарителей ГГИ-3000.

Можно сравнить данные нашего реанализа (рис. 2, рис. 4) с результатами картирования, представленного в Указаниях[1]. Сравнительный анализ показывает, что среднемноголетнее испарение в период 2000–2020 гг. примерно такое же или немногим ниже, чем в 1960-х годах. Данное обстоятельство объясняется тем, что в 1970–1980-е годы зафиксировано довольно заметное падение испарения с водной поверхности на Европейской территории России [6, 14, 16, 17]. В 1990-е годы спад испарения в основном прекратился, а на некоторых испарительных площадках был зафиксирован его рост. Однако, несмотря на рост испарения в последние десятилетия, в среднем в период 2000–2020 гг. величина испарения не достигла тех значений, которые были использованы при создании карты в конце 1960-х годов.

ВЫВОДЫ

В рамках проведенной работы для расширения баз данных и пространственных обобщений об испарении с водной поверхности впервые реализован метод реанализа, основанный на использовании физически обоснованной математической модели «ГГИ – ГИДРОФИЗИКА».

По данным о среднесуточных значениях температуры воздуха, скорости ветра, давления водяного пара, нижней и общей облачности на пространственной сетке в местах расположения 105 метеостанций Европейской территории России рассчитаны средние многолетние величины испарения с поверхности воды за период 2000–2020 гг. Предварительно была выполнена калибровка модели по данным наблюдений на 35 площадках за испарением с водной поверхности и построены соответствующие карты для данного участка территории России.

Результаты пространственного моделирования обобщены, получен ряд новых закономерностей, связывающих величину среднемноголетнего испарения с поверхности воды со среднемноголетними значениями температуры воздуха и скорости ветра за период 2000–2020 гг. Коэффициенты корреляции отдельных связей составляют 0,99, а стандартная ошибка расчета – 7 %. Полученная авторами статьи формула для расчета испарения по данным о температуре воздуха использована при реанализе величин испарения на регулярной пространственной сетке 0,5° широты × 0,5° долготы.

При реанализе на регулярной сетке средняя величина испарения с воды за период 2000–2020 гг. на исследуемой территории составила 524 мм/год. По данным расчета в узлах расположения метеостанций – 514 мм/год, а среднее измеренное испарение на 35 пунктах наблюдения, используемых при калибровке математической модели, равно 544 мм/год.

Математическая модель испарения с водной поверхности была откалибрована по данным наблюдения с испарителя ГГИ-3000. В исследовании впервые показано, что коэффициенты перехода результатов наблюдения, полученных методом испарителей, к испарению с малых и средних водоемов подвержены климатическим изменениям, произошедшим за последние десятилетия. При этом рост испарения приводит к падению переходных коэффициентов, и наоборот. Впервые выполнена корректировка основных расчетных формул для определения коэффициентов перехода, которые были получены более 50 лет назад и используются до сих пор. Статистический анализ данных наблюдений показал, что среднее значение коэффициента перехода для исследуемой территории с испарения, измеренного испарителями ГГИ-3000, к испарению с бассейна 20 м^2 составляет 0,94.

Полученные в ходе исследования результаты среднемноголетних значений испарения за период 2000–2020 гг. сопоставлены с данными картирования, представленными в Указаниях по расчету испарения с поверхности водоемов для периода 1960-х годов. Сравнения показали, что величины испарения в 2000-е годы зачастую не превышают наблюдавшиеся в 1960-е годы. Это объясняется тем, что на Европейской территории России в период 1970–1980 гг. произошло значительное уменьшение испарения по сравнению с 1960-ми годами, и последующий его рост в 2000-е годы не смог в среднем компенсировать данное падение.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Давыдов В. К. Испарение с водной поверхности в Европейской части СССР. М.: Гидрометеоиздат, 1944. 120 с.
2. Постников А. Н. О распределении испарения с водной поверхности на территории России // Ученые записки РГГМУ. 2014. № 36. С. 22–28.
3. Uliana E. M. et al. Estimated evaporation of lakes by climate reanalysis data and artificial neural networks // Journal of South American Earth Sciences. 2024. Vol. 136. P. 104811.
4. Andreasen M. et al. Estimating daily lake evaporation from biweekly energy-budget data // Hydrological Processes. 2017. Vol. 31. No. 25. P. 4530–4539.
5. Калюжный И. Л., Лавров С. А. Гидрофизические процессы на водосборе. СПб.: Нестор-История, 2012. 615 с.
6. Лавров С. А. Влияние климатических изменений на процессы формирования стока на водосборах. СПб: Свое издательство, 2024. 294 с.
7. Кузьмин П. П. О соотношении между показаниями водных испарителей и испарительного бассейна площадью 20 м^2 // Труды ГГИ. 1979. Вып. 258. С. 111–121.
8. Кузнецов В. И. О переходных коэффициентах наземных испарителей ГГИ-3000 // Труды ГГИ. 1954. Вып. 45 (99). С. 142–156.
9. Кузнецов В. И. Методика расчета испарения с бассейнов площадью 20 м^2 по наблюдениям в испарителях ГГИ-3000 // Труды ГГИ. 1970. Вып. 181. С. 3–32.
10. Константинов А. Р. Испарение в природе. Л.: Гидрометеоиздат, 1968. 532 с.
11. Голубев В. С. Экспериментальное определение составляющих водного баланса: в кн. Экспериментальные исследования гидрологических процессов и явлений. М.: Изд-во МГУ, 1979. С. 8–21.
12. Вуглинский В. С., Албул И. П. Методика расчета испарения с водной поверхности по данным наземного испарителя ГГИ-3000 // Вестник СПбГУ. 2016. Сер. 7. Вып. 3. С. 118–128.
13. Голубев В. С., Урываев А. П. Метод водных испарителей и его применение для расчета испарения с поверхности водоемов // Труды ГГИ. 1983. Вып. 289. С. 69–76.
14. Многолетние изменения испарения на Европейской территории России по данным водноиспарительной сети: научно-прикладной справочник под редакцией В. С. Вуглинского. 2021. 64 с.
15. Peterson A. T., Golubev V. S., Groisman P. Y. Evaporation losing its strength // Nature. 1995. No. 377. P. 687–688.
16. Сперанская Н. А. Испарение с поверхности почвы с травяным покровом: доступные наблюдения и восстановленные данные // Известия РАН. Сер. Географическая. 2016. № 2. С. 49–60.
17. Лавров С. А. Закономерности формирования испарения с поверхности суши и воды под влиянием климатических изменений // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2019. № 1. С. 4–23. https://doi.org10.35567/1999-4508-2019-1-1
18. Mc Vicar T. R. et al. Wind speed climatology and trends for Australia, 1975–2006: capturing the stilling phenomenon and comparison with near-surface reanalysis output // Geophysical Research Letters. 2008. No. 35. P. 1–13.
19. Han S. and Tian F. A review of the complementary principle of evaporation: from the original linear relationship to generalized nonlinear functions // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2020. No. 24. P. 2269–2285.
20. Rayner D. P. Wind run changes are the dominant factor affecting pan evaporation trends in Australia // Journal of Climate. 2007. No. 20. P. 3379–3394.
21. Roderick M. L., Hobbins M. T., Farquhar G. D. Pan evaporation trends and the terrestrial water balance II. Energy Balance and Interpretation // Geography Compass. 2009. No. 3/2. P. 761–780.
22. Многолетние изменения испарения с открытой водной поверхности по данным испарительной сети: научно-прикладной справочник под редакцией В. Ю. Георгиевского. СПб, 2019. 112 с.

REFERENCES

1. Davydov V. K. Evaporation from water surface in the European part of Russia. M.: Gidrometeoizdat, 1944. 120 p.
2. Postnikov A. N. About distribution of evaporation from water surface on the territory of Russia. *Proceedings of RGGMU*. 2014. No. 36. P. 22–28.
3. Uliana E. M. et al. Estimated evaporation of lakes by climate reanalysis data and artificial neural networks. *Journal of South American Earth Sciences*. 2024. Vol. 136. P. 104811.
4. Andreasen M. et al. Estimating daily lake evaporation from biweekly energy-budget data. *Hydrological Processes*. 2017. Vol. 31. No. 25. P. 4530–4539.
5. Kalyuzhniy I. L., Lavrov S. A. Hydro/physical processes on a catchment. SPb.: Nestor-Istoria, 2012. 615 p.
6. Lavrov S. A. Climatic changes impact on the processes of the runoff formation at the catchment. SPb: Svoye izdatelstvo, 2024. 294 p.
7. Kusmin P. P. About correlation between indications of water evaporators and evaporation poll of 20 m^2 area. *Proceedings of GGI*. 1979. Вып. 258. P. 111–121.
8. Kuznetsov V. I. About transition natural coefficients of ground-based evaporators GGI-3000. *Proceedings of GGI*. 1954. Issue 45 (99). P. 142–156.
9. Kuznetsov V. I. Methods of calculation of evaporation from pool of 20 m^2 area according observations at evaporators GG-3000. *Proceedings of GGI*. 1970. Issue 181. P. 3–32.
10. Konstantinov A. R. Evaporation in nature. L.: Gidrometeoizdat, 1968. 532 p.
11. Golubev V. S. Experimental identification of the water balance components: in *Experimental research of hydrological processes and phenomena*. M.: MGU Publishing House, 1979. P. 8–21.
12. Vuglinskiy V. S., Albul I. P. Methods of calculation of evaporation from water surface according to ground-based evaporator GG-3000 data. *SPbGU newsletters*. 2016. Iss. 7. Iss. 3. P. 118–128.
13. Golubev V. S., Uryvaev A. P. A method of water evaporators and its application for calculating of evaporation from water bodies' surfaces. *Proceedings of GGI*. 1983. Iss. 289. P. 69–76.
14. Many-year changes of evaporation on the European territory of Russia according the data of water/evaporation network: scientific/applied reference book edited by V. S. Vuglinskiy. 2021. 64 p.
15. Peterson A. T., Golubev V. S., Groisman P. Y. Evaporation losing its strength. *Nature*. 1995. No. 377. P. 687–688.
16. Speranskaya N. A. Evaporation from grass-covered soil surface: available observations and restored data. *Newsletters of RAN*. Series: Geography. 2016. No. 2. P. 49–60.
17. Lavrov S. A. Laws of formation of evaporation from the ground and water surfaces under the influence of climatic changes. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management.* 2019. No. 1. P. 4–23. https://doi.org10.35567/1999-4508-2019-1-1
18. Mc Vicar T. R. et al. Wind speed climatology and trends for Australia, 1975–2006: capturing the stilling phenomenon and comparison with near-surface reanalysis output. *Geophysical Research Letters*. 2008. No. 35. P. 1–13.
19. Han S. and Tian F. A review of the complementary principle of evaporation: from the original linear relationship to generalized nonlinear functions. *Hydrological Earth Systems Science*. 2020. No. 24. P. 2269–2285.
20. Rayner D. P. Wind run changes are the dominant factor affecting pan evaporation trends in Australia. *Journal of Climate*. 2007. No. 20. P. 3379–3394.
21. Roderick M. L., Hobbins M. T., Farquhar G. D. Pan evaporation trends and the terrestrial water balance II. Energy Balance and Interpretation. *Geography Compass*. 2009. No. 3/2. P. 761–780.
22. Many-year measurements of evaporation from open water surface according to the evaporation network data: scientific/applied reference book edited by V. Y. Georgievsky. SPb, 2019. 112 p.

Сведения об авторах:

Лавров Сергей Алексеевич, д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник, ФГБУН «Государственный гидрологический институт», Россия, 199053, Санкт-Петербург, 2-я линия В. О., д. 23; https://orcid.org/0000-0002-8140-5346; e-mail: sergey_lavrov_50@mail.ru

Иванова Светлана Александровна, канд. геогр. наук, старший научный сотрудник, ФГБУН «Государственный гидрологический институт», Россия, 199053, Санкт-Петербург, 2-я линия В.О., д. 23; https://orcid.org/0009-0008-4214-1684; e-mail: s.ivanova@hydrology.ru

About the authors:

Sergey A. Lavrov, Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher, State Hydrological Institute (SHI), Vasilyevskiy Ostrov 2-nd Line, 23, St.-Petersburg, 199053, Russia; https://orcid.org/0000-0002-8140-5346; e-mail: sergey_lavrov_50@mail.ru

Svetlana A. Ivanova, Candidate of Geographic Sciences, Senior Researcher, State Hydrological Institute (SHI), Vasilyevskiy Ostrov 2-nd Line, 23, St.-Petersburg, 199053, Russia; https://orcid.org/0009-0008-4214-1684; e-mail: s.ivanova@hydrology.ru

Поступила в редакцию / Received 22.01.2026.
Поступила после рецензирования / Revised 09.02.2026.
Принята к публикации / Accepted 16.03.2026.

УДК 556.5; 504.455 *https://doi.org/10.35567/19994508-2026-2-32-62*

Оригинальная статья/Original paper

Особенности формирования концентраций и потоков метана в акватории карбонового полигона «Цимлянское водохранилище»

Е. В. Усова[1] ✉, Л. Ю. Дмитрик[1], Е. Л. Анпилова[1], Ю. А. Федоров[1, 2], Д. Н. Гарькуша[1, 2], М. А. Верещагин[1], Е. Р. Чернышенко[1]

✉ chimanalit@inbox.ru

[1] *Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов, г. Ростов-на-Дону, Россия*
[2] *Институт наук о Земле Южного федерального университета, г. Ростов-на-Дону, Россия*

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Цимлянское водохранилище и другие искусственные водоемы рассматриваются современной наукой как антропогенные источники поступления климатически активных газов, в том числе метана, в атмосферу. Однако исследователи расходятся в оценках эмиссии CH_4 водохранилищами. Выявление закономерностей и основных факторов, определяющих пространственную и сезонную изменчивость эмиссии метана, его концентраций в воде и донных осадках является важнейшей задачей исследований в акватории карбонового полигона «Цимлянское водохранилище». **Методы.** Проведены комплексные экспедиционные исследования с отбором проб воды, донных отложений, потоков метана на границе «вода – атмосфера». Определение содержания метана выполнено газохроматографическим методом на газовом хроматографе с пламенно-ионизационным детектором и дозатором равновесного пара. Для количественного определения растворенного органического углерода применялся метод высокотемпературного каталитического окисления на анализаторе углерода. Вертикальное зондирование водной толщи для определения характеристик воды выполнено с помощью мультипараметрического зонда. **Результаты.** Получены данные о пространственной и временной изменчивости концентраций метана в воде, донных осадках и его эмиссионных потоков для Цимлянского водохранилища. Описаны взаимосвязи между некоторыми гидрохимическими показателями и концентрациями метана. Получены количественные оценки эмиссии CH_4 с водной поверхности водохранилища.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: искусственные водоемы, Цимлянское водохранилище, карбоновый полигон, метан, потоки, органический углерод

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Работа выполнена в рамках создания и функционирования карбонового полигона «Цимлянское водохранилище» М7.7/08-18-24.

© Усова Е. В., Дмитрик Л. Ю., Анпилова Е. Л, Федоров Ю. А., Гарькуша Д. Н., Верещагин М. А., Чернышенко Е. Р., 2026

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Усова Е. В., Дмитрик Л. Ю., Анпилова Е. Л, Федоров Ю. А., Гарькуша Д. Н., Верещагин М. А., Чернышенко Е. Р. Особенности формирования концентраций и потоков метана в акватории карбонового полигона «Цимлянское водохранилище» // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2026. № 2. С. 32–62. https://doi.org/10.35567/19994508-2026-2-32-62; EDN: GSCAZP

Special features of the methane concentrations and flows' formation in the "Tsymlyansk Reservoir" carbon range water area

Elena V. Usova[1], Leonid Yu. Dmitrik[1], Evgeniya L. Anpilova[1], Yuri A. Fedorov[1,2], Dmitry N. Garkusha[1,2], Michael A. Vereshchagin[1], Elena R. Chernyshenko[1]

chimanalit@inbox.ru

[1] *Russian Scientific Research Institute for Integrated Use and Protection of Water Resources, Rostov-on-Don, Russia*
[2] *Institute of Earth Sciences of the Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia*

ABSTRACT

Relevance. The Tsimlyansk reservoir and other artificial reservoirs are considered by modern science as anthropogenic sources of entry of climatically active gases, including methane into the atmosphere. However, researchers differ in their estimates of CH4 emissions from reservoirs. The identification of patterns and main factors determining the spatial and seasonal variability of methane emissions, its concentrations in water and bottom sediments in the studied reservoir is the most important task of conducting research in the water area of the carbon landfill "Tsimlyanskoe reservoir". **Methods.** Comprehensive expeditionary studies have been conducted with sampling of water, sediments, and methane fluxes at the water-atmosphere boundary. The methane content was determined by the gas chromatographic method on a gas chromatograph with a flame ionization detector and an equilibrium vapor dispenser. The method of high-temperature catalytic oxidation on a carbon analyzer was used to quantify dissolved organic carbon. Vertical probing of the water column to determine the characteristics of the water is performed using a multiparametric probe. **Results.** Data on spatial and temporal variability of methane concentrations in water, bottom sediments, and its emission fluxes in the Tsimlyansk reservoir have been obtained. The interrelationships between some hydro/chemical parameters and methane concentrations are described. Quantitative estimates of CH4 emissions from the reservoir's water surface have been obtained.

KEYWORDS: artificial reservoirs, Tsimlyansk reservoir, carbon landfill, methane, flows, organic carbon

FINANCING: The work was carried out within the framework of the creation and operation of the carbon landfill "Tsimlyanskoe reservoir" M7.7/08-18-24.

FOR CITATION: Usova E. V., Dmitrik L. Y., Anpilova E. L., Fedorov Y. A., Garkusha D. N., Vereshchagin M. A., Chernyshenko E. R. Special features of the methane concentra-

tions and flows' formation in the "Tsymlyansk Reservoir" carbon range water area. Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management. 2026. No. 2. P. 32–62, https://doi.org/10.35567/19994508-2026-2-32-62; EDN: GSCAZP

ВВЕДЕНИЕ

Одной из актуальных экологических проблем является глобальное изменение климата, связанное с увеличением концентраций в атмосфере Земли климатически активных (парниковых) газов (CO_2, CH_4, N_2O и др.), что обусловливает повышение температуры воздуха в тропосфере, таяние вечной мерзлоты, повышение уровня Мирового океана, увеличение частоты и интенсивности гидрометеорологических стихийных бедствий и т. д.

Снижение выбросов парниковых газов является критически важным аспектом в контексте противодействия последствиям климатических изменений. Исследования в области количественной оценки углеродного следа в процессе производства продукции активно развиваются [1–4]. Важным инструментом в этом направлении являются карбоновые полигоны – специализированные исследовательские площадки, предназначенные для проведения комплексных экспериментальных исследований углеродного цикла в природных экосистемах. На данных объектах осуществляются систематический мониторинг и количественная оценка потоков климатически активных газов на границе раздела «поверхность – атмосфера», проводится валидация современных методологических подходов к измерению эмиссии и поглощения парниковых газов, а также тестируются инновационные технологии, направленные на снижение выбросов и усиление процессов секвестрации углерода в природных системах.

В феврале 2021 г. Министерство науки и высшего образования Российской Федерации запустило пилотный проект по созданию на территории регионов России карбоновых полигонов для разработки и испытаний технологий контроля углеродного баланса. В настоящее время функционируют 19 полигонов, репрезентирующих ключевые биогеоценозы: лесные экосистемы, морские акватории, аграрные ландшафты и водно-болотные угодья[1].

В 2024 г. на базе Российского научно-исследовательского института комплексного использования и охраны водных ресурсов и Федерального научного центра агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН начал функционировать первый межведомственный водный карбоновый полигон на пресноводном водоеме, в качестве объекта выбрано Цимлянское водохранилище.

1 Карбоновые полигоны Российской Федерации. [Электр. ресурс]. URL: https://carbon-polygons.ru/about/ (дата обращения: 02.04.2026).

Целью создания карбонового полигона являлось получение новых экспериментальных данных о пространственной и временной изменчивости потоков климатически активных (парниковых) газов (CO_2 и CH_4) между поверхностью пресноводного водоема и атмосферой в степной зоне юга европейской части России; изучение динамики баланса органического и неорганического углерода в водах водохранилища; установление чувствительности потоков CO_2 и CH_4 к изменению условий внешней среды с последующей разработкой комплекса мероприятий по контролю поглощения и эмиссии климатически активных газов.

Водохранилища являются важными источниками поступления в атмосферу метана (CH_4) – агрессивного парникового газа, «парниковый потенциал» которого в расчете на 100 лет в 28 раз сильнее, чем у углекислого газа, а в 20-летней перспективе – в 84 раза [5]. Этот газ образуется в водных объектах главным образом в результате протекания анаэробных процессов разложения органического вещества (ОВ) в воде и донных отложениях и поступает в атмосферу в результате пузырькового переноса и диффузии через водную толщу [6].

Особое внимание исследователей направлено на изучение водохранилищ – крупных резервуаров-накопителей автохтонного и аллохтонного органического вещества, обладающих высоким потенциалом к образованию метана и его эмиссии в атмосферу [7, 8].

Имеющиеся ориентировочные оценки вклада водохранилищ в глобальную эмиссию метана существенно разнятся, что, помимо отсутствия общепринятой методологии измерения выбросов парниковых газов, обусловлено как ограниченным числом данных, на которых базируются эти оценки, так и большей, чем в естественных водоемах и водотоках, вариативностью внутригодовых изменений величин их удельных потоков [9–12]. Значения удельных потоков CH_4 могут существенно отличаться (до нескольких порядков) как с различных водохранилищ, так и в пределах одного водоема в разные сезоны и на разных участках.

Цель проведенного исследования – выявление закономерностей и основных факторов, определяющих пространственную и сезонную изменчивость эмиссии метана с поверхности Цимлянского водохранилища, его концентраций в воде и донных осадках.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В период 2023–2024 гг. в различные гидроэкологические фазы проводились комплексные исследования эмиссии CH_4 с поверхности Цимлянского водохранилища на 18 станциях (рис. 1, табл. 1), расположенных на основных плесах-участках Цимлянского водохранилища: Калачевский, Чирский, Центральный и Приплотинный.

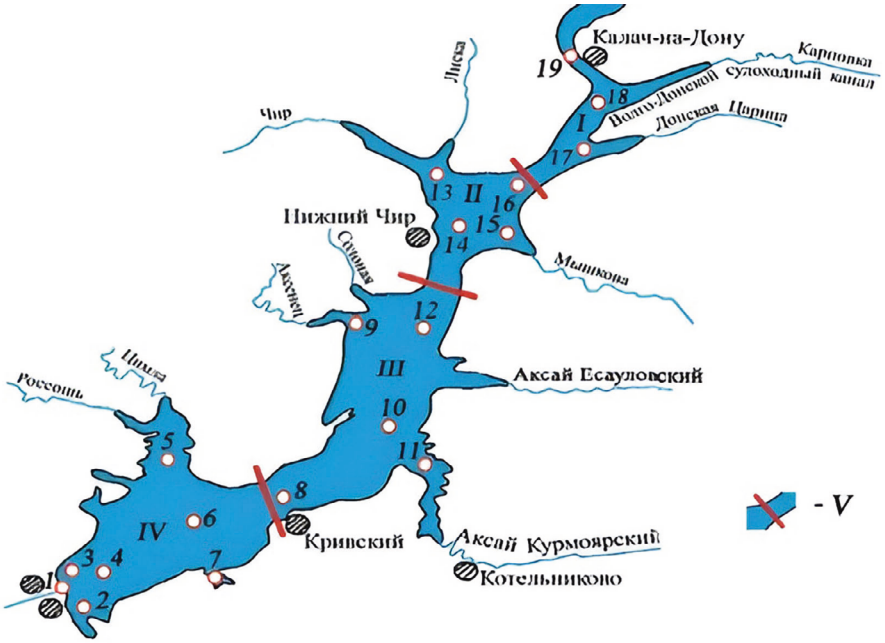


Рис. 1. Картосхема станций мониторинга парниковых газов в Цимлянском водохранилище в 2023–2024 гг.: I – Калачевский участок; II – Чирский участок; III – Центральный участок; IV – Приплотинный участок; V – границы участков

Fig. 1. Scematic map of the greenhouse gases monitoring stations at the Tsymlyansk Reservoir in 2023–2024: I is Kalachevskiy section; II is Chirsky section; III is Tsentralny section; IV is Priplotinny section; V is sections' boundaries

Отбор проб воды в поверхностном и придонном слоях для определения содержания гидрокарбонат-ионов, растворенного органического углерода (РОУ) и общего органического углерода (ООУ) выполнялся батометром Молчанова согласно ГОСТ Р 59024-2020 «Вода. Общие требования к отбору проб». Вертикальное зондирование водной толщи по параметрам – температура, растворенный кислород, водородный показатель (pH), окислительно-восстановительный потенциал (Eh) – проводилось мультипараметрическим зондом Aquaprobe® AP-7000. Метеорологические параметры (температура воздуха, скорость ветра, давление и влажность) на борту судна и на берегу в местах отбора проб измерялись беспроводной метеостанцией DAVIS Instruments Vantage Pro2 6152EU.

Отбор донных отложений осуществлялся ударной трубкой конструкции ГОИН согласно ПНД Ф 12.1:2:2.2:2.3:3.2-03 «Отбор проб почв, грунтов, донных отложений, илов, осадков сточных вод, шламов промышленных сточных вод, отходов производства и потребления».

Определение содержания метана в воде и донных отложениях выполнялось газохроматографическим методом с использованием анализа равно-

весного пара на газовом хроматографе «Хроматэк-Кристалл 5000.2», оснащенном дозатором равновесного пара и пламенно-ионизационным детектором, согласно аттестованным методикам[2,3].

Таблица 1. Местоположение станций отбора проб в Цимлянском водохранилище в 2024 г.
Table 1. Location of the water sampling stations at the Tsymlyansk Reservoir in 2024

Станция отбора на картосхеме	Месторасположение станций отбора проб воды и донных отложений	Координаты, с.ш. / в.д.
2	г. Волгодонск, приплотинный участок, вертикаль 20	47°33’38.9»N 42°09’14.8»E
3	г. Цимлянск, приплотинный участок, вертикаль 19	47°37’05.5»N 42°07’30.5»E
4	Выше г. Вологодонск, в районе Ростовской АЭС, вертикаль 69	47°38’26.7»N 42°13’57.3»E
5	Ниже впадения р. Россошь	47°50’59.0»N 42°22’49.8»E
6	Ст. Жуковская, приплотинный участок, вертикаль 3	47°44’30.4»N 42°25’04.2»E
7	Ст. Жуковская, приплотинный участок, вертикаль 24	47°39’17.6»N 42°27’10.5»E
8	Ниже х. Кривский	47°46’26.2»N 42°42’44.7»E
9	Ниже впадения р. Солоная	48°10’14.4»N 42°51’37.5»E
10	Центральный участок, х. Красноярский, вертикаль 28	47°54’46.9»N 42°57’55.7»E
11	Центральный участок, х. Красноярский, вертикаль 29	47°53’43.0»N 42°59’41.6»E
12	Ниже г. Ильмень-Суворовский	48°07’49.8»N 43°01’26.6»E
13	Чирский (верхний) участок ст. Нижний Чир, вертикаль 13	48°26’43.6»N 43°07’33.7»E
14	Чирский (верхний) участок, ст. Нижний Чир, вертикаль 30	48°21’46.2»N 43°10’10.0»E
15	Район впадения р. Мышкова, х. Шебалино	48°21’06.5»N 43°16’03.5»E
16	Калачевский участок, х. Логовский, вертикаль 14	48°26’24.8»N 43°20’33.9»E
17	Район впадения р. Донская Царица	48°30’25.6»N 43°27’22.5»E
18	Ниже г. Калач-на-Дону, район впадения Волго-Донского канала	48°37’00.8»N 43°31’17.8»E
19	Выше г. Калач-на-Дону	48°42’02.8»N 43°28’18.3»E

2 РД 52.24.511-2013. Массовая доля метана в донных отложениях. Методика измерений газохроматографическим методом с использованием анализа равновесного пара. Ростов-на-Дону: Гидрохимический институт, 2013. 19 с.

3 РД 52.24.512-2012. Объемная концентрация метана в водах. Методика измерений газохроматографическим методом с использованием анализа равновесного пара. Ростов-на-Дону: Гидрохимический институт, 2012. 23 с.

Определение содержания общего органического углерода (ООУ) и растворенного органического углерода (РОУ) осуществлялось методом высокотемпературного каталитического окисления углеродсодержащих соединений пробы на анализаторе общего углерода «Топаз NC» до оксида углерода с его последующим ИК-детектированием в соответствии с ГОСТ 31958-2012 «Методы определения содержания общего и растворенного органического углерода».

Измерение удельных потоков CH_4 с поверхности воды Цимлянского водохранилища проводилось методом плавучих камер [13–15], представляющих поликарбонатные емкости цилиндрической формы с открытым основанием на тяжелых деревянных поплавках (для устойчивости в ветреную погоду).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ полученных данных показал, что летом 2023 г. содержание CH_4 в поверхностном слое воды Цимлянского водохранилища изменялось от 3,2 до 55,6 мкл/л, среднее значение составило 12,5 мкл/л (рис. 2). Как правило, концентрации метана на большинстве станций не превышали 10 мкл/л, исключения составили станции, относящиеся к устьевым участкам притоков водохранилища (5, 9, 13, 15), и станция 19, расположенная в верхней русловой части, где гидрологический режим вод близок к речному [16].

В придонном слое воды в этот период концентрации метана варьировали от 1,8 до 167,4 мкл/л, а усредненный показатель равнялся 22 мкл/л (рис. 2). Наиболее высокие уровни содержания метана (40 и более мкл/л) зарегистрированы на станции 3, расположенной у Приплотинного участка, и на станциях 9, 13 и 15. На станциях 2 и 8 концентрации CH_4 не превышали 20 мкл/л, а на остальных были меньше 10 мкл/л.

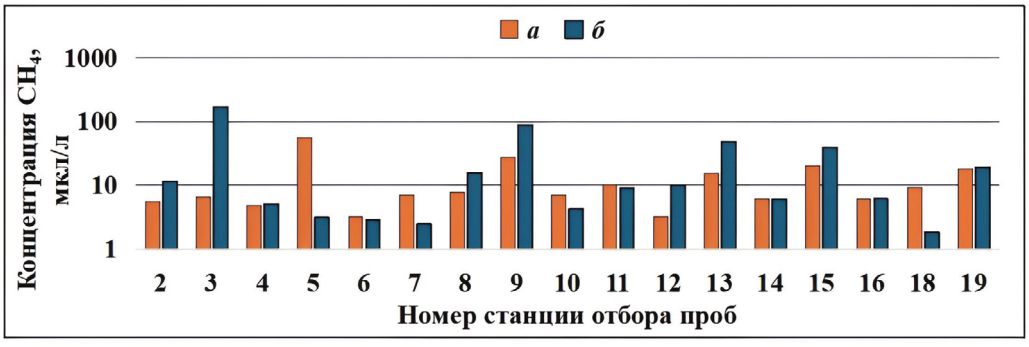


Рис. 2. Распределение концентрации метана в поверхностном (*а*) и придонном (*б*) слоях воды Цимлянского водохранилища, август 2023 г.

Fig. 2. The methane concentration distribution in surface (*a*) and near-bottom (*б*) water layers of the Tsymlyansk Reservoir, August 2023

Осенью 2023 г. диапазон концентраций CH_4 в верхнем слое воды составлял 1,6 – 20,7 мкл/л, в среднем 8,2 мкл/л (рис. 3). Содержание метана на станциях Приплотинного и Центрального плесов (кроме 9) не превышало 10 мкл/л, тогда как на Чирском и Калачевском участках отмечены концентрации выше 10 мкл/л. В придонной воде содержание метана варьировало в пределах от 2,1 до 20,7 мкл/л, среднее значение – 10,7 мкл/л, что незначительно превышает его концентрацию в поверхностном водном горизонте.

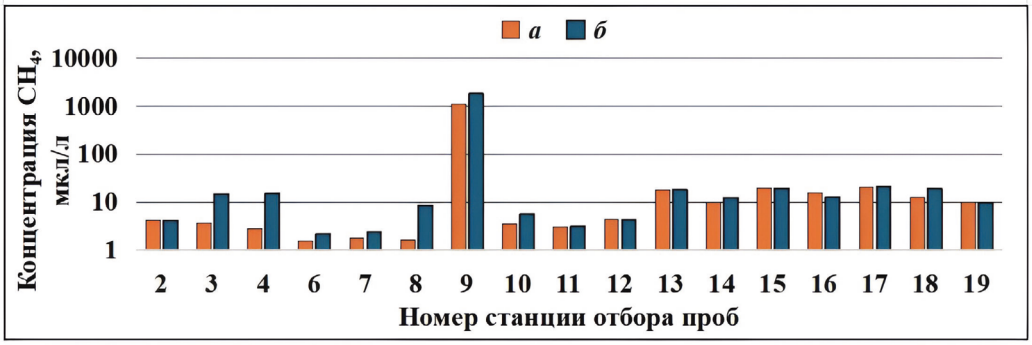


Рис. 3. Распределение концентрации метана в поверхностном (*а*) и придонном (*б*) слоях воды Цимлянского водохранилища, сентябрь 2023 г.

Fig. 3. The methane concentration distribution in surface (*a*) and near-bottom (*б*) water layers of the Tsymlyansk Reservoir, September 2023

Следует обратить внимание на данные, полученные на станции 9, где фиксировались экстремально высокие концентрации метана как в поверхностном, так и придонном слоях (1096 и 1796 мкл/л соответственно). Это связано с сильной эвтрофикацией и загрязненностью воды в этот период. Достоверно установить причины такого загрязнения не удалось, а при последующих отборах проб столь высокие значения не обнаруживались, поэтому результаты проб станции 9 осенью 2023 г. в дальнейших расчетах и при статистической обработке данных не учитывались.

В весенний период 2024 г. в поверхностном слое воды концентрации метана изменялись в интервале от 1,5 до 21,9 мкл/л, в среднем составили 5,6 мкл/л. Содержание метана выше 10 мкл/л обнаружено на станциях 9, 15, 18 и 19, по-видимому, вследствие их расположения в зонах выноса питающих водохранилище рек. Распределение растворенного метана в придонной воде Цимлянского водохранилища повторяет картину поверхностного слоя без значительных отличий в его концентрациях (рис. 4).

Летом 2024 г. в поверхностном слое воды Цимлянского водохранилища содержание метана изменялось в пределах от 2,1 до 56,0 мкл/л со средним значением 9,8 мкл/л (рис. 5). Концентрации растворенного метана, превышающие отметку в 10 мкл/л, зарегистрированы на станциях 2, 9, 13, 15.

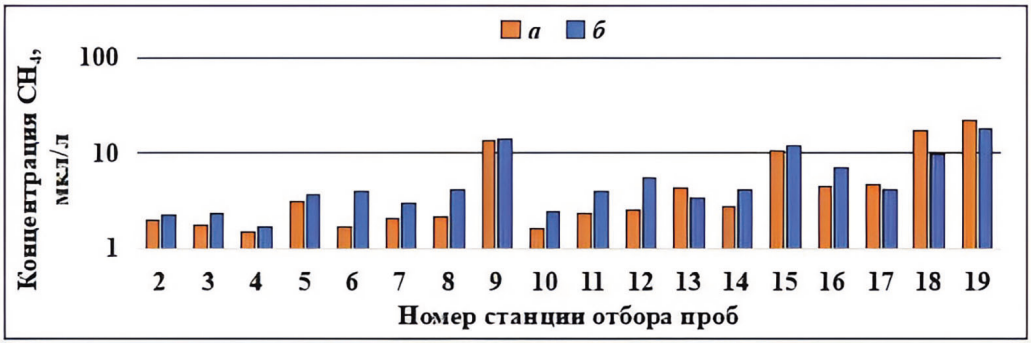


Рис. 4. Распределение концентрации метана в поверхностном (*а*) и придонном (*б*) слоях воды Цимлянского водохранилища, апрель–май 2024 г.

Fig. 4. The methane concentration distribution in surface (*а*) and near-bottom (*б*) water layers of the Tsymlyansk Reservoir, April-May 2023

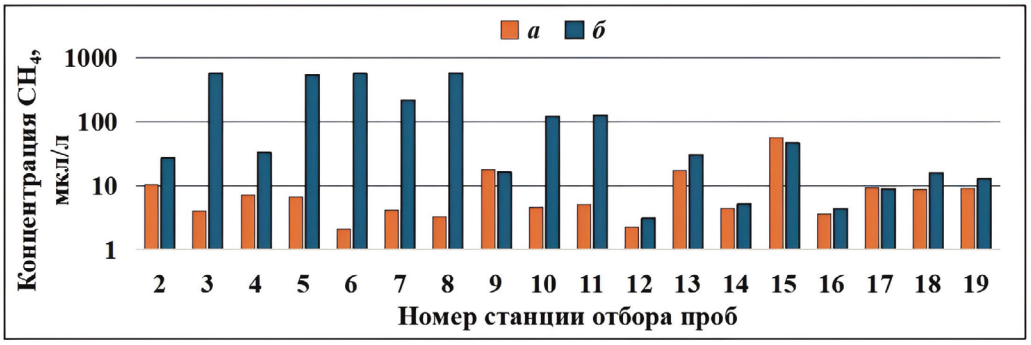


Рис. 5. Распределение концентраций метана в поверхностном (*а*) и придонном (*б*) слоях воды Цимлянского водохранилища, июль 2024 г.

Fig. 5. The methane concentration distribution in surface (*а*) and near-bottom (*б*) water layers of the Tsymlyansk Reservoir, July 2024

В придонной воде концентрации CH_4 изменялись в больших пределах – от 3,1 до 585,8 мкл/л, среднее значение равнялось 163,4 мкл/л (рис. 5). Высокие концентрации метана отмечены в Приплотинном и Центральном плесах, вверх по течению они снижались. Разница между содержанием CH_4 в поверхностном и придонном горизонтах воды Цимлянского водохранилища была обусловлена летней стратификацией водоема, установившейся на глубоководных Приплотинном и Центральном участках.

Концентрации метана в осенний период в поверхностном и придонном слоях нивелировались. Интервалы концентраций для поверхностного и придонного слоев составляли 2,3–25,8 мкл/л (среднее 7,8 мкл/л) и 2,5–35,9 мкл/л (среднее 10,1 мкл/л) соответственно (рис. 6). На мелководных участках наблюдалось возрастание содержания метана в обоих горизонтах. На станции 4 фиксировалось повышение концентрации метана в придонном слое воды, что, вероятно, обусловлено остаточным эффектом летней стратификации.

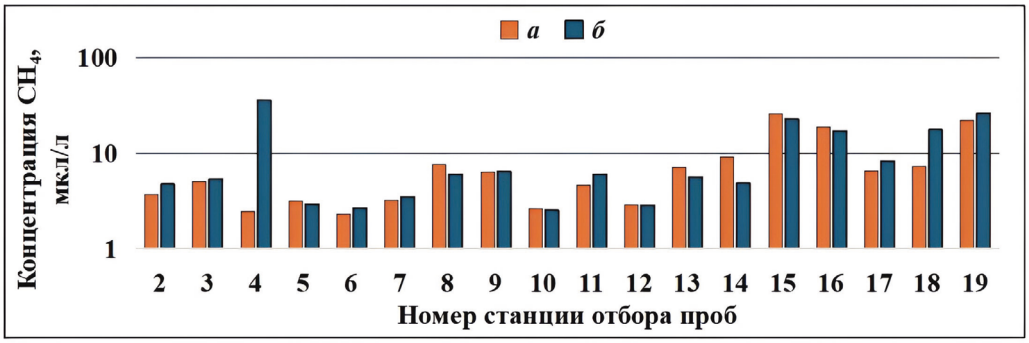


Рис. 6. Распределение концентраций метана в поверхностном (*а*) и придонном (*б*) слоях воды Цимлянского водохранилища, сентябрь – октябрь 2024 г.

Fig. 6. The methane concentration distribution in surface (*a*) and near-bottom (*б*) water layers of the Tsymlyansk Reservoir, September – October 2023

В рамках проведенной работы проанализирована сезонная изменчивость концентраций растворенного в воде метана в период 2023–2024 гг. (рис. 2–6). Весной 2024 г. и осенью 2023, 2024 гг. различие между концентрациями метана в поверхностном и придонном слоях воды, как правило, было минимально (в среднем в 1,1–2 раза), что связано с проведением исследований в гидрологические фазы осеннего и весеннего перемешивания вод в водохранилище. В эти периоды распределение концентраций CH_4 в поверхностном и придонном слоях происходило достаточно синхронно, причем в 71 % проб концентрации метана в придонном слое были выше, чем в поверхностном. Летом 2023 г. в конце периода стратификации только на 53 % станций концентрация метана в придонной воде была выше, чем в поверхностной, с отношением в 1,1–25,6 раза.

В летний период 2024 г. наблюдалось существенное различие между концентрацией метана в поверхностном и придонном слоях (в 52–272 раза) на глубоководных станциях Приплотинного участка водохранилища (станции 3, 5, 6, 7 и 8, с глубинами 9,5–18,5 м), которое было обусловлено стратификацией вод в период летней стагнации. С уменьшением глубины различие значений концентрации метана в поверхностном и придонном слоях на станциях Калачевского, Чирского и верхней части Центрального плесов не превышало двух раз.

В целом за период 2023–2024 гг. пространственное распределение концентраций метана в поверхностном и придонном горизонтах имело ярко выраженную сезонность. В периоды осеннего и весеннего перемешивания в водохранилище наблюдалось увеличение концентрации метана в обоих горизонтах воды по направлению от Приплотинного к Калачевскому участку. В летний период концентрации метана в придонном слое воды возрастали в обратном направлении, что обусловлено аномально высокими значениями содержания метана в период летней стратификации.

Концентрация метана в придонном слое воды в летний период имела тенденцию к увеличению по мере возрастания глубины – от мелководных участков к глубоководным, что обусловлено формированием устойчивых стратификационных условий, лимитирующих вертикальное перемешивание водных масс и способствующих аккумуляции метана в гиполимнионе. Детальные данные, полученные в ходе вертикального зондирования летом 2024 г. на глубоководных станциях Приплотинного и нижней части Центрального участков (станции 3–8 и 10), позволяют конкретизировать эти наблюдения. Установлено, что значения окислительно-восстановительного потенциала (Eh) в придонном слое варьировались от –290,2 до –152,5 мВ, что свидетельствовало о развитии восстановительных условий. Концентрация растворенного кислорода находилась в интервале от 0,03 мг/л (степень насыщения 0,3 %) до 2,3 мг/л (26,6 %), указывая на выраженный дефицит кислорода, при этом концентрация метана изменялась в широком диапазоне от 33,1 до 585,8 мкл/л (в среднем 377,7 мкл/л). Глубина водоема на исследуемых участках составляла 9,5–18,5 м, отрицательные значения Eh и гипоксические условия фиксировались в горизонте 2–5 м от дна. Показатели поверхностного слоя воды на тех же станциях были противоположны придонному: окислительно-восстановительный потенциал принимал положительные значения от +43,5 мВ до +168,3 мВ (в среднем +91,7 мВ), концентрации кислорода были выше – от 8,07 мг/л (100,2%) до 8,86 мг/л (113,1%) (в среднем 8,45 мг/л), а концентрации метана существенно ниже – от 2,1 до7,1 мкл/л (в среднем 4,54 мкл/л).

Таким образом, вертикальная стратификация водоема в летний период формирует контрастные геохимические зоны: придонный слой характеризуется восстановительными условиями, дефицитом кислорода и высокой концентрацией метана, тогда как поверхностный отличается окислительной обстановкой, насыщением кислородом и низкими концентрациями метана. Именно эти условия определяют интенсивность накопления метана в донных отложениях. На рис. 7–11 представлены данные о сезонном и пространственном распределении метана в поверхностном слое донных отложений (0–2 см) Цимлянского водохранилища.

В летний период 2023 г. концентрации метана в поверхностном слое седиментов изменялись в интервале 0,8–30,8 мкг/г влажного осадка (вл. о.), при среднем значении 9,0 мкг/г вл. о. (рис. 7). Наиболее высокие показатели содержания метана в донных отложениях фиксировались на глубоководных станциях 7, 6 и 4, находящихся вне зоны непосредственного влияния притоков водохранилища. Концентрации метана на этих станциях достигали 30,8, 26,5 и 20,9 мкг/г вл. о. соответственно. Показательно почти симбатное изменение содержания метана в донных осадках с глубинами на станциях со 2-й по 12-ю, что может свидетельствовать о более активных

процессах метаногенеза в донных отложениях на станциях, расположенных на удалении от речных стоков, и на больших глубинах.

В осенний период зафиксировано пространственно-неоднородное распределение метана в донных отложениях Цимлянского водохранилища. Диапазон концентраций составил от 0,1 до 85,7 мкг/г вл. о. (рис. 8), среднее значение – 13,4 мкг/г вл. о. (без учета станции 9). Несмотря на повышение среднего содержания метана относительно летнего сезона, на большей части исследуемых станций наблюдалось его снижение. Статистически значимое увеличение концентраций (в несколько раз относительно летних показателей) зарегистрировано только на станциях 3, 4, 15 и 18, наибольшие концентрации CH_4 в поверхностном горизонте донных отложений (0–2 см) характерны для нижней части Приплотинного участка, отличающейся максимальной глубиной. На других участках корреляция между глубиной водоема и содержанием метана не прослеживалась. Локальный максимум концентраций на станции 18 в горизонте 0–2 см, вероятно, обусловлен аккумуляцией метана, поступающего с водными массами из р. Дон, что указывает на влияние речного стока на формирование геохимического фона в данной зоне водохранилища.



Рис. 7. Изменение концентраций метана в поверхностном слое донных отложений с глубиной в Цимлянском водохранилище в августе 2023 г.: 1 – концентрации CH_4, мкг/г вл. о.; 2 – глубина, м

Fig. 7. Changes in methane concentrations in the surface layer of bottom sediments with depth in the Tsimlyansk reservoir, August 2023: 1 is CH_4 concentration, mkg/g; 2 is depth, m

Весной 2024 г. наблюдались минимальные за весь период исследований концентрации метана в поверхностном слое донных отложений. Диапазон значений составил 0,02–7,9 мкг/г вл. о., в среднем – 1,8 мкг/г вл. о. (рис. 9). Низкие показатели обусловлены комплексом гидрологических и биогеохимических факторов: недостаточным прогревом водной толщи после зимнего периода и высоким содержанием растворенного кислорода, формирующимся в результате весеннего конвективного перемешивания водных масс. Указанные условия препятствуют формированию устойчивых анаэробных

зон в придонных слоях, что подавляет активность метаногенных архей в донных отложениях. Пространственный анализ распределения метана выявил локальные участки повышенных концентраций, которые приурочены к зонам впадения притоков (станции 5, 14 и 15) и к верхней русловой части водохранилища (станция 19). При этом статистически достоверной корреляции между распределением метана в поверхностном слое донных осадков и глубиной водоема в весенний период не установлено.



Рис. 8. Изменение концентраций метана в поверхностном слое донных отложений с глубиной в Цимлянском водохранилище, сентябрь 2023 г.: 1 – концентрации CH_4, мкг/г вл. о.; 2 – глубина, м

Fig. 8. Changes in methane concentrations in the surface layer of bottom sediments with depth in the Tsimlyansk reservoir, September 2023: 1 is CH_4 concentration, mkg/g; 2 is depth, m

Летом 2024 г. отмечено существенное увеличение концентраций метана в донных осадках относительно весеннего сезона. Диапазон варьирования составил от 0,02 до 26,7 мкг/г вл. о. со средним показателем в 7,9 мкг/г вл. о. (рис. 10). Для летнего сезона характерно восстановление субпараллельной зависимости между глубиной водоема и концентрациями метана в поверхностном слое донных отложений по продольному профилю водохранилища. Однако по сравнению с аналогичным периодом 2023 г. выраженность этой закономерности оказалась менее значительной, а зона ее распространения ограничилась станциями со 2-й по 10-ю. Максимальные концентрации CH_4 регистрировались на станциях, локализованных в Центральном плесе Цимлянского водохранилища.

В осенний период 2024 г. наблюдалось снижение концентраций метана в поверхностном слое донных отложений относительно летнего сезона, что связано с началом осеннего конвективного перемешивания водных масс. Диапазон значений содержания CH_4 – в пределах 0,02–17,3 мкг/г вл. о., средний показатель – 3,3 мкг/г вл. о. (рис. 11). В этот период нарушилась ранее наблюдавшаяся зависимость распределения метана от глубины водоема.

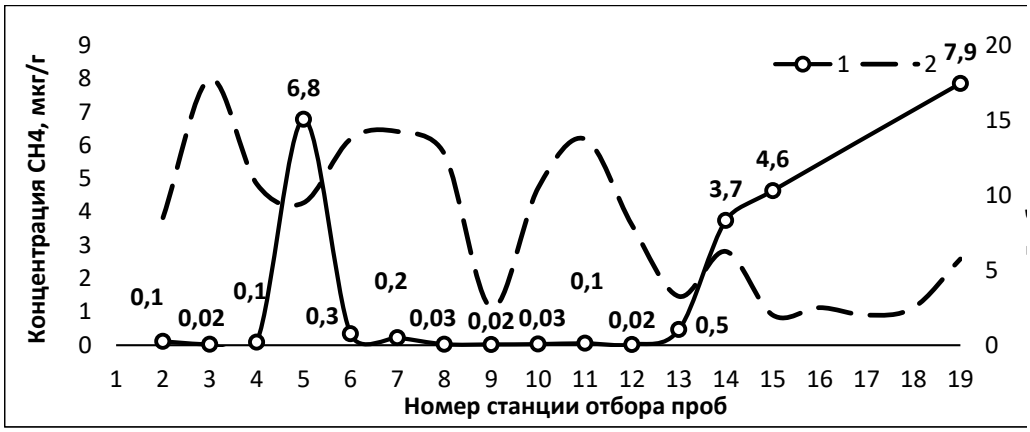


Рис. 9. Изменение концентраций метана в поверхностном слое донных отложений с глубиной в Цимлянском водохранилище в апреле – мае 2024 г.: 1 – концентрации CH_4, мкг/г вл. о.; 2 – глубина, м

Fig. 9. Changes in methane concentrations in the surface layer of bottom sediments with depth in the Tsimlyansk reservoir, April – May 2024: I is CH_4 concentration, mkg/g; 2 is depth, m

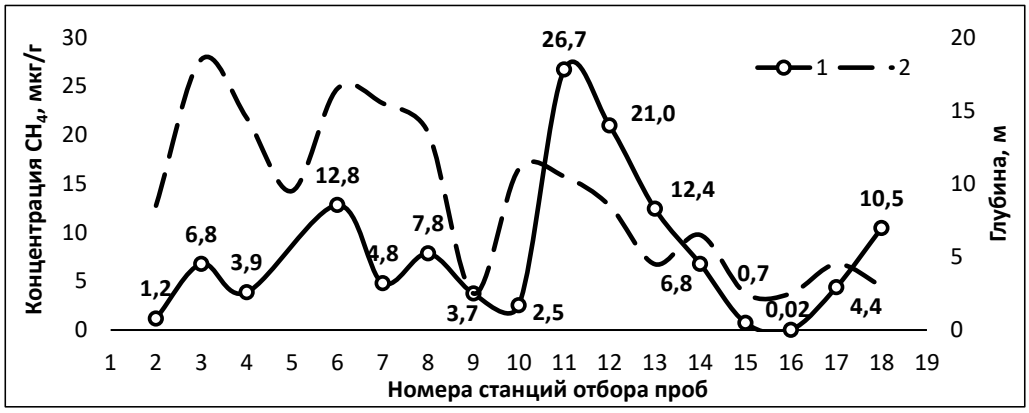


Рис. 10. Изменение концентраций метана в поверхностном слое донных отложений с глубиной в Цимлянском водохранилище в июле 2024 г.: 1 – концентрации CH_4, мкг/г вл. о.; 2 – глубина, м

Fig. 10. Changes in methane concentrations in the surface layer of bottom sediments with depth in the Tsimlyansk reservoir, July 2024: 1 is CH_4 concentration, mkg/g; 2 is depth, m

Максимальные концентрации CH_4 регистрировались на Приплотинном участке водохранилища (станция 6), что может указывать на локальные особенности биогеохимических процессов в данной зоне.

Сопоставление сезонной динамики содержания метана в Цимлянском водохранилище позволило выявить четкую связь между гидрологической структурой водной толщи и распределением метана в поверхностном слое донных отложений (0–2 см). В периоды летней стратификации вод фиксируется субпараллельное распределение концентраций метана с глу-

биной по продольному профилю водоема. Данная закономерность обусловлена формированием устойчивой термической и химической стратификации, способствующей накоплению метана в придонных слоях и его последующей аккумуляции в донных отложениях. В периоды весеннего и осеннего перемешивания водных масс, сопровождающиеся разрушением стратификационных барьеров и насыщением водной толщи кислородом, эта зависимость нарушается. Конвективное перемешивание приводит к снижению градиентов концентраций и перераспределению метана по акватории.

Обобщение данных за 2023–2024 гг. показало, что концентрации CH_4 в верхнем слое донных отложений Цимлянского водохранилища варьировали в диапазоне от 0,02 до 85,7 мкг/г влажного осадка (в среднем 6,22 мкг/г, n = 92). Максимальные концентрации CH_4 в отложениях зафиксированы в летние периоды 2023–2024 гг. и осенью 2023 г., минимальные – весной 2024 г.



Рис. 11. Изменение концентраций метана в поверхностном слое донных отложений с глубиной в Цимлянском водохранилище в сентябре – октябре 2024 г.: 1 – концентрации CH_4, мкг/г вл. о.; 2 – глубина, м

Fig. 11. Changes in methane concentrations in the surface layer of bottom sediments with depth in the Tsimlyansk reservoir, Septemer – October 2024: 1 is CH_4 concentration, mkg/g; 2 is depth, m

Анализ распределения метана в водной толще и донных отложениях Цимлянского водохранилища создает необходимую основу для интерпретации данных по его эмиссии в атмосферу. Обработка массива данных, полученных методом плавучих камер при измерении удельных потоков метана (F_{CH4}) на границе «вода – атмосфера» показала, что летом 2023 г. величина общего удельного потока метана в Цимлянском водохранилище варьировала в интервале 0,001–0,164 мг CH_4/(м^2 час) со средним значением 0,018 мг CH_4/(м^2 час). Это самое низкое среднее значение удельного потока метана за весь период наблюдений (рис. 12). На большинстве станций показатель F_{CH4} не превышал 0,01 мг CH_4/(м^2 час). Повышенные величины

потока зафиксированы на станциях 5, 9, 15 и 19, расположенных вблизи устьев рек, питающих водохранилище, при глубинах менее 7 м.

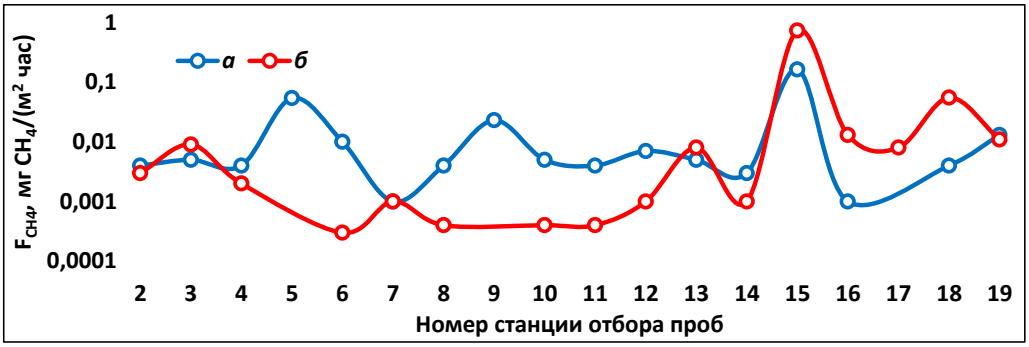


Рис. 12. Распределение удельных потоков метана на границе «вода – атмосфера» Цимлянского водохранилища в августе (*а*) и сентябре (*б*) 2023 г.

Fig. 12. The methane specific flows distribution at the "water – atmosphere" boundary, the Tsymlyansk Reservoir, August (*a*) and September (*б*) 2023

Осенью 2023 г. диапазон изменений значений удельного потока CH_4 составлял 0,0003–0,74 мг CH_4/(м² час) при среднем значении 0,053 мг CH_4/(м² час) (рис. 12). Примечательно, что рост среднего показателя относительно летнего периода сопровождался разнонаправленной динамикой на отдельных участках: на большинстве пунктов отбора проб зафиксировано снижение или лишь незначительное увеличение F_{CH4}. Исключением стали станции 15 и 18, где отмечено многократное возрастание удельного потока метана. Обе станции расположены в верхней части водохранилища – зоне активного влияния речных притоков, при этом глубины на данных участках составляют менее 5 м.

Весной 2024 г. значения общего удельного потока метана на границе «вода – атмосфера» Цимлянского водохранилища варьировали в интервале 0,008–3,44 мг CH_4/(м² час) со средним показателем 0,35 мг CH_4/(м² час) (рис. 13). Пространственное распределение потоков метана характеризовалось выраженной неоднородностью: на глубоководных станциях Приплотинного участка (4, 6) величина F_{CH4} была ниже 0,01 мг CH_4/(м² час). Высокие значения общего удельного потока метана зафиксированы на мелководных приустьевых станциях (15, 18), где они составили 3,44 и 1,80 мг CH_4/(м² час) соответственно. В весенний период 2024 г. показатели F_{CH4} возрастали в направлении от Приплотинного к Калачевскому участку водохранилища.

В фазу летней стратификации воды 2024 г. зафиксированы значительные показатели удельных потоков метана с поверхности Цимлянского водохранилища в диапазоне от 0,04 до 27,4 мг CH_4/(м² час), средний уровень F_{CH4} составлял 3,7 мг CH_4/(м² час) – это максимальное значение за весь период проведенных исследований (рис. 13).

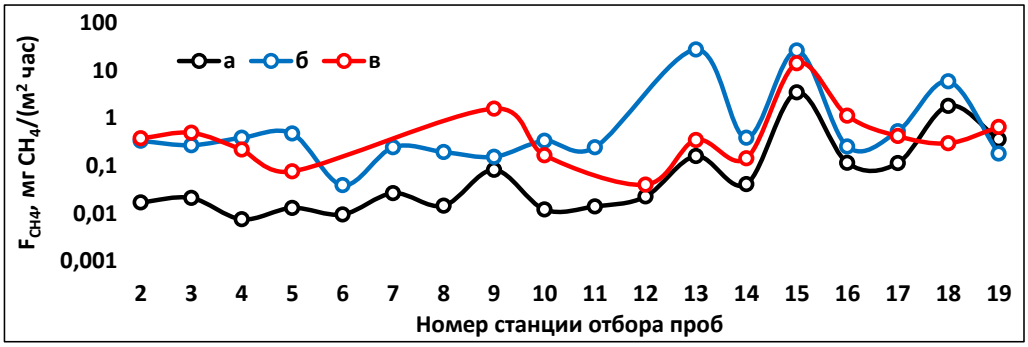


Рис. 13. Распределение удельных потоков метана на границе «вода – атмосфера» Цимлянского водохранилища в апреле – мае (*а*), июле (*б*) и сентябре – октябре (*в*) 2024 г.

Fig. 13. The methane specific flows distribution at the "water – atmosphere" boundary, the Tsymlyansk Reservoir, April – May (*a*), July (*б*) and September – October (*в*) 2024

Пространственное распределение потоков метана в Цимлянском водохранилище характеризовалось отчетливой закономерностью: наблюдалось постепенное увеличение значений в направлении от Приплотинного участка – наиболее глубокого района водохранилища – к Калачевскому, отличающемуся меньшей глубиной. Наиболее высокие значения F_{CH4} фиксировались в приустьевых участках притоков водохранилища на станциях 13, 15, 18. Разница в интенсивности эмиссии метана между глубоководными и мелководными участками водохранилища объясняется комплексом условий, складывающихся в мелководной зоне: здесь быстрее прогревается вода, интенсивнее перемешиваются водные массы и короче путь диффузии метана от донных отложений до границы «вода – атмосфера». Осенью 2024 г. F_{CH4} изменялся от 0,04 до 14,09 мг CH_4/(м² час), а его средний показатель составил 1,4 мг CH_4/(м² час) (рис. 13). Высокие значения удельного потока метана фиксировались, как и в предыдущие периоды, на мелководных и приустьевых станциях водохранилища (9, 15, 16).

В период 2023–2024 гг. отмечены значительные колебания общего удельного потока метана в атмосферу с водной поверхности Цимлянского водохранилища: диапазон значений составил 0,0003–27,8 мг CH_4/(м² час), в среднем 1,1 мг CH_4/(м² час). Статистический анализ данных показал, что подавляющее большинство измерений (92 %) характеризовались значениями F_{CH4} менее 1 мг CH_4/(м² час). Сезонный и пространственный анализ распределения удельных потоков метана выявил ряд значимых закономерностей. В летний период 2023 г. 71 % измеренных значений F_{CH4} был ниже уровня 0,01 мг CH_4/(м² час), а осенью 2023 г. доля таких показателей возросла до 75 %. При этом в оба сезона не было зафиксировано ни одного случая превышения порога 1 мг CH_4/(м² час). Пространственное распределение потоков продемонстрировало устойчивую приуроченность макси-

мальных значений F_{CH4} к определенным участкам водохранилища: преимущественно к мелководным зонам – Чирскому и Калачевскому участкам, а также к устьевым районам притоков (реки Мышкова, Солоная и Чир) и верхней русловой части водохранилища, где гидрологический режим вод близок к речному.

По результатам ориентировочного расчета, суммарная эмиссия CH_4 с водной поверхности водохранилища за период с весны по осень 2024 г., рассчитанная на основе средних значений удельного потока, составила 13 278,6 т CH_4 или 9958,95 т в пересчете на углерод.

Поскольку интенсивность эмиссии метана с поверхности водоема тесно связана с гидрохимическими характеристиками водной среды, возникла необходимость детальной оценки их сезонной динамики и пространственного распределения. Соответствующие данные, включающие диапазоны и средние значения ключевых гидрохимических показателей в поверхностном и придонном слоях воды Цимлянского водохранилища за 2023–2024 гг., представлены в табл. 2.

Таблица 2. Диапазоны и средние значения концентраций гидрохимических показателей в поверхностном и придонном слоях воды Цимлянского водохранилища

Table 2. Ranges and average values of the hydro/chemical indicators' concentrations in the surface and near-bottom layers of the Tsymlyansk Reservoir water

Показатель	Горизонт воды	Лето 2023 г.	Осень 2023 г.	Весна 2024 г.	Лето 2024 г.	Осень 2024 г.
pH	Поверхностный	8,05–9,38 8,86	8,08–8,89 8,57	8,13–9,02 8,53	7,51–8,60 8,36	8,10–8,62 8,40
	Придонный	8,00–8,95 8,42	8,04–8,90 8,43	8,00–8,78 8,32	7,45–8,46 7,88	7,96–8,46 8,31
t воды, °C	Поверхностный	23,2–31,6 26,7	18,5–24,2 20,4	10,6–23,55 17,1	24,6–28,1 26,0	13,1–21,0 17,8
	Придонный	21,4–28,0 24,6	18,7–20,4 19,3	6,2–20,0 13,9	17,8–27,5 24,0	13,6–20,5 17,4
O_2, мг/дм^3	Поверхностный	5,94–12,58 9,70	2,18–11,12 8,09	7,19–12,70 10,03	2,84–9,23 8,13	6,70–10,50 9,27
	Придонный	5,30–8,98 6,70	2,07–11,20 7,89	7,01–11,55 9,28	0,03–8,86 4,13	6,36–11,19 9,09
HCO_3^-, мг/дм^3	Поверхностный	160,2–292,9 197,1	175,4–300,5 229,1	184,6–300,5 244,5	175,4–303,6 232,9	196,8–270,0 231,6
	Придонный	151,0–303,6 199,7	175,4–297,5 221,5	190,7–308,2 247,0	190,7–306,6 237,5	196,8–270,0 232,1
Растворенный органический углерод, мг/дм^3	Поверхностный	–	–	7,53–37,35 19,22	17,34–36,50 23,46	4,14–13,21 8,98
	Придонный	–	–	7,90–25,54 18,07	20,17–37,34 23,88	3,72–22,08 9,39
Общий органический углерод, мг/дм^3	Поверхностный	–	–	9,00–50,33 26,35	18,60–41,31 24,21	6,85–17,22 11,43
	Придонный	–	–	13,36–50,63 28,59	19,12–37,19 24,19	7,35–16,89 11,33

Примечание: в числителе приведены диапазоны концентраций, в знаменателе – средние значения; (–) – нет данных.

Корреляционный анализ концентраций CH_4 и водородного показателя (pH) в воде Цимлянского водохранилища выявил статистически значимые обратные (отрицательные) зависимости: для поверхностного слоя воды в летний период 2024 г. коэффициент корреляции $r = -0,59$ ($n = 18$, $p < 0,01$), что соответствует умеренной обратной связи; для придонного слоя воды летом 2024 г. $r = -0,70$ ($n = 18$, $p < 0,01$), что указывает на сильную обратную связь; для общего массива данных по придонному слою за весь период наблюдений $r = -0,59$ ($n = 83$, $p < 0,001$), что также отражает умеренную обратную зависимость (рис. 14).

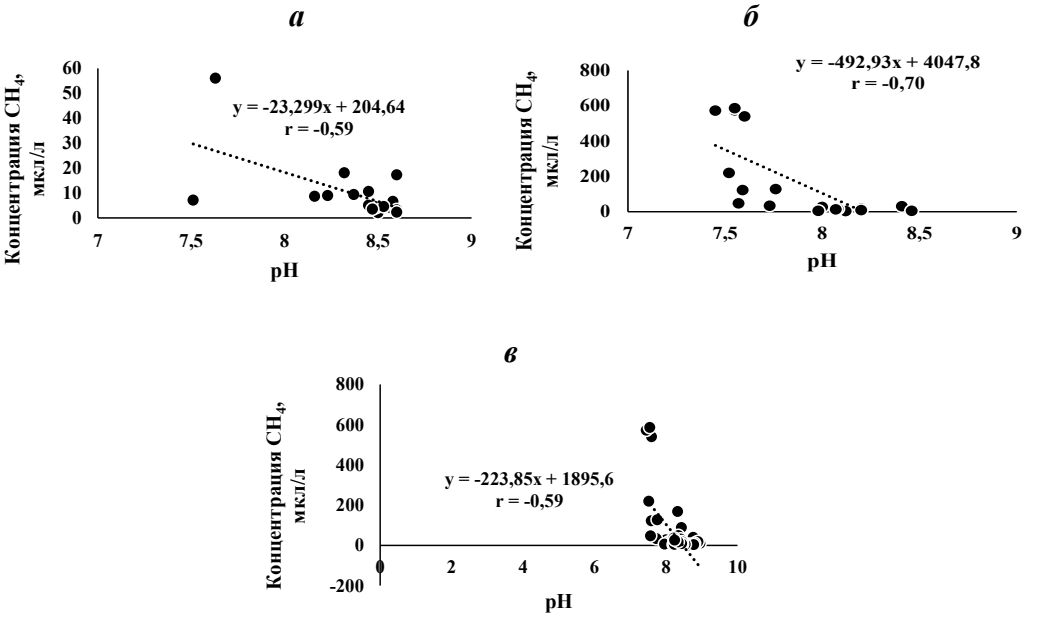


Рис. 14. Зависимость между концентрацией CH_4 и pH в поверхностном и придонном слоях воды на станциях отбора проб в Цимлянском водохранилище в различные периоды экспедиционных исследований в период 2023–2024 гг.: *а* **– лето 2024 г., поверхностный слой;** *б* **– лето 2024 г., придонный слой;** *в* **– придонный слой за период 2023–2024 гг.**

Fig. 14. Dependence between CH_4 concentration and pH in the surface and near-bottom water layers at the sampling stations at the Tsymlyansk Reservoir during different periods of expedition studies in the 2023-2024 period: *a* **is summer 2024, surface layer;** *б* **is summer 2024, near-bottom layer;** *в* **is near-bottom layer over the 2023–2024 period**

Выявленная обратная зависимость между концентрациями метана и pH в водной толще Цимлянского водохранилища имеет различную природу в поверхностном и придонном слоях, что обусловлено спецификой протекающих в них биогеохимических процессов. Для поверхностного слоя воды летом 2024 г. (рис. 14*а*) наблюдаемая закономерность, вероятно, обусловлена косвенными факторами, связанными с сезонной стратификацией. В этот период интенсифицируется фотосинтез фитопланктона, что приводит к активному поглощению углекислого газа из водной толщи, повы-

шению pH вследствие снижения концентрации CO_2 и сдвига карбонатного равновесия [18], насыщению воды кислородом, который служит субстратом для деятельности метанотрофных микроорганизмов, окисляющих CH_4. Таким образом, рост pH в поверхностных водах сопровождается снижением концентраций метана за счет его микробного окисления в аэробных условиях.

В гиполимнионе (придонном слое, рис. 14*б*) механизм формирования обратной зависимости принципиально иной. Здесь она отражает процессы интенсивного анаэробного разложения органического вещества в верхних слоях донных отложений, сопровождающиеся потреблением растворенного кислорода в водной толще, выделением CO_2 и CH_4 в результате микробной деструкции органики, снижением pH из-за накопления углекислоты и органических кислот, образующихся на промежуточных стадиях разложения [14, 18].

Аналогичная закономерность прослеживается и для общего массива данных по придонному слою за весь период исследований (рис. 14*в*), что подтверждает устойчивость выявленной зависимости. Стабильность обратной корреляции между CH_4 и pH в придонных слоях указывает на доминирующую роль анаэробных процессов деструкции органического вещества как ключевого фактора, регулирующего кислотно-щелочной баланс и метановый цикл в глубоководных зонах водохранилища.

Результаты сопоставления концентраций растворенного метана и кислорода в водной толще Цимлянского водохранилища за 2024 г. выявили статистически значимые обратные зависимости между этими показателями (рис. 15): в поверхностном горизонте воды весной $r = –0,50$ ($n = 18$; $p < 0,05$) и летом $r = –0,76$ ($n = 18$; $p < 0,01$), в придонной воде в летний период $r = –0,73$ ($n = 17$; $p < 0,01$).

Для обобщенных данных всех экспедиций в придонном слое воды прослеживалась аналогичная зависимость ($r = –0,65$; $n = 113$; $p < 0,01$). Как было отмечено выше, именно анаэробные условия среды являлись определяющим фактором в процессах метаногенеза, а их нарушение приводило к уменьшению концентрации метана в воде.

Весной 2024 г. статистически значимая обратная зависимость между концентрациями метана и O_2 была выявлена исключительно в поверхностном горизонте водной толщи. Данный факт, вероятно, обусловлен особенностями гидродинамического режима в период весеннего перемешивания: интенсивная турбулентность и конвекционные потоки активизируют биогеохимические процессы преимущественно в верхних слоях водоема. При сопоставимых средних значениях большинства гидрохимических показателей для поверхностного и придонного слоев (табл. 2) отчетливо проявляется существенное различие лишь по температурному параметру.

По-видимому, пониженная температура придонных вод ограничивает скорость биохимических реакций, в т. ч. активность микробных сообществ, участвующих в циклах метана и кислорода. Это сдерживает развитие как процессов метаногенеза в анаэробных условиях, так и окисления метана метанотрофами, требующего присутствия кислорода. Таким образом, температурный фактор выступает одним из ключевых регуляторов пространственной дифференциации биогеохимических процессов в водоеме в весенний период.

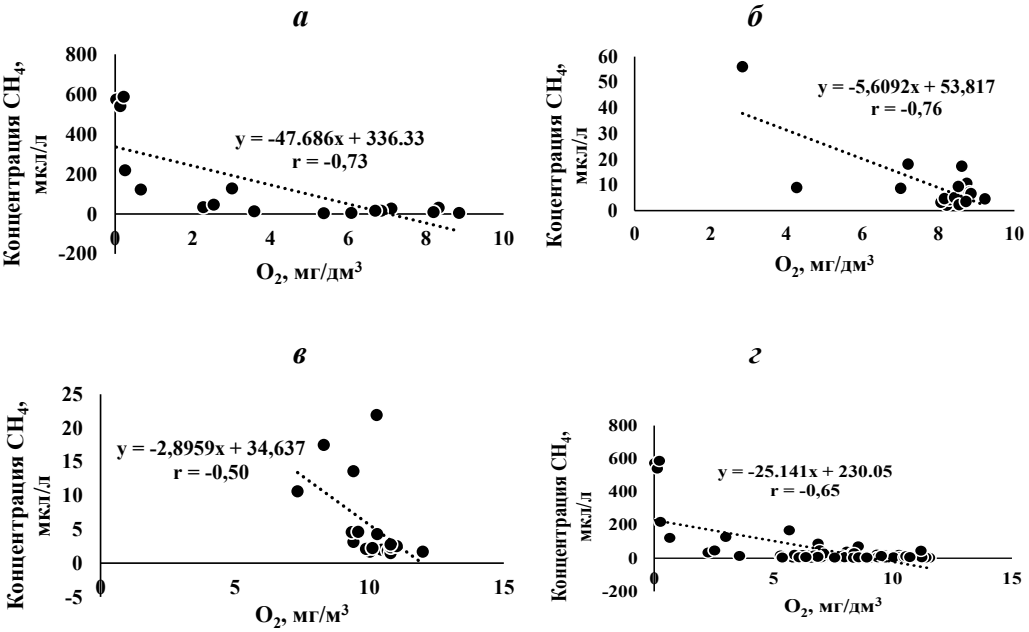


Рис. 15. Зависимость между концентрацией CH_4 и O_2 в поверхностном и придонном слоях воды на станциях отбора проб в Цимлянском водохранилище в различные периоды экспедиционных исследований в 2023–2024 гг.: *а* – весна 2024 г., поверхностный слой; *б* – лето 2024 г., поверхностный слой; *в* – лето 2024 г., придонный слой; *г* – придонный слой за период 2023–2024 гг.

Fig. 15. Dependence between CH_4 and O_2 concentrations in the surface and near-bottom water layers at the sampling stations at the Tsymlyansk Reservoir during different periods of expedition studies in the 2023–2024 period: *a* is spring 2024, surface layer; *б* is summer 2024, surface layer; *в* is near-bottom layer, summer 2024; *г* is near-bottom layer over the 2023–2024 period

Неменьший интерес вызывает и отсутствие обратной зависимости между концентрациями метана и кислорода летом 2023 г. Это явление, вероятно, связано с бурным развитием синезеленых водорослей, сопровождающимся интенсивным фотосинтезом, что приводит к увеличению концентрации кислорода и окислению метана в воде. На это указывал минимальный удельный поток метана с поверхности воды летом 2023 г. при сопоставимых концентрациях CH_4 в донных осадках в летние периоды 2023 и 2024 гг.

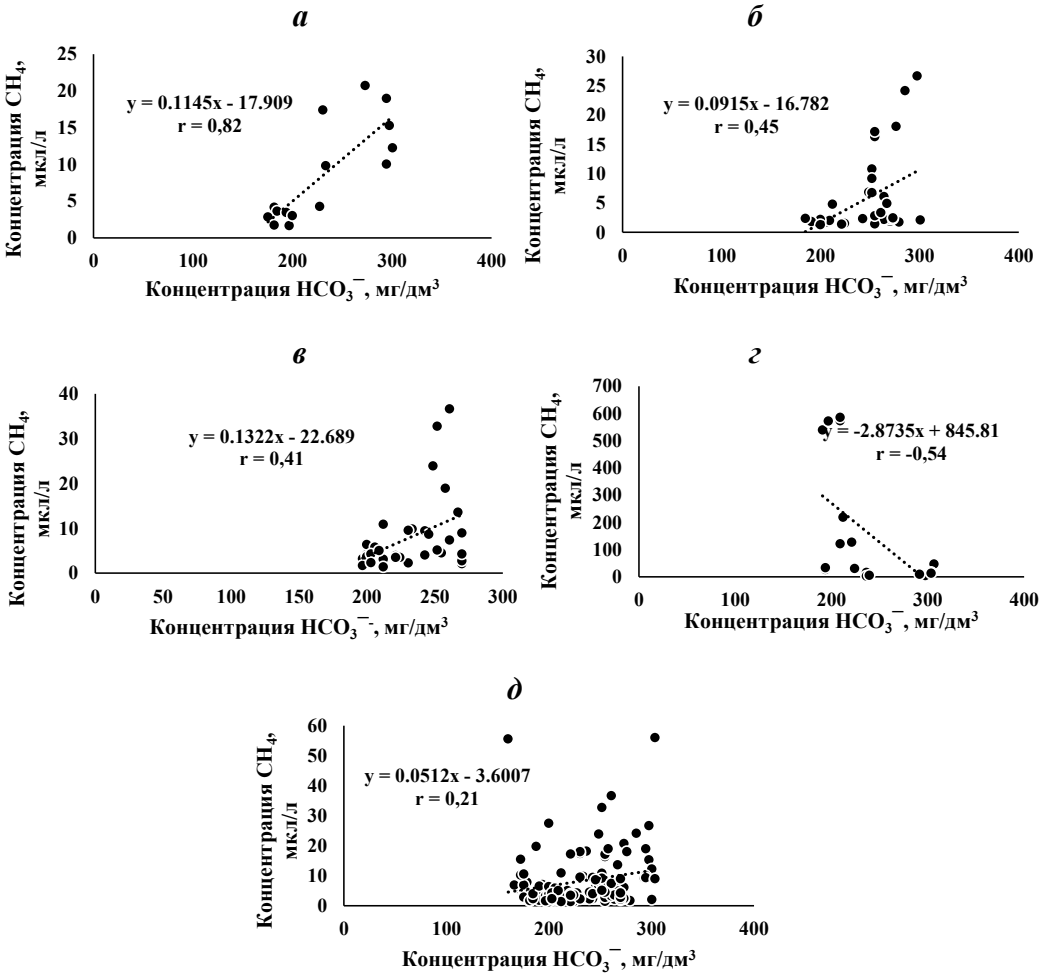


Рис. 16. Зависимость между концентрациями CH_4 и HCO_3^- в поверхностном и придонном слоях воды на станциях отбора проб в Цимлянском водохранилище в различные периоды 2023–2024 гг.: *а* – осень 2023 г., поверхностный слой; *б* – весна 2024 г., поверхностный слой; *в* – осень 2024 г., поверхностный слой; *г* – лето 2024 г., придонный слой; *д* – поверхностный слой за период 2023–2024 гг.

Fig. 16. Dependence between CH_4 and HCO_3^- concentrations in the surface and near-bottom water layers at the sampling stations at the Tsymlyansk Reservoir during different periods of expedition studies in the 2023–2024 period: *а* is autumn 2024, surface layer; *б* is spring 2024, surface layer; *в* surface layer, autumn 2024; *г* is near-bottom layer, *д* surface layer over the 2023–2024 period

Дополнительным подтверждением данной гипотезы служат значимые различия между средними значениями концентрации кислорода и pH летом 2023 г., когда оба показателя были достоверно выше, чем в 2024 г., что согласуется с усиленным потреблением CO_2 фитопланктоном и сдвигом карбонатного равновесия в щелочную область (pH > 8,4) (табл. 2).

Выявлены значимые закономерности взаимосвязи между концентрациями гидрокарбонат-ионов (HCO_3^-) и метана в водной толще Цимлянского водохранилища, демонстрирующие сезонную и вертикальную дифференциацию биогеохимических процессов (рис. 16).

В поверхностном слое воды весной и осенью 2023–2024 гг. зафиксированы достоверные прямые зависимости между содержанием гидрокарбонат-ионов и метана. Эта закономерность отражает процесс аэробного окисления CH_4, вследствие чего выделяется углекислый газ, который при растворении образует гидрокарбонат-ионы. Несмотря на то, что вклад HCO_3^-, образующихся при окислении метана, в общий пул гидрокарбонатов водохранилища относительно невелик, статистический анализ массива данных позволяет выявить и подтвердить эту закономерность на графиках.

Летом 2024 г. в придонной воде во время стратификации установились анаэробные условия, что привело к активизации метаногенеза, и, как следствие, увеличению концентрации CH_4, понижению pH до среднего значения 7,88, снижению доли гидрокарбонатов в воде в соответствии с карбонатным равновесием [19]. Понижение pH обусловлено накоплением органического углерода, в т. ч. органических кислот – промежуточных продуктов анаэробной деструкции органического вещества. В условиях дефицита растворенного кислорода подавляется аэробное окисление метана, что способствует его аккумуляции в водной толще. Одновременно сдвиг карбонатного равновесия при пониженном pH снижает долю гидрокарбонат-ионов в системе неорганического углерода (табл. 2).

Корреляционный анализ взаимосвязей между концентрациями метана, с одной стороны, и показателями растворенного (РОУ) и общего органического углерода (ООУ), с другой, показал наличие статистически значимых прямых зависимостей в поверхностном слое воды как для каждого сезона, так и для общего массива данных в 2024 г. (рис. 17). Такая связь обусловлена биогеохимической природой метана как продукта деструкции более сложных органических соединений.

Максимальная концентрация общего органического углерода в исследуемых горизонтах воды была зафиксирована весной (табл. 2), при этом доля РОУ в поверхностном слое составила 73 % от содержания ООУ, а в придонном – 63 %. Относительно невысокое соотношение РОУ/ООУ весной, в сравнении с другими сезонами, вероятно, обусловлено максимальным наполнением водохранилища. После таяния снега и льда с речным и поверхностным стоком в водоем попадает большое количество органических веществ, их постепенное осаждение в донные отложения запускает процессы микробного окисления и деструкции до более простых соединений.

В летний период наблюдались самые высокие коэффициенты корреляции между концентрациями метана и ООУ, РОУ в поверхностной воде.

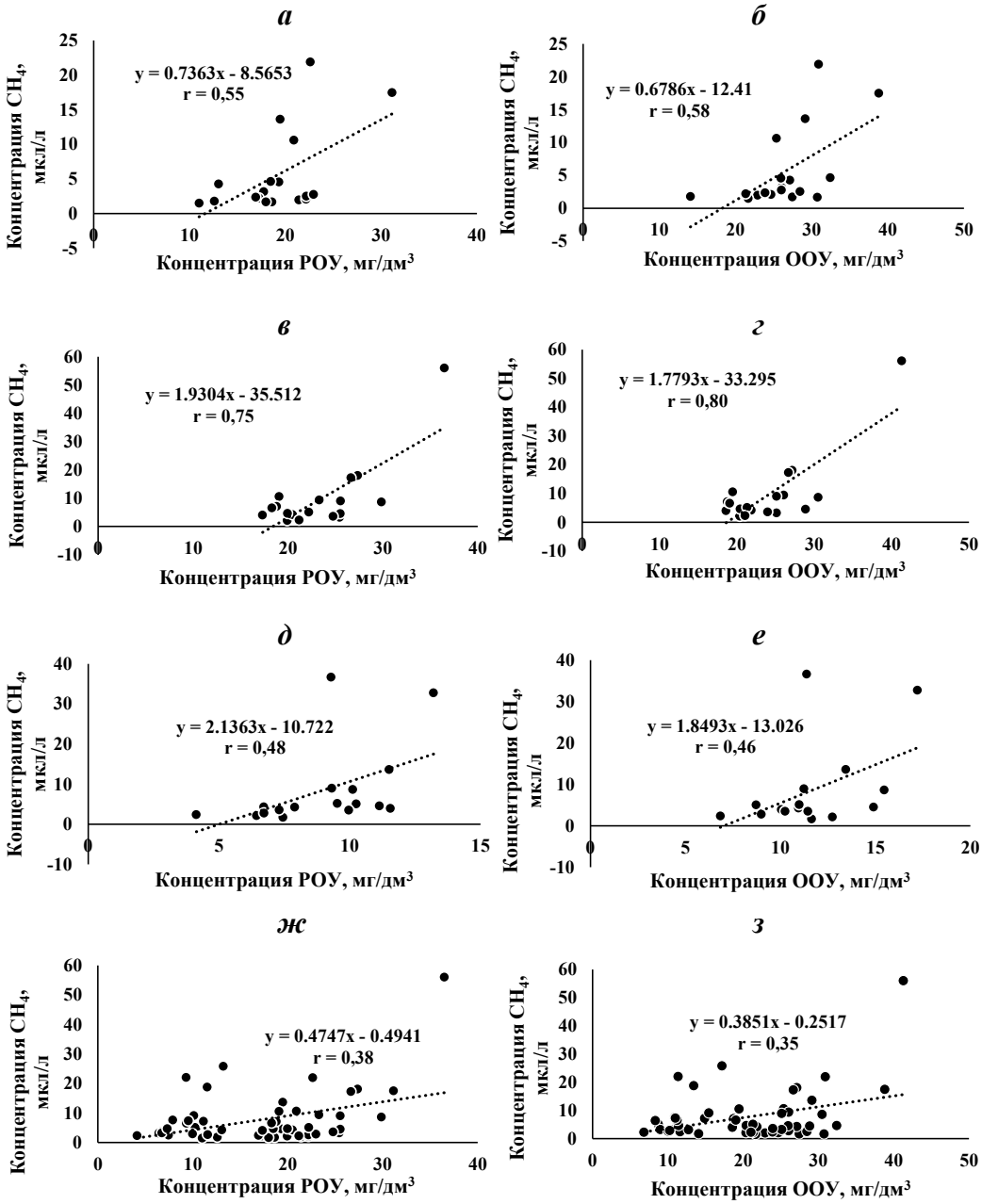


Рис. 17. Зависимость концентрации CH_4 от РОУ и ООУ- в поверхностном слое воды на станциях отбора проб в Цимлянском водохранилище в различные периоды экспедиционных исследований 2024 г.: *а, б* – весна; *в, г* – лето; *д, е* – осень; *ж, з* – поверхностный слой за 2024 г.

Fig. 17. Dependence between CH_4 and РОУ (dissolved organic carbon) and ООУ (total organic carbon) concentrations in the surface water layer at the sampling stations at the Tsymlyansk Reservoir during different periods of expedition studies in 2024 *а, б* is spring; *в, г* is summer; *д, е* is autumn; *ж, з* is surface layer over 2024

При этом зафиксировано незначительное снижение концентрации общего органического углерода в сравнении с весенним периодом и существенное увеличение доли его растворенных форм до 97 и 99 % в поверхностной и придонной воде соответственно. Такая динамика объясняется интенсификацией биогеохимических процессов. Так, увеличение температуры воды по всему вертикальному профилю активизирует процессы жизнедеятельности микробных сообществ (поставщиков автохтонного РОУ в водоем), осаждение большей части нерастворимых органических соединений создает условия для их анаэробного разложения, в условиях стратификации вод содержание кислорода в придонной воде снижается до минимальных значений, что стимулирует метаногенез. Высокие значения концентраций CH_4 были отмечены не только в донных отложениях, но и в придонной воде, которая в этот период выступала важным источником метана [20, 21].

Осенью наблюдалось двукратное уменьшение концентрации обеих форм органического углерода в сравнении с летним периодом: доля РОУ в поверхностной воде составила 78,6 %, в придонной – 82,9 %. Снижение концентрации органического углерода к осеннему периоду закономерно и обусловлено комплексом протекающих в водохранилище биогеохимических процессов. Нарушение термической и кислородной стратификации водохранилища приводило к прекращению метаногенеза и, как следствие, к снижению его концентраций. Совокупность вышеописанных процессов выражалась в уменьшении коэффициентов корреляции обеих форм органического углерода с метаном осенью (рис. 17*д,* 17*е*).

Таким образом, поступающее весной в водохранилище органическое вещество является важным источником метана для водохранилища, который может образовываться не только в донных отложениях, но и в анаэробных микрозонах взвешенных частиц [22, 23], об этом свидетельствуют более высокие коэффициенты корреляции между CH_4 и ООУ в весенний и летний периоды.

Осенью корреляция метана от обеих форм органического углерода снижалась, что может быть следствием затухания микробиологических процессов и поступления этого газа из других источников, например донных отложений.

ВЫВОДЫ

Концентрация метана в воде Цимлянского водохранилища в 2023–2024 гг. изменялась в диапазоне от 1,5 до 585,8 мкл/л со средним значением 26,4 мкл/л. В большинстве случаев более высокими значениями CH_4 характеризовалась придонная вода, а максимальная амплитуда его содержания между дном и поверхностью зафиксирована на глубоководных При-

плотинном и Центральном плесах в период летней стратификации. Зонами повышенных концентраций метана являлись притоки рек, питающих водохранилище и его наиболее глубокие участки.

Содержание CH_4 в верхнем (0–2 см) слое донных отложений Цимлянского водохранилища варьировало в диапазоне от 0,02 до 85,7 мкг/г влажного осадка (в среднем 6,22 мкг/г). Результаты исследования пространственно-временного распределения метана в седиментах Цимлянского водохранилища выявили отчетливую сезонную и пространственную неоднородность его концентраций. Повышенные уровни содержания CH_4 стабильно наблюдались в седиментах Приплотинного и Калачевского участков на протяжении всего периода исследования, тогда как для Чирского и Центрального участков аналогичные показатели отмечались исключительно в летний период 2024 г.

Анализ сезонной изменчивости показал, что максимальные концентрации метана приходились на летние сезоны 2023 и 2024 гг., а также на осенний период 2023 г., что прямо соотносится с фазами устойчивой термической стратификации водной толщи и сопутствующей активизацией анаэробных биогеохимических процессов. Минимальные уровни содержания CH_4, напротив, были зарегистрированы весной 2024 г. и обусловлены комплексом факторов – пониженной температурой воды, замедляющей микробную активность, и интенсивным вертикальным перемешиванием водной массы, препятствующим формированию стабильных анаэробных условий, необходимых для активного протекания метаногенеза.

Значение общего удельного потока CH_4 в атмосферу с поверхности Цимлянского водохранилища варьировало в пределах 0,0003–27,8 мг CH_4/(м^2 час) (в среднем 1,1 мг CH_4/(м^2 час), при этом 92 % значений были ниже 1 мг CH_4/(м^2 час), а самыми высокими показателями F_{CH4} характеризовались мелководные Чирской и Калачевский участки, подверженные влиянию притоков (реки Мышкова, Солоная и Чир) и верхней русловой части водохранилища. Таким образом, зоны вблизи речных устьев выступают ключевыми участками эмиссии метана, что обусловлено поступлением с речным стоком лабильного органического вещества – субстрата для микробной продукции метана, а также мелководностью таких участков (< 7 м), сокращающей путь диффузии метана от донных отложений к поверхности, и усилением метаногенеза в донных осадках из-за повышенного привноса органики.

Ориентировочная эмиссия CH_4 с водной поверхности Цимлянского водохранилища за период с весны по осень 2024 г., рассчитанная на основе средних значений удельного потока, составила 13 278,6 т CH_4 или 9958,95 т в пересчете на углерод.

Обобщая вышеизложенное, можно утверждать, что интенсивность продукции метана в Цимлянском водохранилище имеет ярко выражен-

ную сезонность. Весной происходит насыщение воды органическим веществом и запускаются процессы его химического и биологического разложения. К лету, на фоне повышения температуры воды, в глубоководных зонах формируется термическая стратификация, что приводит к максимальной интенсификации биогеохимических процессов: фиксируется снижение водородного показателя и концентрации растворенного кислорода, а также рост доли растворенного органического углерода. В конце летнего периода нарушение стратификации способствует выносу и окислению углеродсодержащих продуктов распада ОВ, включая метан, из придонных слоев в верхние горизонты. Осенью концентрация общего органического углерода (ООУ) снижается относительно летних значений, а показатели pH и O_2 возвращаются к уровням, характерным для весеннего периода, что свидетельствует о затухании активного метаногенеза в водной толще.

Таким образом, сезонная динамика и пространственное распределение концентраций CH_4, O_2, HCO_3^- и pH отражают смену доминирующих биогеохимических процессов в водной толще Цимлянского водохранилища: от аэробного окисления метана весной и осенью до анаэробного метаногенеза в придонных слоях летом.

Полученные результаты о пространственно-временных закономерностях формирования концентраций и потоков метана в Цимлянском водохранилище позволят, с одной стороны, установить потенциал Цимлянского водохранилища к генерации CH_4 в воде и донных отложениях и интенсивность его миграции в водную толщу и атмосферу, с другой – оценить буферную способность водохранилища препятствовать высвобождению в атмосферу данного газа, что имеет важное практическое значение как для прогнозирования неблагоприятных экологических ситуаций, связанных с ухудшением химического и газового состава вод, так и для оценки региональных потоков метана в атмосферу с поверхности водных ландшафтов степной зоны России. Анализ результатов исследований открывает перспективы для разработки мероприятий, направленных на достижение Цимлянским водохранилищем углеродной нейтральности. Дальнейшее проведение исследований на карбоновом полигоне «Цимлянское водохранилище» поможет разработать рекомендации по организации и ведению мониторинга эмиссии CH_4 в атмосферу с последующей адаптацией и применением для других крупных пресноводных объектов, расположенных в степной зоне России.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамов В. И., Власов А. В., Перфильев Д. О. Углеродный след: методы оценки, сравнение методик и перспективы расчетов в России // Креативная экономика. 2024. Т. 18. № 8. С. 2101–2124. https://doi.org/10.18334/ce.18.8.121475
2. Mikhailov D., Shazhaev I., Chumanskaya V. The prospects of AI and IoT technology development eff ect on the carbon market regulation // BIO Web of Conferences. 2022. P. 00083. https://doi.org/10.1051/bioconf/20225200083
3. Henderson P., Hu J., Romoff J., Brunskill E., Jurafsky D., Pineau J. Towards the systematic reporting of the energy and carbon footprints of machine learning //The Journal of Machine Learning Research. 2020. No. 21 (1). P. 10039–10081.
4. Kumar P., Sahu N. C., Ansari M. A., Kumar S. Climate change and rice production in India: role of ecological and carbon footprint // Journal of Agribusiness in Developing and Emerging Economies. 2021. No. 13 (2). P. 260–278.
5. Глаголев М. В., Сабреков А. Ф. Ответ А. В. Смагину: II. Углеродный баланс России // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. 2014. Т. 5. № 2. С. 50–70.
6. Елистратов В. В., Масликов В. И., Сидоренко Г. И., Молодцов Д. В. Выбросы парниковых газов с водохранилищ ГЭС: Анализ опыта исследований и организация проведения экспериментов в России // Альтернативная энергетика и экология. 2014. № 11 (151). С. 146–159.
7. Федоров Ю. А., Гарькуша Д. Н., Косолапов А. Е., Усова Е. В., Анпилова Е. Л., Верещагин М. А., Беляев А. И. Искусственные водоемы как очаги метаногенеза (на примере Цимлянского водохранилища) // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 3. С. 68–82. https://doi.org/10.35567/19994508-2024-3-68-82. EDN CXWKWU
8. Гречушникова М. Г., Репина И. А., Казанцев В. С., Усова Е. В., Верещагин М. А., Анпилова Е. Л. Первые результаты изучения пространственно-временной изменчивости содержания и эмиссии метана в Цимлянском водохранилище // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 2. С. 80–100. https://doi.org/10.35567/19994508-2024-2-80-100
9. Wallenius A. J., Martins Pa. D., Slomp C. P., Jetten M. S. M. Anthropogenic and Environmental Constraints on the Microbial Methane Cycle in Coastal Sediments // Front. Microbiol. 2021. Vol. 12. Article 631621.
10. Ciais P., Sabine C., Bala G., Bopp L., Brovkin V., Canadell J., Chhabra A., DeFries R., Galloway J., Heimann M., Jones C., Le Quere C., Myneni R. B., Piao S., Thornton P. Carbon and other biogeochemical cycles // Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. MA: Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, 2013. P. 465–570.
11. Conrad R. Contribution of hydrogen to methane production and control of hydrogen concentrations in methanogenic soils and sediments // FEMS Microbiology Ecology. 1999. Vol. 28. No. 3. P. 193–202.
12. Lan X., Thoning K. W., Dlugokencky E. J. Trends in globally-averaged CH4, N2O, and SF6 determined from NOAA Global Monitoring Laboratory measurements. Version 2023-12. URL: https://doi.org/10.15138/P8XG-AA10
13. Bastviken D., Cole J., Pace M., Tranvik L. Methane emissions from lakes: Dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate // Global Biogeochem. Cycles. 2004. Vol. 18. GB4009. https://doi.org/10.1029/2004GB002238
14. Федоров Ю. А., Тамбиева Н. С., Гарькуша Д. Н., Хорошевская В. О. Метан в водных экосистемах. 2-е изд. Ростов на Дону; М., 2007. 330 с.
15. Гарькуша Д. Н., Федоров Ю. А., Тамбиева Н. С. Расчет элементов баланса метана в водных экосистемах Азовского моря и Мирового океана на основе эмпирических формул // Метеорология и гидрология. 2016. № 6. С. 48–58.

16. Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР. Цимлянское, водораздельные и Манычские водохранилища / под ред. В. А. Знаменского и В. М. Гейтенко. Л.: Гидрометеоиздат, 1977. 204 с.
17. Федоров Ю. А., Предеина Л. М. Кислород и pH в зоне смешения вод в Таганрогском заливе // В кн.: Закономерности океанографических и биологических процессов в Азовском море. Апатиты: Кольский научный центр, 2000. С. 88–99.
18. Страхов Н. М. Основы теории литогенеза. Т. II. М.: Изд-во АН СССР, 1960, 574 с.
19. Никаноров А. М., Иваник В. М. Словарь-справочник по гидрохимии и качеству вод суши (понятия и определения). Ростов-на-Дону: Институт водных проблем РАН, 2014. 548 с.
20. Ильинский В. В. Углеводородокисляющие микроорганизмы в прибрежных и открытых водах Можайского водохранилища: активность и вклад в процессы естественного очищения в летний период / В. В. Ильинский, О. В. Поршнева, М. Н. Семененко // Водные ресурсы. 1998. Т. 25. № 3. С. 335–338.
21. Гарькуша Д. Н., Федоров Ю. А., Тамбиева Н. С. Пространственно-временные закономерности распределения содержания метана в водохранилищах // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2014. № 1. С. 450–455.
22. Cynar F. J., Yayanos A. A. Enrichment and characterization of methanogenic bacterium from the oxic upper layer of the ocean // Current Microbiology. 1991. Vol. 23. P. 89–96.
23. Bianchi M., Marty D., Teyssie J. L., Fowler S. W. Strictly aerobic and anaerobic bacteria associated with sinking particulate matter and zooplankton fecal pellets // Marine ecology progress series. 1992. Vol. 88. P. 55–60.

REFERENCES

1. Abramov V. I., Vlasov A. V., Perfiliev D. O. Carbon footprint: assessment methods, comparison of methods and prospects of calculations in Russia. *Creative Economy.* 2024. Vol. 18. No. 8. P. 2101–2124. https://doi.org/10.18334/ce.18.8.121475
2. Mikhailov D., Shazhaev I., Chumanskaya V. Th e prospects of AI and IoT technology development effect on the carbon market regulation. *BIO Web of Conferences*. 2022. P. 00083. https://doi.org/10.1051/bioconf/20225200083
3. Henderson P., Hu J., Romoff J., Brunskill E., Jurafsky D., Pineau J. Towards the systematic reporting of the energy and carbon footprints of machine learning. *The Journal of Machine Learning Research*. 2020. No. 21 (1). P. 10039–10081.
4. Kumar P., Sahu N. C., Ansari M. A., Kumar S. Climate change and rice production in India: role of ecological and carbon footprint. *Journal of Agribusiness in Developing and Emerging Economies*. 2021. No. 13 (2). P. 260–278.
5. Glagolev M. V., Sabrekov A. F. Response to A. V. Smain: II. Carbon balance of Russia. *Environment dynamics and global climate change*. 2014. Vol. 5. No. 2. P. 50–70.
6. Elistratov V. V., Масликов В. И., Sidorenko G. I., Molodtsov D. V. Greenhouse gases emissions from hydro power stations' reservoirs: Analysis of the studies' experience and organization of experiments in Russia. *Alternative power industry and ecology*. 2014. No. 11 (151). P. 146–159.
7. Fedorov Y. A., Garkusha D. N., Kosolapov A. E., Usova E. V., Anpilova E. L., Vereshchagin M. A., Belayev A. I. Artificial water bodies as methane genesis centers (with the Tsymlyansk Reservoir as an example). *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2024. No. 3. P. 68–82. https://doi.org/10.35567/19994508-2024-3-68-82. EDN CXWKWU
8. Grechushnikova M. G., Repina I. A., Kazantsev V. S., Usova E. V., Vereshchagin M. A., Anpilova E. L. First results of studying of spatial/temporal variability of the methane content and emission in the Tsimlyansk reservoir. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2024. No. 2. P. 80–100. https://doi.org/10.35567/19994508-2024-2-80-100

9. Wallenius A. J., Martins Pa. D., Slomp C. P., Jetten M. S. M. Anthropogenic and Environmental Constraints on the Microbial Methane Cycle in Coastal Sediments. *Frontiers in Microbiology.* 2021. Vol. 12. Article 631621.
10. Ciais P., Sabine C., Bala G., Bopp L., Brovkin V., Canadell J., Chhabra A., DeFries R., Galloway J., Heimann M., Jones C., Le Quere C., Myneni R. B., Piao S., Thornton P. Carbon and other biogeochemical cycles. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. MA: Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, 2013. P. 465–570.
11. Conrad R. Contribution of hydrogen to methane production and control of hydrogen concentrations in methanogenic soils and sediments. *FEMS Microbiology Ecology*. 1999. Vol. 28. No. 3. P. 193–202.
12. Lan X., Thoning K. W., Dlugokencky E. J.: Trends in globally-averaged CH4, N2O, and SF6 determined from NOAA Global Monitoring Laboratory measurements. Version 2023-12. https://doi.org/10.15138/P8XG-AA10
13. Bastviken D., Cole J., Pace M., Tranvik L. Methane emissions from lakes: Dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate. *Global Biogeochemical Cycles*. 2004. Vol. 18. GB4009. https://doi.org/10.1029/2004GB002238
14. Fedorov Y. A., Tambieva N. S., Garkusha D. N., Khoroshevskaya V. O. Methane in aquatic ecosystems. 2nd issue. Rostov-on-Don; M., 2007. 330 p.
15. Garkusha D. N., Fedorov Y. A., Tambieva N. S. Calculation of the methane balance elements in aquatic ecosystems of the Azov Sea and Global Ocean based on empiric formulas. *Meteorology and hydrology*. 2016. No. 6. P. 48–58.
16. Hydro/meteorological regime of lakes and reservoirs of the USSR. Tsymlyansk, Watershed and Manych reservoirs / edited by V. A. Znamenskiy and V. M. Geytenko. L.: Gidrometeoizdat, 1977. 204 p.
17. Fedorov Y. A., Predeina L. M. Oxygen and pH in the water mixture zone in the Taganrog Bay. *In the book: Laws of oceanographic and biological processes in the Azov Sea*. Apatity: Cola Scientific Center, 2000. P. 88–99.
18. Strakhov N. M. Basic foundations of the lythogenesis. Vol. II. M.: USSR Academy of Sciences Publishing House, 1960, 574 p.
19. Nikanorov A. M., Ivanik V. M. Reference book on hydrochemistry and inland waters quality (notions and definitions). Rostov-on-Don: RAS Institute of Water Problems, 2014. 548 p.
20. Ilyinsky V. V. Carbon-oxidizing microorganisms in offshore and open waters of the Mozhaisk Reservoir: activities and contribution in the natural purification processes during the summer / V. V. Ilyinsky, O. V. Porshneva, M. N. Semenenko. *Water resources*. 1998. Vol. 25, No. 3. P 335–338.
21. Garkusha D. N., Fedorov Y. A., Tambieva N. S. Spatial/temporal laws of the methane content distribution in reservoirs. *Geopolitics and eco/geo/dynamics of regions*. 2014. No. 1. P. 450–455.
22. Cynar F. J., Yayanos A. A. Enrichment and characterization of methanogenic bacterium from the oxic upper layer of the ocean. *Current Microbiology.* 1991. Vol. 23. P. 89–96.
23. Bianchi M., Marty D., Teyssie J. L., Fowler S. W. Strictly aerobic and anaerobic bacteria associated with sinking particulate matter and zooplankton fecal pellets. *Marine ecology progress series.* 1992. Vol. 88. P. 55–60.

Сведения об авторах:

Усова Елена Валентиновна, заведующая отделом исследования качества вод и аналитической деятельности, ФБГУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Россия, 344037, г. Ростов-на-Дону, ул. Ченцова, здание 10а; https://orcid.org/0009-0003-5800-3706; e-mail: chimanalit@inbox.ru

Дмитрик Леонид Юрьевич, ведущий специалист, отдел исследования качества вод и аналитической деятельности, ФБГУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного ис-

пользования и охраны водных ресурсов» (ФБГУ РосНИИВХ), Россия, 344037, г. Ростов-на-Дону, ул. Ченцова, здание 10а; https://orcid.org/0000-0002-6314-1383; e-mail: dimikarmy13@ya.ru

Анпилова Евгения Леонидовна, канд. хим. наук, старший научный сотрудник, отдел исследования качества вод и аналитической деятельности, ФБГУ РосНИИВХ, Россия, 344037, г. Ростов-на-Дону, ул. Ченцова, здание 10а; https://orcid.org/0009-0009-2196-809X; e-mail: anpilova.jane@gmail.com

Федоров Юрий Александрович, д-р геогр. наук, профессор, заведующий кафедрой физической географии, экологии и охраны природы, Институт наук о Земле, Южный федеральный университет, Россия, 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Р. Зорге, 40; https://orcid.org/0000-0001-7411-3030; e-mail: fedorov@sfedu.ru

Гарькуша Дмитрий Николаевич, канд. геогр. наук, доцент кафедры физической географии, экологии и охраны природы, Институт наук о Земле. Южный федеральный университет, Россия, 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Р. Зорге, 40; https://orcid.org/0000-0001-5026-2103; e-mail: gardim@sfedu.ru

Верещагин Михаил Алексеевич, гидрохимик 1-й категории, отдел исследования качества вод и аналитической деятельности, ФБГУ РосНИИВХ, Россия, 344037, г. Ростов-на-Дону, ул. Ченцова, здание 10а; https://orcid.org/0009-0004-9841-7644; e-mail: zigr57@gmail.com

Чернышенко Елена Романовна, гидрохимик, отдел исследования качества вод и аналитической деятельности, ФБГУ РосНИИВХ, Россия, 344037, г. Ростов-на-Дону, ул. Ченцова, здание 10а; https://orcid.org/0009-0003-5107-4683; e-mail: elenachernyshenko210@gmail.com

About the authors:

Elena V. Usova, Head, Department of Water Quality Research and Analytical Activities, “RosNIIVKh”, ul. Chentsova, 10a, Rostov-on-Don, 344037, Russia; https://orcid.org/0009-0003-5800-3706; e-mail: chimanalit@inbox.ru

Leonid Y. Dmitrik, Leading Specialist, Department of Water Quality Research and Analytical Activities, “RosNIIVKh”, ul. Chentsova, 10a, Rostov-on-Don, 344037, Russia; https://orcid.org/0000-0002-6314-1383; e-mail: dimikarmy13@ya.ru

Evgeniya L. Anpilova, Candidate of Chemical Sciences, Senior Researcher, Department of Water Quality Research and Analytical Activities, RosNIIVKh, ul. Chentsova, 10a, Rostov-on-Don, 344037, Russia; https://orcid.org/0009-0009-2196-809X; e-mail: anpilova.jane@gmail.com

Yuri A. Fedorov, Doctor of Geography, Professor, Head of the Department of Physical Geography, Ecology and Nature Conservation at the Institute of Earth Sciences of the Southern Federal University, ul. R. Sorge, 40, Rostov-on-Don, 344090, Russia; https://orcid.org/0000-0001-7411-3030; e-mail: fedorov@sfedu.ru

Dmitry N. Garkusha, PhD in Geography, Associate Professor of the Department of Physical Geography, Ecology and Nature Conservation at the Institute of Earth Sciences of the Southern Federal University, ul. R. Sorge, 40, Rostov-on-Don, 344090, Russia; https://orcid.org/0000-0001-5026-2103; e-mail: gardim@sfedu.ru

Mikhail A. Vereshchagin, Hydro/chemist of the 1st category, Department of Water Quality Research and Analytical Activities, RosNIIVKh, ul. Chentsova, 10a, Rostov-on-Don, 344037, Russia; https://orcid.org/0009-0004-9841-7644; e-mail: zigr57@gmail.com

Elena R. Chernyshenko, Hydro/chemist, Department of Water Quality Research and Analytical Activities of FSBI RosNIIVKh, ul. Chentsova, 10a, Rostov-on-Don, 344037, Russia; https://orcid.org/0009-0003-5107-4683; e-mail: elenachernyshenko210@gmail.com

Поступила в редакцию / Received 13.03.2026.
Поступила после рецензирования / Revised 20.03.2026.
Принята к публикации / Accepted 6.04.2026.

УДК 556; 535.6 https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-2-63-83

Оригинальная статья/Original paper

Использование данных сетевых наблюдений для характеристики транспорта взвешенных наносов на примере участка Верхней Лены

Д. И. Школьный ✉, А. С. Цыпленков, Л. А. Турыкин, П. П. Головлев

✉ danila.hydro@yandex.ru

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. В статье исследуются особенности транспорта взвешенных наносов на участке Верхней Лены в районе г. Ленска – территории, где прямые гидрологические наблюдения за мутностью потока отсутствуют и данные приходится восстанавливать по удаленным постам-аналогам. **Методы.** Проведен сравнительный анализ стока воды и наносов с учетом геоморфологических, климатических и антропогенных факторов. Построены зависимости расходов наносов от расходов воды и скоростей течения, оценены внутригодовые изменения мутности, крупности и структуры потока. **Результаты.** Выявлено, что россыпная добыча полезных ископаемых в бассейнах Витима, Олекмы и Чары оказывает существенное влияние на мутность и гранулометрический состав наносов, увеличивая объемы стока наносов, долю мелких фракций и пространственную неоднородность в потоке. Анализ показал ограниченную применимость сетевых данных Росгидромета из-за методических погрешностей измерений, нерегулярности отбора проб, недоучета коллоидных и глинистых частиц, а также локальных антропогенных воздействий. Полученные результаты позволяют обоснованно экстраполировать характеристики стока наносов в расчетный створ в районе г. Ленска и рассчитывать исходные данные для проектирования водозаборных и других гидротехнических сооружений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: река Лена, сток наносов, мутность, гидрологический пост, россыпные разработки, гранулометрический состав, руслообразующие фракции

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование выполнено по планам НИР (ГЗ) научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов географического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова «Эрозионно-русловые системы: гидрологический режим, природно-антропогенные трансформации и прогноз опасных проявлений».

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Школьный Д. И., Цыпленков А. С., Турыкин Л. А., Головлев П. П. Использование данных сетевых наблюдений для характеристики транспорта взвешенных наносов на примере участка Верхней Лены // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2026. № 2. С. 63–83. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-2-63-83; EDN: IBRBLO

© Школьный Д. И., Цыпленков А. С., Турыкин Л. А., Головлев П. П., 2026

Characteristics of Suspended Sediment Transport of the Upper Lena River using gauging network observations

Danila I. Shkolnyi, Anatoly S. Tsyplenkov, Leonid A. Turykin, Pavel P. Golovlev

danila.hydro@yandex.ru

Lomonosov Moscow State University, Russia

ABSTRACT

Relevance. This article examines the characteristics of suspended sediment transport in a section of the Upper Lena River near Lensk City. As this area has no suspended sediment measurements, data must be reconstructed using analogue stations. **Methods**. A comparative analysis of water and sediment discharge has been carried out, considering geomorphological, climatic, and anthropogenic factors. Relationships between sediment and water discharge, as well as flow velocities, have been identified. Intra-annual changes in suspended sediment concentration, grain size, and flow structure have been assessed. **Results.** It was found that placer mining in the Vitim, Olyokma, and Chara river basins significantly affects sediment concentration and grain size distribution. This influence increases sediment load, the proportion of finer sediments, and the spatial variation within the flow. The analysis showed that data from the Rosgidromet network has limited use because of measurement errors, infrequent sampling, the underestimation of colloidal and clay particles, and local anthropogenic impacts. The results obtained provide a basis for reasonably extending sediment transport characteristics to the calculated cross-section near Lensk City and for estimating initial data for the design of water intake and other hydraulic structures.

KEYWORDS: Lena River, suspended sediment load, suspended sediments, gauging station, placer mining, grain size, channel-forming fractions.

FUNDING: The work was carried out according to the State Task of the Makkaveev Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes at Moscow State University “Erosion-channel systems: hydrological regime, natural and anthropogenic transformations, and forecast of hazardous processes”.

FOR CITATION: Shkolnyi D. I., Tsyplenkov A. S., Turykin L. A., Golovlev P. P. Characteristics of Suspended Sediment Transport of the Upper Lena River using gauging network observations. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2026. No. 2. P. 63–83. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-2-63-83; EDN: IBRBLO

ВВЕДЕНИЕ

В статье проанализированы особенности транспорта взвешенных наносов на участке Верхней Лены в районе г. Ленска на основании архивных данных, рассмотрены особенности и ограничения, связанные с наличием

информации по характеристикам наносов. Несмотря на широкий спектр хозяйственных задач, требующих изучения условий переноса наносов (в первую очередь, проектирования и эксплуатации водозаборных сооружений, экологического нормирования допустимых сбросов загрязняющих веществ), и высокий уровень изученности физических особенностей транспорта наносов [1, 2], точность расчетных методик и прогнозирования не позволяет решать многие прикладные задачи в условиях недостаточности данных [3, 4].

В нормативных документах[1] указана необходимость выполнения детальных измерений характеристик мутности в исследуемых створах для выполнения расчетов (например, при проектировании водозаборов – не менее 24 раз в год) или использования данных рек-аналогов. В подавляющем большинстве случаев в качестве аналогов из-за отсутствия других источников информации используются данные наблюдений на постах наблюдательной сети Росгидромета. Наблюдения за мутностью и стоком наносов на гидрологических постах имеют значительные погрешности, и их применимость для расчетов ограничена рядом методических сложностей. В первую очередь, это инструментально-методические ошибки непосредственно измерения характеристик наносов (включая изменения методик и мест отбора проб) [5], ошибки измерений расходов воды (в основном возникающие при затоплении поймы или прохождении ледовых явлений, зачастую совпадающих с пиковыми расходами) и их пересчета, а также ошибки из-за недостаточного количества измерений мутности воды и расходов наносов на посту (особенно в период половодья и дождевых паводков) [4].

Анализ многолетних рядов данных о наносах, полученных на наблюдательной сети [3, 5], показал, что существующие протоколы мониторинга мутности воды содержат источник систематической погрешности. Вдобавок из-за особенностей измерений в определяемую на постах часть мутности не попадают коллоидные, глинистые частицы ($d < 0{,}001$ мм) и частично – пылеватые частицы ($d < 0{,}01$ мм). В зависимости от региона и источников взвешенных наносов такие частицы могут составлять до 10–20 % от общего объема, достигая в отдельных случаях 40 % и более, что может оказывать значительное влияние как на эксплуатацию водозаборных сооружений, так и на условия транспорта загрязняющих веществ с наносами. В связи с этим данные УГМС могут быть использованы только для оценочных определений характеристик стока наносов.

1 РД 52.24.622-2017 «Порядок проведения расчетов условных фоновых концентраций химических веществ в воде водных объектов для установления нормативов допустимых сбросов сточных вод», Пособие к СНиП 2.04.02-84 «Пособие по проектированию сооружений для забора поверхностных вод» и другие.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Для расчетов стока наносов к створу г. Ленска (F = 450 тыс. км^2) использовались данные по ближайшим постам-аналогам (рис. 1): 1) г/п Змеиново (F = 140 тыс. км^2) вверх по течению р. Лены; 2) г/п Солянка (F = 770 тыс. км^2) вниз по течению Лены и 3) г/п Бодайбо (F = 186 тыс. км^2) на р. Витим вверх по течению Лены. Посты находятся в условиях, близких к расчетному створу по морфологии долины и уклонам русла, однако удалены от него на расстояние более 400 км по течению (см. рис. 1). Они значительно отличаются по площади водосборов, что связано с впадением крупных притоков: Лена с Витимом сливаются между вышележащими постами и створом, а Олекма впадает в Лену в 4 км выше г/п Солянка. В качестве референтного поста, характеризующего расходы воды, использован г/п Крестовский, расположенный в 163 км выше по течению от г. Ленска. Разница в площади водосбора с расчетным створом – 2 %.

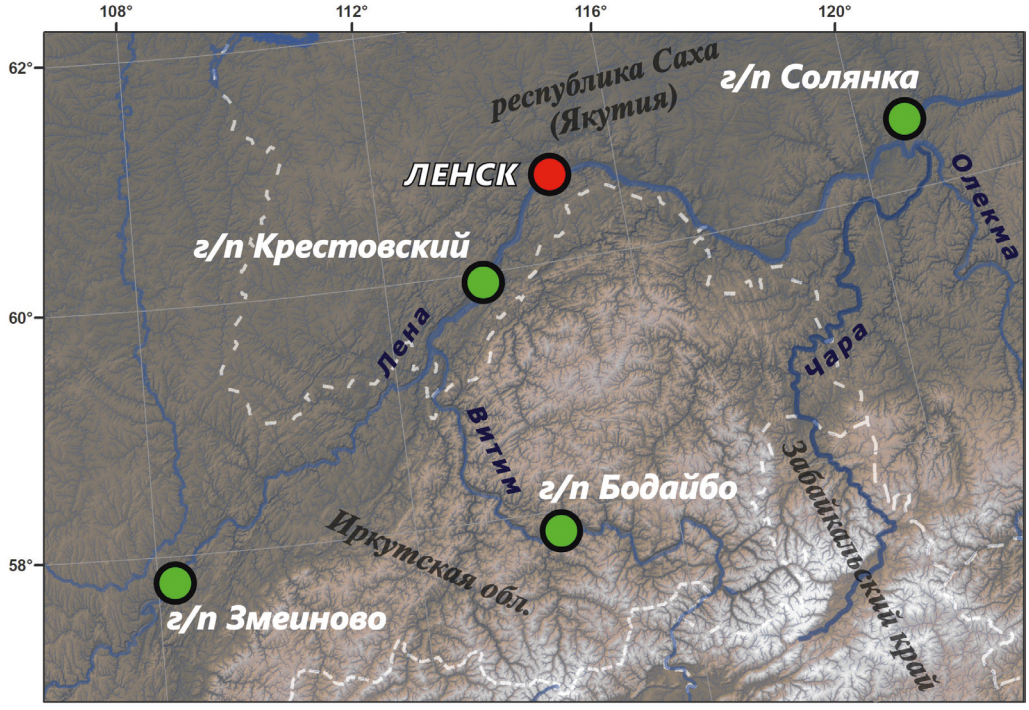


Рис. 1. Расположение сетевых гидрологических постов (зеленые точки) с наличием данных относительно участка исследований (красная точка)

Fig.1. Location of gauges with sediment data within the study area (green dots). The red dot indicates Lensk City

Для анализа и расчета использованы данные по крупности наносов (Круп., мм), а также данные об измеренных расходах наносов (G, кг/с) и воды (Q, м^3/с) за соответствующие даты в створах постов за безледный

период. Подобные данные очень ограниченны и публиковались в гидрологических ежегодниках только до 1980 г. В настоящее время сетевая информация об измеренных характеристиках расходов воды и наносов не публикуется в открытом доступе (за исключением рассчитанных среднедекадных значений мутности и расхода наносов, которые могут использоваться только в качестве справочных), поэтому в рамках настоящего исследования использованы архивные данные.

Для анализа был рассмотрен период с 1958 по 1979 г. как наиболее обеспеченный опубликованными данными о мутности воды и крупности наносов [6]. Однако даже в ежегодниках этого периода имеется большое количество пропусков и неточностей, количество измерений в различные годы очень неравномерно, информация о крупности – отрывочная (см. табл. 1). В зависимости от вида обработки проб нижний предел определения фракций изменялся от 0,05 до 0,001 мм. Статистические характеристики крупности взвеси рассчитаны с помощью программы GradiStat [7]. В качестве информации о распределении скоростей потока по сечению на участке использованы данные измерений доплеровского профилографа Sontek M9. Измерения выполнялись в створе г. Ленска в сентябре 2023 г., а также на участке между устьем Витима и г/п Крестовский в сентябре 2024 г.

Таблица 1. Количество измеренных значений характеристик по постам-аналогам в 1958–1979 гг.

Table 1. A number of gauged charasteristics values for the stations-analogues in 1958–1979

Пост	$Q_{безлед}$	G	Круп.
р. Лена – Змеиново	157	145	29
р. Лена – Солянка	276	212	47
р. Витим – Бодайбо	247	163	7

К требуемым для проектирования водозаборных сооружений характеристикам транспорта наносов относятся как общий объем стока наносов в расчетном створе, так и распределение стока наносов различных фракций при различных диапазонах расходов и скоростей течения. В естественных речных условиях за счет турбулентного характера течения осаждаться будут только взвешенные наносы наиболее крупных фракций, мелкие фракции после поступления в поток будут переноситься практически без потерь на осаждение [8]. Таким образом, при оценках заносимости для расчета осаждения допустимо принимать только руслообразующие фракции взвеси (т. е., $\varnothing > 0{,}05$ мм). При проектировании водозаборов, наоборот, необходимо оценивать и долю мелких фракций от общей мутности, а также распределение мутности по вертикали и ее характеристику в придонном слое.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Общая характеристика водного режима

Для рек бассейна Верхней Лены характерно продолжительное, многопиковое весенне-летнее половодье, начинающееся в конце апреля и связанное с постепенным таянием снега в горных частях водосбора, с наложением большого количества волн дождевых паводков (рис. 2). Для рек исследуемой территории, несмотря на крупные размеры их бассейнов, характерны достаточно резкие изменения уровней и расходов воды как в начале половодья (за счет распространения мерзлоты), так и во время паводков (за счет высоких уклонов и большого количества осадков), с чем могут быть связаны и характерные особенности транспорта наносов. Лена и Витим, имея близкие площади водосборов к точке слияния, значительно отличаются по режиму стока воды. Для Витима характерны более высокие

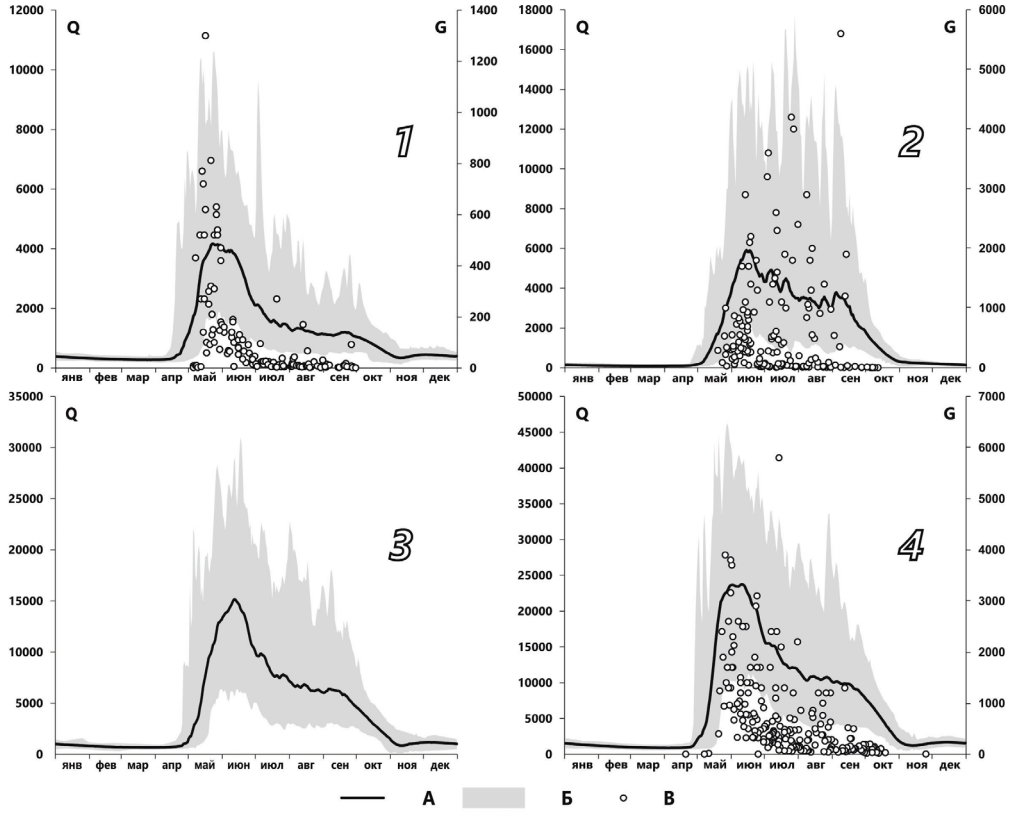


Рис. 2. Средние суточные расходы воды Q, м³/с (А), амплитуда их максимальных и минимальных значений за период наблюдений (Б) и измеренные расходы наносов G, кг/с (В) на постах Змеиново (*1*), Бодайбо (*2*), Крестовский (*3*) и Солянка (*4*) по данным GRDC [9]

Fig. 2. Average daily water discharges Q, cms (А), amplitude of their maximum and minimum values for the observation period (Б) and measured sediment discharges G, kg/s (В) at the Zmeinovo (*1*), Bodaibo (*2*), Krestovsky (*3*), and Solyanka (*4*) gauging stations according to GRDC data [9]

модуль стока и максимальные расходы воды, что связано с большей средней высотой водосбора. Для Лены основным источником питания является снеготаяние, тогда как для Витима характерно преобладание дождевого питания в годовом стоке. Нижележащий участок Лены имеет смешанный водный режим, обусловленный наложением стока двух рек. Здесь наблюдается растянутое половодье, на спад которого накладываются дождевые паводки (преимущественно с бассейна Витима).

Сравнивая приведенные к слиянию Витима и Лены значения годового стока, можно сделать вывод, что доля Витима преобладает в годовом стоке, составляя в среднем около 57 %. В половодье сток Лены выше, в то время как в летне-осенний период доля стока Витима увеличивается, зачастую превышая 65–70 % от общего объема. Среднегодовой гидрограф р. Лены в створе Солянка в целом аналогичен створу Крестовский с закономерным ростом расходов, связанным с увеличением площади бассейна (рис. 2). Максимальные расходы здесь характерны в половодье, на летне-осенний период накладываются волны проходящих по бассейну Олекмы паводков.

Многолетние изменения стока воды и наносов

При оценке стока взвешенных наносов значимое влияние на результат оказывает место выборки используемых данных в многолетних тенденциях. Рассматриваемый период с наличием детальных данных по стоку наносов лежит на границе между фазами понижения и повышения средних годовых и сезонных температур воздуха [10]. С общим потеплением климата и увеличением количества осадков связан и постепенный рост расходов воды [11], наблюдающийся на исследуемых постах (рис. 3). При этом на Верхней Лене (к посту Змеиново) эти изменения менее выражены, чем на Витиме, Олекме и Лене ниже их впадения: ряд расходов в Змеиново однороден, в то время как для Солянки и Бодайбо проверка по критерию Стьюдента показывает неоднородность. При этом перегиб тренда среднегодовых расходов для всех постов произошел после периода с наличием данных – в 1981 г. для Бодайбо, в 1988 г. для Змеиново и в 1996 г. для Солянки [12].

Изменения мутности потока сложно оценивать статистически из-за большого количества пропусков в данных. Можно отметить, что на Лене они демонстрируют положительную связь с ростом среднегодовых расходов только в замыкающем створе участка (р. Лена – Солянка), в створе Змеиново наблюдается устойчивое снижение мутности, в то время как на Витиме в створе Бодайбо рост мутности в 1970-х годах сменился спадом значений (рис. 3). Период наличия данных по наносам на постах Змеиново и Бодайбо пришелся на период повышенных значений среднегодовой мутности, в то время как на посту Солянка мутность к настоящему моменту выросла на треть. Это необходимо учитывать при оценках и расчетах.

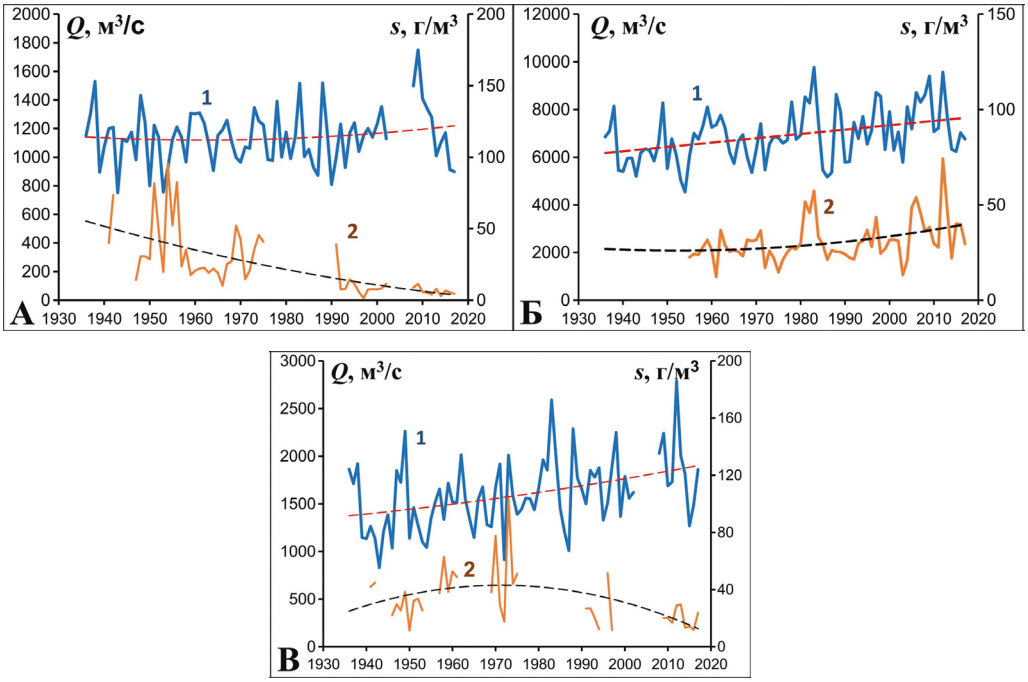


Рис. 3. Ход среднегодовых значений расхода воды (1) **и мутности** (2) **воды на постах Змеиново** (А)**, Солянка** (Б) **и Бодайбо** (В) **(по данным [11])**

Fig. 3. Changes of average annual values of water discharge (1) **and water turbidity** (2) **at the Zmeinovo** (А)**, Solyanka** (Б)**, and Bodaibo** (В) **gauging stations (according to [11])**

Существенным фактором формирования стока взвешенных наносов на участке исследования является добыча золота и других металлов в долинах рек открытым способом. Россыпные разработки значительно влияют на сток наносов и их физические характеристики [13] – в первую очередь за счет изменения рельефа долин и создания больших массивов взрыхленного грунта, легко вовлекающегося в поток при смыве за счет таяния снега и ливневых осадков. Не исключены аварийные и технологические сбросы с повышенной мутностью. Общий объем стока наносов и максимальные мутности рек ниже разработок возрастают в 5–100 раз и более в зависимости от площадей нарушенных земель и механизма добычи [14].

Для гидрологических постов, использованных в работе, затронутость бассейнов россыпной добычей значительно различается [15]. К створу г/п Змеиново длина нарушенных русел в бассейне незначительна (17 км, что соответствует трансформации стока с 0,2 % площади бассейна). К створу г/п Солянка эти значения увеличиваются до 2484 км и 8,1 %, к створу г/п Бодайбо – до 643 км и 9,6 %. Основная часть разработок в бассейне г/п Бодайбо находится на значительном удалении от поста, в верховьях бассейна Витима. При этом пост расположен выше впадения р. Бодайбо, бас-

сейн которой является крупнейшим центром золотодобычи и практически полностью изменен открытыми россыпями (см. рис. 4 (*1*)). К устью Витима показатели трансформации за счет этого увеличиваются до 1032 км и 10,3 %. В результате этого мутность Витима ниже гидропоста значительно повышается, что хорошо читается на спутниковых снимках (рис. 4 (*2*)). Аналогичное влияние характерно и для поста Солянка.

Ниже устья Витима значительно повышают мутность притоки Большой и Малый Патом, общие показатели нарушенности которых суммарно составляют 530 км и 5,2 % (относительно всего межприточного прироста площади водосбора). Бассейн Олекмы характеризуется показателями



Рис. 4. Россыпные разработки, влияющие на сток наносов на участке (*1*), и связанные с ними шлейфы мутности на снимках Sentinel от июня 2024 г. (*2* – на впадении Бодайбо в Витим, *3* – на слиянии Витима с Леной, *4* – на слияниях Чары с Олекмой и Олекмы с Леной)

Fig. 4. Placer mining sites affecting sediment runoff in the area (*1*) and associated turbidity plumes in Sentinel images from June 2024 (*2* – at the confluence of the Bodaibo with the Vitim, *3* – at the confluence of the Vitim with the Lena, *4* – at the confluences of the Chara with the Olyokma and the Olyokma with the Lena)

899 км и 11,2 %, при этом разработки хоть и имеют значительную протяженность, лежат в верхней части бассейна на значительном удалении от устья. Основной вклад в мутность на посту вносит р. Жуя – левый приток Чары, для которого показатели нарушенности составляют 547 км и 28,7 % бассейна. Слияние таких крупных рек с сопоставимыми и большими объемами стока приводит к разделению потока на мощные «струи» со значительно различающейся мутностью, причем перемешивание по длине рек происходит достаточно медленно. Так, Витимская «струя» (рис. 4 (*3*)) отчетливо читается в мутности Лены даже в створе г. Ленска (на удалении более 200 км от устья Витима). На г/п Солянка (рис. 4 (*4*)) часто прослеживаются четыре отдельные «струи» – вода самой Лены, воды ее правых притоков Большого и Малого Патомов, вода Чары и вода Олекмы (от левого к правому берегу).

За счет механической сортировки при создании отвалов и промывке увеличивается доля мелкой фракции в стоке наносов. Так, для одного из наиболее затронутых добычей районов на территории России – Верхней Колымы – содержание мелкой фракции в половодье, т. е. при максимальных годовых мутностях, достигает 50–90 % [16]. Принимая во внимание недоучет мелкой фракции (о чем было указано выше), данные на постах, находящихся под влиянием стоков с участков разработок, также могут быть занижены, а результаты наблюдений за наносами могут значительно отличаться друг от друга в зависимости от условий и места отбора проб. Все это является дополнительным источником погрешности при определении средних мутностей и их осреднению по сечению на гидропостах. Можно предположить, что данные по наносам для Солянки будут сильно завышены по сравнению с условиями в Ленске, а также – что в них будет наблюдаться значительный разброс в зависимости от условий стока на реках-притоках и особенностей отбора проб.

Характеристика стока взвешенных наносов

Для Витима, имеющего паводочный режим, характерны сравнительно высокие расходы наносов (более 500 кг/с) на протяжении всего теплого периода, что связано с наличием в бассейне большого количества межгорных впадин (Куандинская, Баунтовская и другие), сложенных четвертичными, легкоразмываемыми озерными отложениями. В пределах этих впадин наблюдаются активные горизонтальные русловые деформации, которые являются дополнительным источником наносов. Естественные максимумы (до 4100 кг/с) приурочены к высоким паводкам, наивысшие наблюденные расходы наносов за период (5700 кг/с) связаны, согласно примечаниям к таблице в Гидрологическом ежегоднике, с работой драги выше поста. Верхняя часть бассейна Лены сложена преимущественно известняками кембрийского возраста с отдельными участками магматиче-

ских интрузий, русла преимущественно врезанные, галечные, с чем связано в основном бассейновое происхождение наносов. Это сказывается на внутригодовом распределении: большую часть года расходы наносов не превышают 200 кг/с (для поста Змеиново), увеличиваясь только в мае – июне (на пике половодья, до 1320 кг/с) и редко – в высокие паводки. К посту Солянка расходы наносов повышаются и большую часть года превышают 200 кг/с с максимумами до 3850 кг/с на пике половодья и повышенными значениями на протяжении остального теплого периода, что связано, как было сказано выше, с изменениями стока наносов под воздействием россыпных разработок в бассейнах Большого и Малого Патомов и Чары (рис. 5). В холодный период года (январь – апрель и октябрь – декабрь) сток наносов, как и расходы воды, минимальны. Для Лены характерно запаздывание максимальных показателей стока наносов относительно волны половодья и постепенное их снижение в течение теплого периода; на Витиме, наоборот, максимальный сток наносов проходит до пиков половодья, после чего быстро снижается.

Анализ рядов измеренных значений позволяет сделать вывод, что для р. Лены характерно закономерное повышение мутности воды и стока наносов с увеличением расходов воды (т. е. значительный вклад вносит русловая составляющая, выражающаяся во взмучивании донных наносов и их выносе), в то время как для Витима характерны импульсные повышения стока наносов: высокие отдельные измеренные значения мутности не всегда тождественны значительному росту стока наносов за счет кратковременности своего увеличения или небольшого расхода воды, особенно в летний паводочный период. Таким образом, логично предположить, что для Витима преобладает вклад бассейнового смыва, происходящего при

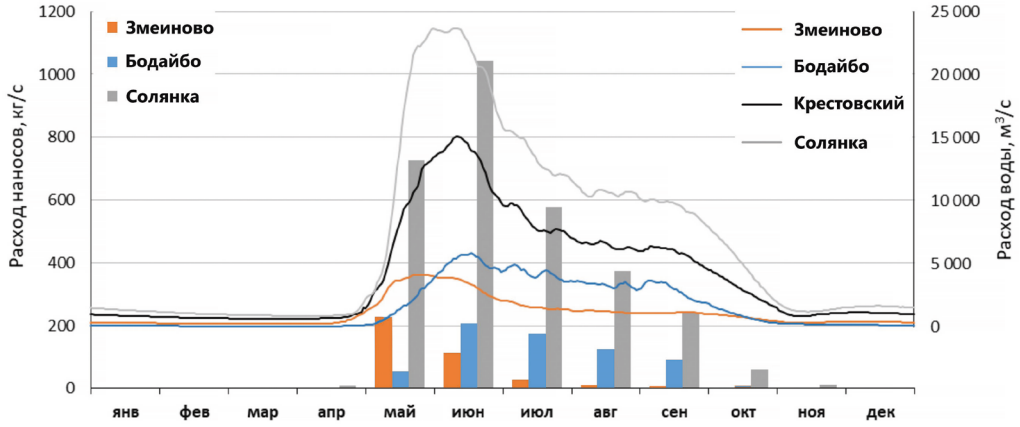


Рис. 5. Среднемесячные расходы наносов и среднесуточные расходы воды за доступный период на используемых постах

Fig. 5. Average monthly sediment discharge and average daily water discharge for the available period at used gauging stations

снеготаянии. Русло же Витима практически на всем протяжении за счет геологических особенностей и больших уклонов сложено крупной фракцией (галькой и валунами), в связи с чем мобилизация донных наносов незначительна, а описываемые выше плановые деформации русел носят локальный и эпизодический характер.

Важной информацией для оценки режима стока наносов являются характеристика крупности взвеси и ее изменчивость в течение года. Для г/п Бодайбо доступно лишь 7 валидных измерений, охватывающих, однако, весь диапазон летних расходов воды. Диапазон средних и медианных крупностей совпадает (от 0,05 до 0,59 мм), при этом минимальная крупность отмечается для пика половодья. Это может быть связано с воздействием сбросов с россыпных разработок, т. к. другое измерение, сделанное на подъеме половодья, характеризуется наибольшей из наблюденных крупностей, отражающей смыв материала с бассейна и поймы. Во время летних паводков средняя и медианная крупности составили 0,24 и 0,21 мм соответственно, с преобладанием фракции 0,5–0,2 мм (48 % по весовому содержанию, что соответствует мелким пескам). Связь между расходом воды и крупностью взвеси отсутствует.

Данные для г/п Змеиново и Солянка более полные, измерения наносов на верхнем посту (Змеиново) охватывают только половодье (май – июнь), в то время как данные для Солянки распределены более равномерно в течение года. Диапазон крупностей для Змеиново достаточно узок, изменяясь для средних от 0,03 до 0,2 мм, для медианных – от 0,003 до 0,16 мм. Из подобного распределения можно сделать вывод о превышении фоновых крупностей взвеси Витима над теми же показателями Лены без учета стоков с разработок, которые лежат вне бассейнов постов. Однозначная связь между расходом воды и крупностью взвеси также отсутствует (рис. 6). Однако можно предположить петлеобразную изменчивость крупности: подъему и максимальным расходам воды соответствуют наименьшие крупности, а при спаде они повышаются. Мутности, наоборот, выше на подъеме половодья. Это можно объяснить отсутствием значимого источника бассейновых наносов и преобладанием руслового источника, что подтверждается и связью между средней крупностью и мутностью – она практически повторяет связь крупности и расхода, однако можно сделать вывод, что крупность практически не меняется с ростом мутности, а при увеличении крупности (соответствующем спаду половодья) мутность не растет.

В створе г/п Солянка диапазон средних крупностей взвеси изменяется от 0,03 до 0,43 мм, медианных – от 0,008 до 0,54 мм, т. е. соответствует общему размаху крупностей на постах Змеиново и Бодайбо. При этом максимальная крупность наблюдается осенью во время ледохода, остальные

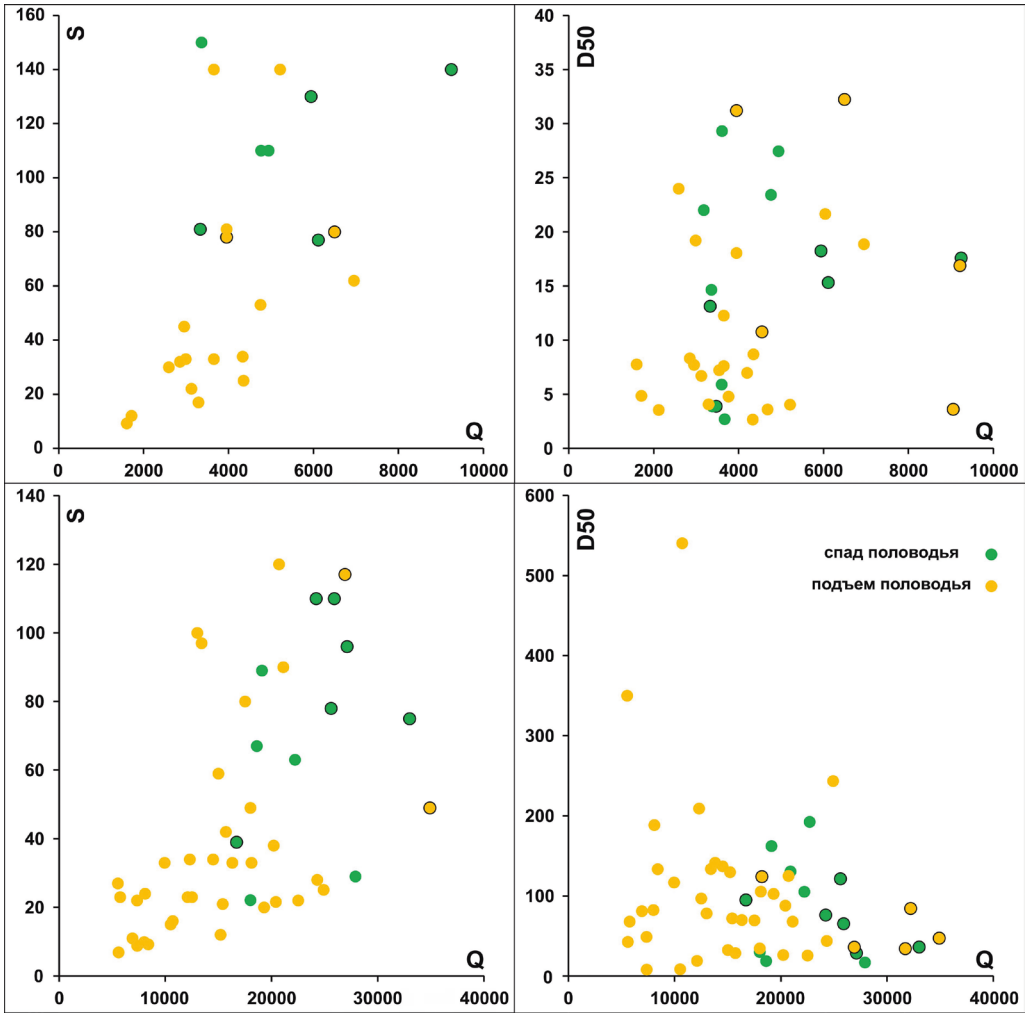


Рис. 6. Связи расходов воды Q, м³/с с мутностью S, г/м³ (*слева*) и медианными крупностями взвеси D50, мм (*справа*) на г/п Лена – Змеиново (*сверху*) и г/п Лена – Солянка (*снизу*). Черной окружностью выделены значения в пределах двух дней от пика половодья

Fig. 6. Relationships between water discharge Q, cms and turbidity S, g/m³ (*left*) and median suspended sediment sizes D50, mm (*right*) of the Lena river at Zmeinovo (*top*) and Solyanka (*bottom*), measurements taken within two days around the flood peak are circled

значения соответствуют этим показателям в Змеиново. Явной связи с фазами режима не наблюдается (что объясняется опять же наличием отдельных «струй» с разными характеристиками и наложением друг на друга фаз режима на притоках), однако можно отметить сравнительно невысокие крупности при максимальных расходах. Отмечается уменьшение крупности с ростом средних скоростей потока (рис 6). Наибольший разброс крупностей (отношение D90/D10) наблюдается на спаде половодья, при относительно низких расходах и мутностях.

Обобщая имеющуюся информацию о крупности наносов р. Лены на данном участке, можно отметить преобладание мелкой фракции (пылеватых и более мелких частиц) в составе взвеси большую часть года и слабую связь характеристик взвеси с водностью и фазой режима, что связано со значительным удалением источника наносов от постов.

Для определения расходов наносов и их временных характеристик и изменчивости были построены и проанализированы связи между расходами воды и наносов. Согласно [17], такие связи должны аппроксимироваться степенными зависимостями вида $G = A * Q^m$, где A – эрозионный коэффициент, определяющий природные условия водосбора и их влияние на формирование стока наносов, а степенной показатель ^{m} отражает состав взвеси. На практике данные зависимости наиболее хорошо работают для небольших водосборов и для таких створов, где постоянно преобладает бассейновая составляющая. Для больших водосборов, имеющих в своих пределах различные природные условия и, следовательно, различные условия стока наносов, корреляция данной зависимости снижается, и значительную роль начинают играть местные факторы.

Анализируя кривые связей данного типа для исследуемых постов (рис. 7), можно увидеть, что достаточно тесная связь наблюдается для ниж-

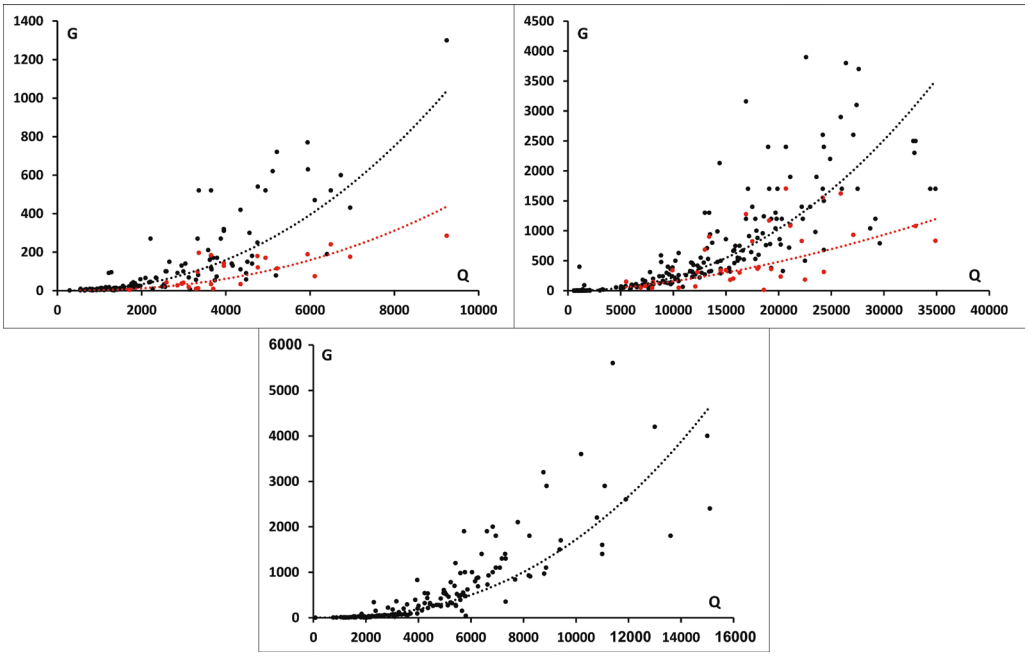


Рис. 7. Связи между расходами воды Q, м³/с и расходами наносов G, кг/с (черным отмечены общие расходы, красным – руслообразующей фракции > 0,05 мм) на г/п Лена – Змеиново (*слева*), Лена – Солянка (*справа*), Витим – Бодайбо (*внизу*)

Fig. 7. Relationships between water discharge Q, cms and sediment discharge G, kg/s (black – total, red – channel-forming fraction > 0.05 mm) at the Lena – Zmeinovo (*left*), Lena – Solyanka (*right*), Vitim – Bodaibo (*bottom*) gauging stations

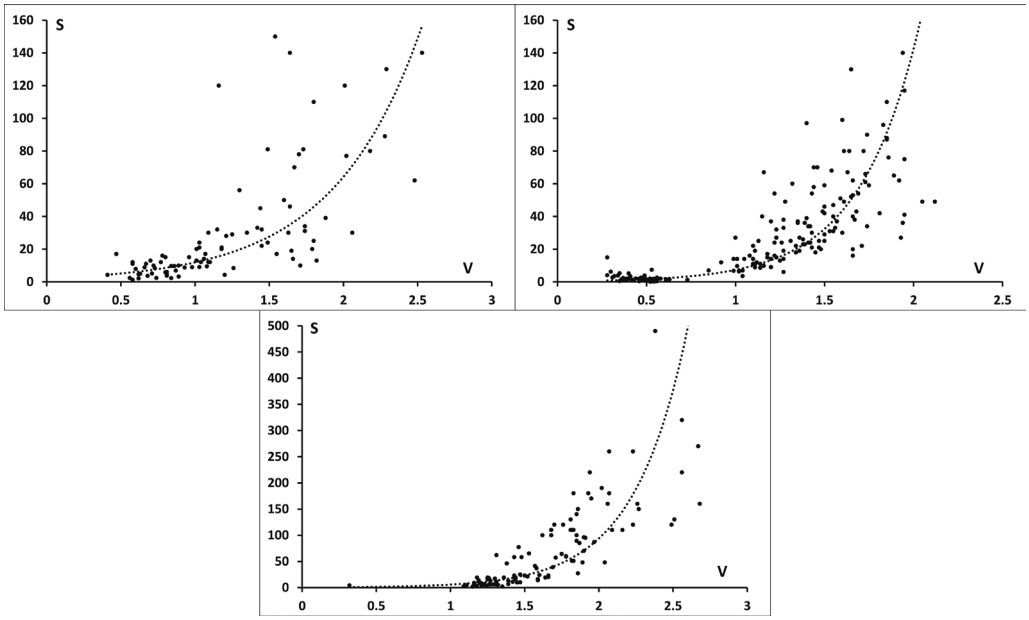


Рис. 8. Связи между мутностью воды S, г/м³ и средними скоростями V, м/с потока на г/п Лена – Змеиново (*слева*), Лена – Солянка (*справа*), Витим – Бодайбо (*снизу*)

Fig. 8. Relationships between water turbidity S, g/m³ and average flow velocities V, m/s at the Lena – Zmeinovo (*left*), Lena – Solyanka (*right*), Vitim – Bodaibo (*bottom*) gauging stations

них диапазонов расходов, для которых характерны невысокие мутности. Связи между расходом руслообразующей фракции > 0,05 мм и расходами воды имеют другой характер. Так, для г/п Змеиново данная связь близка к линейной (однако при добавлении данных измерений при низких расходах связь также становилась бы степенной) и имеет сравнительно небольшую дисперсию, доля расходов этой фракции составляет в среднем 25 % от общей, изменяясь в широких пределах от 6 % до 72 %. Для г/п Солянка связь значительно менее тесная, и для расчета стока руслообразующей фракции в этом случае можно использовать верхнюю огибающую поля точек, изменяющуюся по линейной зависимости.

Также при анализе необходимо учитывать структуру скоростного поля потока, определяющего вовлечение наносов, их перемещение и осаждение. Зависимости между мутностями и средними скоростями потока имеют более четкие, близкие к экспоненциальным связи для г/п Солянка и Бодайбо (рис. 8), в то время как для г/п Змеиново связь относительно устойчива только для малых значений мутности. Подавляющая часть транспорта наносов проходит при средней и высокой водности, в летний период. Этому периоду соответствуют высокие скорости – для г/п Змеиново > 0,8 м/с, для г/п Крестовский, Солянка и Бодайбо > 1,1 м/с. Максимальные мутности на всех постах проходят при средних скоростях потока 1,5 м/с и выше. При

таких скоростях даже алевриты и песок, составляющие руслообразующую фракцию наносов, свободно переносятся потоком в турбулентной форме, осаждение частиц будет происходить только в скоростных тенях потока, морфологические условия для формирования которых редко встречаются на участке.

Вертикальное распределение скоростей по потоку может быть охарактеризовано по измерениям профилографа, выполненным в характерных для участка створах в 2023–2024 гг. (с корытообразным, глубоким руслом, преобладающим на Верхней Лене). Измерения показали малую изменчивость скоростей по вертикали с их уменьшением ко дну на 10–30 % и при значительных пульсациях, выражающихся в ломаной форме эпюр. К таким пульсациям обычно приурочены отдельные вихри с повышенной мутностью потока. Падение скоростей начинается в придонном слое толщиной 1–1,5 м ото дна, придонные скорости составляют не менее 0,75 от средней скорости по потоку.

Таким образом, при решении хозяйственных задач для створов в окрестностях г. Ленска, связанных со стоком наносов, можно принимать особенности стока и крупности взвешенных наносов по Змеиново как характерные. При планировании сооружений необходимо учитывать наличие «струй» мутности в потоке, пропорции которых значительно меняются

Таблица 2. Характерные параметры стока взвешенных наносов в створе г. Ленска при различных гидрологических фазах

Table 2. Characteristic parameters of the suspended sediments discharge at Lensk city in different hydrological phases

Фаза режима	Диапазон расхода, м³/с	Диапазон придонной скорости, м/с	Диапазон мутности, г/м³	Крупность, мм	Примечание
Зимняя межень (ноябрь – апрель)	100–1000	0,15–0,5	< 70	< 0,03	по г/п Солянка
Подъем половодья	1000–10 000	0,7–1,1	70–100	0,03–0,1	включая весенние ледовые явления, по г/п Змеиново
Пики (низкой водности)	10 000–18 000	0,9–1,1	50–100	0,03–0,15	по г/п Змеиново и г/п Бодайбо
Пики (высокой водности)	18 000–30 000 и более	0,9–1,2	100–150	0,03–0,05	по г/п Змеиново
Спад половодья	5000–15 000	0,5–0,8	30–80	0,05–0,2	по г/п Змеиново
Летние паводки	5000–20 000	0,7–1,0	10–50	0,01–0,43	по г/п Бодайбо для условий стока с разработок
Летне-осенняя межень	3000–10 000	0,3–0,6	50–80	0,05	по г/п Змеиново

в течение года. Так, сравнение суточных расходов Лены и Витима (приведенных через прирост площади водосбора к их слиянию) показывает, что подавляющую часть времени (в среднем 330 дней в году) расход Верхней Лены составляет треть и более от общего расхода ниже по течению (предположительно, в такой ситуации, с учетом смешения, воды Витима будут оказывать значительное влияние на показатели воды, поступающей на насосные сооружения). При этом в отдельные годы, характеризующиеся сравнительно низкой меженью на р. Лене и прохождением паводков по Витиму, доля расходов Верхней Лены может падать до 10 % от общего. Максимальная продолжительность периода подавляюще высоких расходов Витима (больше 2/3 от общего) составила 38 дней. Как было показано выше, таким условиям соответствуют повышенные крупности и содержание песчаной фракции. В период половодья, когда предположительно наибольшего процентного содержания в стоке Витима достигает мелкая взвесь с разработок, доля расхода Верхней Лены составляет 63 % и выше. Охарактеризовать транспорт наносов и его внутригодовую изменчивость на данном участке можно согласно приведенным в табл. 2 значениям. Для оценки скоростей кольматации сооружений допустимо использовать максимальные значения в каждом диапазоне, соответствующие наихудшим условиям из возможных.

ВЫВОДЫ

Проведенный анализ транспорта взвешенных наносов на участке Верхней Лены в районе г. Ленска, выполненный на основе архивных данных гидрологических постов-аналогов (Змеиново, Солянка, Бодайбо), позволил выявить ключевые особенности формирования и переноса наносов в условиях сложного пространственного взаимодействия природных и антропогенных факторов. Установлено, что данные наблюдательной сети Росгидромета, несмотря на их широкое применение в практических расчетах, обладают существенной систематической погрешностью, обусловленной как методическими ограничениями измерений, так и пространственной неоднородностью потока, особенно в условиях влияния россыпной добычи полезных ископаемых в бассейнах Витима, Олекмы и Чары. Именно антропогенная трансформация рельефа и гидрологического режима притоков приводит к формированию выраженных «струй» мутности, сохраняющих свои характеристики на протяжении сотен километров вниз по течению. Это обусловливает высокую локальную изменчивость мутности, крупности и гранулометрического состава наносов, что затрудняет их осреднение по сечению и требует учета не только гидрологической фазы, но и соотношения стоков основных притоков.

Выявлено различие в типах транспорта наносов: для Верхней Лены характерен преимущественно русловой тип с выраженной связью расходов наносов и воды в половодье, в то время как для Витима доминирует бассейновый смыв, усиливающийся за счет размыва делювиальных и озерных отложений, а также техногенных отвалов. Сопоставление данных постов-аналогов, дополненное современными измерениями скоростного поля, позволило обоснованно реконструировать внутригодовую динамику мутности, крупности и расходов наносов, а также оценить диапазоны гидравлических и седиментационных характеристик по фазам водного режима.

В совокупности результаты исследования свидетельствуют о возможности и одновременно необходимости критического переосмысления подходов к использованию сетевых данных при решении прикладных задач. В частности, при проектировании водозаборных и иных гидротехнических сооружений, где недооценка роли мелкодисперсных фракций или игнорирование пространственной структуры потока может привести к существенным ошибкам в прогнозе кольматации и долговечности эксплуатации. Таким образом, адекватная оценка транспорта наносов на слабоизученных участках крупных рек возможна лишь при комплексном учете геоморфологических, гидрологических и антропогенных факторов, а также при переходе от формализованного применения усредненных сетевых данных к их содержательной интерпретации в контексте локальных особенностей формирования стока.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Караушев А. В. Теория и методы расчетов речных наносов. Л.: Гидрометеоиздат, 1977. 272 с.
2. Алексеевский Н. И. Формирование и движение речных наносов. М.: Моск. ун-т, 1998. 204 с.
3. Чалов С. Р. Речные наносы. М.: Издательский дом «Инфра-М», 2024. 469 с.
4. Шмакова М. В. К вопросу о расчетах расхода взвешенных наносов // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2020. № 1. С. 50–71. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2020-1-4
5. Чалов С. Р., Терский П. Н., Ефимова Л. Е., Терская А. И., Ефимов В. А., Данилович И. С. Проблемы гидрологического мониторинга в бассейнах трансграничных рек Восточной Европы (на примере Западной Двины) // Инженерные изыскания. 2019. Т. XIII, № 1. С. 32–44. https://doi.org/10.25296/1997-8650-2019-13-1-32-44
6. Магрицкий Д. В. Годовой сток взвешенных наносов российских рек водосбора Северного Ледовитого океана и его антропогенные изменения // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. 2010. № 6. С. 17–24.
7. Blott S. J., Pye K. GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments // Earth Surface Processes and Landforms. 2001. Vol. 26. No. 11. P. 1237–1248. https://doi.org/10.1002/esp.261

8. Великанов М. А. Движение наносов. М.: Изд-во Министерства речного флота СССР, 1948. 208 с.
9. GRDC: Data Portal. [Электронный ресурс]. URL: https://grdc.bafg.de/data/data_portal/ (дата обращения: 29.11.2025 г.)
10. Георгиади А. Г., Кашутина Е. А. Многолетние изменения годового и сезонного стока рек бассейна Лены // Известия РАН. Серия географическая. 2014. № 2. С. 71–83. https://doi.org/10.15356/0373-2444-2014-2-71-83
11. Магрицкий Д. В., Банщикова Л. С. Реакция стока наносов рек в бассейне р. Лены на изменения климата и хозяйственную деятельность // Динамика и взаимодействие геосфер Земли. Материалы Всероссийской конференции с международным участием. Т. 2. Томск: Изд-во Томского ЦНТИ, 2021. С. 61–64.
12. Фролова Н. Л., Магрицкий Д. В., Киреева М. Б., Григорьев В. Ю., Гельфан А. Н., Сазонов А. А., Шевченко А. И. Сток рек России при происходящих и прогнозируемых изменениях климата: обзор публикаций. 1. Оценка изменений водного режима рек России по данным наблюдений // Водные ресурсы. 2022. № 3. С. 251–269. https://doi.org/10.31857/S032105962203004X
13. Чалов С. Р. Эрозионно-русловые системы в условиях горнодобывающей деятельности // Эрозия почв и русловые процессы. 2024. № 1. С. 107–121. https://doi.org/10.71367/3034-4638-2024-1-1-107-121
14. Виноградова О. В., Хмелева Н. В. Русловые процессы и формирование аллювиальных россыпей золота. М.: МГУ, 2009. 171 с.
15. Shkolnyi D., Magritsky D., Chalov S. Impact of open-cast placer mining on sediment transport across Far Eastern rivers of Russia // International Journal of Sediment Research. 2024. Vol. 39. No. 5. P. 702–713. https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2024.03.001
16. Ушаков М. В. Влияние добычи россыпного золота на мутность воды реки Колымы // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 9. С. 316–325.
17. Маккавеев Н. И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 247 с.

REFERENCES

1. Karaushev A. V. Theory and methods of the river alluvium calculations. L.: Gidrometeoizdat, 1977. 272 p. (In Russ.)
2. Alekseyevskiy N. I. Formation and movement of river alluvium. M.: Moscow University. 1998. 204 p. (In Russ.)
3. Chalov S. R. River alluvium. M.: Infra-M Publishing House, 2024. 469 p. (In Russ.)
4. Shmakova M. V. On the issue of the suspended alluvium discharge calculations. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management.* 2020. No. 1. P. 50–71. (In Russ.) https://doi.org/10.35567/1999-4508-2020-1-4
5. Chalov S. R., Terskiy P. N., Efimova L. E., Terskaya A. I., Efimov V. A., Danilovich I. S. Problems of hydrological monitoring in transboundary rivers of Eastern Europe (on the example of the Western Dvina). *Engineering survey.* 2019. Vol. 13. No. 1. P. 32–45. (In Russ.) https://doi.org/10.25296/1997-8650-2019-13-1-32-44
6. Magritsky D. V. Annual runoff of the suspended alluvium of Arctic Acean catchment Russian rivers and its anthropogenic changes. *Moscow University Bulletin.* Ser. 5, Geography. 2010. No. 6. P. 17–24. (In Russ.)
7. Blott S. J., Pye K. GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surface Processes and Landforms*. 2001. Vol. 26. No. 11. P. 1237–1248. https://doi.org/10.1002/esp.261
8. Velikanov M. Alluvium movements. M.: Publishing House of the Ministry of Inland Water Transport of the USSR, 1948. 208 p. (In Russ.)

9. GRDC: Data Portal. [Electronic resource]. URL: https://grdc.bafg.de/data/data_portal/ (accessed 29.11.2025).
10. Georgiadi A. G., Kashutina Ye. A. The Features of Long-term Annual and Seasonal Runoff Changes for Lena Basin Rivers. Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Series: Geography. 2014. Vol. 2. P. 71–83. (In Russ.) https://doi.org/10.15356/0373-2444-2014-2-71-83
11. Magritskiy D. V., Banshchikova L. S. The Lena River basin rivers alluvium runoff response to climate change and economic activities. Proceedings of "The Earth geospheres' Dynamics and Interactions" all-Russian Conference with international participation. Vol. 2. Tomsk: Tomsk SNTI Publishing house. 2021. P. 61–64. (In Russ.)
12. Frolova N. L., Magritskiy D. V., Kireyeva M. B., Grigoriev V. Yu., Gelfan A. N., Sazonov A. A., Shevchenko A. I. Streamflow of Russian rivers under current and forecasted climate changes: a review of publications. 1. Assessment of changes in the water regime of russian rivers by observation data. *Water Resources.* 2022. Vol. 49. No. 3. P. 333–350. https://doi.org/10.1134/S0097807822030046
13. Chalov S. R. Fluvial systems affected by open-cast mining. *Soil erosion and river channel processes.* 2024. No. 1. P. 107–121. (In Russ.) https://doi.org/10.71367/3034-4638-2024-1-1-107-121
14. Vinogradova O. V., Khmeleva N. V. Channel processes and formation of alluvial gold deposits. M.: Moscow state University Publishing House. 2009. 171 p. (In Russ.)
15. Shkolnyi D., Magritsky D., Chalov S. Impact of open-cast placer mining on sediment transport across Far Eastern rivers of Russia. *International Journal of Sediment Research.* 2024. Vol. 39. No. 5. P. 702–713. https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2024.03.001
16. Ushakov M. V. The alluvial gold mining impact on the Kolyma River turbidity. Information analytical bulletin of mining. 2016. No. 9. P. 316–325. (In Russ.)
17. Makkaveyev N. I. A river bed and erosion in its basin. M.: The USSR Academy of Sciences Publishing House.1955. 247 p. (In Russ.)

Сведения об авторах:

Школьный Данила Игоревич, научный сотрудник, кафедра гидрологии суши, географический факультет, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова», Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1; https://orcid.org/0009-0005-1954-8652; e-mail: danila.hydro@yandex.ru

Цыпленков Анатолий Сергеевич, канд. геогр. наук, старший научный сотрудник, НИЛ эрозии почв и русловых процессов им. Н. И. Маккавеева, географический факультет, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова», Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1; https://orcid.org/0000-0003-4144-8402, e-mail: atsyplenkov@geogr.msu.ru

Турыкин Леонид Анатольевич, канд. геогр. наук, старший научный сотрудник, НИЛ эрозии почв и русловых процессов им. Н. И. Маккавеева, географический факультет, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова», Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1; https://orcid.org/0000-0003-3712-2370, e-mail: filigorod@list.ru

Головлев Павел Петрович, младший научный сотрудник, НИЛ эрозии почв и русловых процессов им. Н. И. Маккавеева, географический факультет, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова», Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1; https://orcid.org/0009-0007-6604-4849, e-mail: pavel_golovlev@list.ru

About the authors:

Danila I. Shkolnyi, Researcher, Department of Land Hydrology, Faculty of Geography, M.V. Lomonosov Moscow State University. Leninskie Gory, 1, Moscow, 119991, Russia; https://orcid.org/0009-0005-1954-8652; e-mail: danila.hydro@yandex.ru

Anatoly S. Tsyplenkov, Candidate of Geographic Sciences, Senior Researcher, The Makkaveev laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Faculty of Geography, M. V. Lomonosov Moscow State University. Leninskie Gory, 1, Moscow, 119991, Russia; https://orcid.org/0000-0003-4144-8402, e-mail: atsyplenkov@geogr.msu.ru

Leonid A. Turykin, Candidate of Geographic Sciences, Senior Researcher, The Makkaveev laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Faculty of Geography, M. V. Lomonosov Moscow State University. Leninskie Gory, 1, Moscow, 119991, Russia; https://orcid.org/0000-0003-3712-2370, e-mail: filigorod@list.ru

Pavel P. Golovlev, Junior Researcher, The Makkaveev laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Faculty of Geography, M. V. Lomonosov Moscow State University. Leninskie Gory, 1, Moscow, 119991, Russia; https://orcid.org/0009-0007-6604-4849, e-mail: pavel_golovlev@list.ru

Поступила в редакцию / Received 08.12.2025.
Поступила после рецензирования / Revised 07.03.2026.
Принята к публикации / Accepted 10.04.2006. .

УДК 556.5 *https://doi.org/10.35567/19994508-2026-2-84-103*

Оригинальная статья/Original paper

Минимальный летний модуль стока воды малых рек бассейна реки Урал

И. А. Жуков

les-96@yandex.ru

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. В настоящее время основные исследования минимального летнего модуля стока воды и динамики его изменений ведутся в основном на средних и больших реках российской части бассейна р. Урал, изученность же минимального летнего модуля стока воды малых рек бассейна крайне мала. Учитывая возрастающее ухудшение экологического состояния рек, влияющее в первую очередь на минимальный летний модуль стока воды именно на малых реках, изучение процессов его формирования и изменчивости становится важнейшей задачей гидрологии. **Методы.** В основе исследования лежит всесторонний анализ минимального летнего модуля стока воды малых рек российской части бассейна р. Урал. Сформирована база данных картографической и гидрологической информации. В работе представлено картирование величин минимального летнего модуля стока воды малых рек, что ранее не применялось к его количественным характеристикам. **Результаты.** Рассмотрены изменения минимального летнего модуля стока воды малых рек в бассейне р. Урал, произведен анализ этих характеристик до и после начала глобальных гидрологических изменений, выявлены пространственно-временные тенденции в их изменении. Установлена граница азональности малых рек исходя из особенностей их водного режима – по площади речного бассейна в 500 км^2.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: малые реки, минимальный летний модуль стока малых рек, бассейн реки Урал, изменение количественных гидрологических характеристик малых рек

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Жуков И. А. Минимальный летний модуль стока воды малых рек бассейна реки Урал // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2026. № 2. С. 84–103. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-2-84-103; EDN: JTGMZY

© Жуков И. А., 2026

Minimum summer runoff module of small rivers in the Ural River basin

Ivan A. Zhukov

les-96@yandex.ru

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

ABSTRACT

Relevance. Currently, the main studies of the minimum summer runoff modulus and the dynamics of its changes are conducted mainly on medium-sized and large rivers of the Russian part of the Ural River basin, while the minimum summer runoff modulus of small rivers in the basin is extremely poorly understood. Given the increasing deterioration of the ecological state of rivers, which primarily affects the minimum summer runoff modulus on small rivers, studying the processes of formation of the minimum summer runoff modulus and its variability are becoming the most important task of hydrology. **Methods.** The study is based on a comprehensive analysis of the minimum summer runoff modulus of small rivers in the Russian part of the Ural River basin. A database of cartographic and hydrological information has been compiled. The paper presents a mapping of the minimum summer runoff modulus of small rivers, a technique not previously applied to the quantitative characteristics of the runoff modulus of small rivers. **Results.** Changes in the minimum summer runoff modulus of small rivers in the Ural River basin are considered, despite the almost complete lack of research into changes in the runoff of small rivers. An analysis of the characteristics before and after the onset of global hydrological changes is provided. Spatiotemporal trends in the minimum summer runoff modulus of small rivers in the Ural River basin were identified. The boundary of small river anomalousness by basin area – the size of a 500 km^2 river basin was determined.

KEYWORDS: small rivers, minimum summer flow module of small rivers, Ural River basin, changes in quantitative hydrological characteristics of small rivers

FOR CITATION: Zhukov I. A. Minimum summer runoff module of small rivers in the Ural River basin. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2026. No. 2. P. 84–103. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-2-84-103; EDN: JTGMZY

ВВЕДЕНИЕ

Предметом исследований являются пространственные закономерности изменения количественных характеристик минимального летнего модуля стока воды малых рек на объекте исследования – бассейне р. Урал.

Цель исследования – выявить пространственные и временные изменения минимального летнего модуля стока воды малых рек бассейна Урала, а также сравнить полученные результаты с аналогичными данными для средних и больших рек для определения схожести закономерностей гидрологических изменений минимального летнего модуля стока воды малых и средних рек. Актуальность данных исследований связана со слабой

изученностью количественных гидрологических характеристик и величины модуля стока малых рек – самых распространенных на территории России.

Согласно нормативной документации[1,2], а также [1], в данном исследовании принято следующее определение малой реки: река, бассейн которой располагается в одной географической зоне, имеет площадь не более 2000 км^2 и гидрологический режим которой под влиянием местных факторов может быть не свойственен для рек этой зоны.

Основная доля речной сети бассейна Урала приходится на малые реки, количество которых составляет 98 % от общего числа и длина – 71 % суммарной длины всех водотоков [2].

Средняя величина суммы годовых осадков за период 1970–2024 гг. для исследуемой территории имеет явный восходящий тренд, который фиксируется на всех метеостанциях. Годовая сумма осадков в основном прирастает увеличением жидких осадков, а не твердых [3]. В период с 1932 по 2024 г. выявлено увеличение средней многолетней температуры с 4,1 °С в 1953 г. до 5,4 °С к 2024 г., т. е. более чем на один градус.

Изучение гидрологического режима средних и больших рек в настоящее время выполнено во всем бассейне р. Урал. Полученные пространственные и временные тенденции изменений стока воды по фазам водного режима освещены в трудах Н. Л. Фроловой [4], В. А. Балкова [5], Н. И. Алексеевского [1], Д. Е. Клименко [6] и других авторов.

Изучение аналогичных гидрологических характеристик малых рек на исследуемой территории с середины 1950-х годов, помимо сети гидрологических постов, производилось на стоковых станциях. Внутригодовой режим малых рек в разное время исследовался в работах В. С. Дыгало [7], Г. Е. Ландберга [8], средних рек – в работах И. А. Шикломанова [9]. По результатам этих наблюдений выполнены региональные обобщения гидрологических характеристик Н. И. Коронкевичем [10]. Однако данные исследования проводились в основном применительно к одному локальному водосбору. Картирование количественных гидрологических характеристик для малых рек не производилось.

Гидроклиматические условия на Русской равнине в последней четверти XX в. характеризовались повышенным увлажнением территории и увеличением регионального меженного стока. Изменение циркуляционных и связанных с ними других климатообразующих процессов в этот период привело к существенному улучшению условий формирования минимального стока на Восточно-Европейской равнине. Отмечаемые за последние десятилетия климатические изменения, несомненно, влияют на особенности водного режима рек, величину их летнего и зимнего меженного стока [6].

1 СП 529.1325800.2023 «Определение основных расчетных гидрологических характеристик», 2023 г.
2 Гидрология суши: термины и определения. ГОСТ 19179-73. М.: Изд-во стандартов, 1978.

В настоящее время подавляющая часть исследований минимального летнего модуля стока воды проводится на средних и больших реках, обходя вниманием гидрологические процессы, происходящие на малых реках. Поэтому необходимо изучить особенности, пространственные закономерности изменения минимального летнего модуля стока воды малых рек и сравнить полученные результаты с аналогичными данными по средним и большим рекам.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методика отбора гидрологических постов

Для целей исследования из действующих гидрологических постов на малых реках исследуемой территории отобраны посты и оцифрованы данные о ежедневных расходах воды на них для дальнейшего анализа речного стока и его генетических составляющих (табл. 1).

Таблица 1. Сводная таблица гидрологических постов бассейна Урала на малых реках, привлеченных для исследования

Table 1. A summary table of hydrological posts at the Ural River basin small rivers involved into the study

Номер	Гидрологический пост	Куда впадает	Период наблюдений, гг.
19087	р. Миндяк – с. Новобайрамгулово	р. Урал	1948–2024
19088	р. Урляда – д. Новоахуново	р. Урал	1949–2024
19092	р. Малый Кизил – пос. Муракаево	р. Урал	1958–2024
19106	р. Большой Кизил – с. Бурангулово	р. Урал	1951–2024
19108	р. Большой Кизил – д. Верхне-Абдряшево	р. Урал	1949–2024
19114	р. Большая Караганка – пос. Измайловский	р. Урал	1958–2024
19115	р. Большая Уртазымка – с. Сосновка	р. Урал	1962–2024
19121	р. Джуса – свх Ириклинский	р. Суундук	1962–2024
19122	р. Таналык – с. Самарское	р. Урал	1955–2024
19143	р. Кугутык – пгт Домбаровский	р. Камсак (бассейн р. Орь)	1946–2024
19167	р. Зилаир – с. Зилаир	р. Сакмара	1948–2024
19170	р. Касмарка – с. Утягулово	р. Сакмара	1975–2024
19172	р. Большой Ик – с. Мраково	р. Сакмара	1942–2024
19190	р. Черная – с. Красный Холм	р. Сакмара	1951–2024
19235	р. Чаган – с. Сергиевский	р. Урал	1957–2024
19313	р. Худолаз – пос. Чернышевский	р. Урал	1975–2024
19381	р. Бердянка – пос. Пугачевский	р. Урал	1975–2024
19383	р. Блява – г. Медногорск	р. Кураган (бассейн р. Сакмара)	1975–2024

Методика выбора гидрологических постов для исследования заключалась в следующем: гидрологические посты должны равномерно располагаться по исследуемой территории, иметь максимальные ряды гидрологических наблюдений в бассейнах соседних средних рек. Наличие пробелов в непрерывных наблюдениях ежедневных расходов воды более 5 лет приводило к отбраковке поста (пропуски в 1–2 года восстанавливались по зависимостям вида Q = f(H)). При наличии в бассейне реки нескольких постов (4–6) на малых реках, выбирался один пост с наиболее длинным рядом наблюдений, который максимально полно характеризует условия формирования речного стока в районе. Посты выбирались на тех реках, в бассейнах которых отсутствуют пруды, минимально влияние болот на речной сток, отсутствуют водохранилища (наличие прудов и водохранилищ для каждого привлеченного в исследовании поста проверялось по базе действующих водохранилищ, а также визуально в программах ArcGis, SasPlanet и Landsat Explorer), нет карста, не ведется добыча полезных ископаемых. В исследуемых бассейнах не производилась рубка леса, и отсутствовало антропогенное воздействие на речной сток (табл. 2).

Таблица 2. Сводная таблица гидрологических постов бассейна Урала на малых реках, привлеченных для исследования

Table 2. A summary table of hydrological posts at the Ural River basin small rivers involved into the study

Номер	Наличие пропусков данных, лет	Наличие прудов, шт	Заболоченность, %	Наличие водохранилищ	Закарстованность, %	Добыча полезных ископаемых	Вырубка леса, %	Антропогенное воздействие, %
19087	0	0	0,26	Нет	0	Нет	0	0
19088	1	0	0	Нет	0	Нет	0	0
19092	0	0	0	Нет	0	Нет	0	0
19106	0	0	0,27	Нет	0	Нет	0	0
19108	0	0	0	Нет	0	Нет	0	0
19114	0	0	0	Нет	0	Нет	0	0
19115	0	0	0	Нет	0	Нет	0	0
19121	0	0	0	Нет	0	Нет	0	0
19122	0	0	0,83	Нет	0	Нет	0	0
19143	1	0	0	Нет	0	Нет	0	0
19167	2	0	0	Нет	0	Нет	0	0
19170	0	0	0	Нет	0	Нет	0	0
19172	0	0	0	Нет	0	Нет	0	0
19190	0	0	0	Нет	0	Нет	0	0
19235	2	0	0	Нет	0	Нет	0	0
19313	0	0	0	Нет	0	Нет	0	0
19381	0	0	0,48	Нет	0	Нет	0	0
19383	1	0	0	Нет	0	Нет	0	0

Согласно этой методике выбраны ряды ежедневных расходов воды для 18 гидрологических постов (рис. 1). Площадь бассейнов рек, привлеченных для исследования, варьируется от 79 км^2 до 1990 км^2.

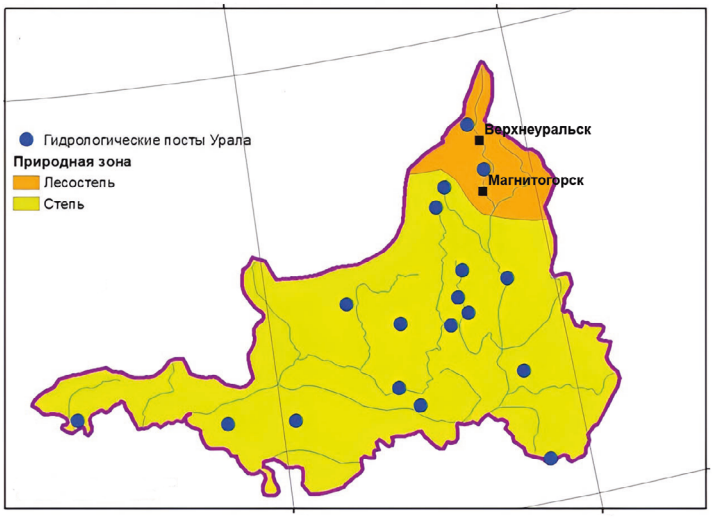


Рис. 1. Расположение задействованных в исследовании гидрологических постов
Fig. 1. Location of hydrological posts involved in the study

Для исследования привлекались только действующие стоковые посты, а уровенные игнорировались. В работе использованы данные о ежедневных расходах воды, полученные из ежегодников за период с 1932 по 2024 г.[3,4].

Построение и анализ разностно-интегральных кривых

Разностная интегральная кривая представляет собой нарастающую сумму отклонений модульных коэффициентов от среднего многолетнего значения временного ряда на конец каждого года [11].

Разностно-интегральные кривые необходимо построить для рядов минимальных летних модулей стока воды на исследуемых постах. На основе данных, полученных по средним и большим рекам исследуемой территории, можно предположить, что построенные разностно-интегральные кривые должны иметь экстремум (точку перегиба), приуроченную к началу глобальных гидрологических изменений.

3 Государственный водный кадастр. Основные гидрологические характеристики. Т. 11. Средний Урал и Приуралье. Вып. 1. Кама. Л.: Гидрометеоиздат, 1967, 1975, 1980.

4 Государственный водный кадастр. Раздел 1. Поверхностные воды. Сер. 2. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. 1981–1999 гг. Ч. 1. Реки и каналы. Т. 1. Вып. 25. Бассейн Каспийского моря без Кавказа и Средней Азии. Бассейн р. Камы. Уральское управление по гидрометеорологии и контролю природной среды, Свердловск, 1983–1989; Уральское межрегиональное территориальное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, 1999–2010.

Начало глобального потепления климата, повлекшее за собой гидрологические изменения, приходится на конец 1970-х – начало 1980-х гг., поэтому предполагается, что переломный год должен попадать во временной интервал 1980–1990 гг.

Для построения разностно-интегральной кривой вычисляется среднее значение ряда (м^3/с), далее для каждого года рассчитывается модульный коэффициент $K_i = \frac{Q_i}{\bar{Q}}$, затем – ординаты суммарной интегральной кривой: $S_1 = K_1$, $S_2 = S_1 + K_2$, $S_m = S_{m+1} + K_m \ldots S_N = S_{N-1} + K_N$ [12]. По получившимся данным строится интегральная кривая.

Для пространственного определения времени сроков начала изменений величины минимального летнего модуля стока построены разностно-интегральные кривые для каждого из 18 исследуемых постов (рис. 2).

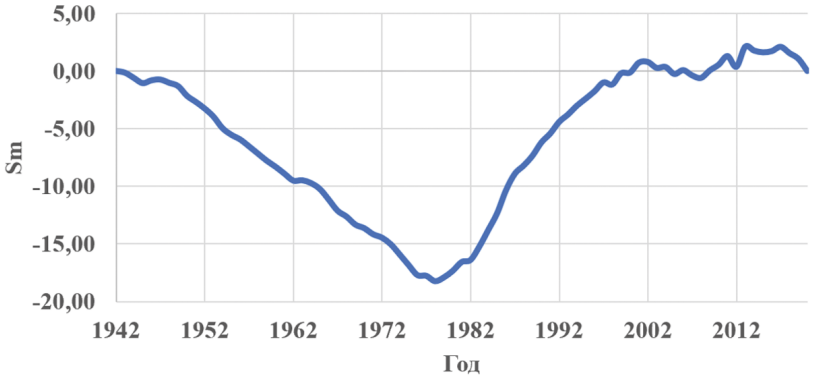


Рис. 2. Разностно-интегральная кривая для минимального летнего модуля стока воды р. Большой Ик

Fig. 2. Difference-integral curve for the minimum summer modulus of water runoff of the Bolshoy Ik River

Расчет минимального летнего модуля стока

Модуль стока – объем воды, стекающей с единицы площади бассейна в единицу времени. Модуль стока воды M рассчитывают по формуле $M = \frac{Q \cdot 10^3}{F}$, где Q – любой расход воды (как мгновенный, например максимальный, так и средний за интервал времени Δt) [13]. В настоящем исследовании в расчетах использовалась минимальная летняя норма расхода воды для каждого створа. Расчеты проводились для каждого года наблюдений.

В результате исследования получены многолетняя динамика изменений минимального летнего модуля стока воды, его многолетние значения, сроки фиксации начала гидрологических изменений характеристики, также выполнено исследование величины до начала гидрологических изменений и после. Полученные данные сопоставлены с аналогичными для средних и больших рек.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Подробно проанализировано распределение по исследуемой территории минимального летнего модуля стока воды малых рек. Для укрупнения районов анализа исследование распределения количественных гидрологических характеристик выполнено в рамках бассейнов средних и больших рек. В настоящем исследовании проведено сравнение динамики изменений минимального летнего модуля стока воды за период 1987–2024 гг. по сравнению с периодом 1950–1986 гг.

Такие периоды для сравнения изменений модуля стока воды малых рек выбраны потому, что на исследуемых постах на основе анализа построенных разностно-интегральных кривых начало гидрологических изменений фиксируется до 1986 г. Таким образом, устанавливается, насколько существенны изменения минимального летнего модуля стока воды малых рек после начала гидрологических изменений. Рассмотрим их более подробно.

Многолетняя динамика минимального летнего модуля стока

Изменения минимального летнего модуля стока на исследуемой территории произошли неравномерно (рис. 3). Границы зон этих изменений проведены по границам водосборов средних рек, а где невозможно – по границам малых рек.



Рис. 3. Многолетняя динамика минимального летнего модуля стока
Fig. 3. Long-term dynamics of the minimum summer runoff module

Результаты анализа полученной карты представлены в табл. 3.

Выявлена зависимость распределения характеристики по исследуемой территории: при движении с запада на восток уменьшение минимального летнего модуля стока сменяется его увеличением. При сравнении резуль-

Таблица 3. Динамика минимального летнего модуля стока малых рек бассейна р. Урал
Table 3. Dynamics of the minimal summer runoff module of the Ural River basin small rivers

Изменение характеристики	Количество постов	% от общего количества
Общие тенденции		
Минимальный летний модуль стока сокращается	6	33
Минимальный летний модуль стока не изменяется	1	5,6
Минимальный летний модуль стока увеличивается	11	61,1

татов исследования и установленных закономерностей с аналогичными данными, полученными для средних и больших рек, выясняется, что они совпадают.

Проанализируем время начала глобальных гидрологических изменений минимального летнего модуля стока (рис. 4).

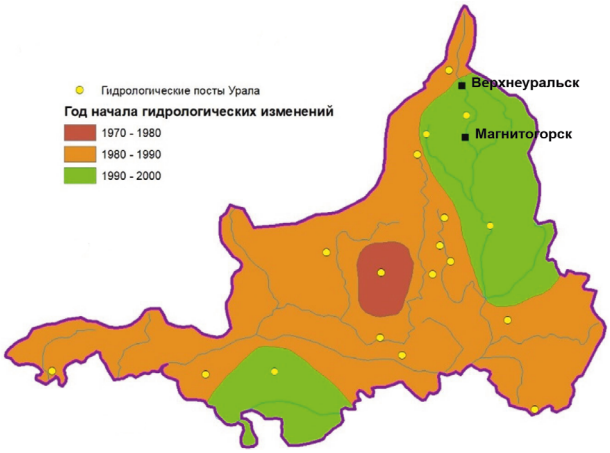


Рис. 4. Схема начала глобальных гидрологических изменений на малых реках для минимального летнего модуля стока

Fig. 4. Scheme of the onset of global hydrological changes on small rivers for the minimum summer runoff module

Гидрологические изменения на исследуемой территории произошли недружно. Количественные результаты анализа карты фиксации сроков начала гидрологических изменений для минимального летнего модуля стока представлены в табл. 4.

Таблица 4. Сроки начала гидрологических изменений
Table 4. Time of the hydrological changes starting

Изменение характеристики, период	Количество постов	% от общего количества
Количественные показатели		
1970–1980 гг.	1	5,6
1980–1990 гг.	13	72,2
1990–2000 гг.	4	22,2

В результате анализа выявлена общая закономерность времени наступления гидрологических изменений в бассейне р. Урал: при движении с севера на юг по исследуемой территории во все меньшем количестве бассейнов малых рек начало изменений отмечается во все более поздние сроки. Также установлено, что при движении с севера на юг количество бассейнов малых рек с азональными значениями тренда минимального летнего модуля речного стока увеличивается.

Динамика модуля стока с началом глобальных гидрологических изменений представлена на карте (рис. 5).

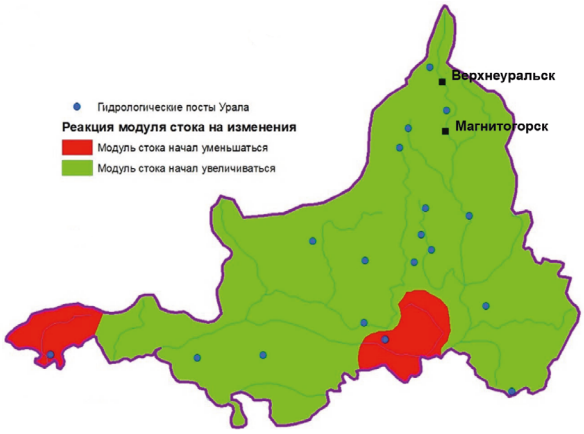


Рис. 5. Схема тенденций динамики минимального летнего модуля стока после начала глобальных гидрологических изменений

Fig. 5. Diagram of trends in the dynamics of the minimum summer runoff module after the onset of global hydrological changes

Изменение динамики минимального летнего модуля стока в годы глобальных гидрологических изменений на исследуемой территории однотипно: почти во всех бассейнах больших рек модуль стока начал увеличиваться. Количественные результаты анализа карты реакции минимального летнего модуля стока представлены в табл. 5.

Таблица 5. Тренды изменения минимального летнего модуля стока

Table 5. Trends of the minimal summer runoff module changing

Изменение характеристики	Количество постов	% от общего количества
Общие тенденции		
Модуль стока начал уменьшаться	2	11,1
Модуль стока начал увеличиваться	16	88,9

Общая закономерность для исследуемой территории: чем южнее, тем в большем количестве бассейнов минимальный летний модуль стока стал уменьшаться после начала глобальных гидрологических изменений. Также

установлено, что при движении с севера на юг количество бассейнов малых рек с азональными значениями тренда минимального летнего модуля стока увеличивается.

При сравнении полученных результатов исследования и установленных закономерностей с аналогичными данными, полученными для средних и больших рек, выясняется, что они совпадают.

Минимальный летний модуль стока

Рассмотрим распределение минимального летнего модуля стока воды по исследуемой территории с более подробным делением (рис. 6).

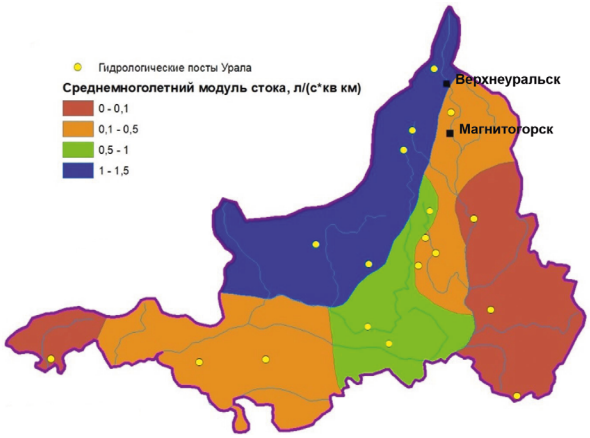


Рис. 6. Карта распределения минимального летнего модуля стока
Fig. 6. Map of the distribution of the minimum summer runoff module

Количественные результаты анализа карты распространения величины минимального летнего модуля стока представлены в табл. 6.

Таблица 6. Величина минимального летнего модуля стока, л/(с × км²)
Table 6. Value of the minimal summer runoff module, l/(s·km²)

Изменение характеристики	Кол-во постов	% от общего количества
Количественные показатели		
0–0,1	4	22,2
0,1–0,5	6	33,3
0,5–1	3	16,7
1–1,5	5	27,8

Общая закономерность для исследуемой территории: при движении с севера на юг величина минимального летнего модуля стока уменьшается. Используя данные, полученные при анализе разностно-интегральных кривых, проанализируем величину минимального летнего модуля стока до и после начала глобальных гидрологических изменений.

Рассмотрим пространственное распределение минимального летнего модуля стока воды по исследуемой территории до начала гидрологических изменений (рис. 7). Результаты анализа полученной карты представлены в табл. 7.

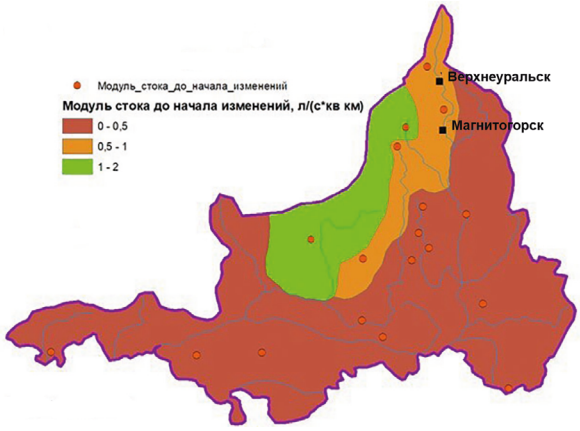


Рис. 7. Карта распределения минимального летнего модуля стока до начала гидрологических изменений

Fig. 7. Map of the distribution of the minimum summer runoff module before the onset of hydrological changes

Таблица 7. Величина минимального летнего модуля стока до начала гидрологических изменений малых рек бассейна р. Урал, л/(с × км²)

Table 7. Value of the minimal summer runoff module prior to starting of the Ural River basin small rivers changes, l/(s·km²)

Изменение характеристики	Количество постов	% от общего количества
Количественные показатели		
0–0,5	11	66,7
0,5–1	3	22,2
1–2	4	11,1

Общие закономерности для исследуемой территории:

– при движении севера на юг величина минимального летнего модуля стока до начала гидрологических изменений увеличивается;

– области с одинаковыми величинами минимальных летних модулей стока до начала гидрологических изменений имеют выраженную широтную зональность и тенденцию к уменьшению при движении с севера на юг.

Рассмотрим пространственное распределение минимального летнего модуля стока воды по исследуемой территории после начала гидрологических изменений (рис. 8). Результаты анализа полученной карты представлены в табл. 8.

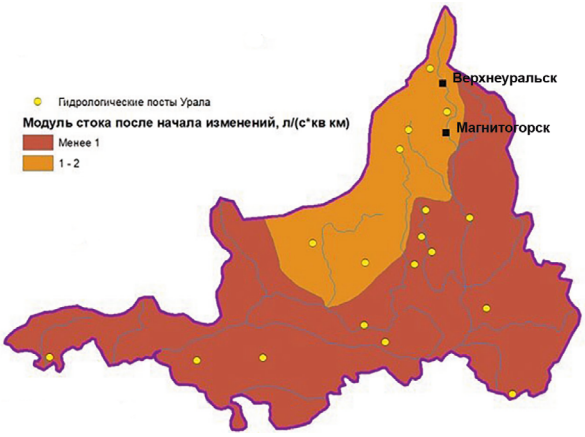


Рис. 8. Карта распределения минимального летнего модуль стока после начала гидрологических изменений

Fig. 8. Map of the distribution of the minimum summer runoff module after the onset of hydrological changes

Таблица 8. Величина минимального летнего модуля стока после начала гидрологических изменений малых рек бассейна реки Урал, л/(с × км²)

Table 8. Value of the minimal summer runoff module after starting of the Ural River basin small rivers changes, l/(s·km²)

Изменение характеристики	Кол-во постов	% от общего количества
Количественные показатели		
До 1	12	66,7
1-2	2	33,3

Общая закономерность для исследуемой территории: при движении с севера на юг минимальный летний модуль стока после начала гидрологических изменений уменьшается. При сравнении полученных результатов исследования и установленных закономерностей, с аналогичными данными, полученными для средних и больших рек, выясняется, что они совпадают.

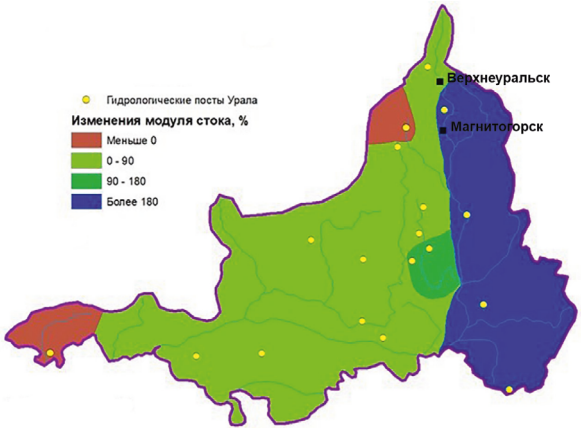


Рис. 9. Карта изменений минимального летнего модуля стока, %

Fig. 9. Map of changes in the minimum summer runoff module, %

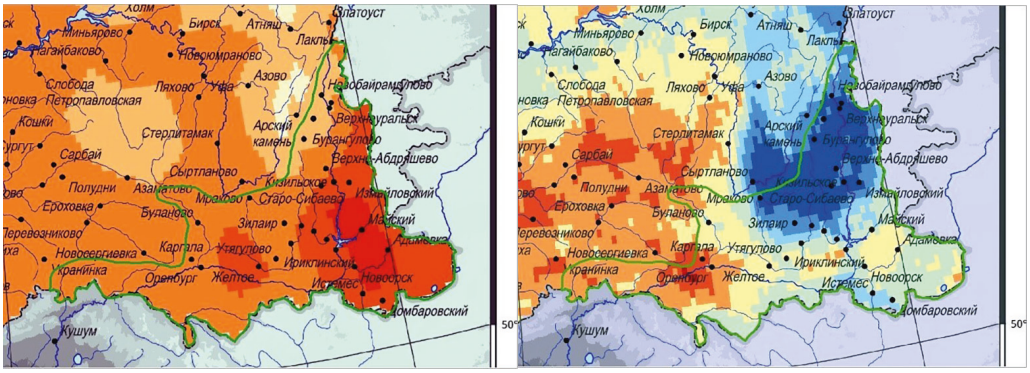
Теперь рассмотрим, на какую долю в % изменилась величина минимального летнего модуля стока на исследуемой территории (рис. 9). Результаты анализа полученной карты представлены в табл. 9.

Таблица 9. Изменения величины минимального летнего модуля стока малых рек бассейна реки Урал, %

Table 9. The Ural River basin small rivers minimal summer runoff value changes, %

Изменение характеристики	Кол-во постов	% от общего количества
Общие тенденции		
Модуль стока сокращается	2	11,1
Модуль стока увеличивается	16	88,9
Количественные показатели		
Менее 1	2	11,1
0–90	11	61,1
90–180	2	11,1
180–270	3	16,7

Общая закономерность для исследуемой территории: при движении с запада на восток количество бассейнов, в которых фиксируется уменьшение минимального летнего модуля стока после начала гидрологических изменений, увеличивается. При сравнении полученных результатов исследования и установленных закономерностей с аналогичными данными, полученными для средних и больших рек, а также с изменениями основных метеопараметров (рис. 10) (величины суммы осадков за время прохождения летней межени и средней температуры) выясняется, что они совпадают.



а *б*

Рис. 10. Изменение суммы осадков (*а*) и средней температуры (*б*) за летнюю межень

Fig. 10. Change in the amount of precipitation (*а*) and average temperature (*б*) during the summer low water period

Сравнение с аналогичными данными по большим и средним рекам

После анализа величин и тенденций изменения модуля стока воды малых рек проведено их сравнение с аналогичными тенденциями для средних и больших рек (табл. 10). Полученные в результате исследования данные

об изменении модулей стока воды малых рек бассейна р. Урал соотнесены с аналогичными данными для следующих средних и больших рек: Чаган, Иртек, Илек, Салмыш, Сакмара, Большой Ик, Губерля, Таналык, Орь, Большой Кумак, Суундук, Большой Кизил, Гумбека, Урал. Данные по средним и большим рекам российской части бассейна р. Урал взяты из [2] и [6].

Таблица 10. Сравнение величин модуля стока малых и больших рек бассейна р. Урал
Table 10. Comparison of the Ural River basin small and greater rivers' runoff module values

Характеристика	0–500 км²	501–2000 км²	> 2000 км²
Изменения модуля стока, %	116	122	109
Год начала гидрологических изменений.	1982	1987	1989
Динамика модуля стока	+	+	+
Реакция модуля стока на начало гидрологических изменений	+	+	+
Минимальный летний модуль стока сток, л/(с × км²)	0,89	1,12	3
Минимальный летний модуль стока до начала изменений, л/(с × км²)	0,13	0,18	3
Минимальный летний модуль стока после начала изменений, л/(с × км²)	0,19	0,28	3,5

В результате анализа установлено, что тенденции изменений модуля стока после начала гидрологических изменений у малых рек аналогичны тенденциям у больших рек, однако количественные показатели у малых рек в среднем на 15 % больше, чем у больших. Кроме этого, сроки начала гидрологических изменений у малых рек фиксируются на 1–5 лет раньше (в зависимости от площади бассейна), чем у больших рек.

После построения и анализа карт распределения гидрологических характеристик для исследуемой территории установлено, что все характеристики имеют зональное распространение с тенденцией уменьшения с севера на юг. Для выявления нарушений определенных закономерностей предложены три критерия, по которым (всем вместе или каждому в отдельности) малую реку можно считать азональной:

Статистически значимые тенденции изменений количественных гидрологических характеристик в бассейне малой реки не совпадают с фоновыми значениями.

Изменение количественных гидрологических характеристик в бассейне малой реки фиксируется более чем на один кластер выше или ниже, чем фоновые значения.

Несоответствие значения количественной гидрологической характеристики правилу распределения широтной зональности.

Для каждой реки фиксировалось количество раз, когда она определялась как азональная, и был рассчитан процент «отскакивающих» значений

от общего числа карт. При анализе полученных данных установлено, что малые реки с площадью бассейна менее 500 км^2 азональны более чем в 70 % случаев (рис. 11). Зеленым цветом выделен последний пост, имеющий площадь бассейна до 500 км^2.

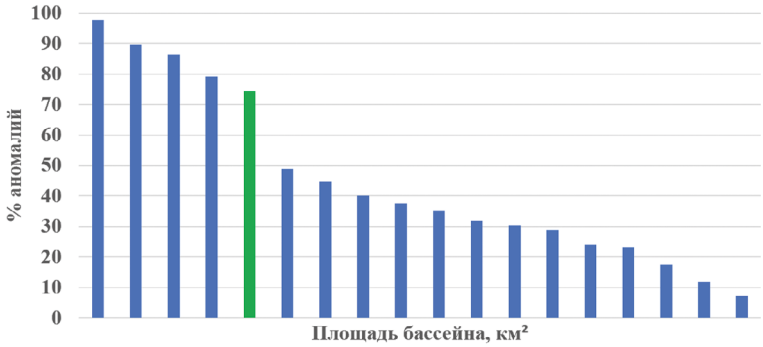


Рис. 11. Применение разработанных критериев к построенным картам
Fig. 11. Application of the developed criteria to the constructed maps

Гидрологические изменения в последние десятилетия отразились на величине минимального летнего модуля стока рек на преобладающей части исследуемой территории. Повысился минимальный летний модуль стока по сравнению с нормой предшествующих многолетних наблюдений. В последние 20–25 лет для большинства рек исследуемой территории фиксируется увеличение водности.

Получены данные об изменении модулей стока в разные фазы водного режима для рек с площадью бассейна до 500 км^2 и до 2000 км^2 в сравнении с аналогичными данными для рек с площадями бассейнов до 150 000 км^2 (табл. 11).

Таблица 11. Изменение модуля стока для рек с разной площадью бассейна
Table 11. The runoff module changing for rivers of different basin area

Характеристика	0–500 км^2	501–2000 км^2	2000–10 000 км^2	10 000–50 000 км^2	50 000–100 000 км^2	> 100 000 км^2
Изменения минимального летнего модуля стока, %	92,6	122	115	105	97,5	83,1

В результате исследования зависимости интенсивности изменения величины модуля стока от величины речного бассейна установлена следующая закономерность: чем меньше бассейн реки, тем интенсивней изменяется минимальный летний модуль стока воды. Такая закономерность прослеживается до величины бассейна в 500 км^2, после чего с дальнейшим уменьшением величины речного бассейна изменения минимального летнего модуля стока становятся хаотическими.

Полученные закономерности проверены с помощью построения зависимостей минимального летнего модуля стока малых рек от величины их бассейнов с сопоставлением аналогичных данных у средних рек (рис. 12.)

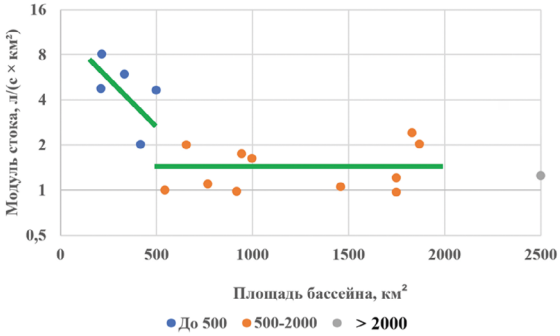


Рис. 12. Зависимость величины минимального летнего модуля стока от площади бассейна
Fig. 12. Dependence of the minimum summer runoff module on the basin area

В результате анализа полученных зависимостей выявлены следующие закономерности (данные сгруппированы в две категории):

– реки с площадями бассейна до 500 км^2, для которых характерно уменьшение величины минимального летнего модуля стока с увеличением площади бассейна;

– группа рек с площадями бассейна 500–2000 км^2. Для них величина модуля стока не зависит от площади бассейна, а также характерна минимальная величина среднеквадратического отклонения.

Утверждение, что чем меньше бассейн реки, тем интенсивней изменяется минимальный летний модуль стока воды, проверено построением зависимости величины Cv стока от площади бассейна (рис. 13).

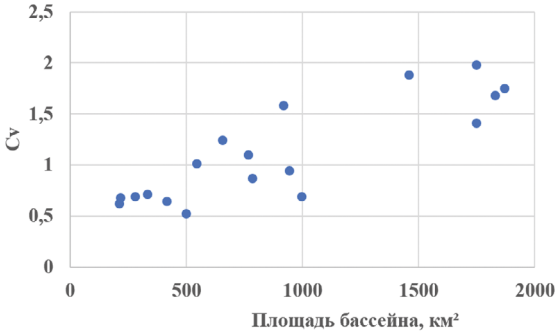


Рис. 13. Зависимость $Cv_{стока}$ от $F_{водосбора}$
Fig. 13. Dependence of Cv_{runoff} on $F_{catchment}$

Изменчивость годового стока по сравнению с его нормой характеризуется относительным среднеквадратическим отклонением или коэффициен-

том вариации (Cv). Коэффициенты изменчивости стока для рек с площадью бассейна до 500 км^2 в исследуемом регионе колеблются в пределах 0,52–0,71, а для преобладающего числа рек с площадью бассейна 500–2000 км^2 – от 0,69 до 1,98. Также выявлена зависимость изменения величины Cv: для рек с площадью бассейна до 500 км^2 с увеличением площади бассейна Cv незначительно уменьшается, в то время как для рек с площадью бассейна 500–2000 км^2 фиксируется значительное увеличение характеристики.

В результате проведенных исследований установлено, что выявленные изменения минимального летнего модуля стока воды малых рек хорошо коррелируется с аналогичными данными по большим рекам. Установлена закономерность абсолютных изменений минимального летнего модуля стока воды: чем меньше бассейн исследуемой реки, тем интенсивнее его изменения. Такая тенденция сохраняется до площади бассейна реки в 500 км^2. Для рек с площадью бассейна менее 500 км^2 выявить какие-либо закономерности изменения водного режима не получилось – изменения хаотичны.

Таким образом, определено, что граница азональности рек по площади бассейна проходит по величине площади водосбора в 500 км^2.

ВЫВОДЫ

В результате сравнения полученных данных о количественных гидрологических характеристиках минимального летнего модуля стока воды и тенденциях их изменений для малых рек с аналогичными данными для средних и больших рек установлено, что для рек с площадью бассейна до 500 км^2 они не совпадают, а для рек с площадью бассейна 501–2000 км^2 они полностью совпадают. Однако реакция малых рек на начало гидрологических изменений более интенсивная, чем у средних и больших рек. Это объясняется тем, что малые реки имеют более прочную связь с локальными факторами формирования речного стока воды, нежели средние, и поэтому даже их небольшие колебания приводят к очень интенсивным изменениям генетических составляющих стока воды.

В результате исследований установлено, что количество выпадающих из общих тенденций изменений гидрологических характеристик крайне мало: в каждом виде исследований их число не превышает 5–7 %. Также выявлена закономерность – чем южнее, тем более существенно изменяется минимальный летний модуль стока и его генетические составляющие.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.
CONFLICT OF INTERESTS
The author declares no relevant conflict of interests.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеевский Н. И. Гидроэкология малых рек // Малые реки: Современное состояние, актуальные проблемы. Тольятти: ИЭВБ РАН, 2001. С. 7.
2. Клименко Д. Е. Годовой сток рек Урала: монография / Д. Е. Клименко. Пермь: Изд-во Перм. гос. нац. исслед. ун-та, 2011. 196 с.
3. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / под ред. В. М. Катцова, 2022. 676 с.
4. Фролова Н. Л., Нестеренко Д. П., Шенберг Н. В. Внутригодовое распределение стока рек России // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2010. № 6. С. 8–16.
5. Балков В. А. Оценка изменений водных ресурсов малых рек в связи с усилением хозяйственной деятельности на их водосборах // Использование, регулирование и охрана водных ресурсов малых рек. Красноярск, 1987. С. 28–33.
6. Клименко Д. Е. К методам оценки характеристик стока неизученных рек / Д. Е. Клименко, А. М. Комлев // VII Всероссийский гидрологический съезд: Тезисы докладов. Водные ресурсы и водный баланс водных объектов в условиях влияния антропогенной деятельности и климатических изменений (секция 2). СПб., 2013. С. 155–156.
7. Дыгало В. С. Экспериментальные гидрологические исследования в бассейне р. Москвы. М.: Гидрометеоиздат, 1991.
8. Ландсберг Г. Е., 1983. Климат города / пер. с англ. под ред. А. С. Дубова. Л.: Гидрометеоиздат, 248 с.
9. Шикломанов И. А. Водные ресурсы / И. А. Шикломанов, И. И. Борзенкова, В. Ю. Георгиевский, П. А. Колосов, Н. А. Сперанская, Н. И. Коронкевич // Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Т. II. Последствия изменения климата. М.: Росгидромет, ГУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2008. С. 77–86.
10. Коронкевич Н. И., Барабанова Е. А., Георгиади А. Г. Природные и антропогенные изменения речного стока: сборник трудов. Москва, 2014. С. 22–44.
11. Лебедев Ю. М. Что такое малая река? // Малые реки: современное состояние, актуальные проблемы. Тольятти: ИЭВБ РАН, 2001. С. 1.
12. Виноградов Ю. Б. Математическое моделирование процессов формирования стока. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 312 с.
13. Водные ресурсы и водное хозяйство Урала / под ред. А. М. Черняева. Свердловск, 1977.

REFERENCES

1. Alekseevsky N. I. Hydro/ecology of small river // Small rivers: Current state, current problems. Togliatti: IEVB RAS, 2001. P. 7.
2. Klimenko D. E. Annual runoff of the Ural rivers: monograph / D. E. Klimenko. Perm: Publishing house of Perm. State National Research University, 2011. 196 p.
3. Third assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation / ed. by V. M. Kattsov, 2022, 676 p.
4. Frolova N. L., Nesterenko D. P., Shenberg N. V. Intra-annual distribution of river runoff in Russia. *Bulletin of Moscow University*. Series 5: Geography. 2010. No. 6. P. 8–16.
5. Balkov V. A. Assessment of changes in water resources of small rivers due to increased economic activity in their catchments // Use, regulation and protection of water resources of small rivers. Krasnoyarsk, 1987. P. 28–33.
6. Klimenko D. E. On methods for assessing the characteristics of the runoff of unstudied rivers / D. E. Klimenko, A. M. Komlev. VII All-Russian Hydrological Congress: Abstracts of reports // Water

resources and water balance of water bodies under the influence of anthropogenic activity and climate change (section 2). St. Petersburg, 2013. P. 155–156.
7. Dygalo V. S. Experimental hydrological studies in the Moskva River basin. Moscow: Gidrometeoizdat, 1991.
8. Landsberg G. E., 1983. City climate, translated from English / ed. by A. S. Dubov. L.: Gidrometeoizdat, 248 p.
9. Shiklomanov I. A. Water resources / I. A. Shiklomanov, I. I. Borzenkova, V. Yu. Georgievskiy, P. A. Kolosov, N. A. Speranskaya, N. I. Koronkevich // Assessment report on climate change and its consequences in the territory of the Russian Federation. Vol. II. Consequences of climate change. M.: Roshydromet, State Institution "VNIIGMI-MCD", 2008. P. 77–86.
10. Koronkevich N. I., Barabanova E. A., Georgiadi A. G. Natural and anthropogenic changes in river runoff. *Collection of papers.* Moscow, 2014. P. 22–44.
11. Lebedev Yu. M. What is a small river? // Small rivers: Current state, topical issues. Togliatti: IEVB RAS, 2001. P. 1.
12. Vinogradov Yu. B. Mathematical modeling of runoff formation processes. L.: Gidrometeoizdat, 1988. 312 p.
13. Water resources and water management of the Urals / edited by A. M. Chernyaev. Sverdlovsk, 1977.

Сведения об авторе:

Жуков Иван Александрович, лаборант, кафедра гидрологии суши, географический факультет, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова», 119991, Россия, г. Москва, Ленинские горы, д. 1; https://orcid.org/0009-0007-3035-1660; e-mail: les-96@yandex.ru

About the author:

Ivan A. Zhukov, Laboratory Assistant, Department of Land Hydrology, Faculty of Geography, M. V. Lomonosov Moscow State University, 119991, Russia, Moscow, Leninskie Gory, 1; https://orcid.org/0009-0007-3035-1660; e-mail: les-96@yandex.ru

Поступила в редакцию / Received 07.01.2026.
Поступила после рецензирования / Revised 23.03.2026.
Принята к публикации / Accepted 06.04.2026.

УДК 556.5 *https://doi.org/10.35567/19994508-2026-2-104-121*

Оригинальная статья/Original paper

Антропогенное воздействие на реку Исеть (Свердловская область)

С. Ю. Скрипченко[1], К. А. Наливайко[1], В. С. Семенищев[1], М. С. Скрипченко[2], А. А. Ульянова[3]

k.a.nalivaiko@urfu.ru

[1] *Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, Россия*
[2] *МАОУ-СОШ № 156, г. Екатеринбург, Россия*
[3] *МАОУ Лицей № 88, г. Екатеринбург, Россия*

АННОТАЦИЯ

Актуальность. В Национальном экологическом рейтинге регионов РФ Свердловская область находится на последнем месте. Это связано в том числе и с высокой степенью загрязненности рек региона. Регулярный мониторинг качества поверхностных вод позволяет оценить эффективность существующих мер борьбы с экологически опасными факторами, а также разработать новые, более действенные способы снижения антропогенной нагрузки на речные системы. **Методы.** Для исследования были отобраны пробы воды р. Исети на участке в 65 км от оз. Исетское до г. Арамиля. Определение химического состава проб воды проводили методами атомно-эмиссионной и масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой, потенциометрии и титриметрии. Для определения радиологических показателей использовали альфа- и бета-радиометрию. **Результаты.** Установлено, что вода относится к гидрокарбонатно-кальциевому классу. Общая минерализация воды р. Исети в среднем составляет 341 мг/дм^3. По общей жесткости вода в реке мягкая (0,68–1,88 °Ж), pH находится в интервале 7,0–7,6. Значения удельной суммарной альфа- и бета-активности воды не превышают соответственно 0,2 и 1,0 Бк/дм^3. В воде р. Исети зафиксировано превышение ПДК Cu, Fe, Zn, V, Se, Hg, Tl, PO_4^{3-}, NO_3^-. По маршруту отбора проб точки превышения нормативов качества воды коррелируют с местами размещения в бассейне реки промышленных объектов, химическая природа поллютантов соотносится с особенностями применяемых ими технологических схем переработки исходного сырья и получения готовой продукции. Вода в р. Исети относится к 3-му классу (разряд «б») и является «очень загрязненной».

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: река Исеть, антропогенное воздействие, химический состав, поллютанты, качество воды, удельная суммарная активность воды, Свердловская область

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (тема № FEUZ-2026-0010).

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Скрипченко С. Ю., Наливайко К. А., Семенищев В. С., Скрипченко М. С., Ульянова А. А. Антропогенное воздействие на реку Исеть (Свердловская область) // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2026. № 2. С. 104–121. https://doi.org/10.35567/19994508-2026-2-104-121; EDN: KEEKOB

© Скрипченко С. Ю., Наливайко К. А., Семенищев В. С., Скрипченко М. С., Ульянова А. А., 2026

Anthropogenic impact on the Iset River (Sverdlovsk region)

Sergey Yu. Skripchenko, Ksenia A. Nalivaiko[1], Vladimir S. Semenishchev[1], Mikhail S. Skripchenko[2], Amira A. Ulianova[3]

k.a.nalivaiko@urfu.ru

[1]*Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia*
[2]*The State Secondary School № 156, Ekaterinburg, Russia*
[3]*Lyceum № 88, Ekaterinburg, Russia*

ABSTRACT

Actuality. The National Environmental Rating ranks Sverdlovsk Region the last among the regions of the Russian Federation because of many factors, particularly due to the high degree of pollution of the region's rivers. Regular monitoring of water quality in surface water bodies makes it possible to assess the effectiveness of existing measures to reduce environmentally hazardous factors, as well as to develop new, more effective ways to reduce anthropogenic pressure on river systems. **Methods.** In this study, water samples of the Iset River were taken at a site 65 km from the lake Isetskoye to Aramil. The chemical composition of water samples was determined by atomic emission and mass spectrometry with inductively coupled plasma, potentiometry and titrimetry. Alpha and beta radiometry was used for determination of radiological parameters of the water samples. **Results.** It was found that the water belonged to the calcium hydrocarbonate class. The total salinity of the Iset water averaged 341 mg/dm^3. According to the total hardness, the water in the river is soft (34–94 ppm), its pH was within the range of 7.0–7.6. The values of the gross alpha and beta activity of the water did not exceed 0.2 and 1.0 Bq/dm^3, respectively. The concentrations of Cu, Fe, Zn, V, Se, Hg, Tl, PO_4^{3-}, and NO_3^- in some points of Iset River exceeded the maximum permissible limits. Along the sampling route, the points of exceeding water quality standards correlated with the locations of industrial facilities in the Iset basin, and the chemical nature of pollutants correlates with the specifics of their technological schemes for processing raw materials and obtaining finished products. The water in the Iset River belongs to the 3rd class (category "b") and is very polluted.

KEYWORDS: Iset River; anthropogenic impact; chemical composition; pollutants; water quality; gross alpha and beta activity; Sverdlovsk region.

FINANCING: This work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme № FEUZ-2026-0010).

FOR CITATION: Skripchenko S. Yu., Nalivaiko K. A., Semenishchev V. S., Skripchenko M. S., Ulianova A. A. Anthropogenic impact on the Iset River (Sverdlovsk region). *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management.* 2026. No. 2. P. 104–121. https://doi.org/10.35567/19994508-2026-2-104-121; EDN: KEEKOB

ВВЕДЕНИЕ

Екатеринбург является административным центром Уральского федерального округа и Свердловской области. В рейтинге городов-миллионников России он находится на третьем месте по площади и на четвертом по

численности населения. Екатеринбург является ключевым промышленным и научно-культурным центром страны. Однако в различных экологических рейтингах город и регион в целом находятся далеко не на первых местах. По итогам 2025 г. Свердловская область, включая столицу Урала, заняла последнее, 83-е место в Национальном экологическом рейтинге регионов РФ, составленном организацией «Зеленый патруль»[1]. При его формировании учитывалось состояние воздуха, водоемов и уровень промышленного загрязнения окружающей среды. Одной из определяющих причин такого положения Свердловской области в экологическом рейтинге является низкое качество поверхностных вод. Основу водной системы региона формируют реки Исеть, Пышма, Тавда, Тура, Чусовая и Уфа. И все они включены в список наиболее загрязненных водных объектов России[2,3,4,5,6].

Река Исеть – главная водная артерия Екатеринбурга. Она является левым притоком р. Тобол, впадающей в Иртыш. Общая протяженность Исети – 606 км. Истоком реки является оз. Исетское, расположенное на территории г. Среднеуральска и выполняющее функцию водохранилища. В озеро впадают многочисленные реки и ручьи, питающие р. Исеть. Именно на участке от истока до Екатеринбурга река испытывает основную антропогенную нагрузку. Причиной этого является не только мегаполис, но и его города-спутники (Арамиль, Верхняя Пышма и Среднеуральск), где находятся крупные предприятия химической отрасли, черной и цветной металлургии, тяжелого машиностроения [1–8].

Чистые поверхностные воды являются основой здоровья и процветания любого города. Однако уровень значимости качества воды еще более возрастает, если речь идет о столице такого стратегически важного для страны региона, как Свердловская область. Это понимают и власти региона, и представители промышленности. Несмотря на неблагоприятную экологическую остановку в Свердловской области, она занимает первые места в рейтинге субъектов Российской Федерации по затратам бизнеса на природоохранную деятельность[7] [3, 4]. Ключевым аспектом в достижении цели снижения уровня загрязненности региона является проведение регулярного

1 Экологический рейтинг субъектов Российской Федерации: Общероссийская общественная организация «Зеленый патруль». Официальный сайт. Режим доступа: https://greenpatrol.ru/tpost/7gsxl6ehp1-natsionalnii-ekologicheskii-reiting-regi (дата обращения: 12.12.2025).

2 О состоянии окружающей среды на территории Свердловской области в 2024 году: государственный доклад / Правительство Свердловской области, Министерство природных ресурсов и экологии Свердловской области. Екатеринбург, 2025. 368 с.

3 Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2024 год / М: Росгидромет, 2025. 225 с.

4 Количество экстремальных загрязнений рек и водоемов возросло в полтора раза. Режим доступа: https://finexpertiza.ru/press-service/researches/2024/kol-ekstr-zagr-rek-vozroslo/ (дата обращения: 12.12.2025).

5 Качество поверхностных вод Российской Федерации. Ежегодник 2024 / 2025. 451 с.

6 Качество поверхностных вод Российской Федерации. Информация о наиболее загрязненных водных объектах Российской Федерации (Приложение к ежегоднику 2024). 2025. 157 с.

7 Приложение к сборнику (информация в разрезе субъектов Российской Федерации и по ОКВЭД2) 2024. Росстат. Режим доступа: https://www.rosstat.gov.ru/folder/210/document/13209 (дата обращения: 12.12.2025).

мониторинга качества атмосферного воздуха, подземных и поверхностных вод. Важно, чтобы это происходило не только силами надзорных служб, но и при активном участии общественности, представителей научного и промышленного сообществ. Это позволит увеличить площадь исследуемых территорий, оперативно выявлять источники загрязнения окружающей среды и устранять последствия их воздействия, а также определить эффективность применяемых методов очистки сточных вод и газовых выбросов, что крайне важно для усовершенствования существующих и разработки новых способов охраны экосистем от промышленных загрязнений.

Все это определяет актуальность представленной в статье работы, в рамках которой были проведены физико-химические исследования воды р. Исети. Определены концентрации в воде целого ряда неорганических компонентов, включая основные анионы, тяжелые и цветные металлы, радиоактивные и редкоземельные элементы (РЗЭ), драгоценные металлы (Ag, Au и металлы платиновой группы – МПГ). Кроме того, установлены уровни общей минерализации, жесткости и цветности воды, показатели ее радиационной безопасности. В результате рассчитан удельный комбинаторный индекс загрязненности воды (УКИЗВ) р. Исети и на его основании определено ее качество.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Пробы воды из р. Исети отбирали маршрутным порядком в ходе полевых изысканий в сентябре 2025 г. на участке от ее истока (оз. Исетское) до г. Арамиля. Протяженность маршрута – 65 км. На этом участке реки расположены четыре водохранилища: Верх-Исетский пруд, Городской пруд, Нижне-Исетский и Арамильский пруды. Пробы отбирали в прибрежье реки из поверхностного горизонта воды (0,1–0,3 м).

Количественный элементный анализ проб воды проводили методами атомно-эмиссионной спектрометрии и масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой с использованием приборов Optima 2100 DV и NexION 350X (Perkin Elmer, США).

Определение в воде фторид-, хлорид- и нитрат-ионов (F^-, Cl^- и NO_3^-), а также катиона аммония (NH_4^+) осуществляли потенциометрическим методом с применением ион-селективных электродов PerfectION F (Mettler Toledo, США), ЭЛИС-131Cl (ИТ, Россия), ЭЛИС-121NO_3 (ИТ, Россия) и ЭЛИС-121NH_4 (ИТ, Россия), электрода сравнения ЭСР 10101 (ИТ, Россия), иономеров Five easy plus (Mettler Toledo, США) и Мультитест ИПЛ-301 (НПП «СЕМИКО», Россия) [9].

Определение концентрации карбонат- и бикарбонат-ионов в пробах воды проводили методом титрования в две стадии. На первом этапе устанавливали концентрацию карбонат-ионов (CO_3^{2-}) с использованием ин-

дикатора фенолфталеина. На второй стадии определяли содержание в образцах бикарбонат-ионов (HCO_3^-) с применением индикатора метилового оранжевого[8].

Жесткость воды рассчитывали на основе содержания в пробе ионов магния и кальция в соответствии с ГОСТ 31954-2012[9]. Цветность воды определяли в единицах Хазена (платино-кобальтовая шкала) в соответствии с ГОСТ 29131-91[10].

Определение показателя pH воды проводили с применением иономера Мультитест ИПЛ-301 (НПП «СЕМИКО», Россия) и pH-электрода ЭСК-10303/4 (ИТ, Россия). При этом предварительно осуществляли градуировку иономера с использованием буферных растворов со значениями pH, равными 4,01, 6,86 и 9,18.

Определение удельной суммарной альфа- и бета-активности образцов воды выполняли в соответствии с аттестованной методикой[11]. Аликвоту речной воды упаривали досуха в стеклянном стакане. Полученный сухой остаток переносили в стандартную латунную кювету, распределяли равномерно по поверхности и фиксировали его массу. Подготовленные пробы измеряли на полупроводниковом альфа-бета-радиометре УМФ-2000 (НПП «Доза», Россия). Объем аликвоты составлял 400 см^3. Каждую пробу измеряли на радиометре дважды по 5000 с.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке представлена карта отбора проб воды из р. Исети. Для отбора образцов были определены 12 точек, 7 из них расположены в черте Екатеринбурга, 3 – в районе Арамиля, 2 – возле истока реки. В табл. 1 и табл. 2 представлены результаты анализа проб воды, включающие содержание неорганических компонентов в изученных образцах и значения их показателя pH. Согласно результатам проведенных исследований, вода в Исети относится к гидрокарбонатному классу с изменяющимся катионным составом при доминировании кальция. Содержание HCO_3^- находится в интервале 168–267 мг/дм^3, SO_4^{2-} – в интервале 27–65 мг/дм^3. Средние концентрации Ca, Na и Mg в образцах воды составляют соответственно 14,2, 11,3 и 8,4 мг/дм^3. Общая минерализация вод Исети лежит в диапазоне от 261 до 507 мг/дм^3 и в целом возрастает по течению реки (табл. 1). Величина pH изученных образцов речной воды составляет от 7,06 до 7,53, что со-

8 Титриметрические методы анализа: уч.-метод. пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета. 2011. 100 с.

9 ГОСТ 31954-2012. Вода питьевая. Методы определения жесткости. Введ. 01.01.2014. М. 2018. 23 с.

10 ГОСТ 29131-91. Продукты жидкие химические. Метод измерения цвета в единицах Хазена (платино-кобальтовая шкала). Введ. 01.01.1993. М. 2004. 4 с.

11 Методика выполнения измерений суммарной альфа- и бета-активности водных проб альфа-бета радиометром УМФ-2000 (МВИ SARC 13.1.001-05/97).

ответствует установленным нормативам[12]. Изменения этого параметра по течению реки не носят системного характера. По общей жесткости вода в Исети мягкая. Значение этого показателя напрямую связано с уровнем минерализации вод и составляет 0,68–1,88 °Ж.



Рисунок. Карта отбора проб воды из реки Исети
Figure. The Iset River water sampling map

12 Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения: Приказ Росрыболовства от 26.05.2025 № 296. Российская газета. 03.06. 2025 г.

Таблица 1. Физико-химические показатели воды р. Исети
Table 1. Physical/chemical parameters of the Iset River water

Точки отбора проб воды	Общая минерализация, мг/дм^3	Жесткость, °Ж	pH	Цветность, ° (Pt-Co шкала)
I1	261	0,68	7,12	10
I2	273	0,96	7,06	50
I3	264	1,07	7,53	50
I4	262	1,08	7,34	60
I5	305	1,19	7,34	60
I6	319	1,39	7,47	50
I7	315	1,42	7,30	10
I8	412	1,88	7,29	40
I9	353	1,87	7,47	30
I10	426	1,69	7,29	30
I11	507	1,72	7,18	30
I12	390	1,79	7,33	30

Цветность воды в Исети по платиново-кобальтовой шкале (шкале Хазена) в среднем составляет 37,5 °. При этом максимальные значения этого показателя (50–60 °) установлены в центральной части Екатеринбурга, где вода имеет цвет от желтоватого до желтого. Это превышает нормативы качества вод хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования[13], установленные в зависимости от их назначения на уровне 5–30 ° цветности. Река Исеть подпитывается водами из болотистых местностей, что насыщает ее сильно влияющими на цветность гуминовыми и фульвокислотами (продуктами разложения органики). В зависимости от их концентрации речная вода по цвету может быть от слабо желтой до коричневой. Желтовато-коричневые тона придают воде также окисленные формы железа и марганца, неизменно присутствующие в уральских реках. Рост цветности воды Исети в центре Екатеринбурга связан и с незаконными или неисправными сливами через городскую ливневую канализацию. Случаи такого антропогенного воздействия на водный объект регулярно фиксируются, при этом их индикатором является окрашивание воды в реке в фиолетовый, коричневый и даже в черный цвета. В итоге цветность Исети определяют не только неорганические вещества (Fe и Mn) и природные гуминовые соединения, но и компоненты отходов жизнедеятельности и бытовой химии.

В образцах воды р. Исети по целому ряду загрязняющих веществ наблюдается превышение норм ПДК, установленных для поверхностных вод рыбохозяйственного значения или хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования[12,13] (табл. 2). В ходе проведенных исследований

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

обнаружены точки с концентрацией больше нормированного предельного значения таких компонентов, как Zn (1,4–1,5 ПДК), V (1,0–1,6 ПДК), Se (1,2–7,3 ПДК), Hg (1,25 ПДК), Tl (2,08 ПДК), PO_4^{3-} (1,2–2,1 ПДК) и NO_3^- (1,3–1,5 ПДК). На всем изученном участке реки в водах зафиксировано превышение ПДК меди в 2,0–7,9 раза и железа в 1,3–5,7 раза.

Концентрации большинства неорганических компонентов подвержены воздействию антропогенных факторов и зависят от точки отбора пробы воды. Они возрастают в образцах, взятых в зоне влияния на водный объект промышленных предприятий, и снижаются в пробах воды, отобранных за их пределами. Условно все изученные образцы воды р. Исети по содержанию и природе поллютантов можно разделить на три группы. К первой группе относятся пробы из оз. Исетское и в точках на подходе к Екатеринбургу (I1–I3). Во вторую группу входят образцы, отобранные в границах территории Екатеринбурга (I4–I9). Третья группа включает пробы воды из р. Исети в районе г. Арамиля (I10–I12).

На берегу оз. Исетское расположен г. Среднеуральск, на территории которого работает ряд машиностроительных, металлообрабатывающих и металлургических предприятий: ООО «Уральский электродный завод», ООО «Среднеуральский завод металлоконструкций», ООО «Среднеуральский электро-механический завод». Кроме того, в озеро впадают реки, протекающие или берущие свое начало в районе г. Верхняя Пышма. К их числу относится, например, р. Мулянка, истоком которой является Молебское болото. Оно находится в зоне антропогенного влияния ряда металлургических, химических и машиностроительных заводов Верхней Пышмы, таких как ОАО «Уралэлектромедь», ОАО «Уралредмет», АО «Екатеринбургский завод по обработке цветных металлов», ОАО «Уральский завод химических реактивов» и ООО «Уральские локомотивы». Кроме того, расстояние от этих предприятий до оз. Исетское составляет менее 10 км, что не исключает их прямого воздействия на экологию водоема. Высокая концентрация промышленных объектов вблизи истока Исети и природа связанных с ними загрязняющих веществ, обусловленная спецификой их производств (табл. 3), в большинстве своем и определили особенности химического состава вод реки на изученном участке.

Среди всех исследованных образцов в пробах воды первой группы (I1–I3) зафиксировано наибольшее содержание Cu, Fe, Mn, Pb, F^-, K, РЗЭ и благородных металлов, а также обнаружено превышение ПДК ртути и таллия. Это подтверждает взаимосвязь концентрации этих поллютантов в водах Исети с близостью расположения соответствующих отходообразующих предприятий.

Екатеринбург входит в пятерку крупных городов России, которые активно ведут работу по переносу заводов и фабрик из центральных районов на

Таблица 2. Химический состав воды р. Исети (жирным шрифтом выделено превышение ПДК)

Table 2. Chemical composition of the Iset River water (exceeding the maximum permissible concentration in bold)

Комп.	Точки отбора проб воды											
	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	I9	I10	I11	I12
Макрокомпоненты, мг/дм³												
HCO_3^-	183	198	191	183	206	206	198	267	214	198	267	168
SO_4^{2-}	27,0	33,3	32,6	37,1	49,2	54,1	54,2	58,0	54,6	63,1	64,7	61,6
NO_3^-	21,4	8,76	6,36	7,12	8,16	9,76	11,4	12,7	13,5	**52,5**	**58,5**	**52,5**
Cl^-	3,16	5,75	7,42	7,30	9,70	13,4	14,8	28,5	27,3	55,4	58,2	51,6
Ca	7,62	11,2	11,7	11,0	12,6	14,6	15,2	18,4	18,3	16,6	16,1	16,7
Na	5,36	6,46	4,74	6,60	8,83	9,57	9,21	10,4	9,5	21,8	22,8	19,9
Mg	3,69	4,94	5,98	6,46	6,83	8,03	8,08	11,7	11,6	10,4	11,2	11,6
K	8,73	1,96	1,51	2,13	1,99	1,84	1,97	1,93	1,95	5,08	5,48	4,73
Микрокомпоненты, мкг/дм³												
PO_4^{3-}	20,0	30,1	21,1	11,3	21,1	37,2	26,8	66,1	72,3	**785**	**1231**	**1002**
Si	388	1299	2557	602	956	1217	1378	2101	1846	1760	2101	1969
Fe	**139**	**350**	**567**	**205**	**229**	**256**	**277**	**333**	**337**	**307**	**295**	**320**
Sr	117	142	139	149	157	243	245	295	226	191	184	196
NH_4^+	360	96,0	75,6	70,3	70,7	71,8	73,2	66,9	84,2	209	204	178
F^-	143	28,4	38,7	47,6	62,6	126	99,0	62,8	143	55,8	70,4	75,5
Br	25,7	26,8	22,8	25,3	28,9	26,7	28,9	32,8	36,6	36,3	39,3	39,0
Ba	30,0	35,9	22,6	31,1	28,1	27,8	28,0	28,8	29,3	14,5	11,7	12,9
I	11,9	12,9	9,15	14,5	16,0	18,9	18,3	18,6	19,5	38,5	37,2	34,6
Al	6,87	21,2	24,4	5,11	5,05	6,29	2,30	2,73	1,54	3,78	2,13	2,78
Zn	3,11	2,83	3,09	3,29	2,31	4,88	6,83	6,80	4,40	**14,7**	**15,0**	**14,6**
Se	1,75	0,97	1,16	1,65	1,07	1,65	1,94	**2,52**	1,12	**10,1**	**10,2**	**14,5**
Cu	**4,63**	**5,06**	**7,83**	**2,41**	**2,38**	**2,79**	**2,53**	**3,97**	**2,34**	**3,54**	**2,02**	**2,80**
Rb	2,69	2,28	1,55	1,84	2,28	<ПО	2,04	0,06	1,79	4,77	6,24	3,44
Li	1,66	2,14	2,04	1,94	2,13	2,39	2,45	2,55	2,44	3,05	2,94	3,18
Ti	0,29	1,15	1,63	0,14	0,56	0,54	0,86	1,09	0,92	3,93	5,76	5,08
Ni	2,98	1,23	1,33	0,45	1,18	0,79	0,71	1,29	1,53	3,87	3,57	3,02
Cr	1,48	1,92	2,04	1,50	1,67	1,81	2,86	2,17	1,63	1,60	1,33	1,50
As	1,67	1,58	1,93	1,52	1,47	1,32	1,35	1,40	1,50	1,89	2,05	1,81
∑РЗЭ	2,84	2,92	4,02	1,24	1,19	1,30	1,52	1,64	1,39	1,30	1,41	1,19
Микрокомпоненты, нг/дм³												
U	192	346	638	2940	626	4610	625	748	589	382	418	449
Mo	892	515	566	644	952	911	940	942	969	935	846	797
V	486	347	477	255	422	488	569	**1050**	957	**1350**	**1540**	**1440**
Sb	441	398	360	391	362	406	513	1358	408	592	557	568
Zr	757	657	562	250	633	375	114	231	229	229	107	159
Te	2,0	<ПО	<ПО	<ПО	<ПО	<ПО	3,0	3,0	<ПО	675	771	580
Ag	772	315	126	39	61	44	19	29	19	18	13	9,0
∑МПГ	20	13	14	16	14	14	9,0	23	13	124	48	103
Tl	**208**	39	34	27	24	16	13	14	10	7,0	11	7,0
Hg	<ПО	<ПО	**13**	<ПО	<ПО	<ПО	<ПО	<ПО	<ПО	<ПО	<ПО	<ПО
Th	42	29	31	6,0	4,0	4,0	3,0	7,0	6,0	2,0	2,0	3,0

Суммарное содержание W, Co, Pb, Mn, Bi, Cd, Re, Cs, Sn, Ta, Nb, Hf, Be, In, Au менее 1 мкг/дм³
< ПО – ниже предела обнаружения 0,001 мкг/дм³

окраины или за пределы мегаполиса. В случае столицы Свердловской области большинство предприятий перемещают свое производство в города-спутники Екатеринбурга – Верхнюю Пышму, Березовский, Среднеуральск и Арамиль. За последние 20 лет с карты города исчезло 45 промышленных объектов. Это не только позволило преобразить архитектурный облик, но и существенно улучшить экологическую ситуацию в столице Свердловской области. Сокращение в городской черте числа источников промышленных сбросов отразилось и на химическом составе проб воды, отобранных на территории Екатеринбурга. Несмотря на превышение ПДК Cu и Fe, содержание этих металлов в образцах второй группы (I4–I9) в несколько раз меньше, чем в пробах, взятых у истока реки и на подходе к городу (I1–I3). Ниже в этих пробах концентрация и многих других неорганических компонентов. При этом общая минерализация вод по течению реки возрастает, что связано с ростом содержания макрокомпонентов (Na, Ca, Mg, SO_4^{2-}, Cl^-, NO_3^-) и обусловлено стоками предприятий жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ).

Таблица 3. Типичные загрязняющие вещества различных отраслей промышленности [10]
Table 3. Typical pollutants from various industries [10]

Отрасли промышленности	Основные загрязняющие вещества
Черная металлургия	Mn, Cr, V, Fe, W
Цветная металлургия	Zn, Pb, Cr, Ni, Cu, Sb, Ag, Mg, Cd, In, Bi, Sn, As, Ti, W, Mo, B
Машиностроение и металлообработка	Zn, Pb, Cr, Ni, Cu, W, Sn, Co, Mo, V, Sb, Mn, Bi, Se
Химическая	S, N, W, Hg, Cd, Sb, Sn, Hf, Ag, Zn, Sn, Cu, Bi, Pb, Nb, Mo, Ni, орг. соединения
Энергетика (в т. ч. АЭС)	S, V, Ni, Ge, Fe, S, N_2O, CO, ^{60}Co, ^{134}Cs, ^{137}Cs, ^{131}I
Производство строительных материалов	As, Pb, Hg, F, CO

Немаловажным фактором уменьшения концентрации одних неорганических веществ и роста других в отобранных в городской черте пробах воды является наличие на этом участке Исети сразу трех водохранилищ. Верх-Исетский, Городской и Нижне-Исетский пруды являются искусственными стоячими водоемами и замедляют поток реки. Это в первую очередь способствует разложению микроорганизмами органических загрязнителей и осаждению взвешенных частиц. Переходят в осадок и некоторые металлы. Причины этого процесса – их адсорбция на поверхности донных частиц (в основном глинистых минералов), комплексообразование с органическими компонентами (с гуминовыми и фульвокислотами) и формирование малорастворимых соединений (гидроксидов, карбонатов, фосфатов, сульфатов). При этом в большинстве случаев все эти механизмы являются обратимыми. Ранее накопленные в отложениях вещества могут растворятся при изменении условий (pH, температуры, окислительно-восстанови-

тельного потенциала среды), в результате превышения сорбционной емкости донных частиц или замещения поллютатов более активными ионами (например, катионы кальция и аммония могут вытеснять адсорбированные тяжелые металлы). Все это приводит к вторичному загрязнению поверхностных вод и нарушению закономерностей распределения загрязняющих компонентов по течению реки [11–14].

Пробы воды р. Исети, отобранные в районе г. Арамиля (I10–I12), характеризуются превышением ПДК не только Cu и Fe, но и Zn, Se, V, PO_4^{3-} и NO_3^-. Ванадий, селен и фосфор, как и титан, никель, теллур, рубидий, повышенное содержание которых также отмечено в исследованных образцах, применяют для легирования металлов. Цинк используют для защиты сталей от коррозии (цинкование). Нитраты служат компонентами флюсов при сварке и пайке металлов, улучшая качество шва. Фосфаты цинка являются основой растворов для подготовки металлических поверхностей к окраске и для получения износостойких покрытий. Фосфатирующие растворы могут включать и нитраты, они ускоряют реакцию и формируют мелкокристаллическую структуру покрытия. Зафиксированная высокая концентрация неорганических компонентов в пробах воды обусловлена антропогенным воздействием на водный объект машиностроительных, металлообрабатывающих и металлургических предприятий, расположенных в бассейне р. Исети на участке от Екатеринбурга до Арамиля: АО «Уральский завод химического машиностроения», ООО «Уральский завод металлоизделий», ООО «Завод индукционного оборудования», ООО «Завод стального проката», ООО «Арамильский завод металлоконструкций», ООО «Уральский завод деталей трубопроводов», АО «Арамильский завод передовых технологий».

Повышенное содержание фосфора и нитратов в водах реки может быть связано и с сельскохозяйственной деятельностью, осуществляемой вблизи водного объекта. Содержащие остатки фосфорных и нитратных удобрений стоки с полей, а также отходы животноводческих комплексов являются распространенной причиной высокой концентрации фосфат- и нитрат-ионов в поверхностных водах [15–20]. При этом чрезмерное обогащение воды фосфором и азотом приводит к эвтрофикации рек. Это влечет за собой бурный рост водорослей, кислородное голодание, массовую гибель рыбы и других водных организмов[14] [21–25]. Если от истока реки до выхода с Нижне-Исетского пруда вода в Исети относится по содержанию фосфора еще к олиготрофной категории (менее 150 мкг/дм^3 PO_4^{3-}), то в районе Арамиля происходит ее эвтрофикация.

Показатели радиационной безопасности всех изученных образцов воды не превышают нормативных значений, установленных для вод хозяйствен-

14 РД 52.24.643-2002. Методические указания. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям. Спб: Гидрометеоиздат, 2002. 49 с.

но-питьевого и культурно-бытового водопользования[15]. Контрольные уровни для удельной суммарной альфа-активности (A_α) и удельной суммарной бета-активности (A_β) составляют соответственно 0,2 и 1,0 Бк/дм^3. По течению реки эти показатели изменяются в узком диапазоне без какой-либо выраженной закономерности (табл. 4). Концентрация урана в водах Исети в среднем составляет 1,05 мкг/дм^3, тория – 0,012 мкг/дм^3 (табл. 2), что в сумме соответствует удельной альфа-активности порядка 0,026 Бк/дм^3.

Таблица 4. Удельная суммарная альфа- (A_α) и бета-активность (A_β) воды р. Исети
Table 4. Specific total alpha (A_α) and beta activity (A_β) of the Iset River water

Точки отбора проб воды	Удельная суммарная активность, Бк/дм^3 (±Δ – абсолютная погрешность измерений, P = 0,95)	
	A_α	A_β
I1	0,079 ± 0,045	0,090 ± 0,032
I2	< 0,031	0,028 ± 0,025
I3	0,044 ± 0,037	0,165 ± 0,035
I4	0,069 ± 0,046	0,063 ± 0,031
I5	< 0,034	0,666 ± 0,048
I6	< 0,035	0,069 ± 0,026
I7	< 0,033	0,102 ± 0,026
I8	< 0,038	0,089 ± 0,032
I9	< 0,036	0,093 ± 0,032
I10	< 0,045	0,125 ± 0,034
I11	0,116 ± 0,066	0,125 ± 0,034
I12	0,004 ± 0,065	0,115 ± 0,034

Согласно проведенным расчетам, удельный комбинаторный индекс загрязненности воды р. Исети на изученном участке составляет 3,37. Критических показателей загрязненности в исследованных пробах речной воды не обнаружено. В соответствии с классификацией по значению УКИЗВ вода в Исети относится к 3-му классу (разряд «б») и является «очень загрязненной»[14].

ВЫВОДЫ

Вода р. Исети относится к гидрокарбонатному классу с изменяющимся катионным составом при доминировании кальция. Общая минерализация воды в среднем составляет 341 мг/дм^3. По общей жесткости вода в реке мягкая (0,68–1,88 °Ж), величина pH находится в интервале 7,0–7,6. Показатели радиационной безопасности воды р. Исети не превышают нормативных значений, установленных для вод хозяйственно-питьевого и культурно-

15 МУ 2.6.1.2719-10. Методические указания. Радиационный контроль и гигиеническая оценка источников питьевого водоснабжения и питьевой воды по показателям радиационной безопасности. Оптимизация защитных мероприятий источников питьевого водоснабжения с повышенным содержанием радионуклидов.

бытового водопользования. Цветность воды в Исети в среднем составляет 37,5 ° (Pt-Co шкала). Высокое значение этого показателя обусловлено сочетанием природных факторов и значительного антропогенного воздействия.

В ходе проведенных исследований в водах Исети на всем изученном участке реки установлено превышение ПДК Cu (в 2,0–7,9 раза) и Fe (в 1,3–5,7 раза). В ряде точек зафиксировано высокое содержание Zn (1,4–1,5 ПДК), V (1,0–1,6 ПДК), Se (1,2–7,3 ПДК), Hg (1,25 ПДК), Tl (2,08 ПДК), PO_4^{3-} (1,2–2,1 ПДК) и NO_3^- (1,3–1,5 ПДК). Повышенное содержание в воде неорганических компонентов обусловлено производственной деятельностью предприятий металлургического, химического и машиностроительного комплексов Екатеринбурга и его городов-спутников. По маршруту отбора проб точки превышения нормативов качества воды коррелируют с местами размещения в бассейне Исети промышленных объектов, а химическая природа поллютантов соотносится с особенностями применяемых ими технологических схем переработки исходного сырья и производства готовой продукции.

На изученном участке реки вода характеризуется как «очень загрязненная». Несмотря на отсутствие критических показателей загрязненности, текущая антропогенная нагрузка оценивается как высокая и стабильная. Она носит характер хронического техногенного воздействия, ограничивающего потенциал самоочищения экосистемы и требующего мер по контролю за сточными водами.

Научная новизна работы заключается в расширенном анализе воды на компоненты, не нормируемые в водных объектах рыбохозяйственного значения, включая радиоактивные металлы и РЗЭ. Такой подход позволил выявить скрытые угрозы, не фиксируемые стандартным мониторингом. В частности, у истока реки была установлена высокая концентрация токсичного и склонного к биоаккумуляции таллия. А зафиксированное значительное превышение фоновых значений для РЗЭ (0,6 мкг/дм³) и Ag (< 0,1 мкг/дм³) представляет серьезную опасность для гидробионтов (рыб, микропланктона и простейших). Кроме того, анализ воды на радиоактивные элементы позволил определить причину формирования ее удельной альфа-активности.

Дальнейшие исследования будут сосредоточены на оценке роли донных отложений как аккумулятора металлов и источника вторичного загрязнения. Кроме того, планируется расширение мониторинговой сети вниз по течению до г. Каменск-Уральского для полноты анализа пространственной трансформации качества воды р. Исети. Однако уже сейчас можно говорить о том, что для эффективного снижения уровня загрязненности реки необходим комплексный подход. В первую очередь требуется проведение глубокой модернизации очистных сооружений промышленных объектов и предприятий ЖКХ с внедрением новых, более эффективных технологий очистки сточных вод.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кулешова Г. И. Научно-инновационный комплекс как один из базовых факторов трансформации каркаса расселения на примере СТП Свердловской области. Предпосылки включения научно-инновационного комплекса в базовые факторы трансформации региональной системы расселения // Academia. Архитектура и строительство. 2020. № 3. С. 98–105. https://doi.org/10.22337/2077-9038-2020-3-98-105
2. Астафьева О. В., Дерягина С. Е. Экологический мониторинг – необходимый элемент в системе обеспечения экологической безопасности неблагополучных территорий (Свердловская область) // Экология и промышленность России. 2016. Т. 20. № 6. С. 58–62. https://doi.org/10.18412/1816-0395-2016-6-58-62
3. Старцева О. П. Переход к модели устойчивого роста Свердловской области // Управление устойчивым развитием. 2023. № 5 (48). С. 27–33. https://doi.org/10.55421/2499992X_2023_5_27
4. Фельдман М. А., Тимин А. А. Экологическая политика в Свердловской области: проблема совершенствования инструментов // Управленческое консультирование. 2018. № 10 (118). С. 133–142. https://doi.org/10.22394/1726-1139-2018-10-133-142
5. Медведева И. В., Амирова Е. В., Студенок Г. А., Цейтлин Е. М., Медведева О. М. Воздействие предприятий горно-металлургического комплекса Свердловской области на окружающую среду и направления его снижения // Известия УГГУ. 2023. №. 4 (72). С. 116–126. https://doi.org/10.21440/2307-2091-2023-4-116-126
6. Боброва З. М., Ильина О. Ю., Студенок Г. А., Цейтлин Е. В. Воздействие предприятий минерально-сырьевого комплекса Урала на водные ресурсы // Известия УГГУ. 2016. № 1 (41). С. 62–66.
7. Oznobikhina L. A. Pollution of ecosystem water resources in the Ural Federal District // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. Vol. 1045. P. 012125. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1045/1/012125
8. Розенталь О. М., Федотов В. Х. Исследование закономерностей вариации показателей качества воды реки Исеть с использованием нейросетевых методик // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2023. № 6. С. 33–43. https://doi.org/10.35567/19994508_2023_6_3
9. Prkić A., Giljanović J., Bralić M., Boban K. Direct potentiometric determination of fluoride species by using ion-selective fluoride electrode // International Journal of Electrochemical Science. 2012. Vol. 7. No. 2. P. 1170–1179. https://doi.org/10.1016/S1452-3981(23)13404-3
10. Каримова О. А., Миняева Ю. В., Четверикова А. В. Влияние антропогенных факторов на водные ресурсы промышленно развитых районов Северо-Западного федерального округа (на примере Ленинградской области) // Научное обеспечение реализации «Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 года»: сб. научных трудов, Петрозаводск, 2015. Т. 1. С. 155–161.
11. Савостикова О. Н., Ушакова О. В., Трегубова Л. Ю. Мониторинг химического и биологического состава придонного ила (обзор литературы) // Гигиена и санитария. 2022. № 101 (5). С. 511–514. https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-5-511-514
12. Наумов Ю. А. Об особенностях загрязнения поверхностных вод на территории Дальнего Востока России // Ойкумена. Регионоведческие исследования. 2021. № 3. С. 102–112. https://doi.org/10.24866/1998-6785/2021-3/102-112

13. Закруткин В. Е., Гибков Е. В., Решетняк О. С., Решетняк В. Н. Донные отложения как индикатор первичного и источник вторичного загрязнения речных вод углепромышленных территорий Восточного Донбасса // Известия Российской академии наук. Сер. географическая. 2020. № 84 (2). С. 259–271. https://doi.org/10.31857/S2587556620020168
14. Опекунов А. Ю., Опекунова М. Г., Джораева А. Н. Фракционирование металлов в донных осадках рек Санкт-Петербурга // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2024. № 69 (1). С. 166–184. https://doi.org/10.21638/spbu07.2024.109
15. Неваев А. С. Анализ эффективности методов экологического мониторинга поверхностных водоемов в условиях их эвтрофирования со стороны объектов сельского хозяйства (обзор) // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2024. Т. 25. № 6. С. 969–987. https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.6.969-987
16. Bijay-Singh, Craswell E. Fertilizers and nitrate pollution of surface and ground water: an increasingly pervasive global problem // SN Applied Sciences. 2021. No. 3. Vol. 518. https://doi.org/10.1007/s42452-021-04521-8
17. Sukharevich V. I., Polyak Y. M. Global occurrence of cyanobacteria: causes and effects (Review) // Inland Water Biology. 2020. No. 13. P. 566–575. https://doi.org/10.1134/S1995082920060140
18. Щукина Д. А., Чукина Н. В., Малева М. Г., Борисова Г. Г. Адаптивные реакции адвентивного вида Lemna gibba в условиях загрязнения водной среды // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2020. № 1. С. 108–123. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2020-1-7
19. Golterman H. L., de Oude N. T. Eutrophication of lakes, rivers and coastal seas. In: water pollution // Water Pollution. 1991. Vol. 5/5A. Springer, Berlin: Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-46685-7_3
20. 20 Li C., Shen J., Feng J., Chi L., Wang X. Variations of phosphorus in sediments and suspended particulate matter of a typical mesotrophic plateau lake and their contribution to eutrophication // Scientific Reports. 2024. No. 14. P. 26551. https://doi.org/10.1038/s41598-024-77866-w
21. Сафиуллин Э. М., Ладыгина О. В., Насибов Т. Р., Насырова Л. А. Исследование эвтрофикации реки Волга через анализ биогенных нагрузок притоков рек Ярославля с применением ГИС // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2025. № 5 (157). С. 193–204. https://doi.org/10.17122/ntj-oil-2025-5-193-204
22. Сазонов А. А., Лисина А. А., Ерина О. Н., Фролова Н. Л., Ломаков О. И., Платонов М. М. Синхронные исследования качества воды реки Волги // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 5. С. 98–114. https://doi.org/10.35567/19994508-2024-5-98–114
23. Huang J., Zhang Y., Arhonditsis G.B., Gao J., Chen Q., Peng J. The magnitude and drivers of harmful algal blooms in China's lakes and reservoirs: A national-scale characterization // Water Research. 2020. Vol. 181. P. 115902. https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115902
24. Melaram R., Newton A.R., Chafin J. Microcystin contamination and toxicity: implications for agriculture and public health // Toxins. 2022. No. 14 (5). P. 350. https://doi.org/10.3390/toxins14050350
25. Ding Y., Xu H., Deng J., Qin B., He Y. Impact of nutrient loading on phytoplankton: a mesocosm experiment in the eutrophic Lake Taihu, China // Hydrobiologia. 2019. No. 829. P. 167–187. https://doi.org/10.1007/s10750-018-3830-6

REFERENCES

1. Kuleshova G. I. Scientific and innovative complex as a basic factor of transformation of the settlement framework on the example of the Scheme of Territorial Planning of the Sverdlovsk region. Prerequisites for the inclusion of the scientific and innovative complex in the basic factors of transformation of the regional settlement system. *Academia. Architecture and construction.* 2020. No. 3. P. 98–105. (In Russ.). https://doi.org/10.22337/2077-9038-2020-3-98-105

2. Astafyeva O. V., Deryagina S. E. Environmental monitoring as an essential element in the system of environmental safety areas of concern (Sverdlovsk Oblast). *Ecology and Industry of Russia*. 2016. Vol.20. No. 6. P. 58–62. (In Russ.). https://doi.org/10.18412/1816-0395-2016-6-58-62
3. Startseva O. P. Transition to the sustainable growth model of the Sverdlovsk region. *Managing sustainable development.* 2023. Vol. 5. No. 48. P. 27–33. (In Russ.). https://doi.org/10.55421/2499992X_2023_5_27
4. Feldman M. A., Timin A. A. Ecological policy in the Sverdlovsk region: problem of improving instruments. *Administrative Consulting.* 2018. No. 10 (118). P. 133–142. (In Russ.). https://doi.org/10.22394/1726-1139-2018-10-133-142
5. Medvedeva I. V., Amirova E. V., Studenok G. A., Tseitlin E. M., Medvedeva O. M. Impact of enterprises of the mining and metallurgical complex of the Sverdlovsk region on the environment and directions of its reduction. *News of the Ural State Mining University.* 2023. Vol. 4 (72). P. 116–126. (In Russ.). https://doi.org/10.21440/2307-2091-2023-4-116-126
6. Bobrova Z. M., Ilina O. Yu., Studenok G. A., Tseytlin E. M. Impact of enterprises of Ural mineral resource complex on water resources. *News of the Ural State Mining University.* 2016. No. 1 (41). P. 62–66. (In Russ.).
7. Oznobikhina L.A. Pollution of ecosystem water resources in the Ural Federal District. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* 2022. Vol. 1045. P. 012125. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1045/1/012125
8. Rosenthal O. M., Fedotov V. K. Investigation of patterns of variation in water quality indicators of the Iset River with the use of neuronet methods. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management.* 2023. No. 6. P. 33–43. (In Russ.). https://doi.org/10.35567/19994508_2023_6_3
9. Prkić A., Giljanović J., Bralić M., Boban K. Direct potentiometric determination of fluoride species by using ion-selective fluoride electrode. *International Journal of Electrochemical Science.* 2012. Vol. 7. No. 2. P. 1170–1179. https://doi.org/10.1016/S1452-3981(23)13404-3
10. Karimova O. A., Minyaeva Yu. V., Chetverikova A. V. The influence of anthropogenic factors on the water resources of industrially developed areas of the Northwestern Federal District (on the example of the Leningrad Region). *Scientific support for the implementation of the Water Strategy of the Russian Federation for the period up to 2020.* Petrozavodsk, July 06-11, 2015. Vol. 1. P. 155–161. (In Russ.).
11. Savostikova O. N., Ushakova O. V., Tregubova L. Yu. Monitoring of Chemical and Biological Composition of Bottom Silt. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal).* 2022. Vol. 101. No. 5. P. 511–514. (In Russ.). https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-5-511-514
12. Naumov Yu.A. On the features of surface water pollution in the Russian Far East. *Ojkumena. Regional researches.* 2021. No. 3. P. 102–112. (In Russ.). https://doi.org/10.24866/1998-6785/2021-3/102-112
13. Zakrutkin V. E., Gibkov E. V., Reshetnyak O. S., Reshetnyak V. N. River sediments as river waters' primary pollution indicator and secondary pollution source in East Donbass coal-mining areas. *Russian Academy of Science news bulletin. Series: Geography.* 2020. Vol. 84. No. 2. P. 259–271. (In Russ.). https://doi.org/10.31857/S2587556620020168
14. Opekunov A. Yu., Opekunova M. G., Jorayeva A. N. Fractionation of metals in bottom sediments of St. Petersburg rivers. *Newsletters of Saint Petersburg University. Earth Science.* 2024. Vol. 69. No. 1. P. 166–184. (In Russ.). https://doi.org/10.21638/spbu07.2024.109
15. Nevaev A. S. Effectiveness analysis of surface reservoirs environmental monitoring methods in conditions of their eutrophication by agricultural facilities. *Agricultural Science of the Euro-North-East.* 2024. Vol. 25. No. 6. P. 969–987. (In Russ.). https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.6.969-987
16. Bijay-Singh, Craswell E. Fertilizers and nitrate pollution of surface and ground water: an increasingly pervasive global problem. *SN Applied Sciences.* 2021. Vol. 3. No. 518. https://doi.org/10.1007/s42452-021-04521-8

17. Sukharevich V. I., Polyak Y. M. Global occurrence of cyanobacteria: causes and effects (Review). *Inland Water Biology.* 2020. No. 13. P. 566–575. https://doi.org/10.1134/S1995082920060140
18. Shchukina D. A., Chukina N. V., Maleva M. G., Borisova G. G. Adaptive reaction of the adventive species *Lemma gibba* to water pollution. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management.* 2020. No. 1. P. 108–123. (In Russ.). https://doi.org/10.35567/1999-4508-2020-1-7
19. Golterman H. L., de Oude N. T. Eutrophication of lakes, rivers and coastal seas. In: water pollution. *Water Pollution.* 1991. Vol. 5/5A. https://doi.org/10.1007/978-3-540-46685-7_3
20. Li C., Shen J., Feng J., Chi L., Wang X. Variations of phosphorus in sediments and suspended particulate matter of a typical mesotrophic plateau lake and their contribution to eutrophication. *Scientific Reports.* 2024. No. 14. P. 26551. https://doi.org/10.1038/s41598-024-77866-w
21. Safiullin E.M., Ladygina O.V., Nasibov T.R., Nasyrova L.A. Investigation of the Volga River Eutrophication on the Basis of Analysis of Biogenic Loads of Yaroslavl River Tributaries Using GIS. *Problems of gathering, treatment and transportation of oil and oil products.* 2025. Vol. 5. No. 157. P. 193–204. (In Russ.). https://doi.org/10.17122/ntj-oil-2025-5-193-204
22. Sazonov A. A., Lisina A. A., Erina O. N., Frolova N. L., Lomakov L. I., Platonov M. M. Synchronous studies of the Volga River water quality. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management.* 2024. No. 5. P. 98–114. (In Russ.). https://doi.org/10.35567/19994508-2024-5-98–114
23. Huang J., Zhang Y., Arhonditsis G. B., Gao J., Chen Q., Peng J. The magnitude and drivers of harmful algal blooms in China's lakes and reservoirs: A national-scale characterization. *Water Research.* 2020. Vol. 181. P. 115902. https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115902
24. Melaram R., Newton A.R., Chafin J. Microcystin contamination and toxicity: implications for agriculture and public health. *Toxins.* 2022. Vol. 14. No. 5. P. 350. https://doi.org/10.3390/toxins14050350
25. Ding Y., Xu H., Deng J., Qin B., He Y. Impact of nutrient loading on phytoplankton: a mesocosm experiment in the eutrophic Lake Taihu, China. *Hydrobiologia.* 2019. No. 829. P. 167–187. https://doi.org/10.1007/s10750-018-3830-6

Сведения об авторах:

Скрипченко Сергей Юрьевич, канд. техн. наук, доцент, кафедра редких металлов и наноматериалов, Физико-технологический институт, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, 620062, г. Екатеринбург ул. Мира, 19; https://orcid.org/0000-0002-7564-886X; e-mail: uran233@mail.ru

Наливайко Ксения Андреевна, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, кафедра редких металлов и наноматериалов, Физико-технологический институт, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, 620062, г. Екатеринбург ул. Мира, 19; https://orcid.org/0000-0001-9483-373X; e-mail: k.a.nalivaiko@urfu.ru

Семенищев Владимир Сергеевич, канд. хим. наук, доцент, кафедра радиохимии и прикладной экологии, Физико-технологический институт, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Россия, 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19; https://orcid.org/0000-0002-5269-2294; e-mail: vovius82@mail.ru

Скрипченко Михаил Сергеевич, учащийся, МАОУ-СОШ № 156, Россия, 620103, г. Екатеринбург ул. Эскадронная, д. 24; https://orcid.org/0009-0002-0332-7837; e-mail: skripa2409@mail.ru

Ульянова Амира Алексеевна, учащаяся, МАОУ Лицей № 88, Россия, 620062, г. Екатеринбург, пр. Ленина, 64А; e-mail: miruse4ka@gmail.com

About the authors:

Sergey Yu. Skripchenko, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Department of Rare Metals and Nanomaterials, Institute of Physics and Technology, B.N. Yeltsin Ural Federal University, Russia, 620062, Mira St., 19, Ekaterinburg; https://orcid.org/0000-0002-7564-886X; e-mail: uran233@mail.ru

Ksenia A. Nalivaiko, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Department of Rare Metals and Nanomaterials, Institute of Physics and Technology, B.N. Yeltsin Ural Federal University, Russia, 620062, Mira St., 19, Ekaterinburg; https://orcid.org/0000-0001-9483-373X; e-mail: k.a.nalivaiko@urfu.ru

Vladimir S. Semenishchev, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Chair of Radiochemistry and Applied Ecology, Institute of Physics and Technology, B.N. Yeltsin Ural Federal University, Russia, 620062, Mira St., 19, Ekaterinburg; https://orcid.org/0000-0002-5269-2294; e-mail: vovius82@mail.ru

Mikhail S. Skripchenko, school student, The State Secondary School № 156, Russia, 620103, Eskadronnaya St., 24, Ekaterinburg; https://orcid.org/0009-0002-0332-7837; e-mail: skripa2409@mail.ru

Amira A. Ulianova, school student, Lyceum № 88, Russia, 620062, Lenin Avenue, 64A, Ekaterinburg; e-mail: miruse4ka@gmail.com

Поступила в редакцию / Received 16.02.2026.
Поступила после рецензирования / Revised 02.03.2026.
Принята к публикации / Accepted 01.04.2026.

УДК 628.193 *https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-2-122-132*

Оригинальная статья/Original paper

О соединениях меди в бассейне реки Терек и необходимости введения региональных ПДК

Ф. А. Атабиева, А. С. Отарова, В. В. Селина

atabieva0812@mail.ru

Высокогорный геофизический институт, г. Нальчик, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Цель исследования – анализ многолетних концентраций меди, одного из приоритетных загрязняющих веществ двойного генезиса в воде рек бассейна р. Терек, и проведение статистического анализа многолетней гидрохимической информации. Актуальность исследований объясняется тем, что не всегда концентрации химических веществ в воде поверхностных водных объектов, сформировавшиеся под влиянием природных факторов, соответствуют требованиям гигиенических или рыбохозяйственных нормативов. Поэтому разработка и принятие региональных предельно допустимых концентраций в таких ситуациях имеет большое значение для улучшения эффективности водоохранных мероприятий. **Методы.** Объектом исследований являются реки бассейна р. Терек – Баксан, Малка, Терек, Урух, Чегем, Черек. Измерения концентраций растворенных форм соединений меди в воде рек проведены с использованием атомно-абсорбционного спектрометра с электротермической атомизацией МГА-915М. Для расчета региональных значений ПДК применялись методики, основанные на оценках непараметрических статистических показателей, позволяющие эффективно учитывать объем рассматриваемых статистических выборок и их изменчивость. **Результаты.** За период 2020–2024 гг. средние концентрации соединений меди в предгорной и равнинной зонах в исследуемых реках изменялись от 1,39 до 6,79 мкг/дм^3. Указанные концентрации превышают нормативы меди (1 мкг/дм^3) для водных объектов рыбохозяйственного назначения. Проведен статистический анализ многолетней гидрохимической информации с использованием методик на основе оценок непараметрических статистических показателей. Рассчитанные региональные ПДК для меди превышают санитарно-гигиенические и рыбохозяйственные нормативы. Необходимость введения региональных ПДК соединений меди для воды рек бассейна р. Терек связана с повышенным естественным содержанием их в воде исследованных рек.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: реки бассейна р. Терек, соединения меди, статистический анализ, региональные показатели, метод Вилькоксона – Манна – Витни.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Атабиева Ф. А., Отарова А. С., Селина В. В. О соединениях меди в бассейне реки Терек и необходимости введения региональных ПДК // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2026. № 2. С. 122–132. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-2-122-132, EDN: XVTSCU

© Атабиева Ф. А., Отарова А. С., Селина В. В., 2026

On copper compounds in the Terek River basin and the need to introduce regional MPCs

Fatimat A. Atabieva, Asiyat S. Otarova, Victoria V. Selina

atabieva0812@mail.ru

Vysokogorny Geophysical Institute, Nalchik, Russia

ABSTRACT

Relevance. The purpose of the study is to analyze long-term concentrations of copper, one of the priority pollutants of dual genesis in the river waters of the Terek River basin, and to conduct a statistical analysis of long-term hydrochemical information. The relevance of the research is explained by the fact that concentrations of chemicals in the water of surface water bodies, formed under the influence of natural factors, do not always meet the requirements of hygienic or fisheries standards. Therefore, the development and adoption of regional MACS in such situations is of great importance for improving the effectiveness of water protection measures. **Methods.** The object of research is the rivers of the Terek River basin – Baksan, Malka, Terek, Urukh, Chegem, Cherek. Concentrations of dissolved forms of copper compounds in river water were measured using an atomic absorption spectrometer with electrothermal atomization "MGA-915M". To calculate the regional MPC values, methods based on estimates of nonparametric statistical indicators were used, which effectively take into account the volume of statistical samples under consideration and their variability. **Results.** During the period 2020-2024, the average concentrations of copper compounds in the foothill and plain zones in the studied rivers varied from 1.39 to 6.79 micrograms/dm3. The indicated concentrations exceed the copper standards (1mcg/dm3) for fishery water bodies. A statistical analysis of long-term hydrochemical information was carried out using methods based on estimates of nonparametric statistical indicators. The calculated regional MACS for copper exceed sanitary and hygienic and fisheries standards. The need to introduce regional maximum permissible concentrations of copper compounds for the river water of the Terek River basin is associated with their increased natural content in the water of the studied rivers.

KEYWORDS: rivers of the Terek River basin, copper compounds, statistical analysis, regional indicators, Wilcoxon-Mann-Whitney method.

FOR CITATION: Atabieva F. A., Otarova A. S., Selina V. V. The content of copper compounds in the Terek River basin and the need to introduce regional maximum permissible concentrations. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2026. No. 2. P. 122–132. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-2-122-132; EDN: XVTSCU

ВВЕДЕНИЕ

Медь (Cu) относится к довольно распространенным элементам и входит в состав большого числа минералов. Медь в природе встречается в виде соединений – оксидов, сульфидов, карбонатов и солей. Большая часть меди (около 80 %) находится в земной коре в соединении с серой, около 15 % – в виде карбонатов, оксидов и силикатов, являющихся продуктами выветри-

вания первичных сульфидных медных руд. Наиболее распространенными из них являются халькопирит $CuFeS_2$, халькозин Cu_2S, ковеллин CuS, куприт Cu_2O, борнит Cu_2FeS_4 и др. [1]. Основным природным источником поступления меди в поверхностные воды являются процессы химического выветривания горных пород и минералов, сопровождающиеся их растворением. Повышенное содержание меди в воде оказывает токсическое воздействие на гидробионты и человека, в связи с этим содержание меди в поверхностных водах нормируется. ПДК растворенных форм меди в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования составляет[1] 1 мг/дм^3, рыбохозяйственного назначения – 0,001 мг/дм^3.

Согласно Водному кодексу РФ[2], одним из основных принципов водного законодательства в нашей стране является бассейновый подход к регулированию водных отношений. Объективная необходимость комплексного управления водными ресурсами, основанного на бассейновом принципе, признана сегодня во всем мире [2].

Согласно информации [3], химический состав поверхностных вод в пределах конкретного бассейнового округа в природных (естественных) условиях характеризуется специфическими особенностями, которые определяются этими естественными условиями и которые должны учитываться при оценках экологического состояния водных объектов. Исследуемые реки относятся к Западно-Каспийскому бассейновому округу – бассейну р. Терек и других, впадающих в Каспийское море. Истоки рек расположены в высокогорье, и некоторая часть рек протекает по горной местности, где отсутствуют антропогенные факторы, т. е. загрязнение происходит за счет естественных природных процессов. Например, на северных склонах Главного Кавказского хребта, в междуречье Баксана и Чегема, а также в верховьях Черека Безенгийского, Черека Балкарского много гранитов, и в зоне их контакта с кристаллическими сланцами и мраморами расположены месторождения меди [4, 5].

Для речных вод практически всей территории бассейна Терека характерны природные концентрации алюминия, железа, меди и марганца, превышающие уровень ПДКрх. В воде некоторых рек отмечается превышение нормативных значений концентрации молибдена, вольфрама, сульфатов, магния, натрия, кальция, нитратов, фосфатов, кремния. Расчетные фоновые концентрации Fe, Al, Cu, Mn, иногда фосфатов, сульфатов и вольфрама (для Баксана) также превышают существующие ПДКрх, что отражает природную специфику данного региона [3].

В настоящее время в качестве критериев нормирования качества природных вод суши применяются одинаковые для всей территории России

1 РД 52.24.465-2011. Массовая концентрация меди в водах. Методика выполнения измерений денситометрическим методом с реактивной индикаторной бумагой. Ростов-на-Дону 2011. 18 с.

2 Водный кодекс Российской Федерации от 03.06.2006 № 74-ФЗ (ред. от 29.12.2025).

нормативы. Они основываются только на виде водопользования и не учитывают региональные особенности химического состава природных вод, зависящих от климатических, гидрологических, физических, биологических и других процессов, протекающих на водосборной площади. Игнорирование такой ситуации приводит к ухудшению эффективности водоохранных мероприятий [6–9]. Цель исследования – анализ многолетних концентраций меди, одного из приоритетных загрязняющих веществ двойного генезиса в воде рек бассейна р. Терек, и проведение статистического анализа многолетней гидрохимической информации. Для расчетов условных фоновых концентраций был использован руководящий документ РД 52.24.622–2019[3], разработанный Гидрохимическим институтом.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Истоки исследуемых рек (Баксан, Малка, Терек, Урух, Чегем, Черек) расположены в ледниках Главного Кавказского и Бокового хребтов. Картосхема пунктов отбора проб приведена на рис. 1. Отбор проводился на каждой реке в двух постоянных створах.

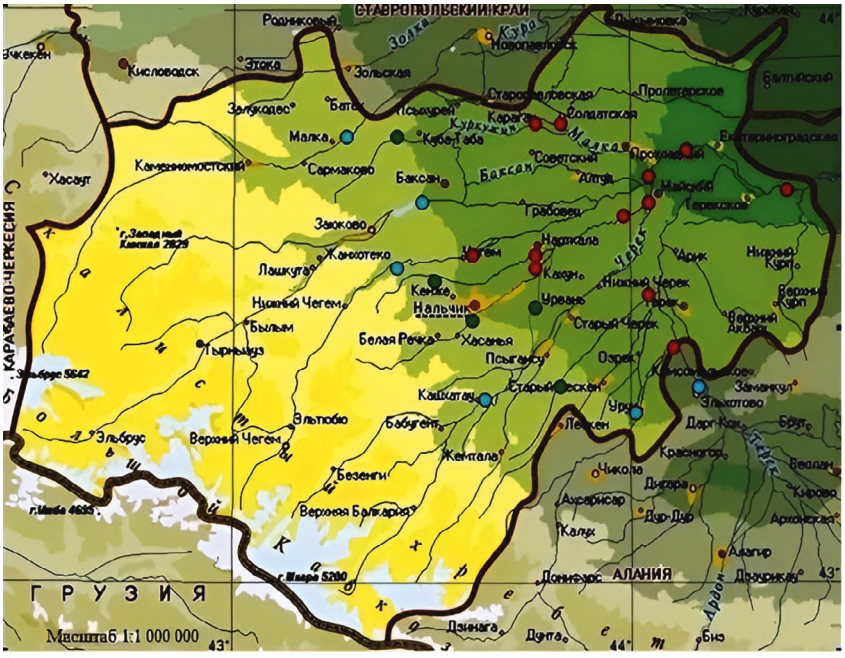
Створ I для каждой реки располагался в предгорной зоне, створ II – в равнинной части. Отборы проб воды проведены 7 раз (в зимнюю межень, во время половодья – на подъеме, пике и спаде; во время летней межени – при наименьшем расходе и прохождении дождевого паводка и осенью); отобраны и проанализированы пробы воды 6 рек в 12 постоянных створах. За 2020–2024 гг. отобрано 420 проб воды, каждый год – по 84 пробы.

В период отбора проб воды в зимнюю межень (февраль) температура воды рек варьировала от +2,4°С до +10,1°С. В летний период (июль) температура воды изменялась от +11,5 °С до +24,9 °С. Пробы воды отбирали согласно РД 52.24.353-2012[4] в заранее подготовленные очищенные полиэтиленовые бутылки. Образцы помещали в портативный холодильник и в охлажденном виде транспортировали в лабораторию для дальнейшего анализа.

На месте отбора портативным кондуктометром HANNA (HI 991300) проводились измерения минерализации, электропроводности, водородного показателя и температуры воды исследуемого водного объекта. Пробы хранили в холодильнике при температуре от +2 до +5 °С. Для определения концентраций растворенных форм тяжелых металлов пробы воды фильтровали через мембранные фильтры с диаметром пор 0,45 мкм. Полученный фильтрат консервировали азотной кислотой из расчета 0,1 мл азотной кислоты на 100 мл воды.

3 РД 52.24.622-2019 Порядок проведения расчета условных фоновых концентраций химических веществ в воде водных объектов для установления нормативов допустимых сбросов сточных вод. Ростов-на-Дону, 2019. 95 с.

4 РД 52.24.353-2012. Отбор проб поверхностных вод суши и очищенных сточных вод. Ростов-на-Дону, 2012.



● – верхний створ на реке ледникового происхождения; ● – верхний створ на реке неледникового происхождения; ● – нижние створы рек

Рис. 1. Картосхема пунктов отбора проб

Fig. 1. Map-diagram of sampling points

Анализы проводили на атомно-абсорбционном спектрометре с электротермической атомизацией МГА-915М[5]. Контроль качества измерений осуществлялся согласно РД 52.54.509-2015[6]. Результаты были получены в аккредитованной лаборатории Высокогорного геофизического института (аттестат аккредитации RA.RU.21АИ34) при выполнении государственной темы «Анализ загрязнения рек Центрального Кавказа тяжелыми металлами и неорганическими соединениями азота по результатам ежегодных наблюдений». В данной статье рассматриваются результаты, полученные в предгорной зоне, т. к. здесь отсутствует антропогенный фактор, влияющий на уровень содержания меди в воде рек.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Геохимические и биоклиматические различия водосборных площадей и разнообразие форм микроэлементов обусловливают сильную вариацию их концентраций в речных водах [10]. Например, согласно табл. 1, средние

5 Методика выполнения измерений массовых концентраций Al, Ba, Be, V, Fe, Cd, Co, Li, Mn, Cu, Mo, As, Ni, Sn, Pb, Se, Sr, Ti, Cr, Zn в природных и сточных водах методом атомно-абсорбционной спектроскопии с использованием атомно-абсорбционного спектрометра с электротермической атомизацией «МГА-915». М., 2009. 36 с.

6 РД 52.54.509-2015. Внутренний контроль качества гидрохимической информации. Ростов-на-Дону, 2015. 77 с.

концентрации растворенных микроэлементов в речных водах водосбора Карского моря (реки Обь и Енисей) [11] близки к средним концентрациям микроэлементов в водах рек мира (1,48 мкг/л) [12], что интерпретируется как результат нивелирования пространственной изменчивости химического состава поверхностных вод вследствие большой площади водосборов. Концентрация меди в речной воде р. Чамбал (Индия) и ее притоках колеблется в пределах 0,21–42,49 мкг/л [13]. Исследование концентраций меди [14] в 118 водных объектах Казахстана за 1997–2017 гг. выявило, что среднее содержание меди имеет диапазон от 1,6 до 158,2 мкг/л. Содержание меди в воде истока р. Баксан [15], расположенного на горе Эльбрус в ледниках Азау Большой и Азау Малый, достигает 5,8 мкг/л, что, по-видимому, связано с породами, обогащенными этим микроэлементом. Таким образом, концентрации соединений меди в поверхностных водных объектах разных регионов изменяются значительно, что объясняется природными и антропогенными факторами.

Таблица 1. Средняя концентрация растворимых форм соединений меди в воде рек разных регионов мира, мкг/л

Table 1. The average concentration of soluble forms of copper compounds in the water of rivers in different regions of the world, mcg/l

Водный объект	р. Обь	р. Енисей	р. Баксан	р. Чамбал	Реки Казахстана	Реки мира	Реки мира	Реки мира
Средняя концентрация, мкг/л	1,63	1,11	5,8	34,11	1,6–158,2	3	1,48	7
Ссылки	[11]	[11]	[15]	[13]	[14]	[16]	[12]	[10]

Исследуемые реки по водному режиму по классификации Б. Д. Зайкова относятся к классу рек с половодьем в теплую часть года – тянь-шаньскому типу, где половодье связано с таянием ледников. Физико-географические и геологические характеристики бассейна значительно влияют на концентрацию веществ в воде рек. Анализ внутригодового распределения меди

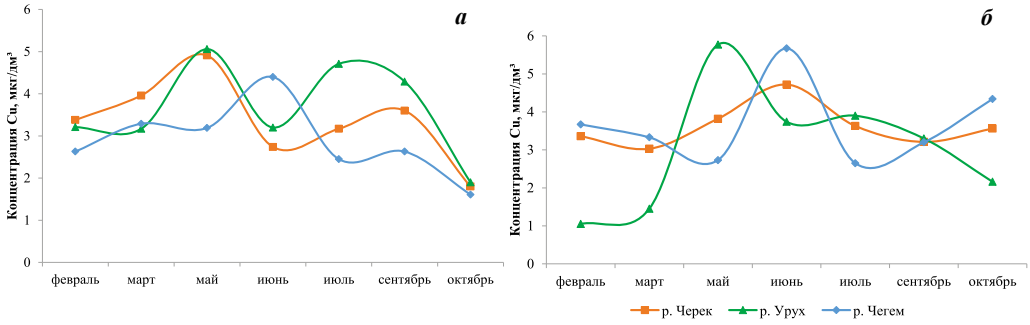


Рис. 2. Осредненное внутригодовое распределение уровня содержания соединений меди в воде рек Чегем, Урух, Черек в предгорной (*а*) и равнинной (*б*) зонах за 2020–2024 гг.

Fig. 2. Average intraannual distribution of the level of copper compounds in the water of the Chegem, Urukh, and Cherek rivers in the foothill (*a*) and plain (*б*) zones for 2020–2024

проводился по данным среднемноголетних уровней концентраций за 2020–2024 гг. (рис. 2, рис. 3) в разные фазы водного режима (в зимнюю межень; во время половодья – на подъеме, пике и спаде; во время летней межени – при наименьшем расходе и прохождении дождевого паводка; и осенью). Во внутригодовом распределении соединений меди максимальные концентрации в предгорной зоне наблюдаются в воде р. Урух (рис. 2*а*) во время подъема половодья (май), минимальные – в октябре. На равнине в реках Терек, Баксан, Малка (рис. 3*а*, 3*б*) минимальные концентрации меди отмечены в большинстве случаев в июле.

На июль приходится пик половодья в результате таяния ледников и сезонного снежного покрова, что приводит к разбавлению воды рек и значительному уменьшению минерализации и концентраций соединений меди.

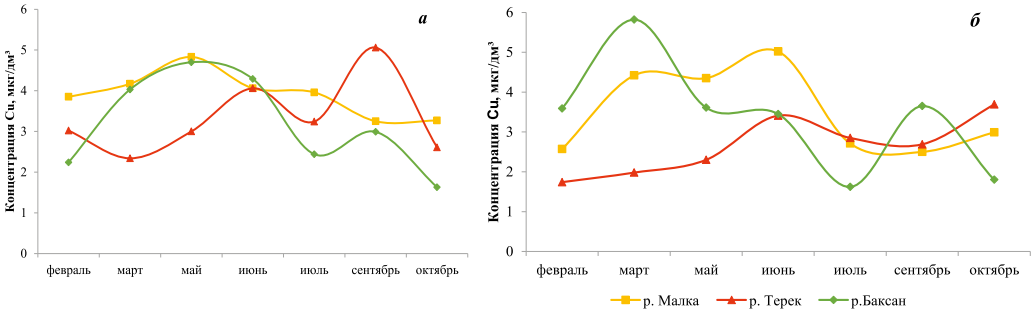


Рис. 3. Осредненное внутригодовое распределение уровня содержания соединений меди в воде рек Терек, Баксан, Малка в предгорной (*а*) и равнинной (*б*) зонах за 2020–2024 гг.

Fig. 3. Average intraannual distribution of the level of copper compounds in the water of the Terek, Baksan, and Malka rivers in the foothill (*a*) and plain (*б*) zones for 2020–2024

Следует отметить, что минимальные концентрации соединений меди в пик половодья превышают значения ПДК. Вниз по течению рек каких-либо закономерностей по изменчивости уровня содержания соединений меди не выявлено.

Таблица 2. Среднегодовые значения концентраций растворимых форм соединений меди в воде рек бассейна р. Терек в предгорной зоне за период 2022–2024 гг.

Table 2. Average concentrations of soluble forms of copper compounds in the river water of the Terek River basin in the foothill and plain zones for the period 2022–2024

Название реки	Среднегодовые значения концентраций Хср, мкг/дм³		
	2022 г.	2023 г.	2024 г.
	Створ I	Створ I	Створ I
р. Чегем	2,08	4,00	2,68
р. Урух	2,75	6,36	1,57
р. Баксан	3,43	4,32	1,85
р. Черек	2,46	4,85	2,23
р. Малка	2,87	5,61	3,47
р. Терек	2,70	5,75	1,61

Среднегодовые значения концентраций растворимых форм соединений меди в воде предгорной части рек бассейна р. Терек, полученные за период 2022–2024 гг., представлены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, максимальные концентрации соединений меди наблюдаются в р. Урух. Диапазон колебаний составляет от 1,57 до 6,36 мкг/дм^3, что выше ПДК согласно СанПин 1.2.3685-21[7]. Необходимо отметить, что Северо-Кавказский регион не относится к промышленно развитым регионам, в горных районах Северного Кавказа антропогенные источники загрязнения водоемов тяжелыми металлами фактически отсутствуют [17]. На исследуемой территории не функционируют сельскохозяйственные предприятия, обогатительные фабрики, металлургические заводы, предприятия химической промышленности, за исключением Тырныаузского горно-обогатительного комбината, который давно законсервирован.

Условные фоновые концентрации соединений меди, рассчитанные по методике РД 52.24.622-2019[1], представлены в табл. 3. Размах вариации значений составляет от 3,39 до 4,22 мкг/дм^3.

Таблица 3. Значения условных фоновых концентраций соединений меди в реках бассейна Терека

Table 3. Values of conditional background concentrations of copper compounds in the rivers of the Terek River basin

Река	$C_{фон}$ по РД 52.24.622-2019, мкг/дм^3	Река	$C_{фон}$ по РД 52.24.622-2019, мкг/дм^3
Черек	3,81	Чегем	3,84
Малка	4,22	Урух	3,65
Терек	3,39	Баксан	3,82

Таким образом, природный фон концентраций соединений меди в воде исследованных рек превышает общепринятые ПДКрх, что свидетельствуют о необходимости введения региональных или бассейновых предельно допустимых концентраций по соединениям меди для воды рек бассейна Терека.

ВЫВОДЫ

Изменение средних концентраций меди в реках Баксан, Малка, Терек, Урух, Чегем, Черек в их предгорной и равнинной зонах за период 2020–2024 гг. характеризуется диапазоном 1,39–6,79 мкг/дм^3. Максимальные значения концентраций соединений меди наблюдаются в период подъема половодья (май, июнь) и объясняются тем, что в эти месяцы на территории водосборов выпадает наибольшее количество осадков, и, вероятно, в силу влияния склоновых процессов в воду рек попадает большое количество выветриваемых горных пород, содержащих медь. В большинстве случаев ми-

7 СанПин 1.2.3685-21.«Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания». 988 с.

нимальные концентрации отмечены в июле. На этот месяц приходится пик половодья в результате таяния ледников и сезонного снежного покрова, что приводит к разбавлению воды рек и значительному уменьшению минерализации и концентраций соединений меди, тем не менее их концентрации превышают ПДКрх. Условные фоновые концентрации соединений меди в предгорной части исследованных рек, рассчитанные по РД 52.24.622-2019, изменяются от 3,39 до 4,22 мкг/дм^3.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вольфсон Ф. И., Дружинин А. В. Главнейшие типы рудных месторождений. М.: Недра, 1982. 383 с.
2. Donzier J.-F., Ait Kadi M. The handbook for management and restoration of aquatic ecosystems in river and lake basins. March, 2015. 96 p.
3. Янин Е. П., Кузьмич В. Н., Иваницкий О. М. Региональная природная неоднородность химического состава поверхностных вод суши и необходимость ее учета при оценках их экологического состояния и интенсивности техногенного загрязнения // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. 2016. № 6. С. 3–72. EDN: WBALCN
4. Кайгородова Е. Н., Лебедев В. А., Чернышев И. В., Якушев А. И. Проявления неоген-четвертичного магматизма в Восточной Балкарии (Северный Кавказ, Россия): изотопно-геохронологические данные // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2021. Т. 496. № 1. С. 36–44. https://doi.org/10.31857/S2686739721010096
5. Парада С. Г., Маркин М. Ю., Столяров В. В., Чотчаев Х. О. Сопоставление химико-аналитических и геологических данных по золотоносных интервалам буровых скважин в пределах Зыгыркольской зоны Тырныаузского рудного поля // Геология и геофизика Юга России. 2019. № 9 (2). С. 56–68. https://doi.org/10.23671/VNC.2019.2.31977
6. Веницианов Е.В., Мирошниченко С. А., Лепихин А.П., Губернаторова Т. Н. Разработка и обоснование региональных показателей качества воды по содержанию тяжелых металлов для водных объектов бассейна Верхней Камы // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2015. № 3. С. 50–64. EDN: TYIJGX
7. Тимофеева Л. А., Фрумин Г. Т. Проблемы нормирования качества поверхностных вод // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2015. № 38. С. 215–229. EDN: TRSAWD
8. Селезнев В. А., Селезнева А. В., Беспалова К. В. Разработка бассейновых нормативов качества воды (на примере водных объектов Нижней Волги) // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2013. № 2. С. 42–53.
9. Возняк А. А., Лепихин А. П. Разработка региональных ПДК: необходимость, методика, пример // Географический вестник. 2018. № 2 (45). С. 103–115. https://doi.org/10.17072/2079-7877-2018-2-103-115
10. Добровольский В. В. Основы биогеохимии: учеб. пособие для геогр., биол., геолог., с.-х. спец. вузов. М.: Высш. шк., 1998. 413 с.
11. Савенко А. В., Савенко В. С., Покровский О. С. Новые данные по содержанию растворенных микроэлементов в водах рек российской Арктики // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2020. Т. 491. № 2. С. 82–88. https://doi.org/10.31857/S2686739720040167

12. Gaillardet J., Viers J., Dupre B. // Treatise on Geochemistry. Vol. 5. Amsterdam: Elsevier-Pergamon, 2004. P. 225–272.
13. Kapil Shrotil, Singh M. K., Jain V. K. Sediment Analysis of Some Physico-chemical Parameters of River Chambal near National Chambal Sanctuary Region // Journal of Emerging Technologies and Innovative Research. June 2018. Vol. 5. Iss. 6. P. 559–566.
14. Krupa E., Barinova S., Romanova S. The Role of Natural and Anthropogenic Factors in the Distribution of Heavy Metals in the Water Bodies of Kazakhstan // Turkish Journal of Fish and Aquatic Science. 19 (8). P. 707–718.
15. Ермакова В. В., Тютикова С. Ф., Дегтярева А. П., Данилова В. Н., Гуляева У. А., Догадкина Д. Н. Формирование биогеохимических аномалий в бассейне р. Баксан // Геохимия. 2020. Т. 65. № 10. С. 955–968. https://doi.org/10.31857/S0016752520100064
16. Bowen H. J. M. Environmental Chemistry of the Elements. Academic Press: London etc., 1979. 317 p.
17. Дементьев М. С., Дементьева Д. М. Проблема оценки фонового содержания тяжелых металлов водного тракта Кубань – Маныч // Гигиена и санитария. 2017. 96 (10). С. 946–949.

REFERENCES

1. Wolfson F. I., Druzhinin A. V. The main types of ore deposits. Moscow: Nedra. 1982. 383 p.
2. Donzier J.-F. , Ait Kadi M. The handbook for management and restoration of aquatic ecosystems in river and lake basins. March 2015. 96 p.
3. Yanin E. P., Kuzmich V. N., Ivanitsky O. M. Regional natural heterogeneity of the chemical composition of land surface waters and the need to take it into account when assessing their ecological status and the intensity of anthropogenic pollution. *Problems of the environment and natural resources.* 2016. No. 6. P. 3–72. EDN: WBALCN
4. Kaigorodova E. N., Lebedev V. A., Chernyshev I. V., Yakushev A. I. Manifestations of Neogene-Quaternary magmatism in Eastern Balkaria (North Caucasus, Russia): isotopic and geochronological data. *Reports of the Russian Academy of Sciences. Earth Sciences*. 2021. Vol. 496. No. 1. P. 36–44. https://doi.org/10.31857/S2686739721010096
5. Parada S. G., Markin M. Yu., Stolyarov V. V., Chotchaev H. O. Comparison of chemical-analytical and geological data on gold-bearing intervals of drilling wells within the Zygyrkol zone of the Tyrnyauz ore field. *Geology and geophysics of the South of Russia*. 2019. No. 9 (2). P. 56–68. https://doi.org/10.23671/VNC.2019.2.31977
6. Venitsianov E. V., Miroshnichenko S. A., Lepikhin A. P., Gubernatorova T. N. Development and substantiation of regional water quality indicators for heavy metal content for water bodies in the Upper Kama basin. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management.* 2015. No. 3. P. 50–64. EDN: TYIJGX
7. Timofeeva L. A., Frumin G. T. The problem of rationing the quality of surface waters. *Scientific notes of the Russian State Hydro/meteorological University*. 2015. № 38. P. 215–229. EDN: TRSAWD
8. Seleznev V. A., Selezneva A. V., Bespalova K. V. Development of basin standards of water quality (on the example of water bodies of the lower Volga). *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management.* 2013. No. 2. P. 42–53.
9. Wozniak A. A., Lepikhin A. P. Development of regional MPCs: necessity, methodology, example. *Geographical Bulletin.* 2018. No. 2 (45). P. 103–115. https://doi.org/10.17072/2079-7877-2018-2-103-115
10. Dobrovolsky V. V. Fundamentals of biogeochemistry: textbook for geography, biology, geology, agricultural sciences, special universities. Moscow: Higher School of Economics, 1998. 413 p.

11. Savenko A. V., Savenko V. S., Pokrovsky O. S. New data on the content of dissolved trace elements in the waters of rivers of the Russian Arctic. *Reports of the Russian Academy of Sciences. Geosciences.* 2020. Vol. 491. No. 2. P. 82–88. https://doi.org/10.31857/S2686739720040167
12. Gaillardet J., Viers J., Dupre B. *Treatise on Geochemistry*. Vol. 5. Amsterdam: Elsevier-Pergamon. 2004. P. 225–272.
13. Kapil Shrotil, Singh M. K., Jain V. K. Sediment Analysis of Some Physico-chemical Parameters of River Chambal near National Chambal Sanctuary Region. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*. June 2018. Vol. 5. Iss. 6. P. 559–566.
14. Krupa E., Barinova S., Romanova S. The Role of Natural and Anthropogenic Factors in the Distribution of Heavy Metals in the Water Bodies of Kazakhstan. *Turkish Journal of Fish and Aquatic Science.* 19 (8). P. 707–718.
15. Ermakova V. V., Tyutikova S. F., Degtyareva A. P., Danilova V. N., Gulyaeva U. A., Dogadkina D. N. Formation of biogeochemical anomalies in the Baksan river basin. *Geochemistry.* 2020. Vol. 65. No. 10. P. 955–968. https://doi.org/10.31857/S0016752520100064
16. Bowen H. J. M. Environmental Chemistry of the Elements. Academic Press: London etc., 1979. 317 p.
17. Dementyev M. S., Dementyeva D. M. The problem of assessing the background content of heavy metals in the Kuban – Manych waterway. *Hygiene and sanitation*. 2017. 96 (10). P. 946–949.

Сведения об авторах:

Атабиева Фатимат Адраевна, канд. хим. наук, руководитель испытательного лабораторного центра, ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», Россия, 360001, г. Нальчик, пр-т Ленина, 2; https://orcid.org/0000-0002-4452-0310; e-mail: atabieva0812@mail.ru

Отарова Асият Салиховна, младший научный сотрудник испытательного лабораторного центра, ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», Россия, 360001, Нальчик, пр-т Ленина, 2; https://orcid.org/0000-0001-5623-7793; e-mail: otarova08@mail.ru

Селина Виктория Валерьевна, стажер-исследователь испытательного лабораторного центра, ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», Россия, 360001, Нальчик, пр-т Ленина, 2; e-mail: selina1981@bk.ru

About the authors:

Fatimat A. Atabieva, Candidate of Chemical Sciences, Head, Testing Laboratory Center, Vysokogorny Geophysical Institute, 2, Lenin Ave., Nalchik, 360001, Russia; https://orcid.org/0000-0002-4452-0310; e-mail: atabieva0812@mail.ru

Asiyat S. Otarova, Junior Researcher, Testing Laboratory Center, Vysokogorny Geophysical Institute, 2, Lenin Ave., Nalchik, 360001, Russia; https://orcid.org/0000-0001-5623-7793; e-mail: otarova08@mail.ru

Victoria V. Selina, Intern Researcher at the Testing Laboratory Center, Vysokogorny Geophysical Institute, 2 Lenin Ave., Nalchik, 360001, Russia; e-mail: selina1981@bk.ru

Поступила в редакцию / Received 12.12.2025.
Поступила после рецензирования / Revised 27.02.2026**.**
Принята к публикации / Accepted 13.04.2026.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Редакторы: Т. М. Принцева, В. А. Федотов
Дизайн С. Ю. Дорохов
Перевод: А. Б. Кочев, И. А. Софронова
Подписано в печать 17.04.2026. Дата выхода в свет 04.05.2026.
Формат 70x100 1/16. Усл. печ. л. 7,5. Тираж 100 экз. Цена свободная.
Отпечатано в типографии ООО «Принт»,
юридический адрес: 426035, Удмуртская Республика, г. Ижевск, ул. Тимирязева, д. 5, помещ. 5.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Manuscripts are reviewed and edited in RosNIIVKh editorial office.

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

Editors: T. M. Printseva, V. A. Fedotov
Design S. Y. Dorokhov
Translation: A. B. Kochev, I. A. Sofronova
Signed for publication. 17.04.2026. Data of issue 04.05.2026
Format 70x100 1/16. Conditional printing sheets: 7.5. Edition 100 copies. Price free.
Printed in OOO "Print" printing house,
legal address: ul. Timiryazeva, 5–5, Izhevsk, 426035, Udmurt Republic, Russia

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

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

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

ФГБУ РОССИЙСКИЙ НИИ КОМПЛЕКСНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ И ОХРАНЫ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

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

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

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

Выходит с 1999 года 6 раз в год.

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

© ФГБУ РосНИИВХ

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

© FGBU RosNIIVKh

Индекс / Index 39076

