

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

ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО РОССИИ:

ПРОБЛЕМЫ, ТЕХНОЛОГИИ, УПРАВЛЕНИЕ

WATER SECTOR OF RUSSIA:

PROBLEMS, TECHNOLOGIES, MANAGEMENT

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
SCIENTIFIC/PRACTICAL JOURNAL

№ 5, 2024



РОСВОДРЕСУРСЫ

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



УЧРЕДИТЕЛЬ ЖУРНАЛА «ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО РОССИИ:
ПРОБЛЕМЫ, ТЕХНОЛОГИИ, УПРАВЛЕНИЕ»

РОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ КОМПЛЕКСНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
И ОХРАНЫ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ (ФГБУ РосНИИВХ)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

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

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Лепихин А.П., д-р геогр. наук, профессор, Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов (Пермь, Россия)

РЕДКОЛЛЕГИЯ

Беляев С.Д., д-р геогр. наук, Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов (Екатеринбург, Россия)

Болгов М.В., д-р техн. наук, профессор, Институт водных проблем РАН (Москва, Россия)

Борисова Г.Г., д-р биол. 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)

Зиновьев А.Т., д-р техн. наук, Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения РАН (Барнаул, Россия)

Козлов Д.В. профессор, д-р техн. наук, 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., д-р техн. наук, профессор, Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов (Уфа, 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, профессор, Институт озероведения РАН, (Санкт-Петербург, Россия)

Ясинский С.В., д-р геогр. наук, Институт географии РАН (Москва, Россия)

МЕЖДУНАРОДНЫЙ СОВЕТ

Габриелян Б.К., д-р биол. наук, профессор, Национальная академия наук Республики Армения (Ереван, Республика Армения)

Гюнтер Блешль, профессор, Институт гидротехники и управления водными ресурсами (Вена, Австрия)

Драган А. Савич, профессор, Центр водных систем Университета Эксетера (Эксетер, Великобритания)

Карло Гуальтери, профессор, Университет Неаполя им. Фридриха II (Неаполь, Италия)

Кью Джи Ванг, профессор, Университет Мельбурна (Мельбурн, Австралия)

Слободан П. Симонович, профессор, Университет Западного Онтарио (Онтарио, Канада)

ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЙ РЕДАКТОР

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

ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО РОССИИ:

ПРОБЛЕМЫ, ТЕХНОЛОГИИ, УПРАВЛЕНИЕ

WATER SECTOR OF RUSSIA:

PROBLEMS, TECHNOLOGIES, MANAGEMENT

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

SCIENTIFIC/PRACTICAL JOURNAL

№ 5, 2024

ЕКАТЕРИНБУРГ
YEKATERINBURG



EDITORIAL BOARD

CHIEF EDITOR

Aleksey E. Kosolapov, Professor, Dr. Sc. (Technical), Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection (Ekaterinburg, Russia)

DEPUTY CHIEF EDITOR

Anatoliy P. Lepikhin, Dr. Sc. (Geographical), Professor, Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection Kama Branch, Institute of Mining of the Russian Academy of Sciences (Perm, Russia)

MEMBERS OF THE EDITORIAL BOARD

Sergey D. Belayev, Dr. Sc. (Geographical), Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection (Ekaterinburg, Russia)

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

Galina G. Borisova, Dr. Sc. (Biological), 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)

Aleksandr T. Zinoviyev, 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. Rummyantsev, 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, Dr. Sc. (Technical), Professor, Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection (Ufa, 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), Professor, 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)

Q.J. 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 ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ

Опыт и проблемы применения на практике сведений,
включенных в государственный водный реестр
И.В. Жерелина, В.А. Жоров, И.С. Постнова, Н.В. Поломошнова, О.В. Брютова.....5

ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ, ВОДНЫЕ ОБЪЕКТЫ

Оценка стационарности годового и сезонного стока рек бассейна Верхней Оби
С.Ю. Самойлова, О.В. Ловицкая, А.Б. Голубева.....21

Самоочищение водных объектов урбанизированных территорий
(на примере реки Дачная)
М.В. Шамова, Д.И. Исаев.....39

Влияние промерзания почв речных бассейнов на процессы формирования
пространственной и временной изменчивости зимнего и весеннего стока
рек Башкортостана
В.И. Барышев, И.Л. Калужный.....51

Динамика содержания соединений азота и фосфора
в Рыбинском водохранилище за многолетний период
И.Э. Степанова.....69

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Применение гидрохимического моделирования при выявлении источника
воздействия на подземную гидросферу в условиях калийного производства
А.А. Борисов.....82

Синхронные исследования качества воды реки Волги
А.А. Сазонов, А.А. Лисина, О.Н. Ерина, Н.Л. Фролова, О.И. Ломаков, М.М. Платонов.....97

Требования к оформлению материалов.....115

CONTENT

WATER RESOURCES MANAGEMENT

Experience and issues of practical application of the data included in State Water Register
I.V. Zherelina, V.A. Zhorov, I.S. Postnova, N.V. Polomoshnova, O.V. Brutova.....5

WATER RESOURCES, WATER BODIES

Assessment of stationarity of annual and seasonal river flow in the Upper Ob basin
S.Y. Samoilova, O.V. Lovtskaya, A.B. Golubeva.....21

Self-purification of water boies on urbanized territories
(with the Dachnaya River as an example)
M.V. Shmakova, D.I. Isaev.....39

Influence of soils freezing of river basins on processes of formation of spatial
and temporal variability of winter and spring flow of Bashkortostan rivers
V.I. Baryshev, I.L. Kalyuzhny.....51

Dynamics of the nitrogen and phosphorous content
in the Rybinsk Reservoir over the many-year period
I.E. Stepanova.....69



ECOLOGICAL ASPECTS OF WATER/ECONOMIC ACTIVITIES

The use of hydro/chemical modeling in identifying the source of impact
on the underground hydrosphere in conditions of potash
A.A. Borisov.....82

Synchronous studies of the Volga River water quality
A.A. Sazonov, A.A. Lisina, O.N. Erina, N.L. Frolova, L.I. Lomakov, M.M. Platonov.....97

Requirements to the material to be accepted.....115

Опыт и проблемы применения на практике сведений, включенных в государственный водный реестр

И.В. Жерелина¹  , В.А. Жоров², И.С. Постнова², Н.В. Поломошнова²,
О.В. Брютова²

 zherelina@mail.ru

¹ФГБОУ ВО «Алтайский государственный университет», г. Барнаул, Россия

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

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Эффективность исполнения государственных услуг и выполнения государственных функций в области управления использованием и охраной водных объектов России в значительной степени определяет объективность и достоверность сведений, включенных в информационные базы данных, одной из которых является автоматизированная информационная система «Государственный водный реестр» (ГВР). Содержащиеся в ГВР устаревшие сведения о части водных объектов, несовершенство механизмов ее пополнения данными о неизученных водных объектах, процедуры изменения и исключения неактуальных сведений, а также типичные технические вопросы, возникающие при установлении соответствий «многое ко многим», осложняют использование на практике включенных в систему сведений. Серьезные проблемы создает несоответствие наименования и типа водных объектов, внесенных в ГВР и государственный каталог географических названий (ГКГН). **Методы.** На основе 15-летнего опыта практической работы с включенными в ГВР сведениями на примере конкретных водных объектов определены недостатки систематизации данных, а также обозначены некоторые проблемы ведения государственной информационной системы. **Результаты.** Установлено, что содержащиеся в государственном водном реестре устаревшие сведения о водных объектах снижают эффективность управления водопользованием. Предложены новые направления совершенствования ГВР и его синхронизации с ГКГН.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: цифровая трансформация, государственный водный реестр, государственный каталог географических названий, информационное обеспечение управления использованием и охраной водных объектов.

Для цитирования: Жерелина И.В., Жоров В.А., Постнова И.С., Поломошнова Н.В., Брютова О.В. Опыт и проблемы применения на практике сведений, включенных в государственный водный реестр // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 5. С. 5–20. DOI: 10.35567/19994508-2024-5-5-20.

Дата поступления 18.12.2023.

EXPERIENCE AND ISSUES OF PRACTICAL APPLICATION OF THE DATE INCLUDED IN STATE WATER REGISTER

Irina V. Zherelina¹  , Viktor A. Zhorov², Irina S. Postnova²,
Natalia V. Polomoshnova², Olga V. Brutova²

 zherelina@mail.ru

¹Altay State University, Barnaul, Russia

²OOO Center of Engineering Technologies, Barnaul, Russia

ABSTRACT

Relevance. Reliability and authenticity of the information included into information data bases (one of them is the “State Water Register” (SWR) automatic information system)

© Жерелина И.В., Жоров В.А., Постнова И.С., Поломошнова Н.В., Брютова О.В., 2024

significantly determine effectiveness of the state-provided services in the sphere of the Russian water resources use and protection. Outdated data on water bodies contained in SWR, as well as imperfectness of the mechanisms of its replenishment with data on unstudied water bodies, absence of legally valid order of procedure for amendment and exclusion of unnecessary data, as well as typical technical issues concerning the “many-to-many” relations make the practical use of the above data difficult. Discrepancies between names and types of water bodies included in SWR and State Catalogue of Placenames (SCP) create serious problems. **Methods.** Based on the 15-year experience of practical work with SWR information we have identified drawbacks of the date systematization with the examples of specific water bodies. At the same time, we have revealed some problems of managing this state information system. **Results.** We have stated that outdated information on water bodies contained in State Water Register decreases water use management effectiveness. We have proposed novel directions of SWR updating and its synchronizing with SCP.

Keywords: digital transformation, State Water Register, State Catalogue of Placenames, Information support of water bodies management and protection.

For citation: Zherelina I.V., Zhorov V.A., Postnova I.S., Polomoshnova N.V., Brutova O.V. Experience and issues of practical application of the date included in State Water Register. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2024. No. 5. P. 5–20. DOI: 10.35567/19994508-2024-5-5-20.

Received 18.12.2023.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из национальных целей развития Российской Федерации на период до 2030 года определена цифровая трансформация – достижение «цифровой зрелости» ключевых отраслей экономики, в т. ч. государственного управления¹ [1]. В соответствии с ведомственной программой цифровой трансформации Федерального агентства водных ресурсов на период 2021–2023 гг. разрабатывается единая цифровая платформа «Водные данные»² [2]. Важнейшим ее сегментом является «Государственный водный реестр», формируемый на основе сведений, в настоящее время входящих в состав автоматизированной информационной системы «Государственный водный реестр» (далее – АИС ГВР) [1, 2].

АИС ГВР является средством ведения на электронных носителях государственного водного реестра (далее – ГВР) – систематизированного свода документированных сведений о водных объектах разных форм собственности [2; 3, ч. 1 ст. 31]. ГВР создан на основе данных государственного водного кадастра РФ по состоянию на 1 января 2007 г.³, фактически – преимущественно на основе данных гидрологической изученности 1960-х годов. В результате естественных процессов, а также хозяйственной деятельности на водосборах, берегах водных объектов изменились их морфометрические характеристики,

¹ О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года: Указ Президента РФ от 21 июля 2020 г. № 474. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

² Ведомственная программа цифровой трансформации Федерального агентства водных ресурсов на 2021–2023 годы: утв. Приказом Росводресурсов от 16 декабря 2020 г. № 297. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

³ О порядке ведения государственного водного реестра: Постановление Правительства РФ от 28 апреля 2007 г. № 253 (ред. от 18.02.2023). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

как следствие, включенные в ГВР сведения не всегда отражают современное состояние водных объектов.

Процедура внесения сведений по изученным и неизученным водным объектам определена Приказом МПР России от 02.11.2007 № 284⁴. Однако большую проблему создает несовершенство этой процедуры в части изменения или исключения сведений о морфометрических характеристиках и типе водных объектов, измененных или утраченных в результате хозяйственной деятельности. Немало вопросов возникает и вследствие несоответствия сведений о водных объектах, включенных в ГВР и «Государственный каталог географических названий» (далее – ГКГН).

Таким образом, данные АИС ГВР, включаемые в единую цифровую платформу «Водные данные», нуждаются в актуализации и согласовании с ГКГН в целях информационного обеспечения комплексного использования водных объектов, целевого использования водных объектов, их охраны, планирования и разработки мероприятий по предотвращению негативного воздействия вод и ликвидации его последствий.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

Внесение сведений о неизученных водных объектах

Согласно данным Минприроды России, по территории Российской Федерации протекает более 2,5 млн рек и насчитывается более 2,7 млн озер [4]. По состоянию на 2018 г. в ГВР включены сведения о 142,3 тыс. рек и 20,7 тыс. озер [5], что составляет, соответственно, 5,7 % и 0,8 % от общего количества рек и озер, расположенных на территории России.

Сведения о неизученных водных объектах предоставляются Федеральной службой по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (далее – Росгидромет) в Федеральное агентство водных ресурсов (далее – Росводресурсы) по мере их обследования⁴ [п. 5]. Однако по причине кадрового дефицита и ресурсного обеспечения в 2019 г. были внесены сведения только о 4 водотоках, в 2020 г. – о 10 водотоках и 18 водоемах. В 2021– 2022 гг. активность в области предоставления сведений о неизученных водных объектах для внесения в ГВР проявили только Приморское и Центрально-Черноземное УГМС [6].

Существуют иные источники пополнения сведений ГВР данными о неизученных водных объектах. Так, более 760 организаций имеют лицензии на осуществление деятельности в области гидрометеорологии и смежных с ней областях (далее – лицензия Росгидромета), и в числе иных работ проводят исследование гидрологических характеристик окружающей среды⁵ [11]. Результаты их работ, после прохождения экспертизы (проверки на достоверность) в организациях системы Росгидромета, например, его территориальных орга-

⁴ Порядок представления и состав сведений, представляемых Федеральной службой по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды для внесения в государственный водный реестр (ред. от 07.02.2019): утв. Приказом МПР России от 2 ноября 2007 № 284. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

⁵ Главный реестр лицензий на осуществление деятельности в области гидрометеорологии и смежных с ней областях (за исключением указанной деятельности, осуществляемой в ходе инженерных изысканий, выполняемых для подготовки проектной документации, строительства). URL: <https://www.meteorf.gov.ru/licenses/hydromet> (дата обращения: 11.12.2023).

нах, могли бы стать существенным источником пополнения сведений о неизученных водных объектах.

Еще один источник данных – результаты оказания услуг по установлению границ водоохранных зон (далее – ВОЗ) и прибрежных защитных полос (далее – ПЗП) водных объектов. В соответствии с ч. 1 ст. 65 Водного кодекса РФ, ВОЗ устанавливаются от береговой линии (далее – БЛ), в этой связи ее определение является обязательным видом работ с последующим внесением сведений в ГВР и Единый государственный реестр недвижимости (далее – ЕГРН). Однако внесение в ГВР сведений о неизученных водных объектах, для которых устанавливаются БЛ и ВОЗ, не является обязательным условием работ и не оплачивается исполнителям. Как следствие, в ГВР размещается информация о БЛ и ВОЗ юридически не существующих водных объектах. Анализ нескольких крупных государственных контрактов по установлению границ ВОЗ и ПЗП водных объектов показал, что в половине случаев в ГВР включены сведения о «несуществующих» водных объектах, т. е. тех, о которых отсутствуют сведения в форме 1.9-гвр.

Оперативное пополнение ГВР сведениями о неизученных водных объектах снимет ряд проблем при подготовке и принятии решения о предоставлении водного объекта в пользование [3, ст. 11], наименование и идентификационные характеристики которого водопользователь должен указать в заявлении согласно сведениям, содержащимся в ГВР⁶ [пп. 7, 9].

Уточнение наименования и типа водного объекта

Официальными источниками данных для уточнения наименования и типа водного объекта являются ГВР, как систематизированный свод документированных сведений о водных объектах [3, ч. 1 ст. 31], и ГКГН, созданный для обеспечения единообразного и устойчивого употребления в Российской Федерации наименований географических объектов и их сохранения⁷ [ст. 10]. В связи с различным назначением этих баз данных, формируемых разными государственными органами на основе различных сведений, поступающих из разных источников, нередко один и тот же водный объект имеет разное наименование и тип, например, р. Едет – р. Едетка, р. Берешь (Береж) – р. Береш, р. Борсук – р. Барсук, р. Ирбо – р. Ирбэ, р. Джа Валган – р. Дявалгал и т. п.

Кроме того, ряд водотоков в ГВР имеют двойное наименование, где в скобках приведено название ее правой или левой составляющей, например, Уленчеть (Прав. Уленчеть), Ича (Прав. Ича), Хантайка (Хибарба), Соленая (Хакдыбира, Делингдэ), Гонда (Бол. Гонда). Длина основной реки определяется с учетом длины ее основной составляющей. В то же время на цифровой картографической основе и в ГКГН основная река и ее самостоятельные водотоки в сумме их длины не всегда соответствуют длине реки, приведенной в ГВР.

Согласно ст. 11 Федерального закона от 18.12.1997 № 152-ФЗ⁷, произвольная замена одних наименований географических объектов другими, употребление

⁶ О подготовке и принятии решения о предоставлении водного объекта в пользование: Постановление Правительства РФ от 19 января 2022 № 18 (ред. от 22.03.2022). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

⁷ О наименованиях географических объектов: Федеральный закон от 18 декабря 1997 г. № 152-ФЗ (с изм. от 30.12.2021). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

их искаженных наименований не допускаются. При внесении сведений в ГВР об установленных БА, ВОЗ, ПЗП, границах зон затопления и зон подтопления сохраняется название водного объекта, включенного в ГВР. При разночтении наименований в скобках приводится название, соответствующее ГКГН. Разночтение в наименовании и типе водного объекта, использование двойных названий усложняют процедуру получения водопользователем документов на право пользования водным объектом.

Внесение изменений в название и тип водных объектов, включенных в ГВР (форма 1.9-гвр), повлечет за собой необходимость их корректировки во всех таблицах ГВР, правоустанавливающих документах (договоры водопользования, решения о предоставлении водного объекта в пользование), базе данных статистической отчетности № 2-ТП (водхоз), других документах и источниках. В то же время ведение ГКГН предусматривает возможность в качестве дополнительной информации включать сведения о вариантах наименований с указанием источника их установления и даты. Тем не менее, этот вопрос на межведомственном уровне до сих пор не урегулирован.

Уточнение гидрографических характеристик водных объектов

Антропогенная деятельность человека, особенно строительство и развитие крупных населенных пунктов, производство открытых горных работ объективно связаны с изменением поверхности водосбора, морфометрических характеристик водотоков и, зачастую, самой структуры гидрографической сети в результате:

- переброски стока водотока через водораздел в сопредельный бассейн;
- переноса русла водотока;
- заключения водотока или его участка в коллектор;
- разрыва водотока с созданием локальных водоемов при пересыпании русла отвалом горной породы;
- ликвидации водотока при полной засыпке его водосбора в результате вертикальной планировки территории или размещения отвала горной породы;
- формирования новых водотоков, источниками которых служат сбросы шахтных и карьерных вод, выклинивание вод из отвалов горной породы;
- исчезновения ручьев и малых рек при понижении уровня грунтовых вод как следствие откачки шахтных вод и др.

Строительство крупных городов, например, Новосибирска, привело к изменению гидрографической сети: участки рек были заключены в коллекторы, изменены истоки и устья водотоков, выполнен перенос участков русел. В качестве примера на рис. 1 и в табл. 1 приведены сведения об изменении приустьевых участков рек Плещуха (Плющиха) при строительстве Бугринского моста через р. Обь и, как следствие, морфометрических характеристик этих водотоков. В результате установления ВОЗ и ПЗП водных объектов в границах г. Новосибирска [7] уточнены местоположение и гидрографические характеристики водотоков, БА, ВОЗ и ПЗП с новыми параметрами включены в ГВР, однако сведения об изученности водных объектов (форма 1.9-гвр) остались без изменения.

Таблица. Изменение местоположения устья рек при строительстве Бугринского моста через р. Обь в г. Новосибирске

Table. The changing of the river mouths' location in the process of the Bugrinsk bridge construction over the Ob River in Novosibirsk

Наименование водного объекта	Код ГВР	Местоположение	
		согласно ГВР	фактическое
Плещуха (Плющиха)	13010200712115200006543	1 км по пр. берегу р. Иня	2969,5 км по пр. берегу р. Обь
Камышенка	–	–	0,5 км по лв. берегу р. Плещуха (Плющиха)

Отсутствие требования актуализации сведений об изученности водных объектов (форма 1.9-гвр) и справочной информации к ней по результатам работ по установлению БА, ВЗ и ПЗП приводит к тому, что сведения в разных формах (1.9-гвр, 1.8.1-гвр, 2.13-гвр) не соответствуют друг другу и вводят в заблуждение пользователей этой информации.

Аналогичная ситуация складывается и на участках горных работ. Вследствие многолетней деятельности предприятий (часто сразу нескольких) на одном и том же водном объекте, смены собственников и других факторов, оценить конкретный вклад отдельного предприятия в изменение гидрографической сети и структуру водного баланса территории в настоящее время не представляется возможным. Как следствие, возникают объекты накопленного вреда окружающей среде. По оценкам специалистов, только на территории Кемеровской области–Кузбасса в зоне горных работ исчезло и сократило свою протяженность свыше 200 водотоков (рис. 2).

В сложившихся условиях представляется целесообразным провести инвентаризацию и обследование территорий и акваторий, на которых осуществлялись открытые горные работы или иная деятельность, связанная с кардинальным изменением водосборной площади и водотоков, с целью выявления объектов накопленного вреда окружающей среде⁸ [ст. 80.1]. Полученные по результатам обследования сведения должны быть внесены в государственный реестр объектов накопленного вреда окружающей среде, параллельно, об измененных водных объектах и их водосборной площади – в ГВР.

Кроме того, при подготовке проектов разработки месторождений полезных ископаемых одной из основных задач должна стать оценка допустимости и минимизация негативных воздействий на водные объекты, степени изменения гидрологических характеристик территории и структуры речной сети после окончания работ с внесением произведенных изменений в ГВР. В районах

⁸ Об охране окружающей среды: Федеральный закон от 10 января 2002 № 7-ФЗ (ред. от 26.03.2022). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

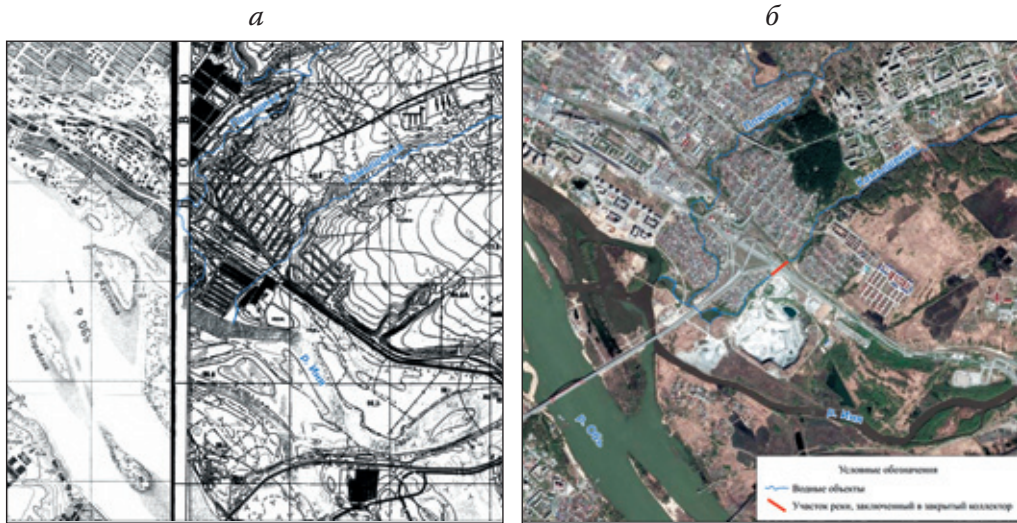


Рис. 1. Изменение гидрографической сети на территории г. Новосибирска (фрагмент устьевой области р. Плющихи): *а* – состояние местности в 1980-е годы; *б* – 2020 г.
 Fig. 1. The hydrographic network changing on the territory of Novosibirsk (a fragment of the Plyushchikha River moth area): *a* is the area state in 1980s; *b* is the area state in 2020.



Рис. 2. Изменение гидрографической сети р. Уса (водораздел притоков Куштубой и Ольжерас) в границах Междуреченского городского округа Кемеровской области–Кузбасса.
 Fig. 2. The Usa River (the Kushtuboy and Olzheras tributaries watershed) hydrographic network changing within the Kemerovo Oblast – Kuzbass Mezhdurechensk Urban District boundaries.

интенсивных горных работ обязательным должен стать постоянный мониторинг современного состояния гидрографической сети на участках разработки месторождений полезных ископаемых с внесением сведений в ГВР.

В рамках действующего законодательства планирование градостроительной деятельности и намечаемой деятельности горнодобывающих предприятий без оценки современного состояния гидрографической сети и оперативного внесения актуализированных сведений в ГВР становится проблематичным.

Изменение типа водного объекта

В ГВР содержится информация о крупных и средних русловых водохранилищах – проточных искусственных водных объектах (водохранилищах), сведения о подпорных гидротехнических сооружениях (далее – ГТС) и сооружениях, расположенных на водных объектах, вносились и вносятся в формы 3.2-гвр и 3.3-гвр, соответственно⁹. Однако информация о водохранилищах, созданных на базе озер, для которых даже разрабатываются Правила использования водохранилищ¹⁰, отсутствует. Эти водохранилища включены в ГВР как естественные водные объекты – озера, при этом в форму 3.2-гвр занесены сведения об образующих их подпорных сооружениях. В качестве примера можно привести водохранилище на оз. Большой Косоголь (в ГВР – оз. Бол. Косоголь с кодом 13010400111115200000924), водохранилище на озере Белое (в ГВР – оз. Белое с кодом 13010400111115200000955), Дудетское водохранилище (в ГВР – оз. Бол. Берчикуль с кодом 13010400111115200001068).

Основным отличием озера от пруда и водохранилища является искусственное происхождение и постепенная утрата природных свойств последних. ГТС таких объектов декларируются с обоснованием их безопасности с учетом класса сооружения¹¹ [ст. 3], вносятся в Российский регистр гидротехнических сооружений. Эти сооружения и объекты, как правило, подведомственны Ростехнадзору, к их использованию и эксплуатации предъявляются требования в соответствии с законодательством о безопасности гидротехнических сооружений и промышленной безопасности.

Наряду с этим в ГВР такие водные объекты остаются озерами (естественными водоемами) с наличием водоподпорных сооружений. Это обстоятельство является основанием для Росприроднадзора и природоохранной прокуратуры предъявлять требования при их использовании как к естественным водоемам. В результате предприятия вынуждены выплачивать многомиллионные штрафы за нарушение этих требований или вести затяжные судебные процессы.

Приведем несколько примеров. В 1939 г. для технического водоснабжения ТЭЦ Норильского комбината была утверждена обратная система с охлаждением циркуляционной воды на оз. Долгое. В 1941 г. выполнена подготовка водоема для использования в обратном водоснабжении: построены глухая

⁹ Форма государственного водного реестра: утв. Приказом МПР России от 29 мая 2007 № 138 (ред. от 18.11.2021). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

¹⁰ О перечне водохранилищ: Распоряжение Правительства РФ от 14 февраля 2009 № 197-р (ред. от 10.09.2020). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

¹¹ О безопасности гидротехнических сооружений: Федеральный закон от 21.07.1997 № 117-ФЗ (ред. от 11.06.2021). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

водоподъемная плотина в истоке р. Долгая, брызгальная установка, циркуляционные водоводы, береговые насосные станции, увеличена емкость котловины и т. п. В настоящее время водоем является изолированным с восполнением дефицита воды за счет закачки природных вод из р. Норилки по двум технологическим трубопроводам. При емкости водоема 9,2 млн м³, объем оборотной воды составляет 145,0 млн м³, а ежегодная закачка воды из р. Норилки для восполнения технологических потерь оборотного цикла водоснабжения – 2,97 млн м³.

Тем не менее, пруд-охладитель, созданный на базе оз. Долгое, в ГВР был включен как оз. Долгое (код 17020000111116100011543) с параметрами, характеризующими его состояние до 1944 г., даты ввода в эксплуатацию глухой насыпной плотины в устье р. Долгой. Только в 2020 г. тип и параметры этого водного объекта были изменены на основании работы, выполненной организацией, имеющей лицензию Росгидромета [8]. Следует отметить, что процесс внесения изменений в сведения ГВР затянулся (с 20.04.2019 г. по 22.06.2020 г.).

Второй пример. В 1954 г. при подготовке Кучукского месторождения минеральных солей к промышленной эксплуатации на базе сухого сульфатного оз. Селитренное создан садочный бассейн с питательным каналом для закачки рапы и последующего сброса из него маточных рассолов в оз. Кучукское. Выполнена вертикальная планировка дна сухого водоема, проложена дренажная сеть для осушения оседающего после закачки мирабилита, по периметру котловины устроены нагорная канава и дамба обвалования, отсекающие поверхностный и грунтовый стоки. В настоящее время цикл добычи мирабилита рассчитан на 24 месяца, из которых 7 месяцев котловина садочного бассейна покрыта водой (период осадки мирабилита), а 17 она находится в сухом состоянии (период добычи мирабилита).

Садочный бассейн «Селитренное» внесен в реестр опасных производственных объектов как карьер (садочный бассейн) – объект II класса опасности. Постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 11.08.2016 № 127 установлена санитарно-защитная зона. Для гидротехнических сооружений разработана и утверждена декларация безопасности. Однако садочный бассейн до сих пор включен в ГВР как оз. Селитренное (код 13020000111115200007632). В 2007, 2009, 2017, 2021 годах проводились специальные работы по определению статуса (типа) объекта «Селитренное» [9]. Только в декабре 2018 г., после многолетней переписки, на основании обращения Верхне-Обского БВУ сведения о водном объекте оз. Селитренное были исключены из базы данных ГВР. Но уже в июле 2021 г. в связи с отсутствием у Верхне-Обского БВУ полномочий принятия решения об исключении сведений из ГВР были восстановлены значения этого водоема по состоянию 1930-х годов.

Отметим, что любое зарегулирование озера нельзя считать основанием для изменения его типа на водохранилище или пруд. Так, например, оз. Байкал зарегулировано Иркутским гидроузлом, однако оно остается озером, объектом Всемирного наследия ЮНЕСКО. На наш взгляд, необходимо определить и за-

конодательно закрепить четкие критерии, в соответствии с которыми может быть признана утрата озером его природных свойств. Например:

- утрата озером формы и признаков водного режима естественного водоема;
- наличие проектной и разрешительной документации, подтверждающей обоснованное изменение формы и признаков водного режима озера;
- расположение водоема полностью в границах земельного участка, принадлежащего на праве собственности физическому или юридическому лицу;
- отсутствие ущемления прав и законных интересов других водопользователей, включая местных жителей, использующих ресурсы озера, при изменении типа водного объекта.

Существует и противоположный пример – включение в ГВР сведений о бывшем технологическом объекте в статусе водоема. С 1960-х годов до 2016 г. на разрезе «Моховский» АО «УК «Кузбассразрезуголь» (Кемеровская область – Кузбасс) применялась технология гидровскрыши с размещением размытых четвертичных пород в гидроотвале. Учитывая технологическую потребность в воде для систем гидромеханизации, на р. Еловке была сформирована система накопителей осветленных вод с водоотводным каналом для возврата воды на гидровскрышу по замкнутой схеме. В 1980-х годах в качестве накопителя чистых технологических вод гидроотвала в русле реки создано водохранилище с местным названием Ульяновский пруд. После завершения вскрышных работ с 2016 г. этот водоем используется только для рекреации и любительского рыболовства. В 2022 г. на основании специально проведенных работ бывший накопитель чистых технологических вод гидроотвала включен в ГВР с типом «водохранилище» (код 13010200621499000000060)¹².

Однако и в этом случае нужно понимать, что не любой технологический водоем может быть признан водным объектом. Во-первых, ему должны быть присущи форма и признаки водного режима, во-вторых, качество воды должно соответствовать нормативам природных вод по приказу Минсельхоза России от 13.12.2016 № 552 и СанПиН 1.2.3685-21^{13, 14}.

Таким образом, актуализация сведений о типе водных объектов, включенных в ГВР, является необходимым условием корректного ведения этой информационной базы данных.

¹² Внесение в государственный водный реестр (ГВР) сведений о статусе и границах водного объекта (пруд Ульяновский) на территориях Беловского и Ленинск-Кузнецкого районов. Этап I Внесение в ГВР сведений о типе и гидрографических характеристиках р. Еловка и Ульяновского пруда: отчет по договору № 12-21 от 14.07.2021, ООО «Центр инженерных технологий», Барнаул, 2021.

¹³ Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения: Приказ Минсельхоза России от 13.12.2016 № 552 (ред. от 22.08.2023). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

¹⁴ Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021 № 2 (ред. от 30.12.2022). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

Проблемы информационного обеспечения управления в области использования и охраны водных объектов

Приведенные выше методические проблемы, а также ряд технических вопросов, возникающих при ведении огромного по масштабам информационного ресурса, каким является ГВР, осложняет использование включенных в него сведений в практике государственного управления в области использования и охраны водных объектов. В процессе работы по уточнению коэффициента водохозяйственной обстановки для расчета субвенций из федерального бюджета, предоставляемых бюджету Красноярского края для осуществления отдельных полномочий Российской Федерации в области водных отношений, при параллельной работе с базами данных ГВР, ГКГН и векторными данными масштаба 1:100 000, входящими в состав цифровой картографической основы схем территориального планирования Российской Федерации, выявлено большое число вопросов, носящих типичный характер при установлении соответствий «многие ко многим»:

Один водный объект в ГВР может иметь два идентификатора (кода водного объекта), например:

- р. Еловка, левый приток р. Чулым: 13010400112199000000840 (1577 км по левому берегу р. Чулым, Балахтинский район, Красноярский край) и 13010400112199000000320 (левый приток р. Чулым. с. Еловка Еловского сельсовета Балахтинского района Красноярского края);

- р. Серез, левый приток р. Березовки: 13010400112115200015262 (р. Березовка, левый приток р. Серез), 13010400112199000000160 (р. Березовка);

- река без названия, впадающая на 46 км по левому берегу р. Хойта (соответствует р. Борикта на карте М 1:100 000): коды 16010200112116200031143 и 16010200112199000000010, соответственно.

Один водный объект в ГВР может иметь два названия, например:

- р. Мельничная, впадающая в р. Чулым по правому берегу на 1360 км от устья (код водного объекта 13010400112199000000370) соответствует реке без названия с кодом 13010400112115200015422;

- протока Ванькина (Алешинская), расположенная по левому берегу р. Енисей на 124 км от устья (код водного объекта 17010800412016100111074) соответствует в ГКГН и на цифровой картографической основе М 1:100 000 двум разным протокам: Алешинская и Ванькина.

Большое количество водных объектов, включенных в ГВР, невозможно идентифицировать в ГКГК и на цифровой картографической основе М 1:100 000, т. к. описание их местоположения недостаточно или неточно, например:

- для водотока без названия с кодом 13010400112099000000030 приведено описание: Красноярский край;

- река без названия с кодом 16010200112116200026811 расположена в «2 км по пр. берегу без названия»;

- ручей без названия с кодом 16010200112299000000050 – «483,2 км».

В некоторых случаях описание местоположения водного объекта в ГВР приведено корректно, но соответствующий водный объект в указанном месте на

карте отсутствует или в этом месте на карте отмечен другой водный объект, имеющий собственное название и код, например:

– река без названия, правый приток р. Надуче, код 17010800412116100110654 (первый случай);

– р. без названия, левый приток р. Пай-Яха на 65 км от устья (код 17010800412116100110661) и р. Тьяха с кодом 17010800412199000000060 (второй случай).

Характерный тип ошибок – неверное указание длины водотока и берега его впадения, например:

– в описании местоположения ручья (код 16010200112299000000160) без названия указано, что он впадает в р. Хохо по правому берегу на 475,7 км от устья, в то время как общая длина р. Хохо приводится 54 км;

– р. Даван по описанию в ГВР находится на 148 км по правому берегу р. Уда, фактически это левый приток р. Уда;

– р. Малый Ихэлэнгуэ, согласно описанию в ГВР, протекает по правому берегу р. Большая Хета, а фактически – по левому берегу.

Распространенным типом ошибки является неверное указание номера водохозяйственного участка (ВХУ) в кодировке объекта. Например, около 700 водотоков, указанных в ВХУ 17.01.07.003, фактически принадлежат ВХУ 17.01.07.002. Другой пример – ручей без названия с кодом 13010400112299000000350, находящийся в ВХУ 13.01.04.001, фактически расположен в границах ВХУ 13.01.04.002.

Обозначенные выше проблемы существенно осложняют предоставление достоверных сведений из ГВР территориальными органами Росводресурсов и, как следствие, оформление водопользователями договоров водопользования и решений о предоставлении водных объектов в пользование.

Другой распространенный тип разногласия – несоответствие длины водного объекта, указанной в ГВР, актуальным картографическим материалам, например:

– длина ручья без названия, впадающего справа в р. Серез на 187 км от устья (код 13010400112299000000450), составляет 3,8 км, этому описанию на цифровой картографической основе М 1:100 000 соответствует руч. Сурзаков длиной 9,3 км;

– длина р. Тайменья, левого притока р. Осетровая, по сведениям ГВР составляет 43 км, а на цифровой картографической основе М 1:100 000 – 25 км.

Несоответствие длины водного объекта, приведенной в справочной информации к форме 1.9-гвр, его фактической длине, устанавливаемой в процессе инженерно-гидрометеорологических изысканий при определении местоположения береговой линии водных объектов, границ зон затопления и подтопления и других работ встречается очень часто, однако при отсутствии процедуры внесения изменений в ГВР используются устаревшие, не отвечающие современной ситуации сведения. Это влечет за собой большие практические проблемы, например, при установлении ширины ВОЗ и ПЗП водотоков длиной около 10 км, а также при оформлении решения о предо-

ставлении водного объекта в пользование на участках, близких к фактическому истоку, где согласно данным ГВР водоток отсутствует.

В процессе двухлетней работы при формировании баз данных локальной ГИС «Обоснование субвенций Красноярского края» [10] были решены технические проблемы по идентификации и уточнению местоположения водных объектов, сведения о которых включены в ГВР. Статистические данные по результатам этой работы представлены на рис. 3. Однако в связи с отсутствием процедуры внесения изменений в ГВР, данные этого государственного информационного ресурса не могут быть актуализированы на основе даже уже выполненной большой работы.

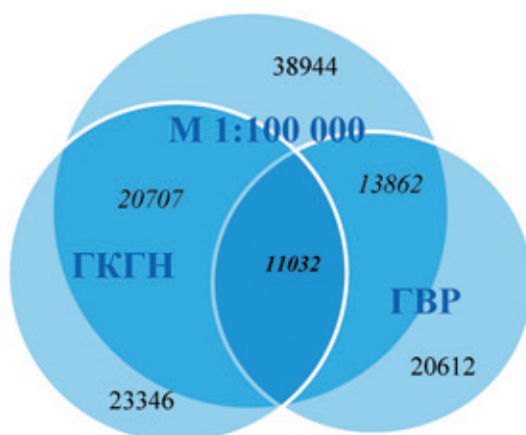


Рис. 3. Диаграмма пересечения данных, полученных из разных источников.

Fig. 3. Diagram of intersection of the date obtained from different sources.

ВЫВОДЫ

В период цифровой трансформации России достижение «цифровой зрелости» ключевых отраслей экономики, в т. ч. государственного управления, зависит не только от создания эффективных цифровых инструментов управления, но и от достоверности сведений, включенных в информационные базы данных, одной из которых является ГВР.

Информационная база данных ГВР, созданная в целях информационного обеспечения комплексного использования и охраны водных объектов, их целевого использования, а также в целях планирования и разработки мероприятий по предотвращению негативного воздействия вод и ликвидации его последствий станет достоверной только при динамичном обновлении включенных в нее сведений.

В целях оперативной актуализации сведений ГВР предлагаем:

1. Внести дополнения в Порядок представления и состава сведений, представляемых Федеральной службой по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, для внесения в государственный водный реестр, утв. Приказом МПР России от 02.11.2007 № 284 в части:

– внесения сведений о неизученных водных объектах, полученных организациями-лицензиатами Росгидромета в результате выполнения гидрологических (гидрометрических) работ, включая установление границ ВОЗ и ПЗП, определение границ зон затопления и подтопления, обследование объектов накопленного вреда окружающей среде и т. п.;

– внесения изменений в сведения о водных объектах, включенных в ГВР, и исключения сведений о водных объектах, прекративших свое существование (утраченных водных объектах), в т. ч. по результатам работ организаций-лицензиатов Росгидромета.

2. Передать полномочия по внесению сведений о неизученных водных объектах, актуализации сведений о наименовании, типе и гидрографических характеристиках водных объектов, включенных в ГВР, территориальным (бассейновым) органам Росводресурсов после их проверки на достоверность территориальными органами (департаментами по федеральным округам) Росгидромета и территориальными органами Росреестра (публично-правовой компании «Роскадастр»), что особенно важно при отсутствии сведений о неизученных водных объектах в ГКГН.

3. Росводресурсам и Росреестру (публично-правовой компании «Роскадастр») провести работы по упорядочиванию сведений о наименовании и типе водных объектов, включенных в ГВР и ГКГН.

4. Росводресурсам организовать и провести масштабную работу по актуализации сведений, включенных в ГВР.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Амашукели С.А. Развитие цифровизации в сфере использования и охраны водных объектов // Актуальные проблемы российского права. 2022. № 3. С. 177–187.
2. Калиманов Т.А., Косолапов А.Е. Цифровая трансформация Росводресурсов: вчера, сегодня, завтра: сб. трудов Всеросс. научно-практ. конф. с межд. участием «Водные ресурсы в условиях глобальных вызовов: экологические проблемы, управление, мониторинг». Ростов-на-Дону, 2023. Т. 2. С. 276–281.
3. Водный кодекс Российской Федерации: Федеральный закон от 03 июня 2006 г. № 74-ФЗ (с изм. и доп. от 04.08.2023 г.). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
4. Доклад «О состоянии и использовании водных ресурсов Российской Федерации в 2020 году». М.: Росводресурсы, НИА-Природа, 2022. 510 с. URL: <https://voda.gov.ru/media/nauchno-prakticheskiy-zhurnal/gosdoklad/558495/> (дата обращения 17.12.2023).
5. Государственный доклад «О состоянии и использовании водных ресурсов Российской Федерации в 2018 году». М.: Росводресурсы, НИА-Природа, 2019. 290 с. URL: https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennyye_doklady/gosudarstvennyy_doklad_o_sostoyanii_i_ispolzovanii_vodnykh_resursov_rossiyskoy_federatsii_v_2018_god/ (дата обращения 17.12.2023).
6. Обзор состояния системы гидрологических наблюдений, обработки данных и подготовки информационной продукции в 2019, 2020, 2021, 2022 годах. Санкт-Петербург: Государственный гидрологический институт. URL: <http://www.hydrology.ru/sites/default/files/Books/> (дата обращения 10.12.2023).
7. Определение местоположения береговой линии (границы водного объекта), границ водоохранных зон и границ прибрежных защитных полос рек Тула (Бол. Тула), Ельцовка, Камышенка, Плещуха (Плющиха), Каменка, Ельцовка 1-я, Ельцовка 2-я на территории г. Новосибирска и Новосибирского района Новосибирской области и их притоков в черте г. Новосибирска (2 этап): отчет по гос. контракту № 0851200000620004994 от 14.10.2020. ООО «Центр инженерных технологий», Барнаул, 2020.

8. Оценка возможности исключения озера Долгое из государственного водного реестра: отчет по договору № НТЭК-32-340/19 от 19.03.2019 г. ООО «Центр инженерных технологий», Барнаул, 2019.
9. Подготовка материалов для внесения изменений в сведения, включенные в государственный водный реестр в отношении оз. Селитренное, в части морфометрических характеристик водного объекта, его типа и дальнейшего исключения объекта из ГВР: отчет по договору № 1427 от 06.10.2021 г. ООО «Центр инженерных технологий». Барнаул, 2021.
10. Научное обоснование достоверного определения коэффициентов водохозяйственной обстановки для расчета субвенций из федерального бюджета, предоставляемых бюджету Красноярского края для осуществления отдельных полномочий Российской Федерации в области водных отношений: отчет по государственному контракту № Ф.2022.014075 от 08.11.2022 г. ООО «Центр инженерных технологий», Барнаул, 2023.

REFERENCES

1. Amashukeli S.A. Digitization development in water bodies use and protection. *Topical problems of Russian legislation*. 2022. No. 3. P. 177–187 (In Russ.).
2. Kalimanov T.A., Kosolapov A.E. Digital transformation of Rosvodresursy: yesterday, today, tomorrow. *Proceedings of international al-Russian scientific/practical conference “Water resources and global challenges: environmental problems, management, monitoring”*. Rostov-na-Donu, 2023. Vol. 2. P. 276–281 (In Russ.).
3. Water code of the Russian Federation: Federal law dated June 03, 2006. No. 74-FZ (amended 04.08.2023). Taken from “KonsultantPlus” information system (In Russ.).
4. Report: On state and use of water resources of the Russian Federation in 2020. M.: Rosvodresursy, NIA-Priroda, 2022. 510 p. Access regime: <https://voda.gov.ru/media/nauchno-prakticheskiy-zhurnal/gosdoklad/558495/> (date of address 17.12.2023) (In Russ.).
5. State report “On state and use of water resources of the Russian Federation in 2018”. M.: Rosvodresursy, NIA-Priroda, 2019. 290 p. Access regime: https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennyye_doklady/gosudarstvennyy_doklad_o_sostoyanii_i_ispolzovanii_vodnykh_resursov_rossiyskoy_federatsii_v_2018_god/ (date of address 17.12.2023) (In Russ.).
6. Review of the state of the hydrological observations system, data processing and preparation of information production in 2019, 2020, 2021, and 2022. St.-Petersburg: State Hydrological Institute. Access regime: <http://www.hydrology.ru/sites/default/files/Books/> (date of address 10.12.2023) (In Russ.).
7. Location of the bank line (a water body boundary), boundaries of water-protective zones, and boundaries of bank protective stripes of the Tula (Bol. Tula), Eltsovka, Kamyshenka, Pleshchukha (Plyushchikha), Kamenka, Yeltsovka 1st, Yeltsovka 2nd, rivers and their tributaries on the territory of Novosibirsk Oblast the city of Novosibirsk and Novosibirsk Rayon within the city of Novosibirsk boundaries (2nd stage): report on the state contract No. 0851200000620004994 dated 14.10.2020. ООО Center of Engineering Technologies, Barnaul, 2020 (In Russ.).
8. Assessment of the possibility of excluding of the Lake Dolgoye from State Water Register: report on contract No. NTEK-32-340/19 dated 19.03.2019. ООО “Tsentr inzhenernykh tekhnologiy”, Barnaul, 2019 (In Russ.).
9. Preparation of materials for amending the data included into State Water Register in respect of the Lake Selitrennoye, particularly in the aspect of its morphometric characteristics, its type and further excluding of it from SWR: report on contract No. 1427 dated 06.10.2021. ООО Center of Engineering Technologies”. Barnaul, 2021 (In Russ.).
10. Scientific substantiation of authentic definition of the water/economic situation coefficients for calculation of subventions from the Federal budget allocated for the Krasnoyarsk Kray budget for realization of some authorities of the Russian Federation concerning water relations: report on the state contract No. F.2022.014075 dated 08.11.2022 ООО “Tsentr inzhenernykh tekhnologiy”, Barnaul, 2023 (In Russ.).

Сведения об авторах:

Ирина Владимировна Жерелина, канд. геогр. наук, доцент, кафедра природопользования и геоэкологии, Институт географии, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный университет», начальник отдела водного хозяйства и охраны окружающей среды, ООО «Центр инженерных технологий», Россия, 656031, Барнаул, ул. Папанинцев, 129; ORCID 0000-003-1446-4087; e-mail: zherelina@mail.ru

Виктор Алексеевич Жоров, канд. геогр. наук, главный инженер, ООО «Центр инженерных технологий», Россия, 656031, Барнаул, ул. Папанинцев, 129; e-mail: jorov52@mail.ru

Ирина Святославовна Постнова, канд. техн. наук, начальник отдела ГИС и математического моделирования, ООО «Центр инженерных технологий», Россия, 656031, Барнаул, ул. Папанинцев, 129; e-mail: irinapostnova69@gmail.com

Наталья Викторовна Поломошнова, инженер-эколог, отдел водного хозяйства и охраны окружающей среды, ООО «Центр инженерных технологий», Россия, 656031, Барнаул, ул. Папанинцев, 129; e-mail: pnv_1.11@mail.ru

Ольга Васильевна Брютова, ведущий инженер, отдел ГИС и математического моделирования, ООО «Центр инженерных технологий», Россия, 656031, Барнаул, ул. Папанинцев, 129; e-mail: brolg@mail.ru

About the authors:

Irina V. Zherelina, Candidate of Geographic Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Nature Management and Geo/ecology Department, Institute of Geography, Altai State University, Head of Water Management and Environmental Protection Department, Engineering Technologies Center LLC, ul. Papanintsev, 129, Barnaul, 656031 Russia; ORCID 0000-003-1446-4087; e-mail: zherelina@mail.ru

Viktor A. Zhorov, Candidate of Geographic Sciences, Chief Engineer, Engineering Technologies Center LLC, ul. Papanintsev, 129, Barnaul, 656031 Russia; e-mail: jorov52@mail.ru

Irina S. Postnova, Candidate of Technical Sciences, Head of GIS and Mathematical Modeling Department, Engineering Technologies Center LLC, ul. Papanintsev, 129, Barnaul, 656031 Russia; e-mail: irinapostnova69@gmail.com

Natalia V. Polomoshnova, Environmental Engineer, Water Management and Environmental Protection Department, Engineering Technologies Center LLC, ul. Papanintsev, 129, Barnaul, 656031 Russia; e-mail: pnv_1.11@mail.ru

Olga V. Brutova, Leading Engineer, GIS and Mathematical Modeling Department, Engineering Technologies Center LLC, ul. Papanintsev, 129, Barnaul, 656031 Russia; e-mail: brolg@mail.ru

Оценка стационарности годового и сезонного стока рек бассейна Верхней Оби

С.Ю. Самойлова  , О.В. Ловцкая , А.Б. Голубева 

 bastet@iwep.ru

ФГБУН «Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук», г. Барнаул, Россия

АННОТАЦИЯ:

Актуальность исследования обусловлена тем, что в последние десятилетия на реках России наблюдаются изменения водного режима, вызванные климатическими факторами. С этим связано нарушение однородности рядов стока, что требует пересмотра существующих методов гидрологических расчетов и прогнозов. В представленной работе выполнен статистический анализ рядов среднегодовых и среднесезонных расходов воды для рек бассейна Верхней Оби. **Методы.** Оценка циклических колебаний водности проведена с использованием разностных интегральных кривых. Для анализа стационарности рядов использовали Standard normal homogeneity test, Buishand's test, Pettitt's test, позволяющие определить год нарушения однородности ряда, и Neumann's test, а также традиционные параметрические тесты Стьюдента и Фишера. Для графического отображения момента нарушения стационарности построены суммарные интегральные кривые. **Результаты.** На большинстве рек бассейна Верхней Оби с начала 1960-х годов наблюдается рост годовых расходов воды. Неоднородность годовых расходов, обусловленная климатическими изменениями, характерна для средних рек, стекающих с северного макросклона Алтайской горной области. На всех исследуемых реках отмечается нарушение стационарности и рост расходов зимней межени, что связано с увеличением зимних температур и количества осадков в октябре-ноябре. Значимые расчетные значения F-критерия свидетельствуют об увеличении дисперсии расходов зимней межени. Нарушение однородности годовых и сезонных расходов на реках бассейна Верхней Оби, в отличие от рек Европейской территории России, произошло после 2000 г.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: р. Верхняя Обь, расход воды, зимняя межень, половодье, летне-осенняя межень, климатические изменения, стационарность, интегральная кривая.

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

Для цитирования: Самойлова С.Ю., Ловцкая О.В., Голубева А.Б. Оценка стационарности годового и сезонного стока рек бассейна Верхней Оби // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 5. С. 21–38. DOI:10.35567/19994508-2024-5-21-38.

Дата поступления 14.03.2024.

ASSESSMENT OF STATIONARITY OF ANNUAL AND SEASONAL RIVER FLOW IN THE UPPER OB BASIN

Svetlana Y. Samoilova  , Olga V. Lovtskaya , Anastasia B. Golubeva 

 bastet@iwep.ru

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

ABSTRACT

Relevance. The climate-induced changes recorded in the recent decades in water regime of Russian rivers make the study topical. This is associated with breaks in the homogeneity of runoff series and requires a revision of existing methods for hydrological calculations and forecasts. In this work, a statistical analysis of series of average annual and average seasonal flows for the rivers of the Upper Ob basin (up to the Novosibirsk reservoir) has been performed. **Methods.** The estimation of cyclic fluctuations in water content is based on the use of differential integral curves. To analyze stationarity of the series, we apply the Standard normal homogeneity test, the Buishand's and the Pettitt's tests providing the determination of the year of breaks in the homogeneity of the series, as well as the Neumann's test and the Student and Fisher traditional parametric tests. The constructed total integral curves are used in graphical display of the moment of stationarity disturbance. **Results.** An increase in annual water flows has been recorded on most rivers of the Upper Ob basin since the early 60s. The annual flows heterogeneity caused by climate change is typical for the medium-sized rivers flowing from the northern macro/slope of the Altai Mountain Region. On all studied rivers, the disturbed stationarity and increased winter low-water flows are associated with rising winter temperatures and precipitation in October-November. Significant calculated values of the F-criterion indicate an increase in dispersion of winter low-water flows. In contrast to the rivers of the European part of Russia, breaks in the homogeneity of annual and seasonal flows for the rivers of the Upper Ob basin occurred after 2000.

Keywords: Upper Ob, water flow, winter low water, flood, summer-autumn low water, climate change, stationarity, integral curve.

Financing: The work was carried out within the framework of the state assignment of the IWEP SB RAS.

For citation: Samoilova. S.Y., Lovtskaya O.V., Golubeva A.B. Assessment of stationarity of annual and seasonal river flow in the Upper Ob basin. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2024. No.5. P. 21–38. DOI:10.35567/19994508-2024-5-21-38.

Received 14.03.2024.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение динамики стока рек под влиянием климатических изменений является актуальной научной и практически важной задачей. На территории России отмечаются существенные изменения годового стока и его внутригодового распределения [1, 2], вплоть до смены типа водного режима [3], а также максимальных расходов воды, связанных с половодьями и дождевыми паводками [4, 5]. Направленные изменения стока приводят к нарушению стационарности гидрологических рядов, что требует пересмотра существующих методик расчета и прогнозирования гидрологических характеристик¹[6].

Считается, что начало наиболее значимых климатических изменений приходится на вторую половину 1970-х годов [7]. С учетом этого, в Государственном гидрологическом институте (ГГИ) Росгидромета [8] была разработана методика оценки изменения годового и сезонного стоков рек, в соответствии с которой стационарность рядов рекомендуется определять с использованием критериев Стьюдента и Фишера. В других работах, например [9], для оценки стационарности рядов использован непараметрический Pettitt's test совмест-

¹ СТО ГГИ 52.08.41-2017. Основные гидрологические характеристики при нестационарности временных рядов, обусловленной влиянием климатических факторов. Рекомендации по расчету. СПб.: ФГБУ «ГГИ», 2017. 46 с.

но с методом суммарной и разностной интегральных кривых, что позволило не только оценить ряды на однородность, но и определить год ее нарушения. Интересно, что для рек Европейской территории России «переломным» является 1978 г., а для рек Урала, Сибири и Дальнего Востока нарушение стационарности произошло позднее – в 1985–1996 гг. [9]. Очевидно, что в этих регионах значимые климатические изменения (или же реакция рек на них) начались позднее. В работе [10] отмечено, что гидрологическая система может постепенно накапливать изменения, а затем достаточно резко, за 2–3 года, переходить в новое стационарное состояние.

Представленное в данной статье исследование посвящено оценке стационарности гидрологических рядов и выявлению значимых изменений водности на разнотипных водосборах Верхней Оби (до Новосибирского гидроузла). В его рамках выполнен статистический анализ рядов годового и сезонного стока с использованием параметрических и непараметрических тестов, позволяющих определить год нарушения однородности ряда. Дополнительно использованы методы разностной и суммарной интегральных кривых.

Причинами нарушения стационарности гидрологических характеристик, как известно, могут выступать не только климатические изменения (в глобальном и региональном масштабах), но и антропогенное воздействие на отдельную реку и ее водосбор (строительство ГЭС, сбросы воды, изъятие стока, распашка земель, сведение лесов и т. д.). Поэтому, как правило, для рек, режим которых был нарушен под влиянием антропогенных изменений, анализ рядов расходов воды на однородность не проводится [8, 9]. Однако для оценки достоверности использованных статистических методов (правильность определения момента нарушения стационарности ряда) в проведенном исследовании мы не исключили такие ряды из анализа.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования стали притоки р. Оби I–II порядка, на которых имеются гидрологические посты с рядом наблюдений 55 лет и более с минимальным количеством пропусков в наблюдениях, а также р. Обь до Новосибирского гидроузла (гидропост в г. Камень-на-Оби) (рис. 1).

Всего выбрано 14 гидрологических постов (г/п), три из которых за исследуемый период переносились: с. Солонешное на р. Ануй (1985 г.), пгт Тальменка на р. Чумыш (1973 г.) и с. Староалейское на р. Алей (1962). Перечень исследуемых створов, а также основные гидрологические характеристики рек представлены в табл. 1. Из-за значительного количество пропусков в рядах среднемесячных расходов по г/п р. Катунь – с. Сротки, для этой реки был выполнен анализ только среднегодовых расходов, восстановленных по рекам-аналогам.

Основной особенностью рек бассейна Верхней Оби (до Новосибирского водохранилища) является неоднородность условий формирования стока, обусловленная сложностью рельефа. Обь, образованная при слиянии Бии и Катуни, является равнинной рекой, а водосборы основных крупных притоков расположены в пределах Алтайской горной области, поэтому их гидрологический режим разнообразен.

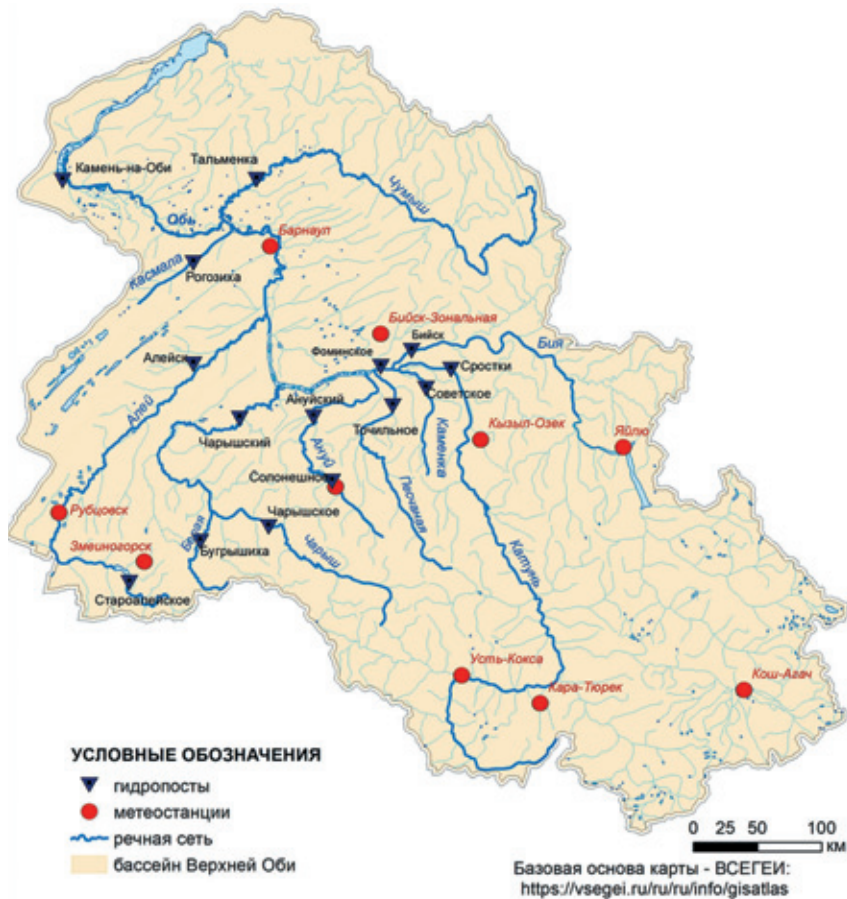


Рис. 1. Картограмма бассейна Верхней Оби до Новосибирского водохранилища.
 Fig. 1. Schematic map of the Upper Ob basin up to the Novosibirsk reservoir.

Большинство исследуемых рек являются притоками р. Оби I порядка, которые условно можно отнести к категории средних рек (согласно ГОСТ 19179-73², это реки с площадью бассейна от 2000 до 50 000 км²). Для исследования влияния климатических изменений на сток использование в качестве объектов исследования средних рек оптимально, поскольку динамика их стока определяется, в основном, климатическими факторами [8]. Малые реки Каменка и Белая являются притоками рек Катуни и Чулыша соответственно.

На большинстве рек крупные водохранилища отсутствуют. Исключение – р. Алей, сток которой в верхнем течении зарегулирован Гилевским водохранилищем (построено во второй половине 1970-х годов, начало эксплуатации – 1980 г.) и р. Каскала с водохранилищем в с. Ребриха, построенным в конце 1970-х годов.

² ГОСТ 19179-73. Государственный стандарт Союза ССР. Гидрология суши. Термины и определения.

Таблица 1. Основные гидрологические характеристики рек бассейна Верхней Оби в исследуемых створах [11]

Table 1. Main hydrological characteristics of rivers of the Upper Ob basin in the sections under study

Река – пост	Открыт/ перенесен, гг.	Площадь водосбора, км ²	Среднегодовые величины основных гидрологических характеристик		
			расход воды, м ³ /с	модуль стока, л/(с•км ²)	слой стока, мм
р. Бия – г. Бийск	1894	36 900	477	12,9	408
р. Катунь – с. Сростки	1919	58 400	633	10,8	342
р. Каменка- с. Советское	1959	1730	12,5	7,21	228
р. Песчаная– с. Точильное	1931	4720	32,9	6,96	220
р. Ануй – с. Солонешное	1944/1985	2540	17,3	6,81	215
р. Ануй – свх. Ануйский	1961	4870	31,1	6,39	201
р. Чарыш – с. Чарышское	1959	7180	92,3	12,8	406
р. Чарыш – свх. Чарышский*	1933	20 700	192	9,26	292
р. Белая – с. Бугрышиха	1960	1140	26,3	23,1	728
р. Алей – с. Староалейское	1959/1962	2070	21	10,1	318
р. Алей – г. Алейск	1953	18 700	34,8	1,85	59
р. Касмала – с. Рогозиха	1939	1650	2,12	1,29	41
р. Чумыш – пгт Тальменка	1934/1973	20 600	146	7,09	223
р. Обь – г. Камень-на-Оби	1893	216 000	1570	7,26	230

Примечание: * – пост закрыт в 2016 г.

Определение сроков гидрологических сезонов для каждого створа выполняли по рядам среднемесячных расходов воды в соответствии с методикой [8], с поправкой на то, что месяцы начала и окончания половодья определяли по среднемноголетней, а не наиболее ранней и поздней дате. Сроки зимней межени (ноябрь–март) и начала половодья (апрель) приняты одинаковыми для всех рек. Продолжительность половодья, соответственно, и его окончание зависят от типа водного режима и характера питания. Для малых (Касмала) и средних (Алей, Чумыш) равнинных рек с преимущественно снеговым питанием, а также рек, водосборы которых приурочены преимущественно к низкогогорьям и предгорьям (Ануй, Песчаная), окончание половодья приходится на май или июнь. У крупных горных рек со снего-дождевым питанием, водосборы которых расположены в нескольких высотных зонах, за счет неравномерного таяния снега и дождевых паводков летом сроки окончания половодья наблю-

даются в июле-августе (например, Чарыш, Бия). На р. Катунь, значительную часть водосбора которой занимают высокогорья с современным оледенением, половодье обычно заканчивается в сентябре. У р. Оби половодье растянуто во времени и часто проходит в две волны: сначала за счет таяния снега на равнине и в предгорьях, затем – в горах. Окончание половодья наблюдается, как правило, в июле.

Проверка гидрологических рядов на однородность. Проверка на однородность временного ряда данных может быть выполнена с помощью множества тестов, для которых нулевая гипотеза соответствует предположению об однородности ряда в заданном временном интервале. Указание на необходимость оценки однородности гидрологических рядов, а также критерии для этой оценки приведены в Руководстве по гидрологической практике (в таблице II.6.1.)³.

Традиционно в отечественных исследованиях для анализа рядов на однородность используются критерии Стьюдента и Фишера [8, 13]. Первый определяет стационарность выборок относительно средних значений, второй – дисперсий. Эти критерии рекомендованы соответствующими нормативными документами по гидрологическим расчетам^{1,4}. При расчете данных критериев предполагается разбиение временного ряда либо на две равные части, либо по году нарушения стационарности. В работах по оценке климатообусловленных изменений стока, например [8], границей разбиения гидрологического ряда выбран 1976 г. (начало резкого роста температур). Недостаток такого подхода в том, что реальный год нарушения стационарности, как правило, неизвестен. Кроме того, критерий Фишера корректно применять только в случае принадлежности анализируемых выборок к нормальному закону распределения, что не всегда выполняется.

В соответствии с принятой в настоящее время международной практикой при проверке однородности рядов признано наиболее целесообразным использовать комбинированный статистический подход с использованием нескольких тестов. Если большая часть из них показывает значимые результаты, то это свидетельствует о нарушении однородности³. В работе [14] рекомендуется использовать четыре статистических метода, из которых два параметрических, предполагающих нормальное распределение ряда данных: стандартный нормальный тест для проверки однородности рядов Александерсона (SNHT) [15], Buishand's test [16], третий, использующий непараметрический критерий (Pettitt's test) [17], и четвертый, основанный на отношении фон Неймана [18]. Первые три теста при нарушении однородности ряда определяют наиболее ярко выраженную точку «перелома», не рассматривая другие возможные точки. Поэтому определение года «перелома» различными тестами и на разной длине ряда может быть неоднозначным.

³ Руководство по гидрологической практике. Т. II. Управление водными ресурсами и практика применения гидрологических методов (ВМО № 168). Женева: ВМО, 2012. 324 с.

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

Если не выполняется только один из тестов, ряд считается однородным. В случае, когда два теста отрицают однородность на 5 % уровне значимости, ряд относят к сомнительным и дальнейшие операции с ним и выводы на его основе следует делать с осторожностью. Если наличие неоднородности ряда подтверждается тремя и более тестами, он признается неоднородным [14].

Статистические методы для анализа временных рядов являются универсальными. Указанные выше критерии для анализа стока рек используются в российских [9] и зарубежных [12, 19, 20] исследованиях. В работе [20] представлен обзор литературы по применению этих тестов как к климатическим, так и к гидрологическим показателям. Преимуществом тестов является возможность их применения к рядам данных, не подчиняющихся закону нормального распределения.

В данной работе использован комбинированный подход к оценке однородности рядов. На первом этапе выполнен анализ с помощью SNHT, Buishand's test, Pettitt's test и Neumann's test [18]. Затем неоднородные ряды были проанализированы при помощи традиционных критериев Стьюдента и Фишера, при этом разбиение ряда осуществлялось по определенному тестами году нарушения однородности (или годам – если разные тесты определяли год «перелома» по-разному). При расчете критерия Фишера ряды предварительно анализировали на принадлежность к нормальному распределению с использованием теста Колмогорова–Смирнова. Все расчеты выполнены в среде MS Excel с использованием авторского приложения (для Pettitt's test) и условно бесплатной надстройки XLStat.

Дополнительно к перечисленным тестам построены и проанализированы разностные и суммарные интегральные кривые. Разностные интегральные кривые использовали для оценки циклических колебаний водности и выявления маловодных и многоводных фаз гидрологического цикла. Суммарные интегральные кривые позволяют графически определить момент нарушения стационарности ряда и направление изменения стока.

Оценка однородности гидрологических рядов не предполагает выделения периодической составляющей временного ряда⁴, достаточно приведения ряда к многолетнему периоду⁵, при этом продолжительность ряда более 50 лет считается достаточной [СП 47.13330.2016]⁶. Анализируемые ряды охватывают период 1960–2020 гг.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Годовой сток

Период 1960–2020 гг. характеризуется положительными тенденциями годового стока на реках бассейна Верхней Оби. Анализ разностных интеграль-

⁴ Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при недостаточности данных гидрометрических наблюдений. СПб.: Ротапринт ГНЦ РФ АА-НИИ, 2007. 66 с.

⁶ СП 47.13330.2016. Свод правил. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения.

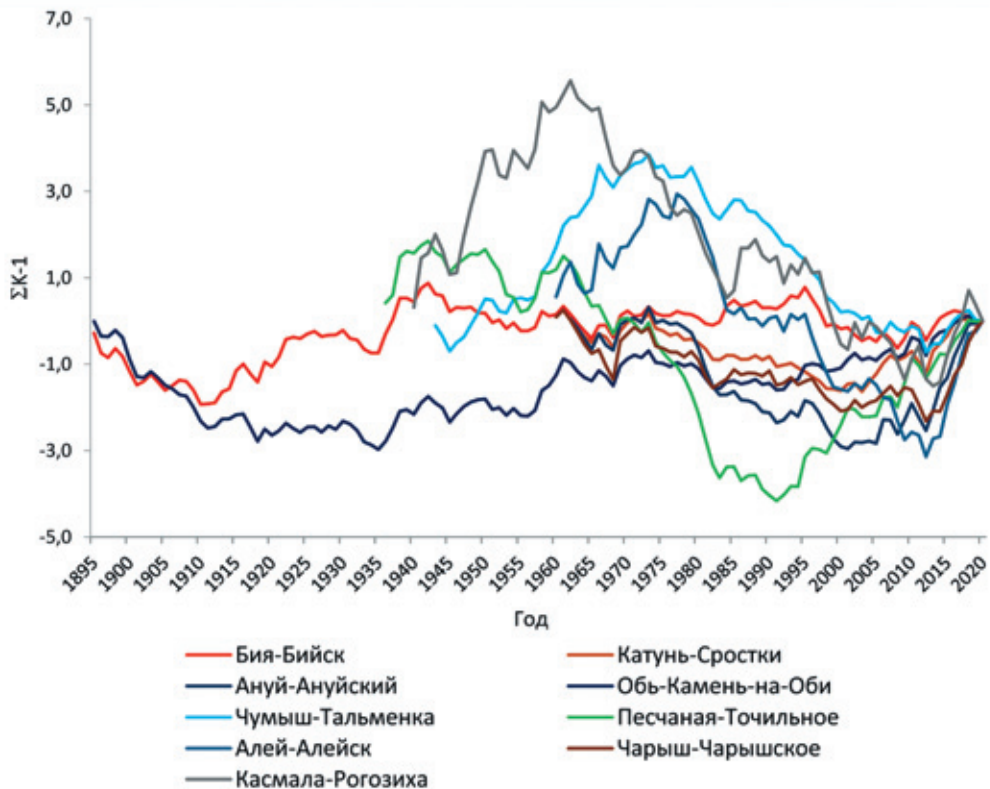


Рис. 2. Разностные интегральные кривые среднегодовых расходов рек бассейна Верхней Оби.

Fig. 2. Difference integral curves of average annual runoff of rivers in the Upper Ob basin.

ных кривых (рис. 2) показал, что большинство рек с 2012 г. находятся в многоводной фазе. Снижение расходов воды наблюдается на реках Бия и Чумыш.

Статистический анализ с применением комплекса тестов, включающих Pettitt's test, Standard normal homogeneity test (SNHT), Buishand range test и Neumann's test, свидетельствует о нарушении однородности рядов среднегодовых расходов на реках Ануй, Песчаная, Чарыш в створе с. Чарышское, Чумыш (табл. 2). Ряд расходов р. Алей можно отнести к «сомнительным».

В качестве примера на рис. 3 приведены результаты анализа среднегодовых расходов р. Ануй с применением Pettitt's test, Standard normal homogeneity test, Buishand range test и методом разностной и суммарной интегральных кривых.

На реках Ануй и Чарыш (табл. 2) нарушение однородности ряда произошло в 2000–2012 гг., что графически подтверждают интегральные кривые. С 2012 г. началась многоводная фаза на большинстве рек (рис. 2). На р. Песчаной отчетливо выделяется смена фаз водного режима в 1991 г. Таким образом, нарушение стационарности рядов отражает изменение стока, обусловленное природно-климатическими факторами. Нарушение однородности расходов под влиянием климатических изменений произошло позднее 1976 г., указанного в [8].

Таблица 2. Результаты анализа рядов среднегодовых расходов на однородность
Table 2. Results of homogeneity analysis of series of average annual runoff

Река – створ	Метод*						Тенденция +/-
	Pettitt's test	Standard normal homogeneity test (SNHT)	Buishand's test	Von Neumann's test	t	F	
р. Бия – г. Бийск	однородный	однородный	однородный	однородный			
р. Катунь – с. Сростки	однородный	однородный	однородный	однородный			
р. Каменка – с. Советское	однородный	однородный	однородный	однородный			
р. Песчаная – с. Точильное	1991	1991	1991	неоднородный	4,8	1,02	+
р. Ануй – свх. Ануйский	2001	2012	2001	неоднородный	4	1,30	+
р. Ануй – с. Солонешное	2000	2000	2000	неоднородный	3,32 4,04	<u>1,61</u> 1,5	+
р. Чарыш – с. Чарышское	2000	2014	однородный	неоднородный	2,4 3,8	<u>1,09</u> 3,14	+
р. Чарыш – свх. Чарышский	однородный	однородный	однородный	однородный			
р. Белая – с. Бугрышиха	однородный	2012	однородный	однородный			
р. Алей – с. Староалейское	однородный	однородный	однородный	неоднородный			
р. Алей – г.Алейск	однородный	2012	однородный	неоднородный			+
р. Касмала – с.Рогозиха	однородный	однородный	однородный	однородный			
р. Чумыш – пгт Тальменка	1973	1973	1973	неоднородный	4,02	1,67	-
р. Обь – г. Камень-на-Оби	однородный	однородный	однородный	однородный			

Примечание: в таблицах 2–5 цветом выделены неоднородные ряды и указан год нарушения однородности. Значение t-критерия и F – критерия, рассчитанные для разных вариантов разделения ряда, приведены через дробь. Значения, превышающие критические, выделены.

Нарушение однородности ряда на р. Чумыш в 1973 г., очевидно, связано с переносом в этом году гидропоста на 310 м выше по течению. Перенос гидрометрического створа, вряд ли, существенно изменил расходы воды. Однако изменение формы поперечного сечения и скорости течения могли повлиять на результаты измерения расходов и кривую связи расходов и уровней. Реки

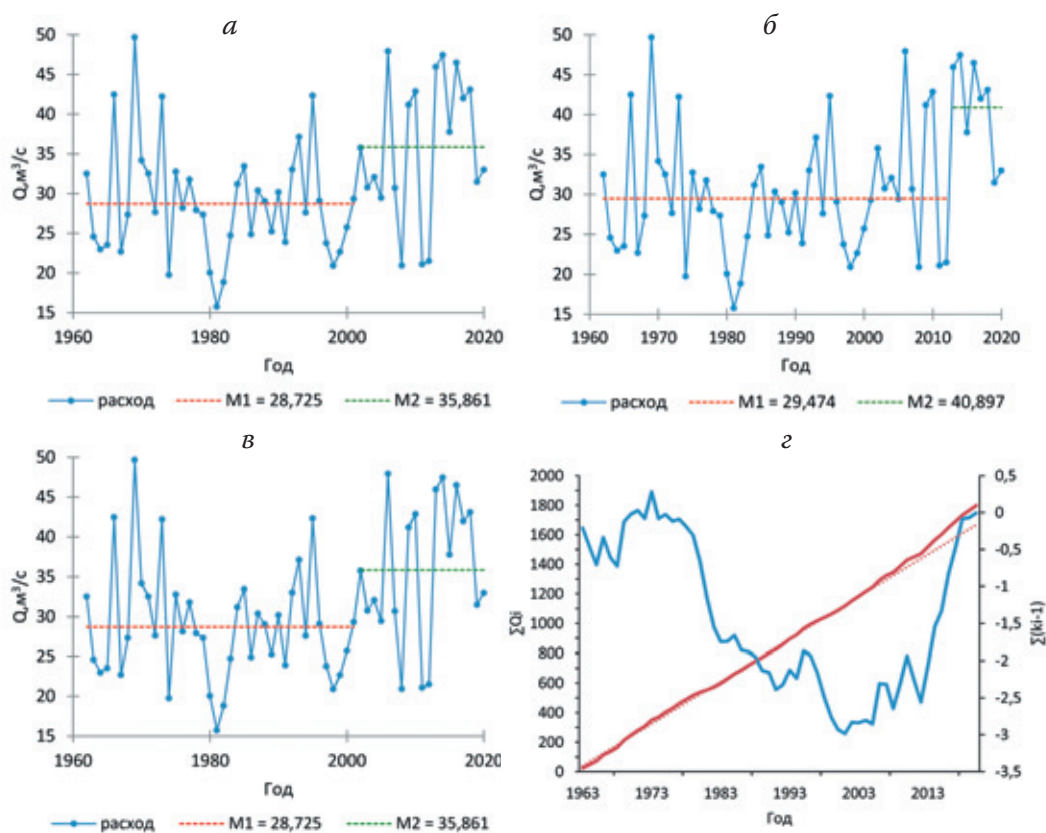


Рис. 3. Определение даты нарушения стационарности рядов среднегодовых расходов воды на г/п р. Ануй–свх. Ануйский: *a* – Pettitt's test; *б* – Standard normal homogeneity test; *в* – Buishand range test; *г* – методом интегральных кривых (M1 – среднее до, M2 – среднее после нарушения однородности ряда).

Fig. 3. Dating of the year with a breaking point in the series of average annual runoff at the gauge River Anuy–farm Anuysky, using: *a* – Pettitt's test; *б* – Standard normal homogeneity test; *в* – Buishand range test; *г* – method of integral curves (M1 – average before and M2 – average after stationarity disturbance).

с неустойчивым руслом (как у р. Чумыш), характеризуются неоднозначными кривыми связи [21]. В работе [22] описано нарушение однородности рядов расходов воды в связи с переносом гидрологических постов и, как следствие, изменением кривой связи. Так или иначе, этот вопрос является темой отдельного исследования, выходящего за рамки представленной работы.

Сезонный сток

На всех исследуемых реках бассейна Верхней Оби фиксируется увеличение стока зимней межени. Эта тенденция, характерная для большинства рек России, объясняется потеплением климата, увеличением количества оттепелей, и, соответственно, грунтового питания рек [8, 13, 23]. В работе [1] в качестве причины увеличения стока зимней межени в бассейне р. Волги указывается также рост осенних осадков.

Таблица 3. Результаты анализа на однородность расходов зимней межени
Table 3. Results of homogeneity analysis of winter low-water flow rates

Река – створ	Метод						Тенденция +/-
	Pettitt's test	Standard normal homogeneity test (SNHT)	Buishand's test	Von Neumann's test	t	F	
р. Бия – г. Бийск	однородный	однородный	однородный	однородный			
р. Каменка – с. Советское	2006	2009	2009	неоднородный	<u>4,04</u> 4,76	-	+
р. Песчаная – с. Точильное	1992	1992	1992	неоднородный	5,29	3,84	+
р. Ануй – с. Солонешное	1994	2009	1994	неоднородный	<u>5</u> 5,8	<u>6,25</u> 5,26	+
р. Ануй-свх Ануйский	1999	2009	2009	неоднородный	<u>3,7</u> 5,1	<u>2,94</u> 2,32	+
р. Чарыш – с. Чарышское	2003	2013	2006	неоднородный	<u>4,7</u> <u>7,4</u> 5,3	<u>4,16</u> <u>2,17</u> 4,76	+
р. Чарыш – свх. Чарышский	1999	2013	2006	неоднородный	<u>3,9</u> <u>6,04</u> 4,05	<u>2,27</u> <u>1,05</u> 2,5	+
р. Белая – с. Бугрышиха	2009	2012	2012	неоднородный	<u>4,4</u> 5,3	<u>0,94</u> 2,1	+
р. Алей – с. Староалейское	однородный	2013	2012	неоднородный	5,6	2,85	+
р. Алей – г. Алейск	1986	2013	1992	неоднородный	<u>6,7</u> <u>5,9</u> 7,95	<u>4,34</u> <u>3,84</u> 1,17	+
р. Касмала – с.Рогозиха	2000	2013	2000	неоднородный	<u>3,84</u> 3,89	-	+
р. Чумыш – пгт Тальменка	2001	2013	2006	неоднородный	<u>3,1</u> <u>4,25</u> 3,76	<u>1,31</u> <u>1,51</u> 1,2	+
р. Обь – г. Камень-на-Оби	1992	2009	1992	неоднородный	<u>4</u> 5,1	<u>3,03</u> 2,94	+

Анализ рядов зимних расходов в бассейне Верхней Оби показал, что у всех рек они неоднородны, за исключением р. Бия (ряд характеризуется как «сомнительный») (табл. 3). Наиболее ранняя дата нарушения однородности ряда зимних расходов приходится на 1992 г. (р. Песчаная). Для остальных рек Standard

normal homogeneity test (SNHT) определяет этот момент 2009 г. или 2012–2013 гг., согласно Pettitt's test и Buishand's test разброс дат достаточно большой.

Сток летне-осенней межени на реках бассейна Верхней Оби характеризуется разнонаправленными изменениями. Ряды расходов летне-осенней межени, в большинстве случаев, однородны (табл. 4). Нарушение однородности ряда характерно для рек Песчаная (1983 г.), Ануй (2001 г.), Касмала и Алей (1983–1985 гг.). Для двух последних рек это, очевидно, связано с зарегулированием их стока, что подтверждается определенными при помощи тестов годами нарушения однородности ряда.

Таблица 4. Результаты анализа на однородность расходов летне-осенней межени

Table 4. Results of homogeneity analysis of summer-autumn low-water flow rates

Река – створ	Метод						Тенденция +/-
	Pettitt's test	Standard normal homogeneity test (SNHT)	Buishand's test	Von Neumann's test	t	F	
р. Бия – г. Бийск	однородный	однородный	однородный	однородный			
р. Каменка – с. Советское	однородный	однородный	однородный	однородный			
р. Песчаная – с. Точильное	1983	1983	1983	неоднородный	4,77	1,33	+
р. Ануй – с. Солонешное	1998	однородный	2001	неоднородный	3,04 3,28	<u>1,1</u> 1,25	+
р. Ануй – свх Ануйский	2001	2001	2001	неоднородный	3,6	1,56	+
р. Чарыш – с. Чарышское	однородный	однородный	однородный	однородный			
р. Чарыш – свх Чарышский	однородный	однородный	однородный	однородный			
р. Белая – с. Бугрышиха	однородный	однородный	однородный	однородный			
р. Алей – с. Староалейское	1985	2013	2000	неоднородный	2,9 4,2 3,6	3,45 <u>1,56</u> 3,03	+
р. Алей – г. Алейск	1985	1985	1985	неоднородный	6,26	0,30	+
р. Касмала – с. Рогозиха	1983	однородный	1984	неоднородный	2,91	1,61	+
р. Чумыш – пгт Тальменка	однородный	однородный	однородный	однородный			
р. Обь – г. Камень-на-Оби	однородный	однородный	однородный	однородный			

Изменение стока половодья на разных реках также носит разнонаправленный характер, нарушение однородности рядов наблюдается на реках Чумыш, Каменка (1978–1979 гг.) и Алей (1978 г.) (табл. 5). На р. Алей в створе г. Алейска

тесты зафиксировали дату начала регулирования стока Гилевским водохранилищем, выше по течению (с. Староалейское) ряд однородный

Таблица 5. Результаты анализа на однородность расходов половодья
Table 5. Results of homogeneity analysis of spring flood runoff

Река – створ	Метод						Тенденция +/-
	Pettitt's test	Standard normal homogeneity test (SNHT)	Buishand's test	Von Neumann's test	t	F	
р. Бия– г. Бийск	однородный	однородный	однородный	однородный			
р. Каменка-с. Советское	1979	1979	1979	однородный	3,4	2,5	–
р. Песчаная – с. Точильное	1990	однородный	1991	однородный			
р. Ануй – с. Солонешное	2003	однородный	2003	однородный			
р. Ануй-свх Ануйский	однородный	однородный	однородный	однородный			
р. Чарыш – с. Чарышское	2000	однородный	однородный	однородный			
р. Чарыш – свх Чарышский	однородный	однородный	однородный	однородный			
р. Белая – с. Бугрышиха	однородный	однородный	однородный	однородный			
р. Алей – с. Староалейское	однородный	однородный	однородный	однородный			
р. Алей-г. Алейск	1978	1977	1978	неоднородный	4,3	2,37	–
р. Касмала – с. Рогозиха	однородный	однородный	однородный	однородный			
р. Чумыш – пгт Тальменка	1979	1979	1979	неоднородный	4,17	2,18	–
р. Обь – г. Камень-на-Оби	однородный	однородный	однородный	однородный			

После анализа рядов годовых и сезонных расходов с помощью Pettitt's test, Standard normal homogeneity test (SNHT), Buishand's test и von Neumann's test для каждого неоднородного ряда проведен t-тест (табл. 2–5): т. к. в ряде случаев год нарушения однородности определен неоднозначно, расчет выполнен для всех вариантов «разделения ряда», значения t-критерия приведены в таблицах через дробь. Для всех гидрологических рядов с зафиксированной точкой «перелома» критерий Стьюдента превышает критическое значение при $\alpha = 5\%$, что подтверждает неоднородность рядов по среднему значению. В случае, если определялись разные годы нарушения однородности, макси-

мальное значение *t*-критерия соответствует разделению выборки с использованием *Standard normal homogeneity test* (SNHT).

В исследовании [24] отмечается, что параметрические критерии проверки однородности дисперсий, к которым относится критерий Фишера, чрезвычайно чувствительны к малейшим отклонениям от нормальности, что негативно отражается на корректности статистических выводов. По результатам теста Колмогорова–Смирнова, для большинства рядов подтверждается гипотеза об их принадлежности к нормальному закону распределения, за исключением зимних расходов рек Каменка и Касмала. Выборки, принадлежащие к нормальному распределению, проанализированы с использованием *F*-критерия. Часть рядов, в основном зимних расходов, характеризуются неоднородностью дисперсий. Критическое значение *F*-критерия определяется в зависимости от количества элементов в сравниваемых выборках, т. е. существенно зависит от точки разбиения. В случаях неоднозначного определения года нарушения однородности, максимальная разница дисперсий соответствует разделению выборки с использованием *Pettitt's test* либо *Buishand's test*.

Значимые расчетные значения *F*-критерия для расходов зимней межени свидетельствуют об увеличении дисперсии, что совпадает с результатами, приведенными в [9]. Для расходов половодья характерно уменьшение дисперсии в современный период, что может быть связано с зарегулированностью стока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Период с середины 1960-х годов характеризуется положительными тенденциями годового стока на реках бассейна Верхней Оби. По результатам анализа разностных интегральных кривых, многоводная фаза гидрологического цикла началась в 2012 г. Общие для большинства рек тенденции позволяют сделать вывод о том, что изменение стока носит естественный характер и связано с природно-климатическими факторами.

С использованием *von Neumann's test*, *Standard normal homogeneity test* (SNHT), *Pettitt's test* и *Buishand's test* проанализированы расходы воды на стационарность и определены годы нарушения однородности рядов. Последующее сравнение полученных выборок по критерию Стьюдента подтвердило их неоднородность по среднему значению. Таким образом, разделение гидрологических рядов целесообразно производить с учетом локальных границ стационарности, которые могут не совпадать даже у соседних водосборов. Наиболее чувствительным для оценки стационарности по среднему значению является *Standard normal homogeneity test* (SNHT).

Большинство рядов имеют нормальное распределение (по критерию Колмогорова–Смирнова). Значимые расчетные значения *F*-критерия свидетельствуют об увеличении дисперсии для расходов зимней межени и уменьшении – для половодья.

Неоднородность рядов годовых расходов, половодья и летней межени характерна, в основном, для притоков Оби, стекающих с северного макросклона Алтайской горной области. Это ожидаемо, т. к. именно средние реки являются

наиболее чувствительными индикаторами изменений климатических факторов формирования стока.

Повсеместно отмечается рост расходов зимней межени, ряды характеризуются неоднородностью средних значений по всем критериям. Это характерно для всех рек, независимо от размеров водосбора и типа водного режима, за исключением р. Бии, сток которой зарегулирован Телецким озером. Очевидно, что увеличение расходов зимней межени вызвано ростом зимних температур и увеличением осадков в октябре-ноябре.

В отличие от рек Европейской территории России, нарушение однородности рядов на большинстве рек бассейна Верхней Оби, обусловленное климатическими изменениями, произошло в 2000-е (реже в 1990-е) годы, что существенно позднее начала интенсивного роста температур (со второй половины 1970-х годов).

В некоторых случаях нарушение стационарности рядов связано не с климатическими факторами, а с антропогенным влиянием, что подтверждается зафиксированными тестами «переломными» годами, например, переносом гидрологического поста на р. Чумыш в 1973 г. или строительством Гилевского водохранилища на р. Алей в конце 1970-х годов.

Таким образом, при оценке однородности гидрологических рядов целесообразно совместное использование комплекса методов, включающих von Neumann's test, Standard normal homogeneity test (SNHT), Pettitt's test, Buishand's test и традиционные критерии Стьюдента и Фишера. Разделение временных рядов с учетом локальных границ стационарности делает оценки критериев Стьюдента и Фишера более обоснованными, при этом полученные результаты не противоречат исследованиям, выполненным ранее с помощью этих методов. Предложенный подход целесообразно использовать при гидрологических расчетах и прогнозах в условиях нестационарности, связанной с климатическими изменениями и антропогенным влиянием на реки и их водосборы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болгов М.В., Филиппова И.А., Осипова Н.В., Коробкина Е.А., Трубецкова М.Д. Современные особенности гидрологического режима рек бассейна Волги // Вопросы географии. 2018. № 145. С. 206–218.
2. Лавров С.А., Калужный И.А. Влияние климатических изменений на сток весеннего половодья и факторы его формирования в бассейне Волги // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2016. № 6. С. 42–60. DOI: 10.35567/1999-4508-2016-6-4.
3. Гельфан А.Н., Гусев Е.М., Калугин А.С., Крыленко И.Н., Мотовилов Ю.Г., Насонова О.Н., Миллионщикова Т.Д., Фролова Н.А. Сток рек России при происходящих и прогнозируемых изменениях климата: обзор публикаций. 2. Влияние изменения климата на водный режим рек России в 21 веке // Водные ресурсы. 2022. Т. 49. № 3. С. 270–285. DOI: 10.31857/S0321059622030051.
4. Гельфан А.Н., Фролова Н.А., Магрицкий Д.В., Киреева М.Б., Григорьев В.Ю., Мотовилов Ю.Г., Гусев Е.М. Влияние изменения климата на годовой и максимальный сток рек России: оценка и прогноз // Фундаментальная и прикладная климатология. 2021. Т. 7. № 1. С. 36–79. DOI: 10.21513/2410-8758-2021-1-36-79.
5. Георгиевский В.Ю., Грек Е.А., Грек Е.Н., Лобанова А.Г., Молчанова Т.Г. Оценка современных изменений максимального стока рек России // Метеорология и гидрология. 2019. № 11. С. 46–55.

6. Болгов М. В., Филиппова И. А. Об определении расчетных характеристик стока в условиях нарушения однородности временных рядов // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2022. № 5. С. 7–17. DOI: 10.35567/19994508_2022_5_1.
7. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / под ред. В.М. Катцова; Росгидромет. СПб.: Научное издание, 2022. 676 с.
8. Водные ресурсы России и их использование / под ред. И.А. Шикломанова. СПб.: ГГИ, 2008. 600 с.
9. Фролова Н.А., 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. Т. 49. № 3. С. 251–269. DOI: 10.31857/S032105962203004X.
10. Болгов М.В. Оценка гидрологических и водохозяйственных характеристик в условиях неопределенности факторов формирования // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2016. № 4. С. 6–17. DOI: 10.35567/1999-4508-2016-4-1.
11. Ресурсы поверхностных вод. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Ч. 1: Реки и каналы. Т. 1: РСФСР. Вып. 10. Бассейны Оби (без бассейна Иртыша), Надыма, Пура, Таза / под ред. Ж.С. Попова. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. 542 с.
12. Волчек А.А., Сидак С.В., Парфомук С.И. Многолетняя изменчивость стока рек Беларуси в условиях изменения климата и антропогенных воздействий // Актуальные научно-технические и экологические проблемы сохранения среды обитания: сб. трудов IV Межд. научно-практ. конф., посвященной 55-летию Брестского государственного технического университета и 50-летию факультета инженерных систем и экологии, Брест, 7–8 октября 2021 г. Брест: БрГТУ, 2021. С. 101–113.
13. Таврыкина О.М., Шмакова М.В., Булак И.А., Русина А.О., Громадская Е.И. Сток трансграничных рек Республики Беларусь и России в условиях изменяющегося климата // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 2. С. 101–114. DOI: 10.35567/19994508-2024-2-101-114.
14. Wijngaard J.B, Klein Tank A.M.G, Können G.P. Homogeneity of 20th century European daily temperature and precipitation series // International Science Journal of Climatology. 2003. 23(6). P. 679–692. DOI: 10.1002/joc.906.
15. Alexandersson H. A homogeneity test applied to precipitation data // Journal of Climatology. 1987. No 6. P. 661–675. DOI:10.1002/JOC.3370060607.
16. Buishand T.A. Some methods for testing the homogeneity of rainfall data // Journal of Hydrology. 1982. Vol. 58. P. 11–27. DOI:10.1016/0022-1694(82)90066-X.
17. Pettitt A.N. A non-parametric approach to the change-point problem // Applied Statistics. 1979. 28(2). P. 126–135.
18. Neumann J. von. Distribution of the ratio of the mean square successive difference to the variance // The Annals of Mathematical Statistics. 1941. Vol. 12(4). P. 367–395.
19. Drissia T. K., Jothiprakash V., Anitha A. B. Statistical classification of streamflow based on flow variability in west flowing rivers of Kerala, India // Theoretical and applied climatology. 2019. Vol. 137(3). P. 1643-1658.
20. Vezzoli, R., Pecora, S., Zenoni, E., Tonelli, F. Data analysis to detect inhomogeneity, change points, trends in observations: an application to Po river discharge extremes. CMCC Research Paper. 2012. No. 138.
21. Двинских С.А., Девяткова Т.П., Китаев А.Б., Тереханова Т.А. Динамика кривых расходов воды как индикатор русловых процессов // Географический вестник. 2012. № 4(23). С. 30–40.
22. Будник С.В. О переносе створов гидрологических постов и однородности данных наблюдений за стоком воды // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов: труды VIII Всеросс. научно-практ. конф. с межд. участием, Пермь, 27–30 мая 2021 г. Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2021. С. 36–40.
23. Коробкина Е.А., Филиппова И.А., Харламов М.А. Оценка стока в бассейне р. Дон: необходимость смены парадигмы гидрологических расчетов // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 6. С. 663–673. DOI: 10.31857/S0321059620060073.

24. Лемешко Б.Ю. Критерии проверки гипотез об однородности. Руководство по применению. М.: Научно-издательский центр ИНФРА-М, 2021. 248 с.

REFERENCES

1. Bolgov M.V., Filippova I.A., Osipova N.V., Korobkina E.A., Trubetskova M.D. Present features of the hydrological regime of the rivers in the Volga River basin. *Problems of Geograpy*. 2018. No. 145. P. 206–218 (In Russ.).
2. Lavrov S.A., Kalyuzhnyi I.L. Climatic changes impact upon the spring high-water runoff and its formation factors in the Volga basin. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2016. No. 6. P. 42–60. (In Russ.).
3. Gelfan A.N., Gusev E.M., Kalugin A.S., Krylenko I.N., Motovilov Yu.G., Nasonova O.N., Millionshchikova T.D., Frolova N.L. Runoff of Russian rivers under current and projected climate change: A review 2. Climate change impact on the water regime of Russian Rivers in the XXI century. *Water Resources*. 2022. Vol. 49(3). P. 351–365. DOI: 10.1134/S0097807822030058
4. Gelfan A., Frolova N., Magritsky D., Kireeva M., Grigoriev V., Motovilov Yu., Gusev E. Climate change impact on annual and maximum runoff of Russian rivers: diagnosis and projections. *Fundamental and Applied Climatology*. 2021. Vol. 7 (1). P. 36–79. DOI: 10.21513/2410-8758-2021-1-36-79 (In Russ.).
5. Georgievskii V.Y., Grek E.A., Grek E.N., Lobanova A.G., Molchanova T.G. Assessment of modern changes in maximum river flow in Russia. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2019. Vol. 44 (11). P. 739–745. DOI: 10.3103/S1068373919110037 (In Russ.).
6. Bolgov M.V., Filippova I.A. On the determination of the calculated runoff characteristics in conditions of time series homogeneity violation. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2022. No. 5. P. 7–17. DOI: 10.35567/19994508_2022_5_1 (In Russ.).
7. Third assessment report on climate changes and their consequences on the territory of the Russian Federation / ed. Kattsov V. M.; Roshydromet. St. Petersburg: Science-consuming technologies, 2022. 676 p. (In Russ.).
8. Water resources of Russia and their use / ed. Shiklomanov I.A., St. Petersburg: SHI, 2008. 600 p. (In Russ.).
9. Frolova N.L., Magritskii D.V., Kireeva M.B., Grigoriev V.Yu., Gelfan A.N., Sazonov A.A., Shevchenko A.I. Stream flow 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 (3). P. 333–350. DOI: 10.1134/S0097807822030046 (In Russ.).
10. Bolgov M.V. Assessment of hydrological and water management characteristics under conditions of uncertainty of the formation factors. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2016. No. 4. P. 6–17 (In Russ.).
11. Surface water resources. Long-term data on the regime and resources of land surface waters. Part 1: Rivers and canals. Vol. 1: RSFSR, Vol. 10: The basins of rivers Ob (without the Irtysh basin), Nadya, Pura, Taza. / ed. Popov J.S. L.: Gidrometoizdat, 1984. 542 p. (In Russ.).
12. Volchak A.A., Sidak S.V., Parfomuk S.I. Long-term variability of the river runoff in Belarus in the conditions of climate changes and anthropogenic influences. Current scientific, technical and environmental problems of habitat conservation: proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference dedicated to the 55th anniversary of Brest State Technical University and the 50th anniversary of the Faculty of Engineering Systems and Ecology, Brest, October 7–8, 2021 Brest: BrSTU, 2021. P. 101–113 (In Russ.).
13. Taurykina A.M., Shmakova M.V., Bulak I.A., Rusina A.O., Hramadskaya A.I. The flow of transboundary rivers of the Republic of Belarus and Russia in a changing climate. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2024. No. 2. P. 101–114. DOI:10.35567/19994508-2024-2-101-1 (In Russ.).
14. Wijngaard J.B., Klein Tank A.M.G., Können G.P. Homogeneity of 20th century European daily temperature and precipitation series. *International Journal of Climatology*. 2003. Vol. 23(6). P. 679–692. DOI: 10.1002/joc.906.
15. Alexandersson H. A homogeneity test applied to precipitation data. *Journal of Climatology*. 1987. No. 6. P. 661–675. DOI:10.1002/JOC.3370060607.

16. Buishand T.A. Some methods for testing the homogeneity of rainfall data. *Journal of Hydrology*. 1982. Vol. 58. P. 11–27. DOI:10.1016/0022-1694(82)90066-X.
17. Pettitt A.N. A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied Statistics*. 1979. Vol. 28(2). P. 126–135.
18. Neumann J. von. Distribution of the ratio of the mean square successive difference to the variance. *The Annals of Mathematical Statistics*. 1941. Vol. 12(4). P. 367–395.
19. Drissia T. K., Jothiprakash V., Anitha A. B. Statistical classification of stream flow based on flow variability in west flowing rivers of Kerala, India. *Theoretical and applied climatology*. 2019. Vol. 137. P. 1643–1658. DOI: 10.1007/s00704-018-2677-0.
20. Vezzoli, R., Pecora, S., Zenoni, E., & Tonelli, F. Data analysis to detect inhomogeneity, change points, trends in observations: an application to Po river discharge extremes. CMCC Research Paper. 2012. No. 138.
21. Dvinskih S.A., Devyatkovskaya T.P., Kitaev A.B., Terekhanova T.A. Dynamics of water flow curves as an indicator of channel processes. *Geographical Bulletin*. 2012. No. 4(23). P. 30–40 (In Russ.).
22. Budnik S. V. About carry gauge line hydrological posts and uniformity of the given supervis. Modern problems of reservoirs and their catchments: proceedings of the VIII All-Russian scientific-practical conference with international participation (Perm, May, 27-30, 2021). Perm State University. Perm, 2021. P. 36–40 (In Russ.).
23. Korobkina E.A., Filippova I.A., Kharlamov M.A. Evaluating the runoff in the Don basin: the need to change the paradigm of hydrological calculations. *Water Resources*. 2020. Vol. 47 (6). P. 924–933. DOI: 10.1134/S009780782006007X (In Russ.).
24. Lemeshko, B. Yu. Criteria for testing homogeneity hypotheses. Practical manual. M.: “Scientific Publishing Center INFRA-M”, 2021. 248 p. (In Russ.).

Сведения об авторах:

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

Ловцкая Ольга Вольфовна, старший научный сотрудник, Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 656038, Барнаул, ул. Молодежная, 1; ORCID: 0000-0002-3942-1350; e-mail: lov@iwep.ru

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

About the authors:

Svetlana Y. Samoilova, Candidate of Geographic Sciences, Senior Researcher, SB RAS Institute for Water and Environmental Problems. ul. Molodezhnaya 1, Barnaul 656038, Russia; ORCID: 0000-0002-3365-0048, e-mail: bastet@iwep.ru

Olga V. Lovtskaya, Senior Researcher, SB RAS Institute for Water and Environmental Problems. ul. Molodezhnaya 1, Barnaul 656038, Russia; ORCID: 0000-0002-3942-1350, e-mail: lov@iwep.ru

Anastasia B. Golubeva, Junior Researcher, SB RAS Institute for Water and Environmental Problems. ul. Molodezhnaya 1, Barnaul 656038, Russia; ORCID: 0000-0002-3942-1350, e-mail: apticagolub@yandex.ru

Самоочищение водных объектов урбанизированных территорий (на примере реки Дачная)

М.В. Шмакова¹  , Д.И. Исаев² 

 m-shmakova@yandex.ru

¹Институт озерадения Российской академии наук – обособленное структурное подразделение ФГБУН «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук», Санкт-Петербург, Россия

²Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Состояние донных отложений служит интегральным индикатором техногенной нагрузки на водный объект и позволяет выявить динамику загрязнения за длительный период. Данная работа посвящена анализу степени загрязненности донных отложений и оценке самоочищающей способности р. Дачной, протекающей по территории Санкт-Петербурга. **Методы.** Исследованы пробы донного грунта р. Дачная на содержание тяжелых металлов по отношению к региональным нормативам. Проведен анализ комплексных показателей степени загрязненности донных отложений. **Результаты.** Показатели анализа проб донных отложений р. Дачная (содержание кадмия, никеля, хрома, свинца, цинка, меди, мышьяка, ртути) были сопоставлены с региональными нормативами, фоновыми концентрациями, индексом геоаккумуляции и показали значительное превышение содержания тяжелых металлов по всем критериям качества. Установлено, что невыраженные скорости реки и, как следствие, замедленный водообмен в озеровидных расширениях русла приводят к накоплению тяжелых металлов. Однако связь содержания повышенных концентраций тяжелых металлов с возможными источниками загрязнения в виде объектов инфраструктуры, расположенных в непосредственной близости от водотока, не выявлена. Анализ динамики содержания тяжелых металлов в донных отложениях вдоль исследуемого водотока показал отсутствие процессов самоочищения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: р. Дачная, загрязнение, водоток, урбанизированный водосбор, донные отложения, тяжелые металлы.

Для цитирования: Шмакова М.В., Исаев Д.И. Самоочищение водных объектов урбанизированных территорий (на примере реки Дачная) // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 5. С. 39–50. DOI: 10.35567/19994508-2024-5-39-50.

Дата поступления 27.04.2024.

SELF-PURIFICATION OF WATER BOIES ON URBANIZED TERRITORIES (WITH THE DACHNAYA RIVER AS AN EXAMPLE)

Marina V. Shmakova¹  , Dmitriy I. Isaev² 

 m-shmakova@yandex.ru

¹Institute of Limnology RAS, Saint-Petersburg, Russia

²Russian State Hydrometeorological University, Saint-Petersburg, Russia

ABSTRACT

Relevance. The bottom sediments' state is an integral indicator of the technogenic load upon the given water body and enables to reveal the pollution dynamics over a long time period.

© Шмакова М.В., Исаев Д.И., 2024

This work is devoted to the analysis of the degree of contamination of bottom sediments and the assessment of the self-cleaning ability of the Dachnaya River flowing in the territory of St. Petersburg. **Methods.** We have studied the samples of the Dachnaya River bottom soil for the heavy metals' content in terms of their comparison with the regionally adopted norms. Analysis of the bottom sediments' pollution integrated indicators has been performed as well. **Results.** The results of the analysis of sediment samples on the river (cadmium, nickel, chromium, lead, zinc, copper, arsenic, mercury) They were compared with regional standards, background concentrations, and the geoaccumulation index and showed a significant excess of heavy metal content according to all these quality criteria. At the same time, the unexpressed speeds of the river and, as a result, the slow water exchange in the lake-like extensions of the riverbed leads to the accumulation of heavy metals. However, the connection of the content of elevated concentrations of heavy metals with possible sources of pollution in the form of infrastructure facilities located in the immediate vicinity of the watercourse has not been revealed. Also, an analysis of the dynamics of heavy metal content in bottom sediments along the studied watercourse showed the absence of self-purification processes.

Keywords: pollution, watercourse, urbanized catchment area, sediments, heavy metals

For citation: Shmakova M.V., Isaev D.I. Self-purification of water bodies on urbanized territories (with the Dachnaya River as an example). *Water Sector of Russia: Problems, Technologies. Management.* 2024. No. 5. P. 39–50. DOI: 10.35567/19994508-2024-5-39-50.

Received 27.04.2024.

ВВЕДЕНИЕ

Донные отложения рассматриваются как интегральный индикатор техногенной нагрузки на водный объект [1]. Их состояние позволяет проследить динамику загрязнения за длительный период техногенного воздействия. Тяжелые металлы (ТМ) относятся к загрязняющим веществам, снижение содержания которых в водных объектах может происходить за счет физических процессов массопереноса, сорбции и биоаккумуляции, физико-химических процессов комплексообразования [2–6]. Под воздействием физико-химических факторов в водных объектах происходит распределение ТМ между компонентами (вода, донные отложения) и, как следствие этого, могут наблюдаться процессы, которые можно отнести к процессам самоочищения.

Самоочищение вод – это восстановление их природных свойств в реках, озерах и других водных объектах, происходящее естественным путем в результате протекания взаимосвязанных физико-химических, биохимических и других процессов (турбулентная диффузия, окисление, сорбция, адсорбция и т. д.). Способность рек и озер к самоочищению находится в тесной зависимости от многих природных факторов. К числу таких факторов следует отнести: биологические – сложные процессы взаимодействия водных растительных организмов с поступающими стоками; гидрологические – разбавление и смешивание попавших загрязнений с основной массой воды; физические – влияние солнечной радиации и температуры; механические – осаждение взвешенных частиц; химические – превращение органических веществ в минеральные, т. е. минерализация.

В настоящее время ПДК для донных отложений не установлены и при оценке уровня загрязнения используют фоновые значения, кларки в породах, ПДК в почвах и другие геохимические показатели. Однако общим недостатком для

всех показателей является отсутствие особенностей гидрохимической трансформации загрязняющих веществ в системе «вода – наносы – донные отложения». Например, для определения степени загрязнения донных отложений тяжелыми металлами в Германии и других странах используют индексы геоаккумуляции I_{Geo} по Г. Мюллеру (табл. 1) [7–9], которые определяются на основании уравнения:

$$I_{Geo} = \ln_2\left(\frac{C}{1,5C_{фон}}\right), \quad (1)$$

где C – измеренная концентрация элемента в донных отложениях;

1,5 – коэффициент учета вариаций природных концентраций элемента;

$C_{фон}$ – геохимическая фоновая концентрация элемента (определяется по данным специальных исследований с учетом региональных особенностей рассеивания элемента).

Таблица 1. Оценка уровня загрязнения донных отложений тяжелыми металлами [7]

Table 1. Assessment of the bottom sediments pollution level with heavy metals [7]

Значение индекса геоаккумуляции	Классы геоаккумуляции	Уровень загрязненности донных отложений (ДО) тяжелыми металлами
> 0	0	Практически незагрязненные донные отложения
> 0–1	1	Незагрязненные до умеренно загрязненного донные отложения
> 1–2	2	Умеренно загрязненные донные отложения
> 2–3	3	Средне загрязненные донные отложения
> 3–4	4	Сильно загрязненные донные отложения
> 4–5	5	Сильно загрязненные до чрезмерной загрязненности донные отложения
> 5	6	Чрезмерно загрязненные донные отложения

Для оценки качества донных отложений в исследуемых водных объектах можно использовать индекс загрязненности донных отложений (ИЗДО):

$$\text{ИЗДО} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{\text{ПДК}_i}, \quad (2)$$

где n – число использованных показателей;

C_i – фактическое содержание i -ого загрязняющего вещества, мг/л;

ПДК_i – предельно допустимая концентрация i -ого вещества.

Для оценки степени загрязнения донных отложений тяжелыми металлами также используется индекс нагрузки загрязнения (PLI) [10], коэффициент загрязнения CF , $K3$ – показатель комплексного загрязнения. Значение CF отслеживает обогащение тяжелых металлов в осадке за определенный период.

Значение $CF \geq 6$ означает высокое загрязнение, $3 \leq CF < 6$ является значительным, $1 \leq CF < 3$ – умеренным, а $CF < 1$ показывает низкий уровень загрязнения:

$$PLI = \left(\sum_{i=1}^n CF_i \right)^{1/n}$$

$$CF_i = \frac{C_i}{C_{\text{фон}}} \quad (3)$$

$$КЗ = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n CF_i,$$

где i – индекс показателя; n – количество показателей.

В России утверждены нормы и критерии оценки загрязненности донных отложений в водных объектах Санкт-Петербурга, содержащие четыре класса загрязненности¹ (табл. 2). Этот документ является региональным и разработан в рамках российско-голландского сотрудничества по программе PSO 95/RF/3/1 в 1996 г.

Таблица 2. Нормы и критерии оценки загрязненности донных отложений в водных объектах Санкт-Петербурга, содержащие четыре класса загрязненности

Table 2. Norms and criteria for assessing the contamination of bottom sediments in the water bodies of St. Petersburg, containing four pollution classes

Загрязняющее вещество	Целевой уровень, мг/кг	Предельный уровень, мг/кг	Проверочный уровень, мг/кг	Уровень, требующий вмешательства, мг/кг
Кадмий (Cd)	0,8	2	7,5	12
Ртуть (Hg)	0,3	0,5	1,6	10
Медь (Cu)	35	35	90	190
Никель (Ni)	35	35	45	210
Свинец (Pb)	85	530	530	530
Цинк (Zn)	140	480	720	720
Хром (Cr)	100	380	380	380
Мышьяк (As)	29	55	55	55

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Река Дачная протекает на юго-западе Петербурга. До XVIII в. она брала свой исток в болотистой местности севернее Волхонского шоссе и Койровских деревень. Строительство Лиговского канала перерезало русло реки. Изначально

¹ Нормы и критерии оценки загрязненности донных отложений в водных объектах Санкт-Петербурга. Региональный норматив, разработанный в рамках российско-голландского сотрудничества по программе PSO 95/RF/3/1. СПб., 1996. 20 с.

была известна как Попов ручей или Поповка, в XX в. получила название по местности Дачное. В 1960-х годах в ходе массового жилищного строительства был засыпан нижний участок русла к северу от Ленинского проспекта. Верховья р. Дачная канализованы и используются в мелиоративных целях.

Река Дачная протекает в меридиональном направлении в районе проспекта Ветеранов в юго-западной части Санкт-Петербурга, ее длина составляет 6,3 км. Ширина открытой части реки меняется от относительно небольших значений в русловой части (5–15 м) до 60 м у Шереметевского сквера. Глубины исследуемого участка реки меняются от 2,75 м (участок пр. Народного Ополчения – пр. Ветеранов) до 0,4–1,0 м (пр. Ветеранов – Дачный) и далее постепенно увеличиваются до 2,2 м в районе Ленинского проспекта. Река разделена в своем течении дамбами-путепроводами на четыре неравные ветви, течение в которых затруднено. Берега земляные, высотой до 2–4 м, уклонами 20–50°, поросли травой, редкими деревьями, у уреза воды часто встречаются заросли тростника. Местами склоны реки искусственно выровнены с уклонами 40–50°. Наблюдаются слабые оползневые явления. На берегах р. Дачной имеется несколько бетонных водосливных труб и колодцев диаметром около 50 см. Донные отложения водотока представлены несортированным грунтом и крупной опесачаненной пылью.

Химический состав донных отложений р. Дачная

В исследуемом водотоке отобрано 30 образцов донного грунта, которые исследованы на содержание тяжелых металлов – меди, свинца, никеля, хрома, цинка, кадмия, мышьяка, ртути (рис. 1). Следует отметить повышенные значения концентраций практически по всем исследуемым показателям. Однако, согласно приведенным в работе [11] результатам исследования, содержания тяжелых металлов в донных отложениях рек северо-западного региона, полученные в результате анализа концентрации, соответствуют или незначительно превышают фоновые значения. Выявлена пространственная неоднородность, которая не может полагаться генетическим химическим составом донного грунта, а определенно имеет антропогенную природу. Наибольшее суммарное количество металлов наблюдается в илистых донных отложениях и находится в диапазоне 256–565 мг/кг, за исключением образца Дачная-10 (20 м выше по течению, поворот на прямое русло к Шереметьевскому мосту) – 61 мг/кг.

Значительно меньше металлов обнаружено в песчаных донных отложениях – 112–155 мг/кг. В донных отложениях, сложенных разнородным илистым песком (63 % образцов), количество металлов находится в диапазоне от 119 до 256 мг/кг, за исключением станций отбора Дачная-23 (420 мг/кг) и Дачная-6, Дачная-14, Дачная-15 – (16–52) мг/кг. При этом аккумуляция тяжелых металлов увеличивается в ряду: песок < илистый песок < ил песчаный. Анализ единичных показателей превышения измеренных концентраций над значениями ПДК показал, что наибольшие превышения по всем станциям отбора проб приходятся на цинк. Вместе с тем, анализ содержания тяжелых металлов в донных осадках по отношению к региональным нормативам¹ выявил отсутствие загрязнения никелем, кадмием, свинцом, хромом и мышьяком на всех станциях.

Анализ превышения измеренных концентраций тяжелых металлов над фоном [11] показал существенные превышения содержания ртути в донных отложениях для всех станций отбора в десятки и сотни раз. Устойчивые превышения содержания тяжелых металлов над фоновыми значениями почти для всех станций приходится также на медь и цинк. Сопряженный алгоритмически индекс геоаккумуляции *Igeo* для почти всех показателей и проб соответствовал уровню от «практически незагрязненные донные отложения» до «умеренно загрязненные» и «средне загрязненные». Исключение составил индекс геоаккумуляции для ртути, который показал загрязнение от «умеренного» до «чрезмерного».

При анализе комплексных показателей степени загрязненности донных отложений также получен неудовлетворительный результат. Показатель комплексного загрязнения (КЗ) по всем исследуемым элементам показал превышения в 1,5–18 раз над единицей почти для всех станций отбора проб воды. Лишь для станции Дачная-14 коэффициент КЗ не превышал единицу. Индекс *PLI* определил загрязнение от «умеренного» до «чрезвычайно загрязненного» для половины станций. При этом превышение измеренных концентраций над ПДК в среднем для всех исследуемых показателей (ИЗДО) составляет 1,25–2,05 ПДК лишь для семи станций Дачная (2, 3, 5, 7, 20, 21, 23).

Из приведенного выше анализа единичных и комплексных показателей загрязнения можно сделать вывод о том, что по сравнению с фоновыми значениями региональных концентраций имеет место существенный антропогенный вклад в содержание тяжелых металлов в донных отложениях р. Дачной. При этом наиболее значительно превышаемый показатель для всех станций отбора – это ртуть, также почти на всех станциях отбора в пробах превышено содержание меди и цинка.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Частный водосбор исследуемого участка р. Дачной представлен жилой застройкой и хорошо развитой инфраструктурой. В непосредственной близости от береговой линии расположено 11 медицинских организаций, в т. ч. медицинские лаборатории, две ветеринарные клиники, бензозаправочная станция и две автомайки. Водный объект расположен в пределах территории, ограниченной крупными магистралями – КАД, Дачный пр., пр. Ветеранов, Ленинский пр. и пр. Стачек.

Тяжелые металлы поступают в придорожное пространство как в результате работы автотранспортных средств, так и при истирании дорожного полотна. От истирания автопокрышек в почву поступают алюминий, кобальт, медь, железо, марганец, свинец, никель, фосфор, титан, цинк и другие элементы [12–16]. Подшипники, вкладыши, тормозные масла – источники поступления в окружающую среду меди и цинка [17]. Кадмий попадает в природную среду в результате износа шин и истирания асфальтобетона, никель и хром – продукты износа покрытий кузовов, железо – продукт истирания цилиндров двигателя [17]. Основная масса газовых выбросов оседает в непосредственной близости от автодорог, остальная часть в зависимости от рельефа местности, направления ветра,

типа почвы, растительного покрова, наличия лесозащитных насаждений может распространяться на расстояния до 200 м от полотна дороги. Результатом суммарного действия рассеянных газовых выбросов и тяжелых металлов является изменение биоты придорожных зон. Наземные части растений загрязняются непосредственно из воздуха, через корневую систему и вторично – с поверхности почвы. Наибольшее отрицательное воздействие такого загрязнения наблюдается в стометровой полосе, непосредственно прилегающей к дороге [17].

Повышенное содержание таких тяжелых металлов, как кадмий, ртуть, свинец и хром, также характерно для поступающего с территории автомоек стока. Наличие значительных концентраций этих тяжелых металлов в донных отложениях исследуемого участка русла р. Дачной определяет в качестве основного источника загрязнения именно эти объекты инфраструктуры.

Однако прямой зависимости повышенного содержания тяжелых металлов в донных отложениях от расположения объектов инфраструктуры не наблюдается, тогда как имеет место прямая зависимость концентрации тяжелых металлов от типа донных отложений. Как известно, поверхностная адсорбция тяжелых металлов в значительной степени зависит от их гранулометрического и композиционного состава. Наибольшее количество показателей с повышенными значениями концентраций приходится на илстые отложения, которые характеризуются высокой адсорбционной способностью.

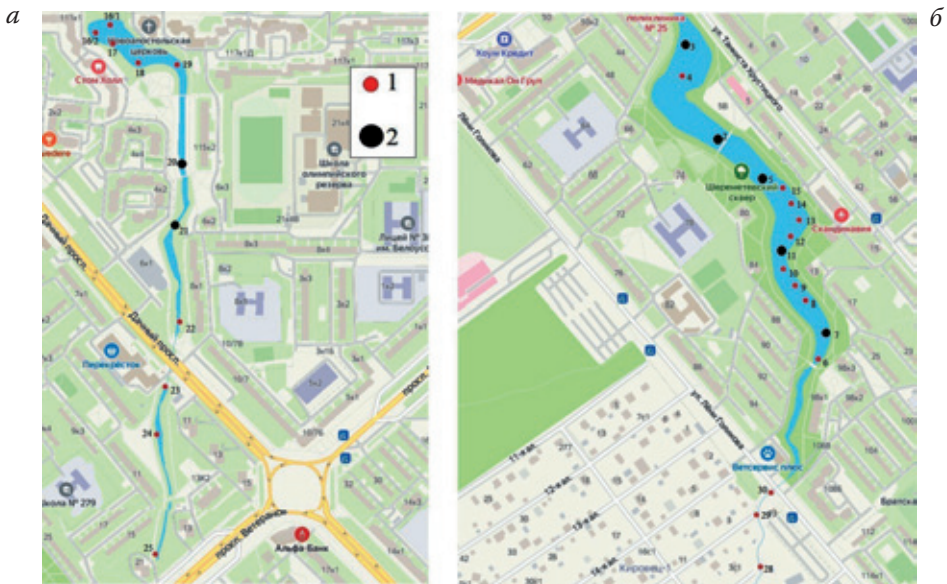


Рис. 1. Карта р. Дачной (*а* – севернее пр. Ветеранов; *б* – южнее проспекта Ветеранов) с обозначенными точками пробоотбора: 1 – станции с низким содержанием тяжелых металлов в донных отложениях; 2 – станции с повышенным содержанием тяжелых металлов в донных отложениях.

Fig. 1. The Dachnaya River map (*a* is north of Veterans Avenue; *b* is south of Veterans Avenue) with designated sampling points: 1 – stations with a low content of heavy metals in the bottom sediment; 2 – stations with a high content of heavy metals in bottom sediment.

Пространственное распределение тяжелых металлов в донных отложениях не связано с морфометрией русла р. Дачной, поскольку глубина всей исследуемой части акватории примерно одинакова и составляет около двух метров. Также не обнаружены пространственные закономерности распределения концентраций вдоль течения реки. Замедленный водообмен водотока в озеровидных расширениях русла приводит к сосредоточенности наибольших концентраций тяжелых металлов, прежде всего, у объектов инфраструктуры, являющихся возможными источниками загрязнения.

Общая степень самоочищения р. Дачной по отношению к тяжелым металлам рассчитана по формуле:

$$CC = 100 \frac{C_{i-1} - C_i}{C_i}, \quad (4)$$

где CC – степень самоочищения, %;

C – содержание металла в створе i , кг/л [17].

Или в абсолютных единицах:

$$CC' = C_{i-1} - C_i \quad (5)$$

На рис. 2 и рис. 3 приведены динамика изменения концентраций тяжелых металлов по длине р. Дачная и интегральные кривые степени самоочищения реки (в абсолютных единицах). Наибольшие концентрации по хрому, цинку и меди приходятся на среднее и нижнее течение р. Дачной, тогда как по прочим показателям концентрации меняются точно, в зависимости от источника загрязнения.

Анализ степени самоочищения реки вдоль всего исследуемого участка не показал никаких закономерностей, что является следствием высокого фоновое содержания тяжелых металлов в грунтах исследуемого региона, а также свидетельствует об отсутствии процессов самоочищения и прямой связи содержания повышенных концентраций тяжелых металлов в донных отложе-

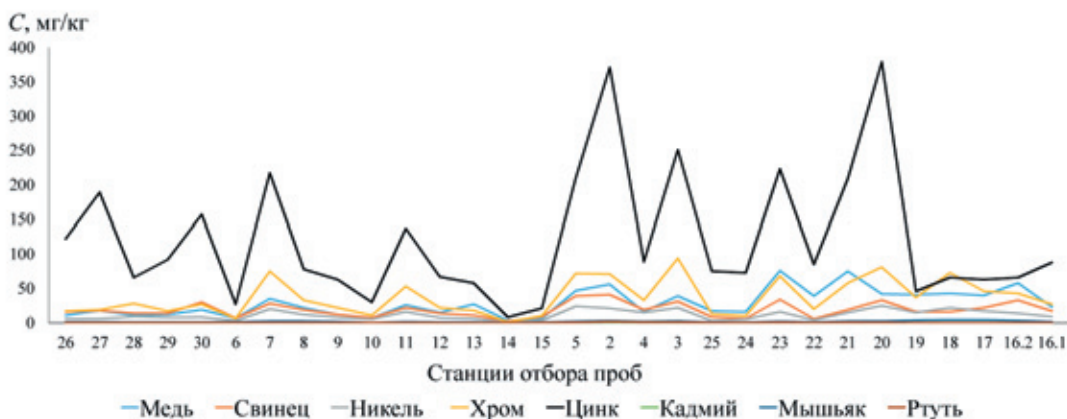


Рис. 2. Динамика изменения концентраций тяжелых металлов по длине р. Дачная
Fig. 2. Dynamics of changes in heavy metal concentrations along the length of the Dachnaya River.

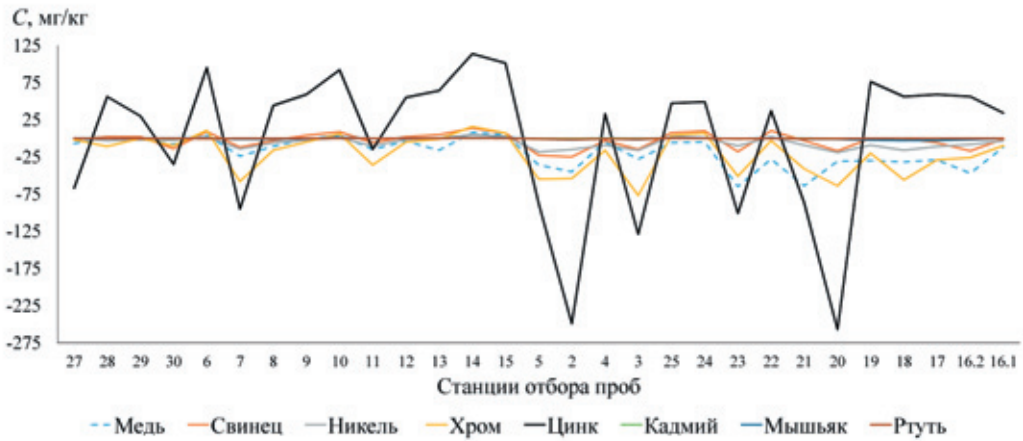


Рис. 3. Интегральные кривые степени самоочищения р. Дачная.
 Fig. 3. Integral curves of the Dachnaya River self-purification degree .

ниях с источниками загрязнения. Последнее объясняется, в первую очередь, относительно неравномерным поступлением загрязняющих веществ в акваторию р. Дачной и ее весьма замедленным водообменом. Все это определяет отсутствие динамики выноса загрязняющих соединений и их аккумуляцию в донных отложениях.

Следует отметить, что сорбционные процессы занимают важное место в самоочищении водных экосистем, перераспределении тяжелых металлов в водных объектах. Миграционную способность тяжелых металлов из донных отложений в воду можно объяснить посредством коэффициента распределения K [18, 19]:

$$\lg K = \frac{C_{\text{ДО}}}{C_{\text{вода}}}, \quad (6)$$

где $C_{\text{ДО}}$ и $C_{\text{вода}}$ – концентрация тяжелых металлов в донных отложениях и в воде соответственно.

Интерпретация $\lg K$ сводится к тому, что чем меньше значение коэффициента распределения, тем интенсивнее миграция металла из донных отложений в воду. Использование коэффициента распределения в сезонной динамике для каждого металла позволяет определить периоды их максимального содержания в воде с предположением о влиянии исследуемых факторов на поступление тяжелых металлов из донных отложений в воду, как следствие этого, на степень самоочищения воды от тяжелых металлов. Однако, в силу отсутствия проб воды на гидрохимический анализ на исследуемом водном объекте, определить физико-химические причины самоочищения р. Дачной в непосредственных местах отбора проб не представляется возможным.

ВЫВОДЫ

Химический состав донных отложений водных объектов является одной из компонент, формирующих качество воды. В водные объекты урбанизиро-

ванных территорий металлы попадают с поверхностными водами и в результате антропогенной деятельности на водосборе. Высокая токсичность ионных форм тяжелых металлов, их биоаккумуляция определяют актуальность изучения процессов миграции и трансформации тяжелых металлов и оценки интенсивности самоочищения водных объектов. При этом донные отложения водотоков с замедленным водообменом, протекающих по урбанизированной территории, являются устойчивой аккумулирующей емкостью для загрязняющих веществ. Адсорбируя тяжелые металлы, донные отложения способствуют самоочищению водной среды, однако при взмучивании донные отложения определяют вторичное загрязнение водного объекта.

На основании проведенных исследований на определенных участках дна р. Дачной выявлено значительное превышение содержания тяжелых металлов по всем критериям качества: региональные нормативы, фоновые концентрации, индекс геоаккумуляции. Повышенная концентрация таких тяжелых металлов, как кадмий, ртуть, свинец и хром, характерна для стока, поступающего преимущественно с антропогенных инфраструктурных объектов, и, прежде всего, с территории автомоек.

Анализ динамики содержания тяжелых металлов в донных отложениях вдоль исследуемого водотока показал отсутствие процессов самоочищения. При этом отмечена прямая зависимость концентрации тяжелых металлов от типа донных отложений. Наибольшее количество показателей с повышенными значениями концентраций приходится на илистые отложения, которые характеризуются высокой адсорбционной способностью.

Исследование степени загрязнения донных отложений малоизученной с гидрологической и гидрохимической точек зрения р. Дачной является первым этапом оценки экологического состояния водотока. Дальнейшее комплексное обследование р. Дачной позволит разработать рекомендации по улучшению качества воды и оздоровлению реки в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Веницианов Е.В., Кирпичникова Н.В., Щеголькова Н.М. Разработка интегральных критериев выделения потенциально опасных зон донных отложений водохранилищ // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2016. № 6. С. 27–40. DOI: 10.35567/1999-4508-2016-6-3.
2. Forstner U., Wittmann G.T.W. Metal pollution in the aquatic environment. Berlin, Springer-Verlag, 1981. 486 p.
3. Elderfield H., McCaffrey R.J., Luedtke N., Bender M., Truesdale V.W. Chemical diagenesis in Narragansett Bay sediments // American Journal of Science. 1981. Vol. 281. P. 1021–1055.
4. Веницианов Е.В., Лепихин А.П. Физико-химические основы моделирования миграции и трансформации тяжелых металлов в природных водах. Екатеринбург: РосНИИВХ, 2002. 236 с.
5. Никаноров А.М. Гидрохимия. СПб.: Гидрометеоиздат, 2001. 444 с.
6. Скурлатов Ю.И., Дука Г.Г., Мизити А.М. Введение в экологическую химию. М.: Высшая школа, 1994. 400 с.
7. Mueller G. Schwermetalle in den Sedimenten des Rheins. Veraenderungen seit. 1979. H. 24. P. 778–783.
8. Kowalska J.B., Mazurek R., Gašiorek M., Zaleski T. Pollution indices as useful tools for the comprehensive evaluation of the degree of soil contamination // Environmental Geochemistry and Health. 2018. Vol. 40. P. 2395–2420.

9. Nowrouzi M., Pourkhabbaz A. Application of geoaccumulation index and enrichment factor for assessing metal contamination in the sediments of Hara Biosphere Reserve, Iran // *Chemical Speciation & Bioavailability*. 2014. Vol. 26. P. 99–105.
10. Islam M.S., Ahmed M.K., Raknuzzaman M., Habibullah-Al-Mamun M., Islam M.K. Heavy metal pollution in surface water and sediment: a preliminary assessment of an urban river in a developing country // *Ecology indicator*. 2015. No. 48. P. 282–291.
11. Опекунов А.Ю., Янсон С.Ю., Опекунова М.Г., Кукушкин С.Ю. Минеральные фазы металлов в техногенных осадках рек Санкт-Петербурга при экстремальном загрязнении // *Вестник СПбГУ. Науки о Земле*. 2020. Т. 66. Вып. 2. С. 267–288.
12. Davydova S. Heavy metals as toxicants in big cities // *Microchemical Journal*. 2005. Vol. 79. P. 133–136.
13. Sharma V., Singh P. Heavy metals pollution and it's effects on environment and human health // *International Journal of Recent Scientific Research*. 2015. Vol. 6. Iss. 12. P. 7752–7755.
14. Веницианов Е.В., Кочарян А.Г. Тяжелые металлы в природных водах: сб. Воды суши: проблемы и решения, отв. ред. М.Г.Хубларян. М.: ИВП РАН, 1994. С. 299–326.
15. Остромогильский А.Х., Петрухин В.А.и др. // Мониторинг фоновое загрязнения природных сред. Вып. 4. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. С.122–147.
16. Петрухин В.А., Бурцева Л.В., Лапенко Л.А., Чичева Т.Б., Виженский В.А., Комарденкова И.В. Фоновое содержание микроэлементов в природных средах по мировым данным // Мониторинг фоновое загрязнения природных сред. Вып. 5. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. С. 4–27.
17. Левкин Н.Д., Лазеба А.В. Распространение тяжелых металлов в зоне движения автотранспорта // *Известия ТулГУ. Науки о Земле*, 2014. Вып. 3. С. 9–16.
18. Корнеева Т.В. Геохимия взаимодействия рудничного дренажа с природными водоемами как естественными гидрохимическими барьерами: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Новосибирск, 2010. 16 с.
19. Линник П.Н., Набиванец Б.И. Формы миграции металлов в природных водах. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 271 с.

REFERENCES

1. Venetsianov E.V., Kirpichnikova N.V., Shchegolkova N.M. Development of integral criteria for the identification of potentially dangerous zones of bottom sediments of reservoirs. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2016. No. 6. P. 27–40 (In Russ.).
2. Forstner U., Wittmann G.T.W. Metal pollution in the aquatic environment. Berlin, Springer-Verlag, 1981. 486 p.
3. Elderfield H., McCaffrey R.J., Luedtke N., Bender M., Truesdale V.W. Chemical diagenesis in Narragansett Bay sediments. *American Journal of Science*. 1981. Vol. 281. P. 1021–1055.
4. Venetsianov E.V., Lepikhin A.P. Physico-chemical bases of modeling migration and transformation of heavy metals in natural waters. Yekaterinburg: Rosniivkh, 2002. 236 p. (In Russ.).
5. Nikanorov A.M. *Hydrochemistry*. St. Petersburg: Hydrometeoizdat, 2001. 444 p. (In Russ.).
6. Skurlatov Yu.I., Duka G.G., Miziti A.M. Introduction to environmental chemistry. Moscow: Higher School, 1994. 400 p. (In Russ.).
7. Mueller G. Schwermetalle in den Sedimenten des Rheins. *Veraenderungen seit*. 1979. H. 24. P. 778–783.
8. Kowalska J.B., Mazurek R., Gąsiorek M., Zaleski T. Pollution indices as useful tools for the comprehensive evaluation of the degree of soil contamination. *Environmental Geochemistry and Health*. 2018. Vol. 40. P. 2395–2420.
9. Nowrouzi M., Pourkhabbaz A. Application of geoaccumulation index and enrichment factor for assessing metal contamination in the sediments of Hara Biosphere Reserve, Iran. *Chemical Speciation & Bioavailability*. 2014. Vol. 26. P. 99–105.
10. Islam M.S., Ahmed M.K., Raknuzzaman M., Habibullah-Al-Mamun M., Islam M.K. Heavy metal pollution in surface water and sediment: a preliminary assessment of an urban river in a developing country. *Ecology indicator*. 2015. No 48. P. 282–291.
11. Opekunov A.Yu., Yanson S.Yu., Opekunova M.G., Kukushkin S.Yu. Mineral phases of metals in technogenic sediments of St. Petersburg rivers under extreme pollution. *Bulletin of St. Petersburg State University. Earth Sciences*, 2020. Vol. 66. Issue. 2. P. 267–288 (In Russ.).

12. Davydova S. Heavy metals as toxicants in big cities. *Microchemical Journal*, 2005. Vol. 79. P. 133–136.
13. Sharma V., Singh P. Heavy metals pollution and it's effects on environment and human health. *International Journal of Recent Scientific Research*. 2015. Vol. 6. Iss. 12. P. 7752–7755.
14. Venitsianov E.V., Kocharyan A.G. Heavy metals in natural waters. *Land waters: problems and solutions*. Ed. by M.G.Khublaryan. M.: IVP RAS, 1994. P. 299–326 (In Russ.).
15. Ostromogilsky A.H., Petrukhin V.A. and others. In the book: *Monitoring of background pollution of natural environments*. Issue 4. L.: Hydrometeoizdat, 1987. P.122–147 (In Russ.).
16. Petrukhin V.A., Burtseva L.V., Lapenko L.A., Chicheva T.B., Vizhensky V.A., Komardenkova I.V. Background content of trace elements in natural environments according to world data. In the book: *Monitoring of background pollution of natural environments*. Iss. 5. L.: Hydrometeoizdat, 1989. P. 4–27 (In Russ.).
17. Levkin N.D., Lazeba A.V. Distribution of heavy metals in the traffic area. *News of TulsU. Earth Sciences*, 2014. Iss. 3 (In Russ.).
18. Korneeva T.V. *Geochemistry of interaction of mine drainage with natural reservoirs as natural hydrochemical barriers*: Abstract. ... Candidate of Geological Sciences. Novosibirsk, 2010. 16 p. (In Russ.).
19. Linnik P.N., Nabivanets B.I. *Forms of migration of metals in natural waters*. L.: Hydrometeoizdat, 1986. 271 p. (In Russ.).

Сведения об авторах:

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

Исаев Дмитрий Игоревич, канд. геогр. наук, заведующий кафедрой водно-технических изысканий, Российский гидрометеорологический университет, Россия, 195196, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98; ORCID: 0000-0003-2258-2366; e-mail: 79112541832@yandex.ru

About the authors:

Marina V. Shmakova, Doctor of Geographical Sciences, Leading Researcher, RAS Institute of Limnology Laboratory of Mathematical Modeling Methods, ul. Sevastyanova, 9, Saint-Petersburg, 196105, Russia; ORCID: 0000-0002-2393-0070; e-mail: m-shmakova@yandex.ru

Dmitriy I. Isaev, Candidate of Geographical Sciences, Head, Russian State Hydrometeorological University Department of Water Engineering Research, pr. Malookhtinskiy, 98, Saint-Petersburg, 195196, Russia; ORCID: 0000-0003-2258-2366; e-mail:79112541832@yandex.ru

Влияние промерзания почв речных бассейнов на процессы формирования пространственной и временной изменчивости зимнего и весеннего стока рек Башкортостана

В.И. Барышев  , И.Л. Калюжный

 hfl@mail.ru

ФГБУ "Государственный гидрологический институт", Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Процессы формирования зимнего и весеннего стока рек имеют важнейшее значение при проектировании и эксплуатации водохозяйственных систем, разработке методов прогнозов и расчетов стока. Актуальность этих исследований значительно возрастает при изменении климата, что обусловлено необходимостью поиска путей оптимизации водохозяйственного комплекса к новым условиям. **Методы.** Оценка изменений характеристик стока и механизма его формирования на речных водосборах основана на учете закономерностей почвенно-гидрологических и гидрофизических процессов. **Результаты.** На основании анализа натурных наблюдений на сети гидрологических станций УГМС Башкортостана установлено, что при изменении климата, уменьшилась глубина промерзания почвы, увеличился запас зимней стокоформирующей влаги, что вызывает повсеместное увеличение зимнего стока. При климатических изменениях сток весеннего половодья может как увеличиваться, так и уменьшаться в зависимости от процесса образования водонепроницаемого слоя и других факторов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: промерзание почвы, зимний и весенний сток, процессы формирования стока, изменение климата.

Для цитирования: Барышев В.И., Калюжный И.Л., Влияние промерзания почв речных бассейнов на процессы формирования пространственной и временной изменчивости зимнего и весеннего стока рек Башкортостана // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 5. С. 51–68. DOI: 10.35567/19994508-2024-5-51-68.

Дата поступления 25.04.2024.

Influence of soils freezing of river basins on processes of formation of spatial and temporal variability of winter and spring flow of Bashkortostan rivers

Valeriy I. Baryshev  , Igor L. Kalyuzhny

 hfl@mail.ru

State Hydrological Institute, St.-Petersburg, Russia

ABSTRACT

Relevance. The processes of formation of winter and spring flow of rivers are of paramount importance in the design and operation of water management systems, the development of methods for forecasting and calculating flow. The relevance of these studies increases significantly with climate change, as it becomes necessary to find ways to optimize the economic complex to new conditions. **Methods.** Assessment of changes in the characteristics of runoff and the mechanism

© Барышев В.И., Калюжный И.Л., 2024

of its formation on river catchments is based on taking into account the laws of soil-hydrological and hydro/physical processes. **Results.** Based on the analysis of field observations at the network of hydrological stations of Bashkortostan, it was established that with climate change, the depth of soil freezing decreased and the stock of winter stocking moisture increased. The latter causes a widespread increase in winter runoff. With climatic changes, spring flood runoff can either increase or decrease, depending on the process of formation of a waterproof layer and other factors.

Keywords: soil freezing, winter and spring runoff, runoff formation processes, climate change.

For citation: Baryshev V.I., Kalyuzhny I.L. Influence of soils freezing of river basins on processes of formation of spatial and temporal variability of winter and spring flow of Bashkortostan rivers. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2024. No. 5. P. 51–68. DOI: 10.35567/19994508-2024-5-51-68.

Received 25.04.2024.

ВВЕДЕНИЕ

На территории России во второй половине XX в. наблюдался рост температуры воздуха, атмосферных осадков и стока в речных системах. В работах [1, 2] впервые показано, что наибольшие изменения речного стока происходили на рубеже 1980–1981 гг., при этом интенсивность протекания этого процесса была индивидуальна для каждого региона России.

В аналитической работе, с детальным анализом инструментальных наблюдений, Б.Г. Шерстюковым [3] предложено современное изменение климата рассматривать как продолжение многолетних долгопериодных природных колебаний, которые являются основными факторами изменения климата. В практическом плане возникает вывод о том, что необходима адаптация к этим природным колебаниям, которая является оптимальным путем к преодолению возникших (или возникающих) препятствий на пути стабильного функционирования экономики конкретного региона [4]. В полной мере это относится и к бассейнам рек Республики Башкортостан.

Возможность оценки изменений характеристик зимнего и весеннего стока рек позволяет разработать методы адаптации водохозяйственного комплекса к новым климатическим условиям, а также усовершенствовать методы расчета и прогноза стока [5].

Изучение закономерностей процессов формирования стока речных бассейнов и оценка их временных изменений, обусловленных глобальным потеплением климата, является весьма актуальной проблемой для регионов России [6–8]. Так, проведенные исследования в бассейне р. Волги позволили установить разнонаправленный характер изменения весеннего стока: на 30 % водосборов происходит рост стока половодья, на 70 % – его уменьшение [7].

В статье [9], на основе анализа многолетних рядов среднегодовых значений температуры воздуха и годового количества осадков, установлено повышение на территории Республики Башкортостан температуры воздуха и осадков, а также определена доля изменений их сезонных значений. Однако оценка влияния этих климатических изменений на все фазы речного стока рек отсутствует.

Оценка изменений характеристик зимнего и весеннего стока рек осложняется тем, что они располагаются как в предгорной, так и в горной частях

Урала, охватывая при этом лесостепную и степную зоны, с существенно различающимися по своим водно-физическим свойствам типами почв [10, 11] и строением речных бассейнов [12].

Целью представленной работы является оценка пространственных и временных изменений характеристик зимнего и весеннего стока рек, исследование механизма и процессов его формирования под влиянием изменения климата.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В зимний период основным природным фактором воздействия на речной бассейн является температура приземного слоя воздуха. Под ее влиянием почва промерзает на определенную глубину, вследствие чего изменяется фазовое состояние воды в почве. Как следствие, часть почвенной влаги замерзает, становится неподвижной и исключается из процесса формирования зимнего стока. Другая часть, находящаяся в талой зоне, не изменяет своего физического состояния и, возможно, принимает определенное участие в формировании зимнего стока. Запасы влаги в талом слое почвы расходуются на зимний сток, в мерзлой зоне – на формирование талого стока в весенний период.

Глубина промерзания почвы на речных водосборах осуществляет регулируемую функцию перераспределения стока в зимний период [13]. Фактором, оказывающим значительное влияние на формирование талого стока, является запас воды в снежном покрове речного бассейна. Снежный покров осуществляет также теплоизолирующие функции, существенно замедляя промерзание почвы. Таким образом, основным методом достижения поставленных в данной работе целей становится критический анализ механизма формирования зимнего и весеннего стока в условиях изменения климата и под воздействием промерзания почвы, состояния почвенной влаги и других факторов.

Исходная гидрометеорологическая информация

Исходная информация о глубине промерзания почвы, временной и пространственной ее изменчивости получена из данных многолетних наблюдений на сети метеорологических, агрометеорологических и гидрологических станций и постов УГМС Республики Башкортостан. Глубины промерзания почвы измерялись в 25 пунктах, составляют ряды длительностью до 83 лет, начиная с зимы 1936–1937гг. [14]. Характеристики зимнего и весеннего стока рек определялись по 26 пунктам наблюдений. Продолжительность рядов 83 и больше лет, начиная с 1933–1936 гг. Запасы воды в снежном покрове в период наибольшего снегонакопления рассчитывались по данным снегомерных съемок на 23 гидрометеорологических станциях, осуществляющих этот вид наблюдений, начиная с 1961 г.

На всем протяжении рядов инструментальных наблюдений как за глубиной промерзания, так и за стоковыми характеристиками выделяются в каждом из них два периода. Первый, квазистационарный, характерен практически стабильными, относительно небольшими временными изменениями наблюдаемой характеристики (глубины промерзания и характеристики стока), второй – их существенной изменчивостью. Оценка переломного периода носит достаточно условный характер. В работах [15, 16] критически оценена задача оптимально-

го построения трендов и определения моментов времени, устанавливающих границы интервалов с устойчивой тенденцией изменения. Влияние изменения климата в ряду изучаемой характеристики может проявляться в виде монотонного его убывания или ступенчатого перехода между двумя относительно стационарными состояниями. При монотонном убывании членов ряда переломную точку перехода определяли путем оценки достоверности тренда.

Значимость линейных трендов оценивали по методике, приведенной в работе¹. При уровне значимости 5 %, что соответствует удвоенной случайной средней квадратической ошибке (σ), величина 2σ меньше коэффициента корреляции (R), на основании чего признается неоднородность рядов и значимость тренда.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Краткий анализ пространственно-временной изменчивости глубин промерзания приведен в работе [14]. Установлено, что весь период наблюдений за гидрометеорологическим режимом в бассейнах рек Башкортостана можно представить в виде двух отрезков: период квазистационарного состояния (с 1937 по 1980–1984 гг.) и период климатических изменений (с 1981–1985 гг. по 2017–2020 гг.).

В период квазистационарного состояния климата средние глубины промерзания по Башкортостану составляли 79 см, изменяясь при этом от 44 до 115 см. В горных речных бассейнах промерзание достигало 198 см. На южном склоне его величина снижалась до 65 см.

В период климатических изменений глубины промерзания во всех речных бассейнах в среднем уменьшились на 22 см, что составляет 28 % от первоначальной величины. Наблюдается корреляция глубин промерзания почв смежных речных бассейнов. На территории Башкортостана коэффициент корреляции изменяется в пределах от 0,45 до 0,73.

В табл. 1 приведены средние глубины промерзания в речных бассейнах в квазистационарный и последующий периоды климатических изменений.

Одним из основных факторов, влияющих на формирование пространственной изменчивости глубин промерзания почвы, является растительный покров, его влияние на динамику снежной массы и теплоизоляционные свойства снежного покрова. С увеличением высоты снега увеличиваются его теплоизоляционные свойства и уменьшается глубина промерзания. В горно-лесной и лесной зонах ветровой перенос снега практически отсутствует, снег в этот период обладает высокими теплофизическими свойствами (его плотность на протяжении зимы составляет 0,20–0,22 г/см³) поэтому средняя глубина промерзания как в квазистационарный период (58 и 82 см соответственно), так и при климатических изменениях (40 и 60 см) в 1,5–2,0 раза меньше, чем в лесостепной и степной зонах. В степных зонах, на полях, высота снега формируется под влиянием пожнивных остатков и ветрового переноса с последующим отложением снега в отрицательных формах рельефа. Эти факторы обуславливают пространственную изменчивость глубины промерзания и, как следствие, влияют на пространственную изменчивость характеристик стока.

¹ Методические рекомендации по оценке однородности гидрологических характеристик и определению их расчетных значений по однородным рядам. Санкт-Петербург, 2010. 162 с.

Таблица 1. Изменения глубин промерзания почв речных бассейнов, обусловленные изменением климата (фрагмент таблицы [14])
 Table 1. Changes in soils freezing depths of river basin caused by climate change (fragment of Table [14])

Метеостанция	Квазистационарный режим климата		Режим изменения климата		Изменение промерзания	
	период, год	промерзание, см	период, год	промерзание, см	см	%
Горнолесная область						
Архангельское	1937–1980	44	1981–2020	25	19	43,2
Зилаир	1937–1980	58	1981–2020	52	6	10,3
Мраково	1937–1980	72	1981–2020	44	28	38,9
Лесная зона						
Янаул	1972–1986	96	1987–2020	61	35	36,5
Аскино	1937–1981	60	1982–2020	41	19	31,7
Дуван	1937–1981	90	1982–2020	78	12	13,3
Лесостепная зона						
Чишмы	1937–1980	115	1981–2020	72	43	37,4
Аксаково	1937–1980	99	1981–2020	67	32	32,3
Раевский	1972–1986	124	1987–2020	64	60	48,4
Буздяк	1972–1986	109	1987–2020	60	49	53,1
Степная зона						
Мелеуз	1937–1980	97	1981–2020	85	12	12,4
Зауральская лесостепная зона						
Учалы	1973–1982	138	1982–2020	104	34	24,6
Зауральская степная зона						
Акъяр	1952–1981	177	1982–2020	96	81	45,8

Примечание: уменьшение глубины промерзания почвы в % дано относительно средней глубины промерзания в квазистационарный период.

Согласно данным табл. 1, в период изменения климата средняя глубина промерзания в природных зонах Башкортостана уменьшилась от 22,6 % (лесная зона) до 42,8 % (лесостепная зона) по отношению к средним величинам квазистационарного периода.

Зимний сток

Промерзание почвы разделяет ее на талую и мерзлую зоны [13]. Влага талой зоны является основным источником формирования зимнего стока. Увеличение его возможно только в случае, если зимние запасы влаги превышают наименьшую полевою влагоемкость (НВ). В большинстве пунктов наблюдений НВ на территории Башкортостана составляет 300–340 мм.

В предосенний период почва имеет существенный дефицит влаги. Осенние осадки его ликвидируют и запас влаги в почве становится равным НВ или превышает его. При глубоком промерзании стокоформирующая талая

зона значительно уменьшается, что влечет снижение расходов зимнего стока, в ряде случаев – до аналитического нуля. В качестве характеристики зимнего стока принят 30-дневный минимальный расход воды ($Q_{\text{ЗИМ}}$).

На рис. 1 приведена динамика глубин промерзания и минимальных зимних расходов воды в створе р. Белая – г. Стерлитамак ($F = 21\,000\text{ км}^2$) по данным наблюдений за период с 1937 по 2018 гг. Оба ряда наблюдений разделяются ступенчатым переходом в 1982–1983 гг. на два периода: квазистационарный – с 1937 по 1983 гг. и период изменения климата – с 1983 по 2018 гг., при котором формируется новый квазистационарный уровень глубин промерзания и, аналогично ему, минимальных расходов.

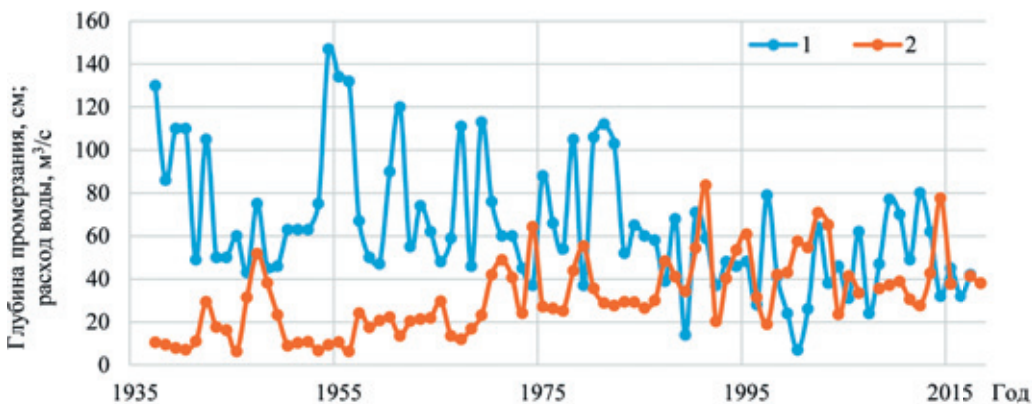


Рис. 1. Временные изменения глубин промерзания почвы (1) и 30-дневного минимального расхода воды (2) в створе р. Белая – г. Стерлитамак.

Fig. 1. Temporary changes in soil freezing depths (1) and 30-day minimum water flow (2) in the range of the Belaya River – the city of Sterlitamak.

Анализ динамики этих двух элементов показывает достаточно устойчивую корреляционную зависимость между ними. С увеличением глубины промерзания уменьшаются зимние расходы воды.

Зависимость $Q_{\text{ЗИМ}} = f(\Pi)$ аппроксимируется выражением вида:

$$Q_{\text{ЗИМ}} = 52,136 * e^{-0.11 * \Pi} (\text{м}^3/\text{с}), \quad (1)$$

где Π – здесь и далее, глубина промерзания почвы, см;

e – основание натуральных логарифмов. Коэффициент корреляции уравнения (1) $R = 0,511$.

При глубинах промерзания менее 80–100 см значительный динамический запас влаги располагается в талой зоне, расходы воды ($Q_{\text{ЗИМ}}$) возрастают и приближаются к 6–8 $\text{м}^3/\text{с}$.

На больших реках лесостепной зоны, но со значительно меньшей площадью водосбора (р. Дема – д. Бочкарево, $F = 12\,800\text{ км}^2$) характер зависимости $Q_{\text{ЗИМ}} = f(\Pi)$ (2) сохраняется. На рис. 2 приведена зависимость $Q_{\text{ЗИМ}}$ от наибольшей глубины промерзания почвы в бассейне р. Дема, которая аппроксимируется уравнением вида:

$$Q_{\text{ЗИМ}} = 31,08 * e^{-0.007 * \Pi} (\text{м}^3/\text{с}), \quad (2)$$

при коэффициенте корреляции $R = 0,694$.

Наиболее значительная зависимость зимних расходов проявляется на реках зауральской лесостепной и степной зон. На рис. 3 представлен временной ход глубины промерзания и зимние расходы в створе р. Миндюк – с. Новобайрамгулово ($F=785 \text{ км}^2$). В этих зонах при квазистационарном режиме климата глубина промерзания почвы достигала 1,5–2,0 м. Практически вся стокоформирующая влага в мерзлом слое была в форме льда и не участвовала в зимнем стоке. Зимний сток прекращался, только глубокие оттепели за счет фазовых превращений воды в почве формировали кратковременный сток.

При изменении климата изменяются глубины промерзания почвы, перемерзание русел не наблюдается и, как следствие, возрастает зимний сток.

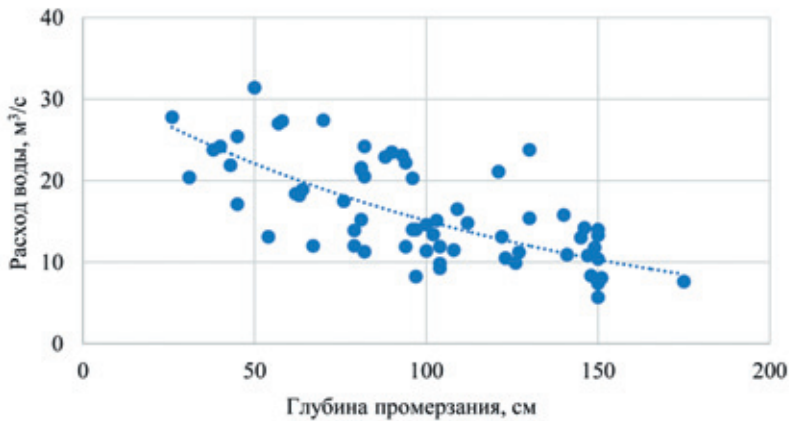


Рис. 2. Зависимость минимального 30-суточного зимнего стока от наибольшей глубины промерзания в бассейне р. Дема – д. Бочкарево.

Fig. 2. Dependence of the minimum 30-day winter runoff on the highest freezing depth in the basin of the Dema River – the village of Bochkarevo.

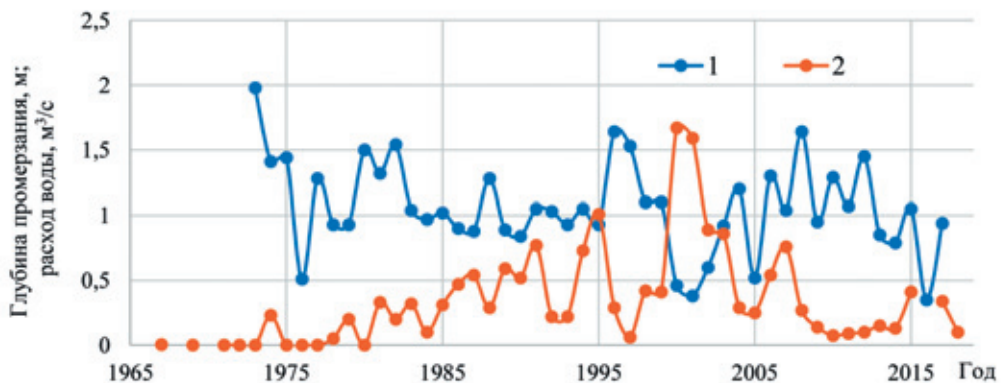


Рис. 3. Временные изменения глубин промерзания почвы (1) по м/с Учалы и зимнего 30-суточного минимального расхода воды (2) в створе р. Миндюк – с. Новобайрамгулово.

Fig. 3. Temporary Changes of Soil Freezing Depths (1) of m/s Uchaly and Winter 30-Day Minimum Water Flow (2) in the range of the Mindyak River – the village of Novobayramguovo.

Зависимость $Q_{зим} = f(\Pi)$ для р. Миндяк – с. Новобайрамгулово описывается линейным уравнением (при $R = 0,599$):

$$Q_{зим} = -0,007 * \Pi + 1,17 \text{ (м}^3\text{/с)}, \quad (3)$$

Таблица 2. Средние значения минимального 30-суточного зимнего стока рек в природных зонах при квазистационарном периоде климата и при его изменении
Table 2. Average values of minimum 30-day winter flow of rivers in natural zones at quasi-stationary period of climate and at its change

Гидрометрический створ	Климатические периоды				Увеличение расхода ($P_{и} - P_{к}$)	
	квазистационарный		изменения климата		м ³ /с	в %
	период	среднее ($P_{к}$), м ³ /с	период	среднее ($P_{и}$), м ³ /с		
Горнолесная область						
р. Нугуш – д. Новосеитово	1950–1980	1,41	1981–2018	3,68	0,59	54
р. Лемеза – с. Нижние Лемезы	1959–1983	4,49	1984–2018	5,91	1,42	32
р. Сакмара – д. Верхне-Галеево	1958– 1985	1,27	1986 –2019	1,85	0,58	46
р. Малый Кизил – пос. Муракаево	1960–1983	0,32	1984–2018	0,40	0,08	25
р. Б. Кизил – д. Верхне-Абдряшево	1959–1983	0,23	1984–2018	0,38	0,15	65
Лесная зона						
р. Бирь – с. Малосухоязово	1951–1985	7,05	1986–2018	8,20	1,15	16
р. Быстрый Танып – д. Алтаево	1936–1980	10,8	1981–2018	15,8	5,00	46
р. Ай – с. Лаклы	1935–1988	9,91	1989–2018	17,7	7,79	79
р. Инзер – д. Азово	1958–1980	6,55	1981–2018	7,48	0,93	14
Лесостепная зона						
р. Дема – д. Бочкарево	1947–1980	11,6	1981–2018	21,3	9,70	84
р. Мияки – с. Мияки-Тамак	1955–1980	0,30	1981–2018	0,64	0,34	113
р. Уршак – с. Ляхово	1949–1981	2,28	1982–2018	4,00	1,72	75
р. Ик – с. Нагайбаково	1934–1979,	13,0	1980–2018	26,7	13,7	105
р. Белая – г. Стерлитамак	1937–1982	23,2	1983–2018	42,4	19,2	83
Степная зона						
р. Мелеуз – г. Мелеуз	1951– 1981	0,23	1982–2019	0,88	0,65	280
Зауральская лесостепная зона						
р. Миндяк – с. Новобайрамгулово	1967–1981	0,064	1982–2017	0,45	0,38	600
Зауральская степная зона						
р. Таналык – с. Самарское	1958–1980	0,039	1981–2018	0,243	0,20	520
р. Карагайлы – д. Старо-Сибаето	1949–1980	0,024	1982–2018	0,071	0,05	240

Примечание: увеличение 30-суточного расхода в % дано относительно среднего расхода в квазистационарный период.

На малых и средних реках горно-лесной области и лесной зоны сохраняется аналогичная зависимость $Q_{\text{ЗИМ}} = f(\Pi)$. В бассейне р. Лемеза (р. Лемеза – с. Нижние Лемезы, $F = 1680 \text{ км}^2$) эта зависимость имеет вид (при $R = 0,576$):

$$Q_{\text{ЗИМ}} = -0,0437 * \Pi + 6,44 \text{ (м}^3\text{/с)}. \quad (4)$$

Анализ зависимостей $Q_{\text{ЗИМ}} = f(\Pi)$ по ряду речных бассейнов показывает низкую коррелятивную зависимость ($R = 0,280-0,600$), что свидетельствует о воздействии на процесс формирования зимнего стока ряда неучтенных факторов.

В табл. 2 приведены средние величины минимального 30-суточного зимнего стока ряда рек, приуроченных к основным природным зонам Башкортостана в условиях квазистационарного режима и изменения климата. Анализ табл. 2 показывает, что увеличение зимнего 30-дневного минимального расхода воды происходит на всех реках, но в разных природных зонах степень увеличения различная, вне зависимости от площади речных водосборов. На реках горно-лесной и лесной зон среднее увеличение за зиму, по отношению к средней величине аналогичного расхода в квазистационарный период, возросло на 44–45 и 47 % соответственно; в лесостепной зоне – на 90–92 %. Наибольшее увеличение зимнего стока наблюдается на реках высокогорной и степной зон, где оно в разы (3–6 раз) может превышать аналогичный сток квазистационарного периода.

Сток весеннего половодья

Анализ рядов большой длительности как по промерзанию почвы речных водосборов, так и по стоку весеннего половодья приведен в табл. 3. Каждый из многолетних рядов наблюдений разбит на два периода: квазистационарный отрезок характеризует относительно стабильный период, второй отрезок отличается монотонным убыванием или ступенчатым переходом на новый квазистационарный уровень. Оценка значимости трендов глубин промерзания и стока весеннего половодья также представлена в табл. 3.

Характерным примером влияния климатических изменений на сток весеннего половодья являются результаты наблюдений по створу р. Ашкадар – д. Ново-Федоровка с 1971 по 2017 гг. Для выбранного створа использованы результаты наблюдений за глубиной промерзания по м/с Стерлитамак с 1937 по 2017 гг. В многолетнем ходе наибольших глубин промерзания наблюдается два характерных периода: с 1937 по 1985 гг. и с 1986 по 2017 г. Первый период имеет хорошо выраженный квазистационарный режим со средней глубиной промерзания ($\Pi_{\text{к}}$) в 76 см. Линейный тренд глубин промерзания этого периода описывается уравнением:

$$\Pi_{\text{к}} = -0,2208t + 508,6 \text{ (м}^3\text{/с)}, \quad (5)$$

где t – член ряда, начиная с 1937 г. при $R = 0,106$ и $\sigma = 0,143$.

Во втором периоде 1983–1986 гг. глубина промерзания резким ступенчатым переходом уменьшилась на 29 см и составила 47 см, т. е. на 38 % меньше по отношению к первому периоду. С 1986 по 2017 гг. тренд изменения глубины промерзания отсутствует, а ряд наблюдений переходит в новое квазистаци-

Таблица 3. Статистические характеристики трендов глубины промерзания и стока весеннего половодья (С) по бассейнам рек Дема, Ашкадар и Бирь
 Table 3. Statistical characteristics of trends of the depth of freezing and spring flood runoff (C) in the basins of the Dema, Ashkadar and Birkh rivers

Период, год	Уравнение тренда	Статистические характеристики			Характер изменения тренда, значимость
		R	2	Среднее	
Гидроствор р. Дема – д. Бочкарево, данные промерзания по м/с Чишмы					
1947–1984	$C_K = -0,663\tau + 1369$ (мм)	0,243	0,305	65	Слабое возрастание, не значим
1985–2019	$C_{И} = -1,4770\tau + 2986$ (мм)	0,497	0,251	67/+2	Монотонное снижение, значим
1937–1984	$\Pi_K = 0,5851\tau - 1034$ (см)	0,311	0,260	113	Слабое возрастание, значим
1985–2020	$\Pi_{И} = -0,3363\tau + 744$ (см)	0,138	0,333	70/43	Ступенчатый переход, не значим
Гидроствор р. Ашкадар – д. Ново-Федоровка, данные по м/с Стерлитамак					
1971–1985	$C_K = -5357\tau + 1143$ (мм)	0,078	0,513	84	Слабо выражен, не значим
1998–2017	$C_{И} = -4,0452\tau + 8196$ (мм)	0,642	0,250	71/13	Монотонное снижение, значим
1937–1985	$\Pi_K = -0,2208\tau + 504,4$ (см)	0,106	0,296	76	Стационарный режим, не значим
1986–2017	$\Pi_{И} = 0,0718\tau - 97$ (см)	0,036	0,352	47/29	Ступенчатый переход, не значим
Гидроствор р. Бирь – с. Малосухоязово, данные по м/с Бирск					
1951–1985	$C_K = 0,0619\tau + 9,29$ (мм)	0,014	0,338	174	Стационарный режим, не значим
1986–2020	$C_{И} = -3,216\tau + 6563$ (мм)	0,572	0,242	167/7	Монотонное снижение, значим
1937–1985	$\Pi_K = 0,1506\tau - 219,5$ (см)	0,077	2,84	76	Стационарный режим, не значим
1986–2020	$\Pi_{И} = -0,1423\tau + 320$ (см)	0,069	0,366	35/41	Ступенчатый переход, не значим

Примечание: С – слой стока весеннего половодья, мм. В знаменателе (см. графу Среднее) разность между средними величинами квазистационарного периода (индекс К) и последующего измененного ряда (индекс И).

онарное состояние (рис. 4). На реках Дема и Бирь (табл. 3) на втором отрезке рядов глубин промерзания переход в новое квазистационарное состояние происходил хорошо выраженным ступенчатым переходом. Коэффициент корреляции тренда ряда становится не значим. Реакции формирования слоя стока в переломный момент уменьшения глубин промерзания (1983–1986 гг.) не наблюдается, т. е. тренд не значим. В период 1971–1985 гг. средняя величина слоя стока весеннего половодья равна 84 мм.

На коротком отрезке от 1986 до 1988 гг. сохраняется средняя величина слоя весеннего стока (на протяжении с 1971 до 1997 гг.). Его монотонное снижение, как реакция на значительно сниженную глубину промерзания (средняя величина 47 см), наступает в 1997 г. (рис. 4). Тренд отрицательный, значим и хорошо выражен, его параметры приведены в табл. 3. Средняя величина слоя талого стока в этот период равна 71,0 мм, т. е. он уменьшился на 13 мм (на 15,5 % от первоначальной величины). Таким образом, снижение глубины промерзания на 38 % обусловило уменьшение стока весеннего половодья на 15,5 %.

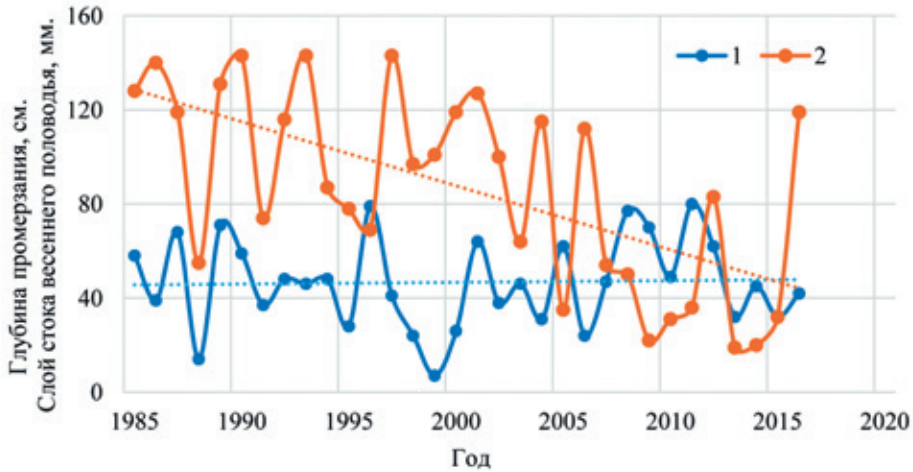


Рис. 4. Фрагмент динамики глубин промерзания (1) и слоев стока весеннего половодья (2) в период формирования процесса их изменений, р. Ашкадар – д. Ново-Федоровка.
Fig.4. Fragment of the dynamics of freezing depths (1) and runoff layers of spring flood (2) during the formation of the process of their changes Ashkadar River – the village of Novo-Fedorovka.

Снежный покров в речном бассейне косвенно и прямо воздействует на процесс формирования стока в период половодья. Косвенное его воздействие происходит путем некоторого повышения температуры поверхности почвы, обусловленного теплоизолирующими свойствами снега. Прямое – аккумулярованными запасами воды в снежном покрове. На рис. 5 приведена динамика годовых изменений наибольших снегозапасов за период с 1961 до 2020 гг. и слоя стока весеннего половодья в бассейне р. Ашкадар. Все изменения хорошо выражены и происходят практически синхронно.

Анализ данных хода снегозапасов показывает, что они повышаются до 1981 г. и составляют в среднем 99,5 мм. За относительно короткий период (1982–1998 гг.) они повысились до 135 мм. Далее, с 1999 до 2020 гг., следует уменьшение запасов воды в снеге (S) до 130 мм, т. е. на 5 мм. Тренд описывается уравнением (при $R=0,220$ и $\sigma=0,206$):

$$S = -1/883t + 3814 \text{ (мм)} \quad (6)$$

Тренд отрицательный (6), что свидетельствует об уменьшении снегозапасов.

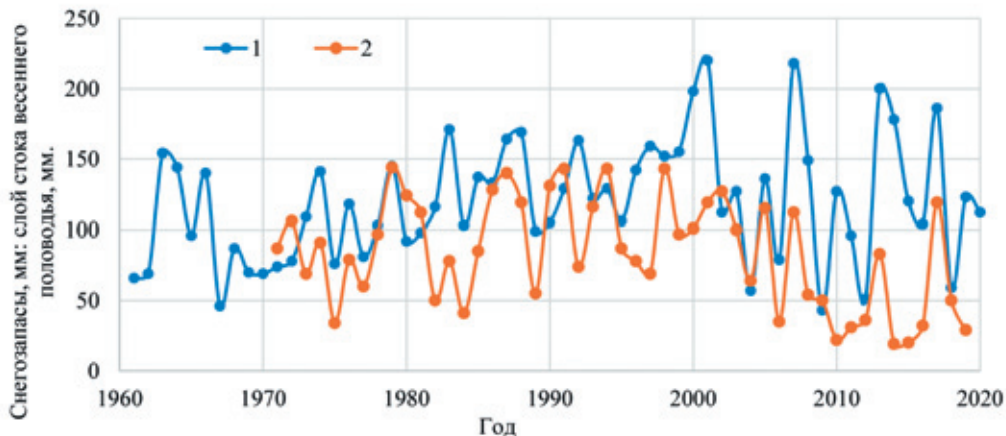


Рис. 5. Временные изменения запасов воды в снегу (1) и слоя стока весеннего половодья (2) по створу р. Ашкадар – д. Ново-Федоровка.

Fig. 5. Temporary Changes in Water supply in Snow (1) and Spring Flood Runoff Layer (2) in the range of the Ashkadar River – the village of Novo-Fedorovka.

В табл. 4 приведены средненные значения слоя весеннего половодья в период квазистационарного состояния климата и при его изменении.

Анализ стока рек весеннего половодья при изменении климата показывает, что наблюдается как увеличение слоя стока, так и его уменьшение. Наименьшие значения слоя стока весеннего половодья отмечаются в том случае, когда в почве речного бассейна при таянии снега образуется водонепроницаемый слой (ВС). Согласно работам [17, 18], он наблюдается при температуре почвы февраля от $-2,0$ до $-4,0$ °С и ниже, увлажнении близком к наименьшей полевой влагоемкости.

На рис. 6 приведена динамика температуры почвы на глубине 20 см по данным наблюдений м/с Чишмы, Дуван и Зилаир. Анализ временного хода температуры с 1981–1982 по 2020 гг. соответствует периоду климатических изменений. Температура февраля ниже $-2,0$ °С позволяет определить зимы, в которых возможно образование водонепроницаемого слоя.

При образовании водонепроницаемого слоя, в слое от поверхности почвы до нижней границы, влага консервируется и не участвует в стоке весеннего половодья. В период его существования на сток расходуются только запасы влаги в снежном покрове и влага, образовавшаяся при фазовых переходах в мерзлом слое. При полном оттаивании мерзлого слоя талая влага инфильтрационным путем пополняет запасы грунтовых вод и не участвует в формировании половодья. Поэтому при образовании в почве водонепроницаемого слоя наблюдаются наименьшие величины весеннего половодья.

В горнолесной области слой стока весеннего половодья при изменении климата незначительно увеличивается, в среднем на 6–7,5 %. По данным м/с Дуван в бассейне р. Большой Ик до створа с. Таишево за период климатических изменений с 1981 по 2019 гг. из 42 лет температура почвы (в слое 20 см) в феврале ниже $-2,0$ °С наблюдалась в 30 зимах. В период весеннего половодья

Таблица 4. Средние значения слоя стока весеннего половодья в природных зонах Башкортостана при квазистационарном периоде климата и его изменении
 Table 4. Average values of the spring flood runoff layer in the natural zones of Bashkortostan during the quasi-stationary period of the climate and its change

Гидрометрический створ	Климатические периоды				Разность (Уи–УК)	
	квазистационарный		Изменение климата		мм	%
	период, год	Сток (УК), мм	период, год	Сток (Уи), мм		
Горнолесная область						
р. Нугуш–д. Новосейтово	1950–1980	249	1981–2018	252	+3	+1,2
р.Лемеза – с. Нижние Лемезы	1959–1984	293	1985–2019	318	+25	+8,1
р. Селеук – д. Нижнеиткулово	1946–1987	193	1988–2019	199	+6	+3,1
р. Инзер – д. Азово	1958–1987	238	1988–2019	265	+28	+11,8
р. Большой Ик – с. Таишево	1950–1981	94	1982–2019	106	+12	+12,8
Лесная зона						
р. Бирь – с. Малосухоязово	1951–1985	174	1986–2019	167	-7	-4,0
р. Быстрый Танып – д. Алтаево	1935–1980	124	1981–2019	119	-5	-4,0
р. Ай – с. Лаклы	1936–1987	115	1988–2019	111	-4	-3,2
р. Юрюзань – пос. Атняш	1932–1981	132	1982–2019	131	-1	-0,77
Лесостепная зона						
р. Дема – д. Бочкарево	1947–1981	67	1982–2019	65	-2	-3,0
р. Мияки – с. Мияки Тамак	1955–1980	70	1981–2019	62	-8	-11,4
р. Уршак – с. Ляхово	1949–1981	58	1982–2019	53	-5	-8,6
р. Ик – с. Нагайбаково	1934–1979	70	1980–2019	52	-18	-25,7
р. Белая – г. Стерлитамак	1919–1983	119	1984–2019	109	-10	-8,4
р. Ашкадар – д. Новофедоровка	1971–1985	84	1986–2017	71	-13	-13,8
Степная зона						
р. Мелеуз – г. Мелеуз	1950–1981	94	1982–2019	76	-18	-19,2
Зауральская лесостепная зона						
р. Миндяк – с. Новобайрамгулово	1967–1981	66	1982–2017	76	+10	+15
Зауральская степная зона						
р. Таналык – с. Самарское	1958–1980	25,7	1982–2021	32,2	+6,5	+25

Примечание: изменение слоя весеннего стока дано относительно средней величины стока в квазистационарный период.

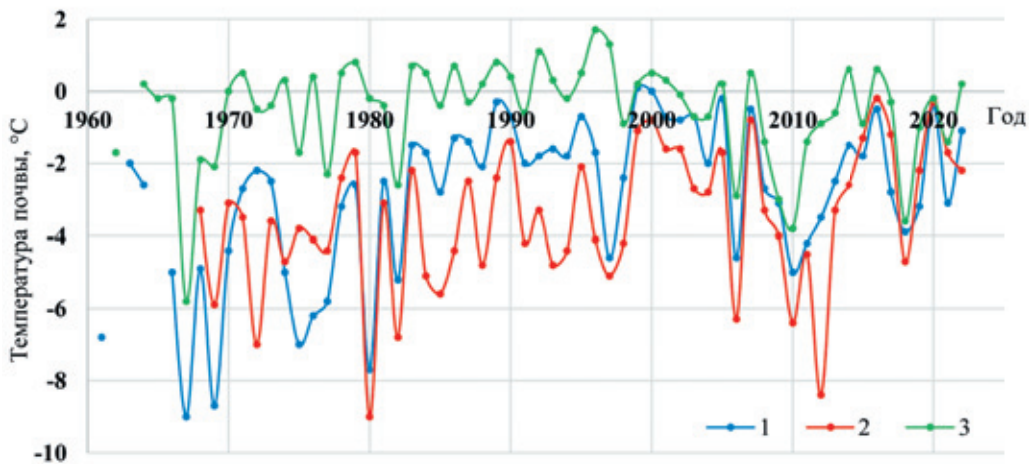


Рис. 6. Временные изменения средней температуры почвы в феврале на глубине 20 см по данным наблюдений на м/с Чишмы (1), м/с Дуван (2) и м/с Зилаир (3).
 Fig. 6. Temporary changes in the average soil temperature in February at a depth of 20 cm according to observations on Chishma (1), Duvan (2) and Zilair (3) meteorological stations.

в почвах речных бассейнов образовывался водонепроницаемый слой. Слой стока весеннего половодья в среднем составлял 93 мм при средней температуре февраля в эти зимы равной $-4,2$ °С. Образование водонепроницаемого слоя исключает часть стокоформирующей влаги из процесса формирования весеннего половодья. При полном оттаивании мерзлого слоя содержащаяся в нем талая влага инфильтрационным путем частично может пополнять запасы грунтовых вод. В 12 зимах температура февраля была выше $-2,0$ °С. Ее среднее значение составило $-1,2$ °С и водонепроницаемый слой, естественно, образоваться не мог. Слой стока половодья в среднем составлял 163 мм. В годы при образовании водонепроницаемого слоя сток половодья уменьшался в среднем в 1,8 раза. Таким образом, за период изменения климата, соотношение зим с наличием водонепроницаемого слоя и его отсутствием обуславливали среднее значение стока весеннего половодья.

Характерной особенностью горнолесной зоны является превышение запасов воды в снеге в период изменения климата по сравнению с квазистационарным периодом. По результатам наблюдений на м/с Улу-Теляк – это превышение в среднем достигает 33 мм при средней величине снегов запасов 229,3 мм.

В лесной и лесостепной зонах слой стока за половодье уменьшается. Обусловлено это тем, что в этих зонах зимний сток увеличился на 80–100 %. Часть стокоформирующей влаги была израсходована на зимний сток, что значительно уменьшило запасы стокоформирующей влаги весеннего половодья. Так, по данным м/с Верхнеяркеево в 2010 г. температура февраля в слое почвы 20 см была равна $-7,6$ °С, что свидетельствует об образовании водонепроницаемого слоя на водосборе р. База в створе с. Рсаево. За период изменения климата (1981–2019 гг.) средняя величина стока весеннего половодья составила 65,4 мм. В 2010 г., когда наблюдался водонепроницаемый

слой, слой весеннего половодья составил 51 мм, что на 22 % меньше величины от среднего значения стока половодья.

Аналогичные значения наименьших слоев стока весеннего половодья при образовании водонепроницаемого слоя наблюдались в бассейне р. Дема до створа с. Бочкарево в 2006, 2010 и 2018 гг. При температуре февраля, соответственно, $-4,6$ °С, $-5,0$ и $-3,4$ °С, слои стока весеннего половодья составили 25 мм, 37 и 47 мм, что значительно меньше средней многолетней величины 65,5 мм.

Зауральская степная и лесостепная зоны характеризуются глубокими промерзаниями почвы как при квазистационарном климате, так и при его изменении. При глубоком промерзании почвы в период квазистационарного режима климата более 1,5 м практически ежегодно возникали условия образования водонепроницаемого слоя. В период климатических изменений промерзание уменьшилось до 35–80 см, что несколько изменило условия образования водонепроницаемого слоя. Слой стока весеннего половодья возрос в среднем на 20 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Фактором, обуславливающим изменение характеристик зимнего и весеннего стока рек, является глубина промерзания почв речного бассейна. При климатических изменениях глубина промерзания осуществляет регулирующую функцию перераспределения стока. В зимний период она разделяет стокоформирующие запасы влаги на две зоны: талую и мерзлую. При изменении климата в результате уменьшения глубины промерзания увеличивается запас влаги в талой зоне. Влага талой зоны формирует зимний и весенний сток.

Установлено, что в период квазистационарного состояния климата средние глубины промерзания составляли 79 см, изменяясь при этом от 44 до 115 см. В период климатических изменений глубины промерзания во всех речных бассейнах в среднем уменьшились на 22 см, что составляет 28 % от первоначальной величины. Коэффициент корреляции зависимости $Q_{\text{зим}} = f(\Pi)$ изменяется в пределах от 0,280 до 0,700, это свидетельствует о воздействии на формирование зимнего стока ряда неучтенных факторов.

Увеличение зимних расходов воды происходит на всех реках. На реках горнолесной и лесной зоны Башкортостана среднее увеличение за зиму, по отношению к аналогичному расходу в квазистационарный период, возросло на 44–45 и 47 % соответственно; в лесостепной зоне – на 90–92 %. Наибольшее увеличение зимнего стока (в 2–6 раз) наблюдается на реках высокогорной и зауральской степной зон. При увеличении зимнего стока, уменьшается запас стокоформирующей влаги, которая пополняет сток весеннего половодья. В лесной и лесостепной зонах, где зимний сток увеличился на 80–100 %, слой стока за половодье уменьшается: в лесостепной зоне в среднем на 11,8 %, от 3 до 25,7 %; в лесной – на 3 %. Уменьшение слоя стока весеннего половодья наблюдается также в том случае, когда в почве при таянии снега образуется водонепроницаемый слой. При образовании водонепроницаемого слоя, влага консервируется в мерзлом слое и только при его оттаивании принимает участие в стоке весеннего половодья.

Зауральская степная и лесостепная зоны отличаются глубокими промерзаниями почвы как при квазистационарном климате, так и его изменении. При промерзании почвы до 0,6–0,8 м практически ежегодно создаются условия образования водонепроницаемого слоя. В условиях климатических изменений, при возрастании зимних осадков, слой стока весеннего половодья в этих зонах возрос в среднем на 20 %. В горнолесной зоне, за счет увеличения зимних осадков, весенний сток увеличивается в среднем на 7,4 %, изменяясь в пределах от 1,2 до 12,2 %.

Таким образом, в рамках проведенной работы впервые показано, что при потеплении климата на территории Республики Башкортостан главным фактором, обуславливающим изменения характеристик гидрологического режима рек, является глубина промерзания почвы. В практическом плане возникает вывод о том, что необходима адаптация к этим природным изменениям как в области гидрологических прогнозов и расчетов стока, так и при разработке мероприятий по стабильному функционированию экономики региона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Георгиевский В.Ю., Ежов А.В., Шалыгин А.А., Шикломанов И.А., Шикломанов А.И. Оценка влияния возможных изменений климата на гидрологический режим и водные ресурсы рек территории бывшего СССР // *Метеорология и гидрология*. 1996. № 11. С. 89–99.
2. Шикломанов И.А., Георгиевский В.Ю. Современные и перспективные изменения стока рек России под влиянием климатических факторов // *Водные ресурсы суши в условиях изменяющегося климата*. 2007. С. 20–32.
3. Шерстюков Б.Г. Глобальное потепление и его возможные климатические причины // *Гидрометеорология и экология*. 2023. № 70. С. 7–37. DOI:10.33933/2713-2023-70-7-37.
4. Школьник И.М., Мелешко В.П., Кароль И.Л., Киселев А.А., Надеждина Е.Д., Говоркова В.А., Павлова Т.В. Ожидаемые изменения климата на территории Российской Федерации в XXI веке // *Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова*. 2014. Вып. 575. С. 65–118.
5. Попов Е.Г. Вопросы теории и практики прогнозов речного стока. М.: Гидрометеоздат, 1963. 395 с.
6. Григорьев В.Ю., Фролова Н.Л., Джамалов Р.Г. Изменение водного баланса крупных речных бассейнов Европейской части России // *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. 2018. № 4. С. 36–47. DOI: 10.35567/1999-4508-2018-4-3.
7. Лавров С.А., Калюжный И.Л. Влияние климатических изменений на сток весеннего половодья и факторы его формирования в бассейне Волги // *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. 2016. № 6. С. 42 – 60. DOI: 10.35567/1999-4508-2016-6-4.
8. Горбаренко А.В., Варенцова Н.А., Киреева М.Б. Трансформация стока весеннего половодья и паводков в бассейне Верхней Волги под влиянием климатических изменений // *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. 2021. № 4. С. 6–28. DOI: 10.33933/2713-2023-70-7-37.
9. Красногорская Н.Н., Фащевская Т.Б., Головина А.В., Феропонтов Ю.И., Жданова Н.В. Климатические особенности формирования стока р. Белая // *Метеорология и гидрология*. 2012. № 1. С. 82–91.
10. Хазиев Ф.Х. Экология почв Башкортостана. Уфа: Гилем, 2012. 312 с.
11. Мукатанов А.Х. Ландшафты и почвы Башкортостана. Уфа: БНЦ УрО РАН, 1992. 118 с.
12. Гареев А.М. Реки, озера и болотные комплексы Башкортостана. Уфа: Гилем, 2012. 246 с.
13. Калюжный И.Л., Лавров С.А. Механизм влияния глубины промерзания почв речных бассейнов на зимний сток // *Водные ресурсы*. 2017. Т. 44. № 4. С. 442–451. DOI 10.7868/S0321059617040071.

14. Барышев В.И., Калюжный И.А. Глубины промерзания почв при изменении климата в бассейнах рек Республики Башкортостан // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2023. № 608. С. 91–108.
15. Лобанов В.А., Шаду́рский А.Е. Применение эмпирико-статистических методов для моделирования и анализа климатических изменений // Ученые записки РГГМУ. 2010. № 14. С. 73–88.
16. Восканян К.А., Иванова Т.И., Кузнецов А.Д., Никитина В.С., Сероухова О.С., Симакина Т.Е. Анализ смены периодов климатической стабильности северной территории России // Гидрометеорология и экология. 2022. № 67. С. 207–220. DOI: 1033933/2713-3001-2022-67-207-220.
17. Вершинина Л.К., Крестовский О.И., Калюжный И.А., Павлова К.К. Оценка потерь талых вод и прогнозы объема стока половодья. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 192 с.
18. Журавин С.А. Исследование процессов влагооборота на воднобалансовых станциях в России. СПб.: РИАА, 2022. 224 с.

REFERENCES

1. Georgievsky V. Y., Ezhov A. V., Shalygin A. L., Shiklomanov I. A., Shiklomanov A. I. Assessment of the effect of possible climate changes on hydrological regime and water resources of rivers in the former USSR. *Meteorology and Hydrology*. 1996. No. 11. P. 89–99 (In Russ.).
2. Shiklomanov I.A., Georgievsky V.Y. Modern and prospective changes in the flow of rivers in Russia under the influence of climatic factors. *Land water resources in a changing climate*. 2007. P. 20–32. (In Russ.).
3. Sherstyukov B. G. Global warming and its possible causes. *Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2023. No. 70. P. 7–37. doi: 10.33933/2713-3001-2023-70-7-37 (In Russ.).
4. Shkolnik, I.M., Meleshko, V.P., Karol I.L., Kiselev A.A., Nadyozhina E.D., Govorkova V.A., Pavlova T.V. Expected climate change in the Russian Federation in the 21st century. *Proceedings of Voeikov Main Geophysical Observatory*. 2014. Iss. 575. P. 65–118. (In Russ.).
5. Popov E.G. the questions of theory and practice of streamflow forecasting. Moscow: Gidrometeoizdat, 1963. 394 p. (in Russ.)
6. Grigoryev V. Y., Frolova N. L., Dzhamaalov R.G. The Water Balance Change of Large River Basins of the European Russia. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2018. № 4. P. 36–47. DOI: 10.35567/1999-4508-2018-4-3 (in Russ.).
7. Lavrov S.A. Kalyuzhniy I.L. Impact of the climatic changes on the spring flood runoff and its formation factors in the Volga River basin. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2016. No. 6. P. 42–60. DOI: 10.35567/1999-4508-2016-6-4 (in Russ.).
8. Gorbarenko A.V., Varentsova N.A., Kireeva M.B. Transformation of the Spring High-water and Flood Runoff in the Upper Volga Basin under the Climate Change Impact. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, management*. 2021. No. 4. P. 6–27. DOI: 10.35567/1999-4508-2021-4-1 (in Russ.).
9. Krasnogorskaja N.N., Fashhevskaja T.B., Golovina A.V., Ferapontov Ju.I., Zhdanova N.V. Climatic features of the formation of the flow of the Belaya River. *Meteorology and hydrology*. 2012. № 1. P. 82–91. (In Russ.).
10. Khaziev F.H. Ecology of soils in Bashkortostan. Ufa: Gilem, 2012. 311 p. (In Russ.).
11. Mukatanov A.Kh. Landscapes and soils of Bashkortostan. Ufa: Bashkir Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. 1992. 118 p. (In Russ.).
12. Gareev A. M. Rivers, lakes and bog complexes of the Republic of Bashkortostan. Ufa: Gilem, 2012. 248 p. (In Russ.).
13. Kalyuzhniy, I.L., Lavrov, S.A. The mechanism of the influence of the soil freezing depth in river basins on the winter runoff. *Water resources*. 2017. Vol. 44. No. 4. P. 442–451 (In Russ.).
14. Baryshev V.I., Kalyuzhniy I.L. Depth of soil freezing in climate change in river basins of the Republic of Bashkortostan. *Proceedings of Voeikov Main Geophysical Observatory*. 2023. Iss. 608. P. 91–108 (In Russ.).
15. Lobanov V.A., Shadursky A.E. Application of empiric-statistical methods for modeling and analysis of climatic changes. *Proceedings of the Russian State Hydro/meteorological University*. 2010. No 14. P. 73–88. (In Russ.).

16. Voskanyan K.L., Ivanova T.I., Kuznetsov A.D., Nikitina V.S., Seroukhova O.S., Simakina T.E. Analysis of the changes of periods of climatic stability in the northern territory of the Russian Federation. *Hydrometeorology and Ecology*. 2022. No 67. P. 207–220. DOI: 1033933/2713-3001-2022-67-207-220 (In Russ.).
17. Verzhinina, L.K., Krestovskiy, O.I., Kalyuzhnyi, I.L., Pavlova, K.K. Assessment of meltwater losses and forecasts of flood runoff. L: Gidrometeoizdat, 1985. 189 p. (In Russ.).
18. Zhuravin S. A. Study of water at the water balance stations in Russia. St. Petersburg: RIAL ltd, 2022: 224 p. (In Russ.).

Сведения об авторах:

Барышев Валерий Иванович, аспирант, ФГБУ «Государственный гидрологический институт», Россия, 199053, Санкт-Петербург, 2-я линия В.О., д. 23; ORCID: 0000-0002-3756-1683; e-mail: hfl@mail.ru

Калюжный Игорь Леонидович, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, заведующий гидрофизической лабораторией, ФГБУ «Государственный гидрологический институт», Россия, 199053, Санкт-Петербург, 2-я линия В.О., д. 23; Scopus Author ID: 6602575483; ID РИНЦ: 58201; e-mail: hfl@mail.ru

About the authors:

Valerii I. Baryshev, Postgraduate student, State Hydrological Institute, 2nd Liniya V.O., 23, St.-Petersburg 199053 Russia; ORCID: 0000-0002-3756-1683; e-mail: hfl@mail.ru

Igor L. Kalyuzhny, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Head, Hydro/physical laboratory, State Hydrological Institute, 2nd Liniya V.O., 23, St.-Petersburg 199053 Russia; Scopus Author ID: 6602575483; ID РИНЦ: 58201; e-mail: hfl@mail.ru

Динамика содержания соединений азота и фосфора в Рыбинском водохранилище за многолетний период

И.Э. Степанова ✉

✉ iris@ibiw.ru

ФГБУН «Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина Российской академии наук», Россия, Ярославская обл., пос. Борок

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Межгодовая динамика содержания биогенных элементов позволяет оценить степень трофии водоемов и масштабы их антропогенного эвтрофирования. Изучено содержание всех форм биогенных элементов в Рыбинском водохранилище в 1993–2018 гг. как в сезонном, так и во временном аспектах. В последние десятилетия отмечается тенденция увеличения концентрации фосфатов и общего фосфора в водоеме. Статус водохранилища в целом оценивается как мезотрофный. **Методы.** Основные данные получены в 2001–2018 гг. в рамках регулярных экспедиционных исследований. Отбор проб производили на шести станциях. В пробах воды, дополнительно к главным формам биогенных элементов, анализировали содержание гидроксиламина, одного из важнейших промежуточных продуктов широкомасштабных биохимических процессов – нитрификации, денитрификации, азотфиксации, методом Стрикленда–Парсонса, модифицированным в лаборатории. **Результаты.** В вегетационный период в Рыбинском водохранилище концентрация гидроксиламина на всех станциях и во все сезоны не превышала 6 мкг N/л. В Шекснинском плесе отмечены большие количества нитратов, особенно в районе выпуска сточных вод в устье р. Кошта. Верхнюю часть этого плеса можно отнести к эвтрофным. В Рыбинском водохранилище наблюдается значительное снижение концентрации неорганических форм азота и фосфора летом и в начале осени и их повышение в зимний и весенний периоды.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: нитраты, нитриты, ионы аммония, общий фосфор, общий азот, Рыбинское водохранилище, природные воды.

Финансирование: Работа выполнена в рамках госзадания Министерства науки и высшего образования по теме АААА–А18–118012690123–4.

Для цитирования: Степанова И.Э. Динамика содержания соединений азота и фосфора в Рыбинском водохранилище за многолетний период // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 5. С. 69–81. DOI: 10.35567/19994508-2024-5-69-81.

Дата поступления 08.08.2023.

DYNAMICS OF THE NITROGEN AND PHOSPHOROUS CONTENT IN THE RYBINSK RESERVOIR OVER THE MANY-YEAR PERIOD

Irina E. Stepanova ✉

✉ iris@ibiw.ru

Russian Academy of Sciences I.D. Papanin Institute of Inland Water Biology; Borok, Nekous Rayon, Yaroslav Oblast, Russia

ABSTRACT

Relevance. Annual dynamics of the biogenic elements content enables to assess the degree of the water bodies' trophic state and the scale of their anthropogenic eutrophication. We

© Степанова И.Э., 2024

have researched content of all biogenic elements' forms in the Rybinsk Reservoir in 1993–2018 both in seasonal and temporal aspects. Over the past decades we have registered the trend to increase of phosphates and total phosphorous concentration in the water body. We estimated the reservoir status as mesa/trophic. **Methods.** The main data were obtained in 2001–2018 within the frameworks of regular expedition researches. Six station were involved in sampling. In the samples, in addition to the main forms of biogenic materials, we analyzed content of hydroxylamine, one of the most prominent intermediate product of the large-scale bio/chemical processes that is nitrification, de-nitrification, and nitrogen fixation with the Strickland-Parsons method modified in our laboratory. **Results.** During the vegetation period in the Rybinsk Reservoir the hydroxylamine concentration did not exceed 6 mg N/l at all stations and during all seasons. At the Sheksninsk reach, we found increased quantities of nitrates, particularly near the wastewater discharge point in the Koshta River mouth. The upstream part of this reach can be identified as a eutrophic one. In the Rybinsk Reservoir we observed considerable decrease of the nitrogen and phosphorous non-organic forms in the summer time and in the beginning of the fall and their increase during the winter and spring periods.

Keywords: nitrates, nitrites, ammonium ions, total phosphorous, total nitrogen, Rybinsk Reservoir, natural waters.

Financing: The work has been done within the frameworks of the State Assignment of Ministry of Science and Higher Education according the theme AAAA–A18–118012690123–4.

For citation: Stepanova I.E. Dynamics of the nitrogen and phosphorous content in the Rybinsk Reservoir over the many-year period. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2024. No. 5. P. 69–81. DOI: 10.35567/19994508-2024-5-69-81.

Received 08.08.2023.

ВВЕДЕНИЕ

Соединения азота и фосфора необычайно важны для функционирования водных экосистем. Их состояние, как среды обитания гидробионтов, во многом определяется содержанием биогенных элементов, которые часто лимитируют продукцию фитопланктона и высшей водной растительности [1, 2, 3]. Знание сезонных и межгодовых вариаций содержания биогенных элементов необходимо также для оценки степени трофии водоемов и прогноза изменений масштабов их антропогенного эвтрофирования. Поэтому наблюдения за их режимом в Рыбинском водохранилище начались еще до его заполнения в реках, впоследствии его образовавших.

Источниками поступления соединений азота и фосфора в водоем является сток через Шекснинский и Угличский гидроузлы, поступление из донных отложений, в результате абразивных процессов, с атмосферными осадками, подземными и сточными водами. Из анализа полученных данных за весь период существования Рыбинского водохранилища следует, что использование различных методов анализа, несистематическое получение и отрывочность аналитических данных, их недостаточность для общей характеристики этого сложного водного объекта, дают противоречивые результаты. Так, до заполнения водохранилища количество неорганических форм биогенных элементов было достаточно велико в реках, которые его образовали, – Волге, Мологе и Шексне: нитраты достигали 0,8

мг/л в весенний период, фосфаты – 0,16 мг/л. Летом нитриты и нитраты исчезали полностью, аммонийный азот и фосфаты значительно снижались [4]. Зимой концентрации неорганических форм биогенных элементов были высокими: количество нитратов доходило до 0,5 мг/л.

При сравнении концентраций этих веществ в реках до заполнения водохранилища и в 1943–1946 гг. отмечалась тенденция к снижению количества нитратного и повышению аммонийного азота в Волжском плесе [5]. Отмечено, что летом концентрация нитратов падала до аналитического нуля (на станции Молога в 1947 г. [6]). При этом концентрация фосфатов оставалась высокой даже в период наиболее активной вегетации водорослей. Исходя из этого, было высказано предположение, что в водохранилище развитие фитопланктона лимитируется соединениями азота. Позднее к аналогичному выводу пришли и некоторые другие исследователи, измерявшие содержание неорганических форм биогенных элементов в 1950-е годы [7, 8]. Исследования, проведенные в 1965 г., показали, что в Главном плесе, представляющем основную водную массу водохранилища, содержание аммонийного и нитратного азота в летний период в среднем составляло 0,07 и 0,13 мгN/л [2]. При этом концентрация фосфатов снижалась до аналитического нуля. Крайне низкие концентрации фосфатов были характерны и для остальной части водохранилища. Отсюда следовал вывод о лимитировании первичной продукции соединениями фосфора, а не азота. Контролирующая роль фосфора в развитии фитопланктона сохранялась и в 1989 г. [9]. Эти выводы противоречат предыдущим исследованиям. Данные по сезонной динамике азот и фосфорсодержащих соединений также имеют некоторые различия. Причины столь существенной несогласованности результатов не могут быть объяснены изменениями, произошедшими всего за 10 лет на водосборе и/или в самом водоеме и, по-видимому, кроются в использовании различных методов анализа, в частности, применении менее совершенных методик в ранние годы исследований.

Последние довольно обширные исследования, выполненные в конце 1970-х – начале 1980-х годов, указывают на то, что в наиболее консервативной водной массе водохранилища – Главном плесе – содержание нитратов, ионов аммония и фосфатов даже в периоды «цветения» водоема сохраняется на относительно высоком уровне. Отмечается тенденция к снижению концентраций биогенных элементов от весны к осени. В других плесах четких закономерностей не прослеживалось [10].

Все сказанное выше подтверждает необходимость детальных и длительных исследований режима биогенных элементов в водах Рыбинского водохранилища на современном этапе. Цель проведенной работы – анализ межгодовых и сезонных закономерностей содержания основных биогенных элементов и их пространственного распределения в водохранилище на основе собственных многолетних исследований.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рыбинское водохранилище является одним из крупнейших искусственных водоемов ($V=25,4 \text{ км}^3$, $S=4550 \text{ км}^2$), оно образовано основными реками – Мологой, Шексней и Волгой. Главную роль в формировании водной массы водохранилища играет Волга (36 % стока), реки Шексна и Молога дают 15 % и 13% соответственно, остальные 36 % приточности приходятся на долю малых и средних рек – Суда, Сить, Согожа и др. По распределению глубин и морфологическим особенностям ложа в водоеме выделено четыре основных плеса – Волжский, Моложский, Шекснинский и Центральный [10]. Первые три располагаются по долинам соответствующих рек и представляют собой вытянутые, довольно узкие участки. Центральный, или Главный плес является собственно водохранилищем.

Несистематические наблюдения на Рыбинском водохранилище проводились в 1990-е годы, а основные данные получены в 2001–2018 гг., когда экспедицион-



Рис. 1. Картограмма расположения станций наблюдения на Рыбинском водохранилище:

1 – Коприно, 2 – Молога, 3 – Волково, 4 – Наволок, 5 – Всехсвятское, 6 – Ухра, 7 – Измайлово, 8 – Средний двор, 9 – Гаютино, 10 – Мякса, 11 – Любец, 12 – Ваганиха, 13 – устье Суды, 14 – Устье Кошты, 15 – Ягорба, 16 – Кабачино, 17 – Первомайские острова, 18 – устье Себлы, 19 – Противье, 20 – Брейтово.

Fig. 1. Schematic map of the observation stations' location at the Rybinsk Reservoir: 1 is Koprino, 2 is Mologa, 3 is volkovo, 4 is Navolok, 5 is Vsekhsvyatskoye, 6 is Ukhra, 7 is Izmaylovo, 8 is Sredniy Dvor, 9 is Gayutino, 10 is Myaksa, 11 is Lyubets, 12 is Vaganikha, 13 is the Suda mouth, 14 is the Koshta mouth, 15 is Yagroba, 16 is Kabachino, 17 is Pervomayskiye Ostrova, 18 is the Sebla mouth, 19 is Protivyue, and 20 is Breytovo.

ные исследования организовывались регулярно, с частотой раз в две недели в период открытой воды. Отбор проб производили на шести стандартных станциях (с горизонта 0,5 м), принадлежащих двум основным плесам водоема – Волжскому (станции Коприно и Молога) и Центральному (Наволоок, Измайлово, Средний Двор и Брейтово). По расширенной сетке станций, охватывающей всю акваторию водохранилища, экспедиции проходили не каждый год, максимально 3–4 раза за вегетационный период. Схема отбора проб представлена на рис. 1.

Кроме отмеченных станций также отбирали пробы в районе выпуска промышленного стока г. Череповца. Пробы воды исследовали как непосредственно на судне, так и в лаборатории гидрологии и гидрохимии ИБВВ РАН. Дополнительно к главным формам биогенных элементов анализировали содержание гидроксилamina, одного из важнейших промежуточных продуктов широкомасштабных биохимических процессов – нитрификации, денитрификации, азотфиксации, методом Стрикленда – Парсонса, модифицированным в лаборатории [11]. Нитриты определяли колориметрическим методом после реакции с сульфаниламидом и альфанафтиламином [12], нитраты также колориметрическим методом после восстановления до нитритов омедненным кадмием, ионы аммония после микродиффузионной отгонки и последующей реакции с реактивом Несслера, фосфаты – колориметрическим методом с молибдатом аммония и оловом [12], общий азот и общий фосфор после предварительного окисления органических фракций персульфатом калия до нитратов и ортофосфатов [13, 14].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В зимний и весенний периоды формируется потенциальный резерв биогенных элементов, определяющий дальнейший уровень развития гидробиоценоза. Процессы нитрификации, начинающиеся осенью при низких температурах, продолжают весь подледный период: при температурах, близких к нулевой, аммоний переходит в наиболее окисленную форму азота – нитраты. Весной концентрация неорганических форм биогенных элементов в воде достигает максимума. В это время водная масса Волжского плеса выделяется более высоким уровнем всех биогенных элементов по сравнению с Центральным (табл. 1).

Таблица 1. Среднемноголетние концентрации биогенных элементов в Рыбинском водохранилище весной, мг/л или Р/л

Table 1. Average many-year concentrations of biogenic elements in the Rybinsk Reservoir, mg/l or R/l

Станция	NH_4^+	NO_2^-	NO_3^-	$\text{N}_{\text{общ}}$	NH_2OH , мкг/л	PO_4^{3-}	$\text{P}_{\text{общ}}$
Весна							
Коприно	0.09	0.010	0.68	1.15	2.4	0.034	0.075
Молога	0.066	0.008	0.49	1.09	1.2	0.023	0.062
Наволоок	0.054	0.004	0.30	1.04	0.75	0.020	0.053
Измайлово	0.052	0.002	0.25	0.95	0.8	0.020	0.053
Ср. Двор	0.052	0.002	0.30	0.92	1.2	0.023	0.050
Брейтово	0.063	0.003	0.27	0.99	1.0	0.023	0.071

В мае на станции Коприно уровень аммонийной формы азота во все исследованные годы был в 1,5–2,5 раза выше, чем на других станциях, а нитратов и нитритов – в 1,5–5 и 1,5–8 раз соответственно. Между концентрациями минеральных форм азота в весенний период на станциях Коприно и Молога различия были незначительными. Минеральные формы в Волжском плесе в период половодья преобладали над органическими, составляя до 60 % от общего азота. На других станциях неорганический азот наблюдался в пределах от 35 % до 38 % от общего. Концентрации фосфатов весной также были в 2–3 раза выше в волжских водах, чем в остальных частях водоема.

Большая площадь водоема, замедленный водообмен ($k=1,8$) и то, что питающие его воды значительно отличаются по химическим и физическим характеристикам, определяющим образом сказывается на сохранении весной водами различного происхождения своих свойств, в итоге в это время они представляют обособленные водные массы. Центральный плес Рыбинского водохранилища в большинстве случаев до середины мая остается заполненным малотрансформированными зимними водами, весенние изменения в химическом составе там наименее заметны.

В начале лета в Центральном плесе происходит разбавление зимних вод водами весеннего половодья и частичное их вытеснение, выравнивание химического состава и физических свойств различных частей водоема. Исключение составляет станция Коприно, где содержание неорганических форм азота несколько повышено (табл. 2). В середине-конце лета различия в концентрациях биогенных элементов на станциях исчезают. Для всех плесов в вегетационный период характерно снижение уровня минеральных форм азота при постепенном увеличении доли органического азота, которая возрастает с прогревом водных масс и может достигать в некоторых случаях 95 % от общего (рис. 2).

Таблица 2. Среднемноголетние концентрации биогенных элементов в Рыбинском водохранилище летом, 1998–2018 гг., мг/л или Р/л

Table 2. Average many-year concentrations of biogenic materials in the Rybinsk Reservoir during summer time, 1998–2018, mg/l or R/l

Станция	NH_4^+	NO_2^-	NO_3^-	$\text{N}_{\text{общ}}$	NH_2OH , мкг/л	PO_4^{3-}	$\text{P}_{\text{общ}}$
лето							
Коприно	0.10	0.009	0.18	0.95	2.2	0.040	0.086
Молога	0.065	0.005	0.09	0.89	1.8	0.018	0.074
Наволоки	0.06	0.004	0.15	0.94	1.6	0.015	0.045
Измайлово	0.06	0.004	0.16	0.95	1.4	0.013	0.047
Ср. Двор	0.07	0.004	0.14	0.14	0.95	0.013	0.047
Брейтово	0.06	0.005	0.12	0.99	1.7	0.015	0.049

Концентрация нитритов иногда падает до аналитического нуля. Главными процессами, направленными на понижение концентрации нитратов в вегетационный период, является потребление их фитопланктоном и бактериями. При интенсивной деструкции органических веществ, которая обычно отмеча-

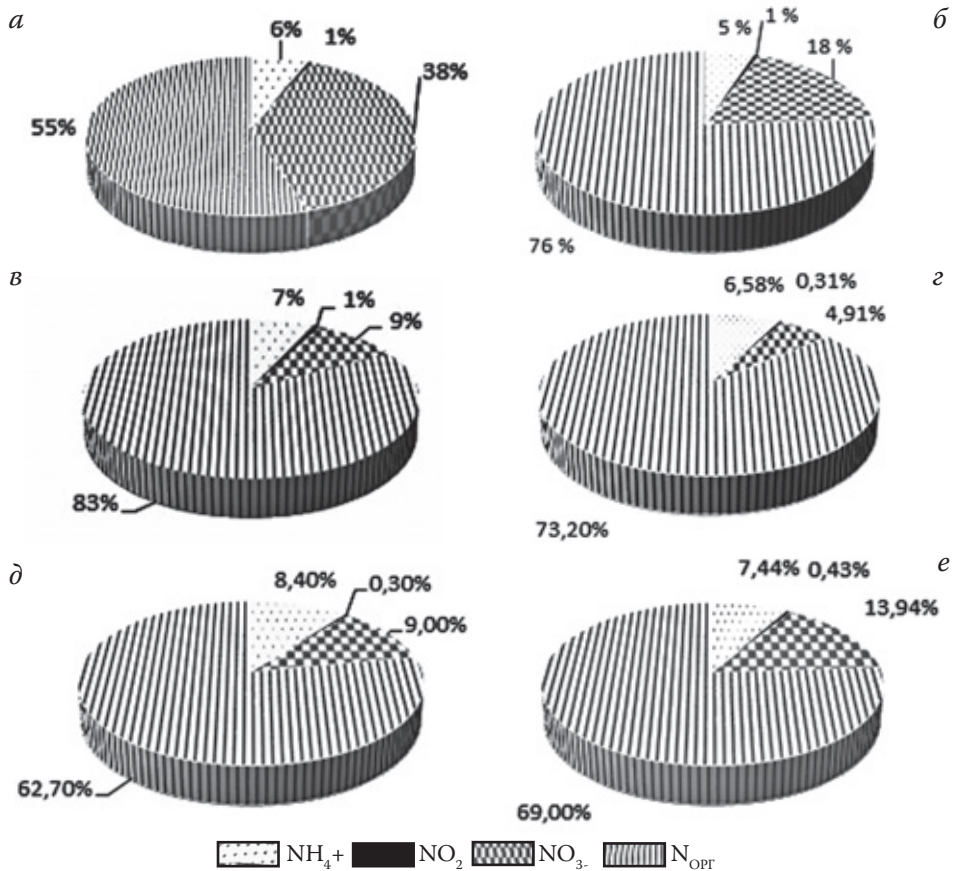


Рис. 2. Сезонная динамика относительного содержания форм азота в среднем по водохранилищу: а – май, б – июнь, в – июль, г – август, д – сентябрь, е – октябрь.
 Fig. 1. Seasonal dynamics of the nitrogen and phosphorous forms average relative content for the Rybinsk Reservoir: a is May, б is June, в is July, г is August, д is September, е is October.

ется при осеннем массовом отмирании планктонных организмов, в окружающей среде резко уменьшается содержание свободного молекулярного кислорода и на локальных участках водохранилища создаются микроаэрофильные или анаэробные условия. В такой ситуации бактерии-денитрификаторы используют связанный кислород нитратов на окисление органических веществ, тем самым существенно понижая его содержание [15]. Количество нитратного азота может снижаться от весны к осени до 60 раз (табл. 1). Однако в летних водах зачастую остаются достаточные количества минеральных форм азота и фосфора, необходимые для поддержания нормального развития фитопланктона. Летом проявляется отклик экосистемы водоема на сформировавшийся режим биогенных элементов.

В начале осени при уменьшении температуры снижается интенсивность фотосинтеза и усилятся процессы деструкции органического вещества, в результате которых происходит выделение в воду ионов аммония, являющих-

ся субстратом для нитрифицирующих бактерий. Поздней осенью возрастает количество нитратов и процент минеральных форм азота в общем его содержании (табл. 3)

Таблица 3. Среднемноголетние концентрации биогенных элементов

в Рыбинском водохранилище осенью, 1998–2018 гг., мг/л или Р/л

Table 3. Average many-year concentrations of biogenic materials in the Rybinsk Reservoir during fall time, 1998–2018, mg/N or R/l

Станция	NH_4^+	NO_2^-	NO_3^-	$\text{N}_{\text{общ}}$	NH_2OH , мкг/л	PO_4^{3-}	$\text{P}_{\text{общ}}$
осень							
Коприно	0.106	0.005	0.21	1.08	1	0.058	0.101
Молога	0.080	0.003	0.16	1.13	2.1	0.033	0.060
Наволоки	0.062	0.002	0.09	1.10	0.3	0.013	0.052
Измайлово	0.057	0.002	0.10	1.01	0.2	0.015	0.059
Ср. Двор	0.066	0.002	0.09	0.96	0.3	0.017	0.054
Брейтово	0.059	0.002	0.09	1.05	1.3	0.021	0.062

В вегетационный период на Рыбинском водохранилище концентрация гидроксилamina на всех станциях и во все сезоны – от начала лета до глубокой осени – не превышала 6 мкгN/л. В среднем содержание гидроксилamina в водохранилище в течение исследованного периода было ~2 мкг N/л, что меньше ПДК этого токсического соединения в несколько раз. Рыбохозяйственное ПДК солянокислого гидроксилamina составляет 0,15 мг/л или в пересчете на азот – 16 мкгN/л. Наиболее высокие концентрации отмечены в Волжском плесе.

В течение периода исследования уровень изученных соединений азота и фосфора варьировал в значительных пределах не только в сезонном, но и в межгодовом аспекте. Особенно обращает на себя внимание отличительная особенность межгодовых различий в сезонном распределении концентраций нитратов, которые заключаются в сроках наблюдения минимальных концентраций нитратов и степени их потребления фитопланктоном за вегетационный период (табл. 4).

Следует отметить, что минимальные уровни во все годы наблюдались в августе, за исключением 2013 г. (в сентябре) и экстремально жаркого 2010 г., когда уровень нитратов снизился до минимума уже в июле и держался на этом уровне и в сентябре. Минимальное снижение концентрации в вегетационный период, начиная с мая, до минимального значения отмечено в 2004 г., в 3,5 раза, а максимальное – в 2013 г., в 60 раз. Такое сильное снижение уровня нитратов в вегетационный период обусловлено целым рядом причин: довольно большим весенним запасом биогенных веществ; ранним прогревом верхнего слоя водных масс, в связи с чем происходило мощное развитие фитопланктонных организмов (по данным лаборатории альгологии уровень хлорофилла в августе достигал очень высоких значений – до 120 мкг/л), в процессе которого усилилось потребление неорганических форм биогенных элементов. За исследуемый период отчетливо проявились и тренды увеличения концентрации фосфатов и общего фосфора (рис. 3). Это связано, скорее всего, с антропоген-

ным загрязнением водохранилища. Такие тренды иногда отмечаются в искусственных водоемах, однако в отдельные периоды тренд может смениться на прямо противоположный [16]. Для Рыбинского водохранилища сложно предсказать, будет ли происходить дальнейшее повышение количества фосфатов и общего фосфора. Если этот процесс будет продолжаться, он неизбежно приведет к повышению трофического статуса водоема. Влияние неантропогенных факторов на концентрацию фосфатов в водах достаточно низкое. Количество остальных биогенных элементов фактически не изменилось: нитратов незначительно снизилось (тренд недостоверен)

Таблица 4. Межгодовая динамика уровня нитратов в Рыбинском водохранилище, (средняя по станциям), 2001–2018 г.г, мг/л.

Table 4. Annual dynamics of the nitrates level in the Rybinsk Reservoir (average over all stations), 2001–2018, mg/l

Год	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Снижение, раз
2001	–	0.39	0.15	0.03	0.03	–	–
2004	0.57	0.34	0.27	0.18	0.19	–	3.2
2005	0.49	0.24	0.16	0.12	0.09	0.11	5.8
2006	0.36	0.25	0.08	0.04	0.06	0.10	5.8
2007	0.28	0.12	0.06	0.02	0.04	0.04	15
2008	0.18	0.16	0.08	0.04	0.08	0.16	4.7
2009	–	0.21	0.14	0.06	0.08	0.15	–
2010	0.47	0.17	0.03	0.03	0.03	0.09	15
2011	0.55	0.30	0.11	0.02	0.05	–	24
2012	0.32	0.19	0.16	0.03	0.04	0.07	12.8
2013	0.59	0.30	0.10	0.05	0.01	0.06	59.0
2014	0.22	0.19	0.02	0.01	0.08	0.15	22.0
2015	0.21	0.14	0.09	0.02	0.04	–	10.5
2016	0.24	0.13	0.03	0.02	0.13	0.24	12.0
2017	0.49	0.29	0.20	0.14	0.04	0.12	12.2
2018	0.30	0.25	0.07	0.012	–	0.14	4.3

При анализе всех данных не выявлено высоких коэффициентов парной корреляции между среднемесячными концентрациями аммония, нитритов, нитратов, общего и органического азота, фосфатов и общего фосфора со среднемесячной температурой. Однако графики зависимости отдельных биогенных элементов от температуры воды наглядно указывают на то, что на сезонное распределение исследуемых параметров определяющее влияние оказывает внутригодовой характер изменения температуры воды [17]. Объем водного стока незначительно влияет на уровень биогенных элементов в водохранилище, можно лишь отметить его отрицательную связь с содержанием общего и органического азота.

Результаты расширенных исследований представлены в табл. 5. В Волжском плесе концентрация биогенных элементов в течение почти всех сезонов

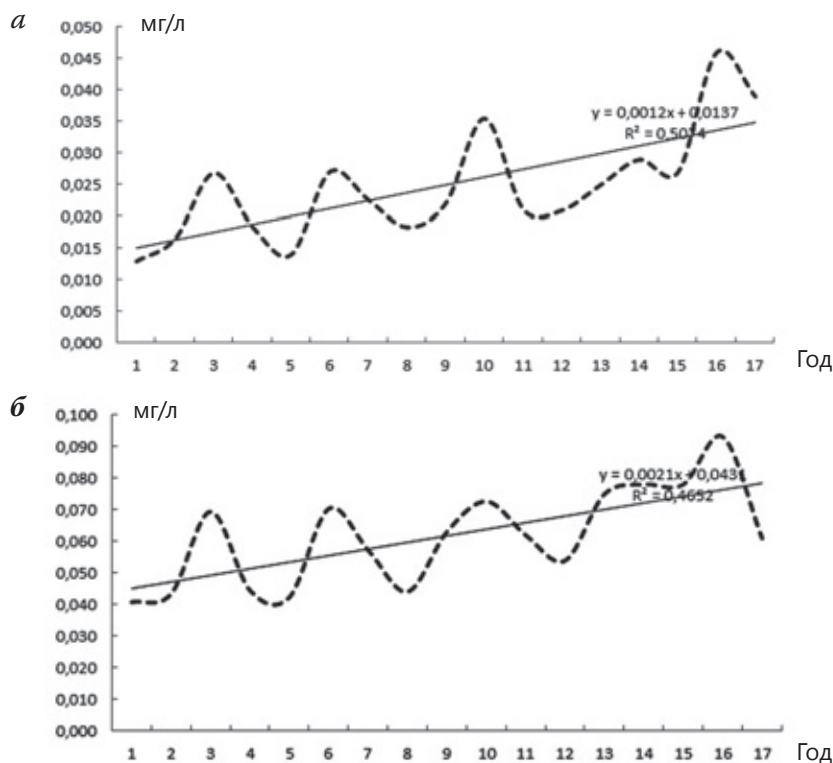


Рис. 3. Динамика уровня биогенных элементов в 2001–2018 гг.:

а – фосфаты, *б* – общий фосфор, мг P/л.

Fig. 3. Dynamics of the biogenic elements level in 2001–2018:

a – phosphates, *b* – total phosphorous, mg P/l

года наблюдалась выше, чем в водной массе остальных частей водохранилища, формируемых водами половодья северных рек Мологы и Шексны, площадь водосбора которых характеризуется большей залесенностью и заболоченностью почв, меньшей сельскохозяйственной освоенностью. Шекснинский плес, как и Волжский, богат биогенными элементами, особенно в районе выпуска сточных вод в устье р. Кошты, где количество нитратов даже в летнее время достигало 1,3 мгN/л, общего азота – 3,85 мг/л, нитритов – 0,18 мг N/л, что выше рыбохозяйственного ПДК, а общего фосфора – 0,5 мг/л. Воды верхней части этого плеса можно отнести к эвтрофным, далее происходит разбавление водной массы поступающими из Шекснинского водохранилища водами (среднегоголетний годовой сток Шекснинской ГЭС составляет 5 км³, а объем сточных промышленных и бытовых вод всего 0,2 км³). В нижней части у станции Гаютино уровень биогенных элементов не отличается от такового в Центральном плесе. Воды Моложского плеса содержат самое низкое количество биогенных элементов.

Из соотношения форм биогенных соединений наиболее информативным является отношение общего азота к общему фосфору, которое в Рыбинском водохранилище за период исследования колебалось в широких пределах, а в

Таблица 5. Содержание биогенных элементов в водах плесов

Рыбинского водохранилища, 2006–2018 гг.

Table 5. Biogenic element content in the Rybinsk Reservoir reaches' waters, 2006–2018

Плес	NO_2^- мг/л	NO_3^- мг/л	NH_2OH , мг/л	$\text{N}_{\text{общ}}$ мг/л	PO_4^{3-} мг/л	$\text{P}_{\text{общ}}$ мг/л
весна						
Волжский	0.008	0.42	0.005	1.06	0.042	0.070
Моложский	0.001	0.087	0.004	0.90	0.027	0.058
Шекснинский	0.010	0.113	0.002	1.04	0.026	0.057
Главный	0.003	0.118	0.001	0.90	0.036	0.061
лето						
Волжский	0.007	0.134	0.001	1.03	0.036	0.091
Моложский	0.001	0.023	0.001	0.89	0.025	0.072
Шекснинский	0.013	0.118	0.002	1.44	0.043	0.100
Главный	0.004	0.067	0.001	0.89	0.018	0.061
осень						
Волжский	0.006	0.150	0.006	0.96	0.074	0.109
Моложский	0.001	0.015	0.002	0.99	0.028	0.056
Шекснинский	0.006	0.098	0.006	1.16	0.040	0.066
Главный	0.004	0.060	0.001	1.12	0.028	0.065

среднем составило 17,8, следовательно, в водоеме фактически нет лимитирования первичной продукции этими элементами (идет небольшое лимитирование по фосфору). Считается, что при соотношении N:P в водоемах меньше десяти, развитие фитопланктона лимитировано азотом, если оно составляет 10–16, то не лимитировано ни одним из этих элементов, если больше 16, то развитие ограничено фосфором [18, 19]. В Куйбышевском водохранилище растворенные в воде фосфаты являются лимитирующим фактором развития водорослей [20].

ВЫВОДЫ

Заполнение Рыбинского водохранилища моложско-шекснинской и волжской водами, формирующимися на качественно разных водосборах, в совокупности с особенностями его морфометрии, определяет пространственную неоднородность и временную изменчивость распределения всех изученных химических компонентов.

В рамках проведенного исследования сезонные изменения прослеживались в трех плесах, кроме Шекснинского. В настоящее время по содержанию биогенных элементов воды большей части Рыбинского водохранилища относятся к мезотрофным, кроме Волжского плеса и верхней части Шекснинского, которые можно отнести к эвтрофным. Воды Моложского плеса содержат самое низкое количество биогенных элементов. Отмечено значительное снижение концентрации неорганических форм азота и фосфора летом и начале осени (нитратов до 60 раз) и повышение их в зимний и весенний периоды.

В последние десятилетия прослеживается тенденция увеличения концентрации фосфатов и общего фосфора, это связано с тем, что поступление фосфора в водоем из антропогенных источников росло и продолжает расти быстрее, чем азота. Эта тенденция впоследствии может привести к повышению эвтрофного статуса Рыбинского водохранилища. В настоящее время исследования продолжают.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Даценко Ю.С. Эвтрофирование водохранилищ. Гидролого-гидрохимические аспекты. М: Геос, 2007. 252 с.
2. Трифонова Н.А. Соединения азота в Рыбинском водохранилище: автореф. дис.... канд. биол. наук. М., 1974. 28 с.
3. Sondergaard M., Lauridsen T.L., Johansson L.S., Jeppesen E. Nitrogen or phosphorus limitation in lakes and its impact on phytoplankton biomass and submerged macrophyte cover // *Hydrobiologia*. 2017. Vol. 795. P. 35–48.
4. Щербаков А.П. Гидрохимический режим Волги, Мологи, Шексны в районе Рыбинского водохранилища (до наполнения водохранилища) // *Труды биологической станции «Борок»*. 1950. Вып. 1. С. 7–34.
5. Воронков П.П. Основные черты формирования гидрохимического режима. Рыбинского водохранилища // *Труды ГТИ*. 1951. Вып. 2. С. 167–238.
6. Кудрявцев Д.Д. Материалы к гидрохимической характеристике Волжского отрога Рыбинского водохранилища в 1943–1946 гг. // *Труды биологической станции «Борок»*. 1950. Вып. 1. С. 35–79.
7. Аничкова Н.И. Некоторые черты гидрохимического режима северной части Рыбинского водохранилища // *Труды Дарвинского государственного заповедника. Вологда: Вологодское книжное изд-во*. 1959. Вып. 5. С. 191–208.
8. Киреева А.С. Некоторые данные по гидрохимии Рыбинского водохранилища // *Труды биологической станции «Борок»*. 1955. Вып. 2. С. 335–350.
9. Былинкина А.А. Содержание азота и фосфора в воде Рыбинского водохранилища в период автотрофной стадии его функционирования. *Труды ИБВВ РАН*. 1993. Вып. 67–70. С. 28–41.
10. Рыбинское водохранилище и его жизнь. Л.: Наука, 1972. 364 с.
11. Степанова И.Э. Методы определения гидразина и гидроксилamina в природных водах // *Экологическая химия*. 1917. 26 (1). С 25–33.
12. Семенов А.Д. Практическое руководство по химическому анализу вод суши. Л.: Гидрометеоиздат, 1977. 540 с.
13. Гапеева М.В., Разгулин С.М., Скопинцев Б.А. Ампульный персульфатный метод определения общего азота в природных водах. *Гидрохимические материалы*. 1984. Т. 87. С. 67–70.
14. Бикбулатов Э.С. О методе определения общего фосфора в природных водах. *Гидрохимические материалы*. 1974. Т. 60. С. 167–173.
15. Гудков А.Г. Биологическая очистка городских сточных вод: уч. Пособие. Вологда: ВоГТУ, 2002. 127 с.
16. Vystavna Y., Heizlar J., Kopachek J. Long-term trends of phosphorus concentration in artificial lake: Socioeconomic and climat drivers. 2017. Plos one <http://doi.org/10.1371/journal.pone0186917>.
17. Литвинов А.С., Степанова И.Э. Зависимость содержания органического вещества и биогенных элементов от гидрологических условий в Рыбинском водохранилище. *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. 2015. № 3. С 20–31. DOI: 10.35567/1999-4508-2015-3-2.
18. Sakamoto M. 1966. Primary production by phytoplankton community in some Japanese lakes and its dependence on lake depth. *Archiv Fur Hydrobiologie*. Vol. 62. No. 1. P. 1–28.
19. Doering P.H., Oviat C.A., Nowicki B.L., Klos E.G., Reed L.W. Phosphorus and nitrogen limitation of primary production in a simulated estuarine gradient. *Marine progress series*. 1995. Vol.124. P. 271–287.
20. Селезнева А.В., Беспалова, К.В., Селезнев В.А. Содержание растворенного неорганического фосфора в воде Куйбышевского водохранилища // *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. 2018. № 2. С. 35–44. DOI: 10.35567/1999-4508-2018-2-3.

REFERENCES

1. Datsenko Y.S. Eutrophication of reservoirs. Hydrological/hydro/chemical aspects. M: Geos, 2007. 252 p. (In Russ.).
2. Trifonova N.A. Nitrogen compounds in the Rybinsk Reservoir: abstract of the thesis for the Candidate of Biological Sciences. M., 1974. 28 p. (In Russ.).
3. Sondergaard M., Lauridsen T.L., Johansson L.S., Jeppesen E. Nitrogen or phosphorus limitation in lakes and its impact on phytoplankton biomass and submerged macrophyte cover. *Hydrobiologia*. 2017. Vol. 795. P. 35–48.
4. Shcherbakov A.P. Hydro/chemical regime of the Volga, Mologa, and Sheksna near the Rybinsk Reservoir (prior to the reservoir filling). *Transactions of the "Borok" biological station*. 1950. Iss. 1. P. 7–34 (In Russ.).
5. Voronkov P.P. The main features of the Rybinsk Reservoir hydro/chemical regime formation. *Transactions of GGI*. 1951. Iss. 2. P. 167–238 (In Russ.).
6. Kudryavtsev D.D. Materials to hydro/chemical characteristics of the Rybinsk Reservoir Volga Branch in 1943–1946. *Transactions of the "Borok" biological station*. 1950. Iss. 1. P. 35–79 (In Russ.).
7. Anichkova N.I. Some features of the Rybinsk Reservoir northern part hydro/chemical regime. *Transactions of the Darwin State Reserve*. Vologda: Voogda Book Publishing House. 1959. Iss. 5. P. 191–208 (In Russ.).
8. Kireyeva A.S. Some data on the Rybinsk Reservoir hydro/chemistry. *Transactions of the "Borok" biological station*. 1955. Iss. 2. P. 335–350 (In Russ.).
9. Bylinkina A.A. Nitrogen and phosphorous content in the Rybinsk Reservoir water during the autotrophic stage of its functioning. *Transactions of RAS IBVV*. 1993. Iss. 67–70. P. 28–41 (In Russ.).
10. The Rybinsk Reservoir and its life. L.: Science, 1972. 364 p. (In Russ.).
11. Stepanova I.E. Methods of hydrazine and hydroxylamine determination in natural waters. *Ecological chemistry*. 1917. 26 (1). P. 25–33 (In Russ.).
12. Semenov A.D. Practical guidelines on the inland water chemical analysis. L.: Gidrometeoizdat, 1977. 540 p. (In Russ.).
13. Gapeyeva M.V., Razgulin S.M., Skopintsev B.A. An ampule peroxydisulfate method of the total nitrogen determination in natural waters. *Hydro/chemical materials*. 1984. Vol. 87. P. 67–70 (In Russ.).
14. Bikbulatov E.S. About the method of the total phosphorous determination in natural waters. *Hydro/chemical materials*. 1974. Vol. 60. P. 167–173 (In Russ.).
15. Gudkov A.G. Biological treatment of urban wastewater: Manual. Vologda: VoGTU, 2002. 127 p. (In Russ.).
16. Vystavna Y., Heizlar J., Kopachek J. Long-term trends of phosphorus concentration in artificial lake: Socioeconomic and climate drivers. 2017. Plos one <http://doi.org/10.1371/journal.pone0186917>.
17. Litvinov A.S., Stepanova I.E. Dependence of the organic matter and biogenic elements concentration on hydrological conditions in the Rybinsk Reservoir. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2015. No. 3. P. 20–31. DOI: 10.35567/1999-4508-2015-3-2 (In Russ.).
18. Sakamoto M. 1966. Primary production by phytoplankton community in some Japanese lakes and its dependence on lake depth. *Archiv Fur Hydrobiologie*. Vol. 62. No. 1. P. 1–28.
19. Doering P.H., Oviat C.A., Nowicki B.L., Klos E.G., Reed L.W. Phosphorus and nitrogen limitation of primary production in a simulated estuarine gradient. *Marine progress series*. 1995. Vol. 124. P. 271–287.
20. Selezneva A.V., Bespalova K.V., Seleznev V.A. Content of the dissolve non-organic phosphorous in the Kuybyshev Reservoir water. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2018. No. 2. P. 35–44. DOI: 10.35567/1999-4508-2018-2-3 (In Russ.).

Сведения об авторе:

Степанова Ирина Эрнстовна, научный сотрудник, лаборатория гидрологии и гидрохимии, ФГБУН «Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина Российской академии наук», Россия, Ярославская обл., Некоузский р-н, пос. Борок, д. 109; e-mail: iris@ibiw.ru

About the author:

Irina E. Stepanova, Researcher, Laboratory of Hydrology and Hydro/chemistry of the Russian Academy of Sciences I.D. Papanin Institute of Inland Water Biology; 109, Borok, Nekous Rayon, Yaroslavl Oblast, Russia; e-mail: iris@ibiw.ru

Применение гидрохимического моделирования при выявлении источника воздействия на подземную гидросферу в условиях калийного производства

А.А. Борисов  

 borissoff@mail.ru

ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Камский филиал, г. Пермь, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Калийная промышленность в России основывается на разработке месторождений водорастворимых минеральных соединений хлорида калия. Несмотря на принимаемые меры по изоляции и контролю за местами хранения рассолов, в результате развития локальной фильтрации отмечаются случаи безаварийных утечек в закрытые для прямого наблюдения элементы геологической среды – горные породы и подземные воды. Это сопровождается формированием своеобразной зоны аккумуляции, которая обеспечивает накопление рассолов и их последующую разгрузку в виде выходов подземных вод. При отсутствии прямых признаков фильтрации процедура идентификации источника усложняется и требует дополнительных работ в виде вскрытия фильтрующей зоны скважинами или трассирование минерализованных потоков геофизическими методами. Другим направлением являются модельные гидрохимические расчеты. В статье представлен опыт применения гидрохимического моделирования при выявлении источника формирования выхода минерализованных подземных вод на участке калийного производства. **Методы.** Гидрохимические модельные расчеты произведены в программе PHREEQC. Аппроксимация процессов гидрохимического взаимодействия в системе вода–порода–газовая фаза выполнена в двух модельных построениях, соответствующих геологическим условиям и составу рассолов. Исходные данные о составах рассолов и выхода подземных вод получены методом капиллярного электрофореза «Капель», значения удельной электропроводности – кондуктометром ProfiLine Cord 1970i, плотность – ареометрами АОН-2 и АОН-3, водородный показатель – рН-метром HI 83141. Состав горных пород, слагающих зону фильтрации, установлен по результатам бурения скважин и минералогическому анализу кернового материала. **Результаты.** Модельные расчеты позволили получить данные о гидрохимических процессах, протекающих при взаимодействии минерализованных водных растворов с минеральными компонентами пород водоносного горизонта и насыщающими их подземными водами. В рассмотренных условиях было установлено что в системе вода–порода–газовая фаза наибольшее влияние на изменение исходного состава рассола оказывает присутствие карбонатов и сульфатов в зоне фильтрации и насыщенность CO_2 . На основе сопоставления модельных расчетов с параметрами и составом вод выхода установлена сходимость результатов с моделью № 1 с разницей средних значений менее 11 %. Полученные результаты позволили обосновать необходимость выполнения комплексных работ на объекте хранения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: гидрохимическая модель, фильтрация, рассолы, подземные воды, калийное производство.

Для цитирования: Борисов А.А. Применение гидрохимического моделирования при выявлении источника воздействия на подземную гидросферу в условиях калийного производства // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 5. С. 82–97. DOI:10.35567/19994508-2024-5-82-97.

Дата поступления 27.05. 2024.

© Борисов А.А., 2024

THE USE OF HYDRO/CHEMICAL MODELING IN IDENTIFYING THE SOURCE OF IMPACT ON THE UNDERGROUND HYDROSPHERE IN CONDITIONS OF POTASH PRODUCTION

Alexander A. Borisov  

 borissoff@mail.ru

Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection Kama Branch, Perm, Russia

ABSTRACT

Relevance. The potash industry in Russia is based on the development of deposits of water-soluble mineral compounds of potassium chloride. Technologically, its operation involves the circulation of brines, which, due to their high ion concentrations and chemical activity, can have a negative impact on elements of the geological environment. In spite of applied measures on isolation and control of brine storage places, as a result of local filtration development there are cases of accident-free leaks into the elements of geological environment - rocks and ground waters, which are closed for direct observation. This is accompanied by the formation of a peculiar accumulation zone, which provides the accumulation of brines and their subsequent discharge in the form of groundwater outlets. The filtration process of brines is accompanied by their interaction with rocks and groundwater, leading to a change in the initial composition. Therefore, in the absence of direct signs of filtration, the procedure of unambiguous identification of the source becomes more complicated and requires additional work in the form of opening of the filtering zone by wells or tracing of mineralized flows by geophysical methods. Another direction is model hydro/chemical calculations based on the principles of physical chemistry in order to obtain information about the processes occurring in the geological environment that contribute to the transformation of mineralized aqueous solutions. The article discusses the experience of applying hydro/chemical modeling in identifying the source of formation of mineralized water solutions. **Methods.** Hydro/chemical model calculations were performed in PHREEQC program. Approximation of hydro/chemical interaction processes in solution-rock-gas phase system was performed in model constructions corresponding to geological conditions and composition of brines in storage objects. Initial data on the compositions of aqueous solutions were obtained by capillary electrophoresis method "Droplet", values of specific conductivity - by conductometer ProfiLine Cord 1970i, density - by areometers AON-2 and AON-3, hydrogen index - by pH-meter HI 83141. The composition of rocks composing the filtration zone was determined based on the results of well drilling and mineralogical analysis of core material. **Results.** Model calculations allowed to obtain data on hydro/chemical processes occurring during the interaction of mineralized aqueous solutions with mineral components of aquifer rocks and groundwater saturating them. Under the considered conditions it was found that in the solution-rock-gas phase system, the presence of carbonates and sulfates in the filtration zone and CO₂ saturation have the greatest influence on the change of the initial brine composition. On the basis of comparison of model constructions with actual parameters of groundwater yield the convergence of the results with model No.1 was established, with the difference of average values less than 11%. The obtained results allowed to justify the necessity of performing complex works at the storage site.

Keywords: hydro/chemical model, filtration, brines, groundwater, potash production.

For citation: Borisov A.A. The use of hydro/chemical modeling in identifying the source of impact on the underground hydrosphere in conditions of potash production. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2024. No. 5. P. 82–97. DOI:10.35567/19994508-2024-5-82-97.

Received 27.05. 2024.

ВВЕДЕНИЕ

Основой калийной промышленности в России являются девять месторождений, из которых на семи запасы представлены минеральными соединениями хлоридов. Действующий цикл промышленного освоения калийных солей реализован только на Верхнекамском месторождении, где добывают сильвинит и карналлит. Остальные месторождения находятся на разных этапах подготовки к разработке [1].

Технология освоения запасов калийных руд предполагает обращение с большим объемом рассолов. Они образуются при проведении горных работ, обогащении руды и используются при гидравлической закладке выработанных камер рудника.оборот и хранение рассолов на предприятии осуществляется за счет гидротехнических сооружений (ГТС) – рассолосборников и шламонакопителей. Несмотря на применяемые меры по изоляции, отмечаются случаи малообъемных безаварийных фильтрационных утечек, которые в гидрохимическом плане сопровождаются постепенным замещением пресных гидрокарбонатно-кальциевых вод солеными хлоридными магниевыми и кальциевыми и кальциевыми натриевыми водами [2–4]. Своевременное выявление и локализация фильтрации позволяют купировать канал поступления за счет специальных мероприятий (гидронамыв, тампонаж зоны фильтрации и т. д.), что в сочетании с организацией систем перехвата минерализованных потоков (дренажные колодцы, разгрузочные скважины и пр.) должно обеспечивать минимизацию воздействия на окружающую среду.

Если в приповерхностной части разреза отсутствует выдержанный флюидоупор, при фильтрационных утечках геологическая среда будет выступать в качестве зоны аккумуляции фильтрата. В ней будет происходить накопление и распределение фильтрата по проницаемому пространству горных пород вплоть до участка потенциальной разгрузки (речных долин, балок, оврагов и т. д.). Фильтрация рассолов может сопровождаться смешиванием с подземными водами, катионными обменов с минералами горных пород и фазовыми переходами. Эти процессы обеспечивают изменение исходного состава рассолов.

Если прямые признаки фильтрации отсутствуют и состав вод новообразованного выхода подземных вод не соответствует составу рассолов в ГТС, обоснование их генетической взаимосвязи затруднительно. Поэтому для однозначной идентификации источника требуются проведение дополнительных работ в виде вскрытия фильтрующей зоны скважинами или трассирование минерализованных потоков дистанционным геофизическими методами. Вместе с тем, на участках калийного производства процессы трансформации гидросферы могут обеспечиваться не только фильтрационными утечками из поверхностных объектов, но и быть обусловлены глубинными факторами (соляной карст, стволы скважин, активизация восходящей миграции) [5, 6]. Эти факторы определяют значительное время и трудозатратность при установлении генезиса выхода минерализованных подземных вод на участке калийного производства в случае отсутствия прямых признаков, нескольких потенциальных источников, различий в химическом составе.

Примером решения подобной задачи может служить определение генезиса выхода подземных вод в долине временного водотока бассейна р. Камы. Выход был расположен в зоне потенциального влияния двух ГТС, удаленных от него на 200–300 м (рис. 1).

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Поскольку на момент активизации выхода на данной территории уже много лет выполнялась горно-обогательная деятельность калийного предприятия, с целью исключения глубинных источников поступления минеральных компонентов был выполнен анализ и систематизация материалов поисковых работ, гидрологических съемок, инженерно-геологических работ, учтен отбор проб в рамках мониторинговых наблюдений за состоянием подземных вод. Полученный результат позволил исключить связь выхода вод с глубоко-залегающими подземными водами по причине отсутствия ликвидированных скважин и гидродинамических предпосылок к изливу у подземных вод.

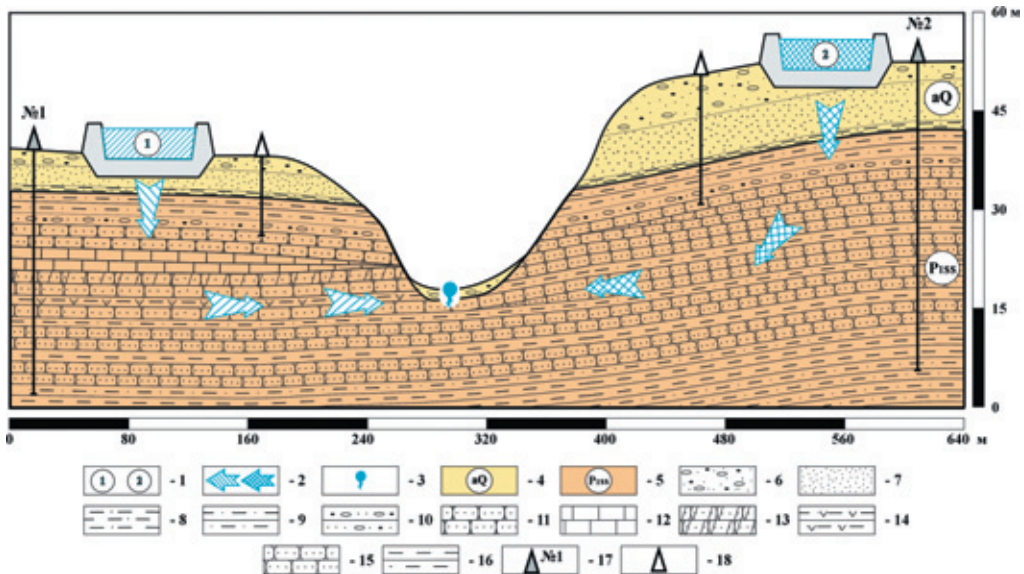


Рис. 1. Ситуационная схема участка: 1 – рассолосборники № 1 и № 2; 2 – предполагаемое направление фильтрации; 3 – выход подземных вод; 4 – аллювиальные четвертичные отложения; 5 – отложения шешминской свиты; 6 – супеси; 7 – пески; 8 – алевроиты; 9 – алевролиты; 10 – смесь песчаников, гравелитов, конгломератов; 11 – песчаник известковистый; 12 – известняк; 13 – песчаник доломитизированный; 14 – алевролит с включениями гипса; 15 – песчаник полимиктовый; 16 – аргиллит; 17 – скважина; 18 – наблюдательная скважина/пъезометр.

Fig. 1. Situation diagram of the site: 1 – brine collector No.1 and No.2; 2 – expected direction of filtration; 3 – groundwater outlet; 4 – alluvial quaternary deposits; 5 – deposits of the Sheshmin formation; 6 – sandy loam; 7 – sands; 8 – aleurites; 9 – siltstones; 10 – a mixture of sandstones, gravelites, conglomerates; 11 – calcareous sandstone; 12 – limestone; 13 – dolomitized sandstone; 14 – siltstone with gypsum inclusions; 15 – polymictic sandstone; 16 – mudstone; 17 – well; 18 – observation well/piezometer.

Высказано предположение, что формирование выхода обусловлено фильтрационными утечками из рассолоборников, расположенных на левом и правом склонах долины временного водотока. Отсутствие воды в пьезометрах и в наблюдательных скважинах дамб указывало на то, что фильтрация проходит непосредственно через ложе. Проведены специальные работы по выявлению утечек с помощью красителя и химико-аналитических исследований водорастворенных микрокомпонентов. После распыления флуоресцентного красителя в придонном слое ГТС на протяжении длительного периода наблюдений он так и не был зафиксирован в составе выхода подземных вод. Химико-аналитические исследования методами эмиссионной спектроскопии водорастворенных катионов IV–VI аналитических групп и хромато-масс-спектрометрии индивидуальных органических водорастворенных соединений не обнаружили признаков подобия между рассолами в рассолоборниках и водами выхода.

Полученные результаты объяснялись совокупностью процессов смешивания рассолов (фильтрата) с подземными водами и сопутствующими этому фазовым переходам и ионно-обменными процессами. На вероятность этого указывали результаты сопоставления макрокомпонентного состава вод, где отмечалось несоответствие ионного состава выхода подземных вод водам рассолоборников и водам водоносного горизонта (рис. 2). При этом отмечались признаки промежуточного положения вод выхода между водами водоносного горизонта и водами рассолоборников (рис. 2с).

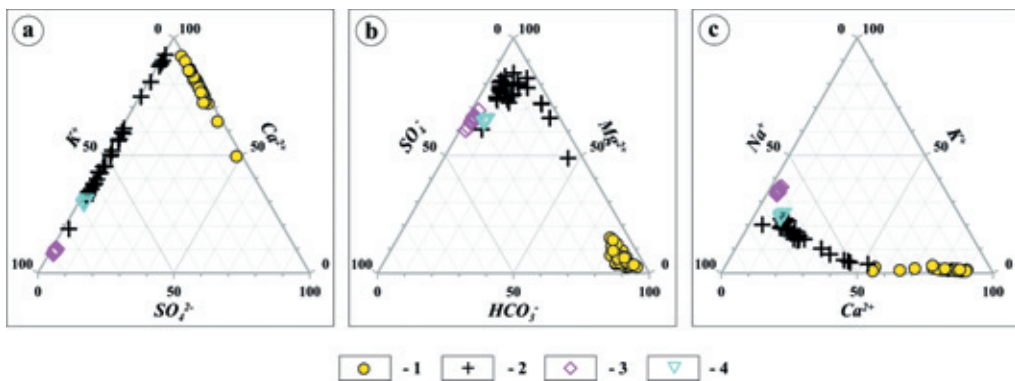


Рис. 2. Состав вод: 1 – водоносный горизонт ($P_1 \text{ \textcircled{S}}$); 2 – выход подземных вод; 3 – рассолоборник № 1; 4 – рассолоборник № 2.

Fig. 2. Water composition: 1 – aquifer ($P_1 \text{ \textcircled{S}}$); 2 – groundwater outlet; 3 – brine collector No. 1; 4 – brine collector No. 2.

В основе представлений о характере взаимодействия подземных вод с горными породами лежат модельно-расчетные построения, основанные на принципах и подходах физической химии [7, 8]. В процедурном плане значительное упрощение расчетов достигается за счет использования специальных компьютерных программ [9]. PHREEQC является одной из программ, алгоритм работы которой базируется на решении системы уравнений закона действующих масс и материального баланса с коррекцией ионной силы как по уравнению Дебая–Хюккеля, так и по параметрам Питцера, что обеспечивает надежный уровень вычислений в системах с преобладанием хлоридов даже при высоких концентрациях ионов

[10, 11]. Положительный опыт применения программы PHREEQC, в т. ч. и при расчетах фильтрации подземных вод [12–14], послужил обоснованием для ее использования при гидрохимическом моделировании процесса поступления рассола (фильтрата) из рассолосборников в водоносный горизонт.

Построения были выполнены в двух модельных ситуациях: модель № 1 – взаимодействие вод рассолосборника № 1, подземных вод шешминского горизонта, пород водоносного горизонта разреза скважины № 1; модель № 2 – взаимодействие вод рассолосборника № 2, подземных вод шешминского горизонта, пород водоносного горизонта разреза скважины № 2. При моделировании процесса смешивания рассолов (фильтратов) с водами водоносного горизонта рассчитывались стехиометрические реакции смешивания, кинетика реакций, определялся итоговый состав смеси водного раствора. Поскольку объем фильтрационных утечек и подземных вод неизвестны, расчет выполняли для различных соотношений: от смеси с составом 10 % рассола (фильтрата) и 90 % подземных вод до смеси с составом 90 % рассола (фильтрата) и 10 % подземных вод. С шагом 10 % за девять расчетов была рассмотрена ситуация как с преобладанием одного компонента над другим, так и ситуация, при которой смешивание происходит в равных пропорциях – 50 % рассола (фильтрата) и 50 % подземных вод. Исходными данными для расчета стали средние значения составов (табл. 1).

Таблица 1. Среднее значение физико-химических параметров и средний ионно-катионный состав вод

Table 1. Average value of physical/chemical parameters and average ion-cationic water composition

Параметр (Parameter)		Рассолосборник (Brine collector)		Водоносный горизонт (P ₁ šš) (Aquifer (P ₁ šš))
		№ 1	№ 2	
Плотность, г/см ³ (Density g/cm ³)		1,225	1,134	0,998
Удельная электропроводность, См/см (Specific Conductivity, S/cm)		0,323	0,196	0,012
рН, единицы (pH, units)		6,51	7,51	7,42
Катионы, мг/л (Cations, mg/l)	Na ⁺	96190,5	43530,7	16,1
	K ⁺	54329,7	15700,3	1,2
	Ca ²⁺	5755,1	6779,8	89,1
	Mg ²⁺	1977,4	1295,0	19,8
Анионы, мг/л (Anions, mg/l)	Cl ⁻	157167,8	66631,2	83,2
	SO ₄ ²⁻	1012,1	573,4	22,8
	HCO ₃ ⁻	72,8	151,5	204,2

Для каждой смеси водных растворов определяли реакции взаимодействия с минеральными компонентами водовмещающих пород, расчет обменного взаимодействия, индексы насыщения. На территории рассматриваемого участка первый водоносный горизонт приурочен к шешменским отложениям (P₁šš). Горизонт безнапорный, развит спорадически, водоносный интервал соответствует глубинам 20–60 м. Вскрытая скважинами проницаемая часть

водоносного горизонта неоднородна: в районе рассолосборника № 1 встречаются карбонаты в виде известняка и доломита, включения гипса, доломитизации песчаника; в рассолосборнике № 2 проникаемая часть представлена терригенными минералами, в основном силикатами и алюмосиликатами – кварц, полевые шпаты, амфибол, слюды и т. д. (табл. 2).

Таблица 2. Минеральный состав пород водоносного горизонта на участке исследований

Table 2. Mineral composition of aquifer rocks at the research site

Название (Name)	Содержание минералов, % (Mineral content, %)	
	Скважина № 1 (Well No. 1)	Скважина № 2 (Well No. 2)
Кварц (Quartz)	28,5	31,2
Плагиоклаз (Plagioclase)	11,7	12,1
Альбит (Albite)	9,8	10,9
Микроклин (Microcline)	8,8	9,8
Амфибол (Amphibole)	8,5	13,8
Известняк (Limestone)	7,5	2,1
Доломит (Dolomite)	4,8	0
Ангидрит (Anhydrite)	3,9	0
Мусковит (Muscovite)	2,8	3,8
Магнетит (Magnetite)	2,4	7,4
Бiotит (Biotite)	2,2	1,6
Гётит (Goethite)	1,9	3,4
Остальные (Others)	7,2	3,9

Поскольку скорость фильтрации была неизвестна, из-за чего время контакта невозможно учесть, итоговым считался состав, при котором достигалось равновесие фаз. Расчет фазовых равновесий, реакций ассоциации и диссоциации, катионный обмен выполнен по термодинамическим параметрам базы данных программы PHREEQC¹ [10]. Для отсутствующих минералов (амфибол, плагиоклаз и т. д.) данные были взяты из справочников [15, 16]. Предполагалось, что фильтрат насыщен Cl⁻, Na⁺, K⁺, поэтому в расчет для отслеживания и учета реакций диссоциаций и возможности фазового перехода были введены параметры для эвапоритовых минералов. Набор реакций с учетом минеральной составляющей представлен в табл. 3.

Для условий подземных вод необходим учет газовой фазы, поскольку растворенный в воде CO₂ (и его гидратированная форма H₂CO₃) в сочетании с Ca²⁺ и Mg²⁺ регулирует pH и определяет буферную способность водной системы, а также общий химический баланс вод [17, 18]. В расчет закладывалось предположение об открытой газовой системе и насыщении подземными водами CO₂ и N₂ через фиксированное значение парциального давления [10, 19]. Расчет выполнялся при условии, что газовые компоненты проявляют идеальные свойства, а сама газовая фаза представляет собой идеальную смесь газовых компонентов [11].

¹ PHREEQC database Base de Donnee Thermodem_MAJ2020. Version V1.10. Available online: https://thermoddem.brgm.fr/sites/default/files/phreeqc_thermoddemv1.10_15dec2020.zip (accessed on 27 February 2024).

Таблица 3. Заложенные в гидрохимический расчет реакции

Table 3. Reactions included in the hydrochemical calculation

Название (Name)	Реакция (Reaction)
Минералы водоносного горизонта (Aquifer minerals)	
Альбит (Albite)	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8 + 8\text{H}_2\text{O} = \text{Na}^+ + \text{Al}(\text{OH})_4^- + 3\text{H}_4\text{SiO}_4$
Амфибол (Amphibole)	$\text{Ca}_2\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2 + 14\text{CO}_2 + 22\text{H}_2\text{O} = 2\text{Ca}^{2+} + 5\text{Mg}^{2+} + 14\text{HCO}_3^- + 8\text{H}_4\text{SiO}_4$
Ангидрит (Anhydrite)	$\text{CaSO}_4 = \text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-}$
Биотит (Biotite)	$\text{KMg}_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2 + 6\text{H}^+ + 4\text{H}_2\text{O} = \text{K}^+ + 3\text{Mg}^{2+} + \text{Al}(\text{OH})_4^- + 3\text{H}_4\text{SiO}_4$
Гётит (Goethite)	$\text{FeO}(\text{OH}) + 3\text{H}^+ = \text{Fe}^{3+} + 2\text{H}_2\text{O}$
Доломит (Dolomite)	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2 = \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + 2\text{CO}_3^{2-}$
Известняк (Limestone)	$\text{CaCO}_3 = \text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-}$
Кварц (Quartz)	$\text{SiO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} = \text{H}_4\text{SiO}_4$
Магнетит (Magnetite)	$\text{Fe}_2\text{O}_3 + 6\text{H}^+ = 2\text{Fe}^{3+} + 3\text{H}_2\text{O}$
Микроклин (Microcline)	$\text{KAlSi}_3\text{O}_8 + 4\text{H}_2\text{O} = \text{K}^+ + \text{Al}^{3+} + 4\text{H}^+ + 3\text{H}_4\text{SiO}_4$
Мусковит (Muscovite)	$\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2 + 10\text{H}^+ = 3\text{Al}^{3+} + \text{K}^+ + 3\text{H}_4\text{SiO}_4$
Плагиоклаз (Plagioclase)	$\text{Na}_{0.62}\text{Ca}_{0.38}\text{Al}_{1.38}\text{Si}_{2.62}\text{O}_8 + 5.52\text{H}^+ + 2.48\text{H}_2\text{O} = 0.62\text{Na}^+ + 0.38\text{Ca}^{2+} + 1.38\text{Al}^{3+} + 2.62\text{H}_4\text{SiO}_4$
Эвапоритовые минералы (Evaporite minerals)	
Бишофит (Bischofite)	$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} = \text{Mg}^{2+} + 2\text{Cl}^- + 6\text{H}_2\text{O}$
Галит (Halite)	$\text{NaCl} = \text{Na}^+ + \text{Cl}^-$
Гейлюссит (Gaylussite)	$\text{Na}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O} = \text{Ca}^{2+} + 2\text{CO}_3^{2-} + 2\text{Na}^+ + 5\text{H}_2\text{O}$
Гергейт (Goergeyite)	$\text{K}_2\text{Ca}_5(\text{SO}_4)_6 \cdot \text{H}_2\text{O} = 2\text{K}^+ + 5\text{Ca}^{2+} + 6\text{SO}_4^{2-} + \text{H}_2\text{O}$
Глазерит (Glaserite)	$\text{NaK}_3(\text{SO}_4)_2 = \text{Na}^+ + 3\text{K}^+ + 2\text{SO}_4^{2-}$
Глауберит (Glauberite)	$\text{Na}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2 = \text{Ca}^{2+} + 2\text{Na}^+ + 2\text{SO}_4^{2-}$
Каинит (Kainite)	$\text{KMg}(\text{SO}_4)\text{Cl} \cdot 3\text{H}_2\text{O} = \text{Cl}^- + \text{K}^+ + \text{Mg}^{2+} + \text{SO}_4^{2-} + 3\text{H}_2\text{O}$
Калицитинит (Kalicinit)	$\text{KHCO}_3 = \text{K}^+ + \text{H}^+ + \text{CO}_3^{2-}$
Карналлит (Carnallite)	$\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O} = \text{K}^+ + \text{Mg}^{2+} + 3\text{Cl}^- + 6\text{H}_2\text{O}$
Кизерит (Kieserite)	$\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O} = \text{Mg}^{2+} + \text{SO}_4^{2-} + \text{H}_2\text{O}$
Леонгардит (Leonhardite)	$\text{MgSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O} = \text{Mg}^{2+} + \text{SO}_4^{2-} + 4\text{H}_2\text{O}$
Мирабилит (Mirabilite)	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O} = \text{SO}_4^{2-} + 2\text{Na}^+ + 10\text{H}_2\text{O}$
Полигалит (Polyhalite)	$\text{K}_2\text{MgCa}_2(\text{SO}_4)_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} = 2\text{K}^+ + \text{Mg}^{2+} + 2\text{Ca}^{2+} + 4\text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}_2\text{O}$
Сильвинит (Sylvite)	$\text{KCl} = \text{K}^+ + \text{Cl}^-$
Хантит (Huntite)	$\text{CaMg}_3(\text{CO}_3)_4 + 4\text{H}^+ = \text{Ca}^{2+} + 3\text{Mg}^{2+} + 4\text{HCO}_3^-$

Кроме состава вод рассчитывали удельную электропроводность и плотность. PHREEQC определяет удельную электропроводность раствора путем суммирования произведений удельной электропроводности и молярной концентрации компонентов раствора, корректируя молярную концентрацию по коэффициенту электрохимической активности, который рассчитывается на осно-

ве сочетания закона Кольрауша и уравнения Дебая–Хюккеля [10, 11]. Плотность рассчитывается через определение молярного объема по уравнению Хельгесона–Киркхема–Флауэрса в модификации Редлих–Розенфельда, использование которого для поверхностных условий достаточно эффективно [20].

Полученные модельные значения состава вод и физико-химические параметры сравнивали со значениями, зарегистрированными с помощью метода капиллярного электрофореза «Капель», кондуктометром ProfiLine Cord 1970i, ареометрами АОН-2 и АОН-3, рН-метром HI 83141 в пробах из выхода подземных вод.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты модельных гидрохимических построений, отражающие процесс поступления и смешивания фильтрата с подземными водами и взаимодействия смеси с минералами пород водоносного горизонта представлены на рис. 3. Линейный тренд роста концентрации по мере увеличения доли вод расколосборников для Cl^- отмечается для обеих моделей (рис. 3a). Это обусловлено тем, что его фазовый переход в минеральную форму определяется только формированием небольшого количества соединений с металлами (алюминий, магний, железо). Для основного объема хлоридсодержащих минералов даже при максимальных концентрациях Cl^- в растворе коэффициент насыщения менее 0 (рис. 4a, 4b).

В модельных построениях концентрации Na^+ демонстрируют более низкие значения, чем в исходных составах. Это обусловлено тем, что при большой ионной силе раствора происходит замещение в минеральных структурах кальция натрием [21]. Также часть Na^+ образует соединения сульфатов и гидрокарбонатов (бикарбонатов). Относительно других ионов для K^+ является характерным более низкое содержание в системе вода–порода–газовая фаза, чем в исходных составах (рис. 3c). При этом для модели № 1 фазовый переход K^+ обусловлен образованием гергеита – $\text{K}_2\text{Ca}_5(\text{SO}_4)_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (рис. 4a) и гидросульфата калия. Для модели № 2 – только образованием гидросульфата калия.

Насыщение Ca^{2+} в модельных растворах обусловлено наличием карбонатных минералов в зоне фильтрации (рис. 3d). Растворение CaCO_3 обеспечивается его взаимодействием с H^+ , который совместно с HCO_3^- образуется при диссоциации CO_2 . Доломит и ангидрит, относительно которых растворы ненасыщенные и диссоциируют, обеспечивает увеличение содержания сульфатов и магния (рис. 4).

Из результатов модельных построений следует, что наибольшее влияние на формирование итогового состава в системе вода–порода–газовая фаза вод оказывает наличие карбонатов, сульфатов и насыщенность CO_2 . Для модели № 1, в минеральном составе которой был доломит и ангидрит, отмечается увеличение содержания Mg^{2+} , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , HCO_3^- в результате фазовых переходов.

При сопоставлении полученных результатов модельных построений с фактическими параметрами выходов подземных вод очевидно, что наибольшая сходимость наблюдается с моделью № 1 (рис. 5). Модель № 2 в большинстве случаев находится за пределами распределений концентраций компонентов выхода подземных вод в соотношениях $\text{SO}_4^{2-}/\text{Na}^+$ (рис. 5b), $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ (рис. 5c), $\text{HCO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$ (рис. 5d).

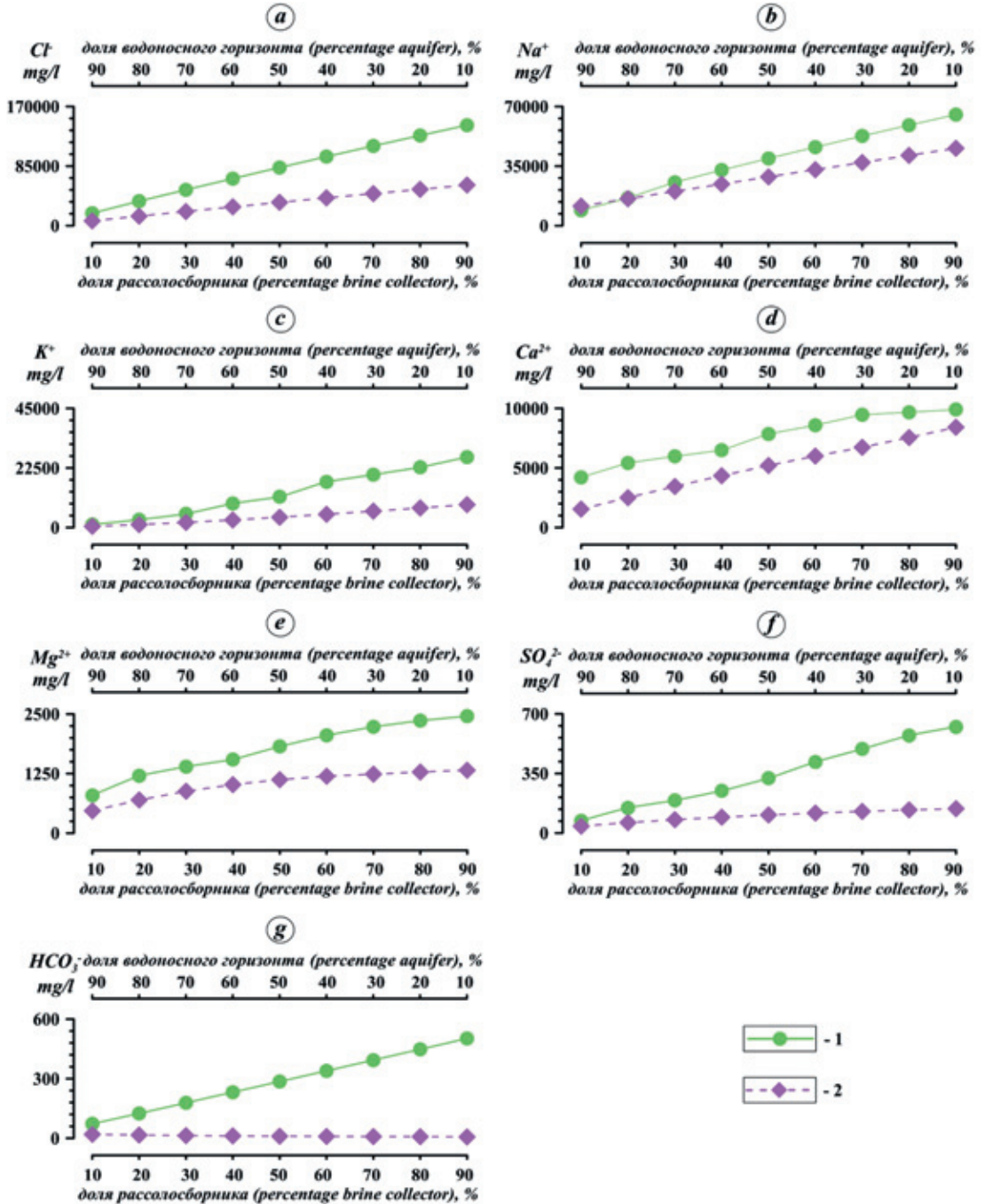


Рис. 3. Результаты гидрохимического моделирования смешанного состава вод в системе вода–порода–газовая фаза: 1 – модель № 1; 2 – модель № 2.

Fig. 3. Results of hydro/chemical modeling of mixed water composition in the solution–rock–gas phase system: 1 – model No. 1; 2 – model No. 2.

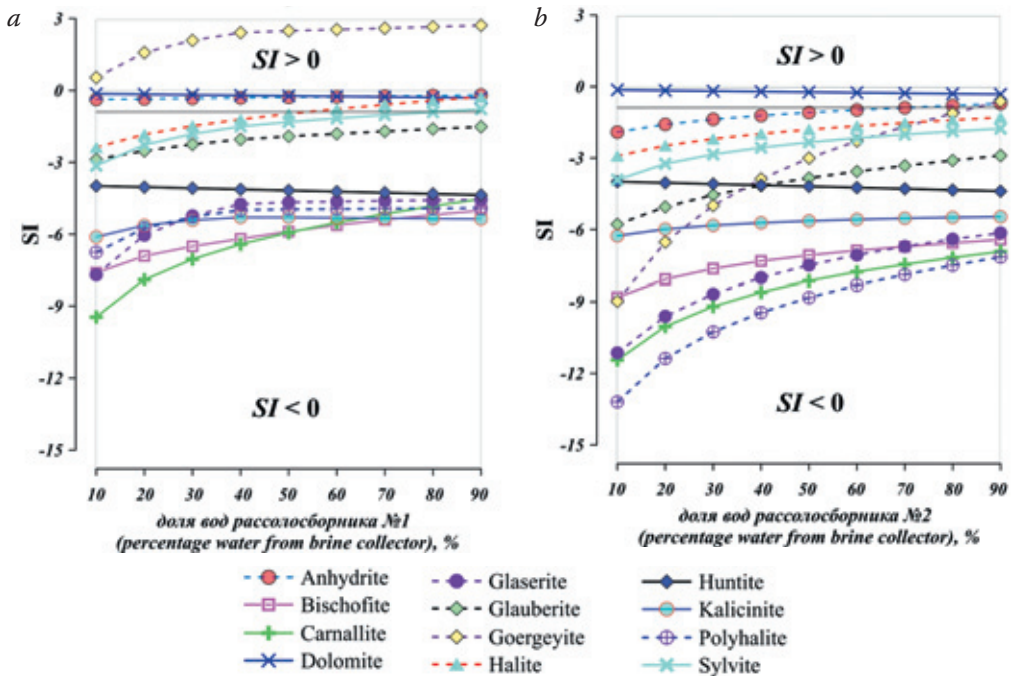


Рис. 4. Значения индекса насыщения (SI) минералов в модели № 1 (а) и в модели № 2 (б).
 Fig. 4. Saturation index (SI) values of minerals in Model No. 1 (a) and in model No. 2 (b).

Модель № 1, кроме общего подобия в распределении компонентов и уровня их концентраций, отражает развитие фильтрационного процесса. В условиях безнапорного, спорадически водоносного горизонта объем подземных вод на локальном участке ограничен. Поэтому по мере поступления фильтрата (рассола) его доля будет увеличиваться, а доля пресных подземных вод уменьшаться из-за отсутствия притока с внешнего контура питания и со стороны атмосферных осадков. В процессе наблюдений за выходом подземных вод это отображалось в постоянном росте концентраций: в модели № 1 начальные концентрации компонентов в выходе подземных вод соответствуют доле рассола (фильтрата) в 20 % и постепенно происходит их увеличение до 60 %.

Оценку сходимости модельных результатов с фактическими параметрами вод выходов можно выполнить при сопоставлении их средних значений. В количественном отношении расхождение средних значений концентраций в выходе вод и в модели № 1 составило 0,63–10,56 % в сторону завышения модельных значений (табл. 4). Расхождение по наиболее значимым компонентам составило: Cl^- – 6,27 %, Na^+ – 10,74 %, K^+ – 9,54 %, Ca^{2+} – 4,51 %. Скорее всего, это обусловлено процессами взаимодействия с металлсодержащими минералами, которые не были учтены в минеральном составе и в реакциях. С моделью № 2 расхождения составили 18,83–92,71 % (5,3 % для pH) в сторону занижения модельных значений. С данной моделью расхождения по наиболее значимым компонентам составили: Cl^- – 57,17 %, Na^+ – 18,83 %, K^+ – 62,92 %, Ca^{2+} – 30,59 %. Характерным является то, что для концентраций в модели № 1 и модели № 2 не прослеживаются общих трендов несоответствия с концентрациями выхода вод.

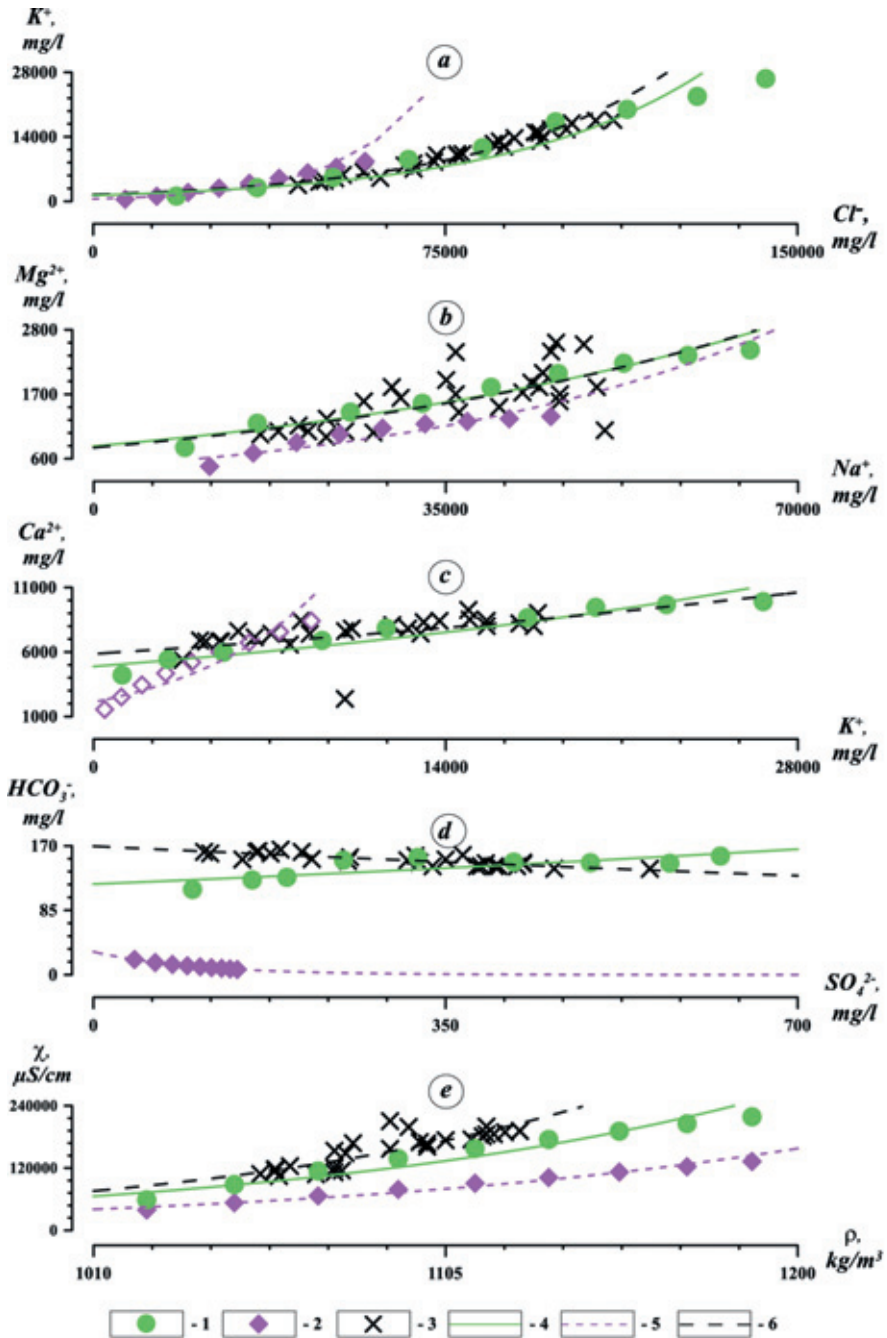


Рис. 5. Сопоставление концентраций ионов выхода подземных вод и модельных построений: 1 – модель № 1; 2 – модель № 2; 3 – выход подземных вод; 4 – линия тренда модели № 1; 5 – линия тренда модели № 2; 6 – линия тренда подземных вод.

Fig. 5. Comparison of ion concentrations of groundwater outlet and model constructions: 1 – model No. 1; 2 – model No. 2; 3 – groundwater outlet; 4 – model No. 1 trend line; 5 – model No. 2 trend line; 6 – trend line of groundwater.

Таблица 4. Средние значения физико-химических параметров и среднего ионно-катионного состава вод моделей и выхода подземных вод
 Table 4. Model and water outlet average values of physico-chemical parameters and average ion-cation water composition

Параметр (Parameter)		Выход вод (Water outlet)	Модель (Model)		Разница, % (Difference, %)	
			№ 1	№ 2	№ 1	№ 2
Плотность, г/см ³ (Density g/cm ³)		1091	1110	1112	1,71	1,92
Удельная электропроводность, См/см (Specific Conductivity, S/cm)		0,156	0,157	0,097	0,63	-37,82
рН, единицы (pH, units)		6,98	6,78	7,35	-2,95	5,3
Катионы, мг/л (Cations, mg/l)	Na ⁺	35364	39501	28702	10,47	-18,83
	K ⁺	10523	11633	3902	9,54	-62,92
	Ca ²⁺	7497	7851	5204	4,51	-30,59
	Mg ²⁺	1627	1819	1122	10,56	-31,04
Анионы, мг/л (Anions, mg/l)	Cl ⁻	77727	82932	33293	6,27	-57,17
	SO ₄ ²⁻	305	322	106	5,28	-65,25
	HCO ₃ ⁻	151	154	11	1,95	-92,71

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Модельные гидрохимические расчеты, основанные на принципах физической химии и выполненные в программе PHREEQC, позволили получить представление о протекающих в геологической среде процессах на участке потенциального влияния со стороны рассолосборников калийного производства. Установлено, что в системе вода–порода–газовая фаза наибольшее влияние на изменение исходного состава рассола оказывает присутствие карбонатов и сульфатов и насыщенность CO₂ в зоне фильтрации рассолов.

Отсутствие данных об объеме фильтрационных утечек и количестве задействованных подземных вод было компенсировано вариацией их долей в модельном растворе при смешивании. В рамках девяти проведенных расчетов рассмотрена ситуация как с преобладанием одного компонента над другим, так и ситуация, при которой смешивание происходит в равных пропорциях. Для каждой смеси определены реакции взаимодействия с минеральными компонентами водовмещающих пород разреза, количество которых было установлено по результатам анализа керна скважин. Насыщение подземных вод газовой фазы было учтено через парциальное давление.

На основе сопоставления модельных расчетов с параметрами и составом вод выхода установлена сходимость результатов с моделью № 1 с разницей средних значений менее 11 %. Для модели № 2, отражающей условия фильтрации со стороны другого объекта, расхождение составило 18,83 – 92,71 %.

Полученные результаты легли в обоснование источника воздействия на подземную гидросферу и позволили сконцентрировать дальнейшие иссле-

дования. Подтверждением модельных построений стали результаты бурения специальной скважины, непосредственно вскрывшей зону фильтрации, состав вод которой соответствовал гидрохимической модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барях А.А., Смирнов Э.В., Квиткин С.Ю., Тенисон Л.О. Калийная промышленность России: проблемы рационального и безопасного недропользования // Горная промышленность. 2022. № 1. С. 41–50. DOI 10.30686/1609-9192-2022-1-41-50.
2. Хайрулина Е.А. Воздействие фильтрационных вод шламохранилища с соледержащими отходами на поверхностные и подземные воды // Географический вестник. 2018. № 2 (45). С. 145–155. DOI 10.17072/2079-7877-2018-2-145-155.
3. Белкин П.А., Катаев В.Н. Закономерности техногенной трансформации химического состава подземных вод в районах разработки калийных месторождений // Известия Уральского государственного горного университета. 2018. № 2 (50). С. 55–64. DOI 10.21440/2307-2091-2018-2-55-64.
4. Лепихин А.П., Мирошниченко С.А. Техногенное воздействие Соликамско-Березниковского промузла на поверхностные водные объекты // Горный журнал. 2008. № 10. С. 92–96. EDN KUYRRV.
5. Бельтюков Г.В. Карстовые и гипергенные процессы в эвапоритах: автореф. дисс. ... д-ра геол.-минер. наук. Пермь, 2000. 346 с.
6. Тютюнова Ф.И. Гидрогеохимия техногенеза. М.: Наука, 1987. 335 с.
7. Крайнов С.Р., Шваров Ю.В., Гринчук Д.В. и др. Методы геохимического моделирования и прогнозирования в гидрогеологии. М.: Недра, 1988. 254 с.
8. Борисов М.В., Шваров Ю.В. Термодинамика геохимических процессов. М.: Изд-во Московского ун-та, 1992. 256 с.
9. Букаты М.Б. Разработка программного обеспечения для решения гидрогеологических задач // Известия ТПУ. Геология. Поиски и разведка полезных ископаемых Сибири. 2002. Т. 305. Вып. 6. С. 348–365.
10. Parkhurst D.L., Appelo C.A.J. User's Guide to Phreeqc (Version 2) - A Computer Program for Speciation, Batch Reaction, One Dimensional Transport, and Inverse Geochemical Calculations. Water-Resources Investigation Report. 1999. 99. 312.
11. Parkhurst D.L., Appelo C.A.J., Description of input and examples for PHREEQC version 3: a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations (No. 6-A43). 2013. U.S. Geological Survey.
12. Лю Ю., Лехов А.В. Моделирование изменения фильтрационных параметров загипсованных пород при фильтрации рассолов // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2012. № 6. С. 551–559.
13. Xie X., Wang Y., Li J. et al. Hydrogeochemical and Isotopic Investigations on Groundwater Salinization in the Datong Basin, Northern China. Journal of the American Water Resources Association. 2013. Vol. 49. No. 2. P. 402–414. DOI 10.1111/jawr.12028.
14. Dang X., Gao M., Wen Zh. et al. Saline groundwater evolution in the Luanhe River delta (China) during the Holocene: hydrochemical, isotopic, and sedimentary evidence // Hydrology and Earth System Sciences. 2022. Vol. 26. No. 5. P. 1341–1356. DOI 10.5194/hess-26-1341-2022.
15. Université d'Ottawa, C. Chapter 5 Geochemical Weathering. Available online: <https://mysite.science.uottawa.ca/idclark/GEO4342/2009/Weathering.pdf> (дата обращения: 27.02.2024).
16. MINTEQA2/PRODEFA2, A Geochemical Assessment Model for Environmental Systems: User Manual Supplement for Version 4.0. HydroGeoLogic, Inc. Herndon, Virginia. Available online: <https://www.epa.gov/sites/default/files/documents/SUPPLE1.PDF> (дата обращения: 27.02.2024).
17. Cole J.J., Prairie Y.T., Dissolved CO₂ in: GE Likens (Ed.), Encyclopedia of Inland Waters. 2. Elsevier. Oxford, 2009. P. 30–34.
18. Sobek S., Algenstein G., Bergstrom A.K., Jansson M., Tranvik L.J., The catchment and climate regulation of p CO₂ in boreal lakes, Global Change Biology. 9 (2003). P. 630–641. DOI: 10.1046/j.1365-2486.2003.00619.x.

19. Appelo C.A.J., Postma D. *Geochemistry, Groundwater and Pollution*, 2nd ed.; Balkema, P.A.A., Ed.; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2005.
20. Appelo C.A.J., Parkhurst D.L., Poste, V.E.A., 2014. Equations for calculating hydrogeochemical reactions of minerals and gases such as CO₂ at high pressures and temperatures. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 125. P. 49–67. DOI: 10.1016/j.gca.2013.10.003.
21. Merkel B.J., Planer-Friedrich B. & Nordstrom D.K. (2005). *Groundwater Geochemistry: A Practical Guide to Modeling of Natural and Contaminated Aquatic Systems*. https://www.researchgate.net/publication/252701485_Groundwater_Geochemistry_A_Practical_Guide_to_Modeling_of_Natural_and_Contaminated_Aquatic_Systems (дата обращения: 27.02.2024).

REFERENCES

1. Baryakh A.A., Smirnov E.V., Kvitkin S.Y., Tenison L.O. Potassium sector of Russia: problems of rational and safe use of deposits. *Mining industry*. 2022. No.1. P. 41–50. DOI 10.30686/1609-9192-2022-1-41-50 (In Russ.).
2. Khairulina E.A. Salt-containing sludge dump filtration waters impact on surface water and groundwater. *Newsletter of geography*. 2018. No. 2 (45). P. 145–155. DOI 10.17072/2079-7877-2018-2-145-155 (In Russ.).
3. Belkin P.A., Kataev V.N. Regularities of technogenic transformation of the groundwater chemical composition in the areas of potassium deposits working. *Newsletter of the Ural State Mining University*. 2018. No. 2 (50). C. 55–64. DOI 10.21440/2307-2091-2018-2-55-64 (In Russ.).
4. Lepikhin A.P., Miroshnichenko S.A. Technogenic impact of the Solikamsk-Berezniki industrial complex upon surface water bodies. *Mining journal*. 2008. No.10. P. 92–96. EDN KUYRRV (In Russ.).
5. Belyukov G.V. Karst and hypergenic processes in evaporites: abstract of the thesis for Doctor of Geological/mineralogical Sciences. Perm, 2000. 346 p. (In Russ.).
6. Tyutyunova F.I. *Hydro/geochemistry of the techno/genesis*. M.: Nauka, 1987. 335 p. (In Russ.).
7. Kraynov C.R., Shvarov Y.V., Grinchuk D.V. et al. *Methods of geo/chemical modeling in hydro/geology*. M.: Nedra, 1988. 254 p. (In Russ.).
8. Borisov M.V., Shvarov Y.V. *Thermodynamics of the geo/chemical processes*. M.: Publishing House of the Moscow University, 1992. 256 p. (In Russ.).
9. Bukaty M.B. Development of software for the hydro/geological tasks solution. TPU newsletter. *Geology. Prospecting of the Siberian deposits*. 2002. Vol. 305. Iss. 6. P. 348–365 (In Russ.).
10. Parkhurst D.L., Appelo C.A.J. User's Guide to Phreeqc (Version 2). A Computer Program for Speciation, Batch Reaction, One Dimensional Transport, and Inverse Geochemical Calculations. Water-Resources Investigation Report. 1999. 99. 312.
11. Parkhurst D.L., Appelo C.A.J., Description of input and examples for PHREEQC version 3: a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations (No. 6-A43). 2013. U.S. Geological Survey.
12. Lyu U., Lekhov A.V. Modeling of the plastered mining rocks' filtration parameters' changing during the brine filtration. *Geo/ecology. Engineering geology, hydro/geology, geo/cryo/ecology*. 2012. No. 6. P. 551–559 (In Russ.).
13. Xie X., Wang Y., Li J. et al. Hydrogeochemical and Isotopic Investigations on Groundwater Salinization in the Datong Basin, Northern China. *Journal of the American Water Resources Association*. 2013. Vol. 49. No. 2. P. 402–414. DOI 10.1111/jawr.12028.
14. Dang X., Gao M., Wen Zh. et al. Saline groundwater evolution in the Luanhe River delta (China) during the Holocene: hydro/chemical, isotopic, and sedimentary evidence. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2022. Vol. 26. No. 5. P. 1341–1356. DOI: 10.5194/hess-26-1341-2022.
15. Université d'Ottawa, C. Chapter 5 Geochemical Weathering. Available online: <https://mysite.science.uottawa.ca/idclark/GEO4342/2009/Weathering.pdf> (accessed on 27 February 2024).
16. MINTEQA2/PRODEFA2, A Geochemical Assessment Model for Environmental Systems: User Manual Supplement for Version 4.0. HydroGeoLogic, Inc. Herndon, Virginia. Available online: <https://www.epa.gov/sites/default/files/documents/SUPPLE1.PDF> (accessed on 27 February 2024).
17. Cole J.J., Prairie Y.T., Dissolved CO₂ in: GE Likens (Ed.), *Encyclopedia of Inland Waters*, 2, Elsevier, Oxford, 2009. P. 30–34.

18. Sobek S., Algenstein G., Bergstrom A.K., Jansson M., Tranvik L.J., The catchment and climate regulation of p CO₂ in boreal lakes, *Global Change in Biology*. 9 (2003). P. 630–641. DOI: 10.1046/j.1365-2486.2003.00619.x.
19. Appelo C.A.J., Postma D. *Geochemistry, Groundwater and Pollution*, 2nd ed.; Balkema, P.A.A., Ed.; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2005.
20. Appelo C.A.J., Parkhurst, D.L., Poste, V.E.A., 2014. Equations for calculating hydrogeochemical reactions of minerals and gases such as CO₂ at high pressures and temperatures. *Geochimica et Cosmochimica. Acta* 125. P. 49–67. DOI: 10.1016/j.gca.2013.10.003.
21. Merkel B.J., Planer-Friedrich B. & Nordstrom D.K. (2005). *Groundwater Geochemistry: A Practical Guide to Modeling of Natural and Contaminated Aquatic Systems*. https://www.researchgate.net/publication/252701485_Groundwater_Geochemistry_A_Practical_Guide_to_Modeling_of_Natural_and_Contaminated_Aquatic_Systems (accessed on 27 February 2024).








Сведения об авторе:

Борисов Александр Александрович, канд. техн. наук, научный сотрудник, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Камский филиал, Россия, 614002, г. Пермь, ул. Островского, 113; ORCID: 0000-0001-5847-0214; e-mail: borissoff@mail.ru

About the author:

Alexander A. Borisov, Candidate of Technical Sciences, Researcher, Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection Kama Branch, ul. Nikolaya Ostrovskogo, 133, Perm, 614002, Russia; ORCID: 0000-0001-5847-0214; e-mail: borissoff@mail.ru

Синхронные исследования качества воды реки Волги

А.А. Сазонов^{1,2,3}  , А.А. Лисина^{1,2,3} , О.Н. Ерина¹ , Н.Л. Фролова¹ ,
О.И. Ломаков³ , М.М. Платонов³ 

 sazonov.lesha@gmail.com

¹ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», Москва, Россия

²ФГБУН «Институт водных проблем Российской академии наук», Москва, Россия

³НФОЭР «Без рек как без рук»

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Волга – крупнейшая река Европы, площадь ее бассейна занимает почти треть Европейской территории России. В пределах Волжского бассейна расположено 38 субъектов Российской Федерации, в т. ч. 8 республик, 29 областей и город Москва, а также около 30 % сельскохозяйственных территорий. Все это не могло не отразиться на качестве воды в реке. В настоящее время много научных исследований посвящено анализу качества воды Волги в отдельно взятых регионах, однако работ, обобщающих экологическую ситуацию по всей длине реки, практически нет. В совместном исследовании, организованном некоммерческим фондом «Без рек как без рук», ПАО Сбербанк и МГУ имени М.В. Ломоносова в рамках акции «День Волги» (20 мая) в период 2021–2023 гг. производился одновременный отбор проб воды из реки в пределах территории крупнейших городов. **Методы.** В отобранных образцах воды в лабораторных условиях определяли содержание биогенных веществ и ионов тяжелых металлов. В 2022 и 2023 гг. была предпринята попытка оценить влияние городских агломераций на качество воды путем отбора проб выше и ниже по течению относительно городской черты. **Результаты.** На основе проведенных исследований качества воды получены актуальные данные по превышению ПДК ключевых для бассейна Волги загрязняющих веществ. Полученные результаты сопоставлены с ранее опубликованными исследованиями и между собой.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: р. Волга, качество воды, загрязняющие вещества, тяжелые металлы.

Для цитирования: 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. DOI:10.35567/19994508-2024-5-98-114.

Дата поступления 19.02.2024.

SYNCHRONOUS STUDIES OF THE VOLGA RIVER WATER QUALITY

Alexey A. Sazonov^{1,2,3} , Anastasia A. Lisina^{1,2,3} , Oksana N. Erina¹ ,
Natalia L. Frolova¹ , Oleg I. Lomakov³ , Maxim M. Platonov³ 

¹ M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

² Russian Academy of Sciences Institute of Water Problems, Moscow, Russia

³ «Without Rivers as Without Hands», Moscow, Russia

© Сазонов А.А., Лисина А.А., Ерина О.Н., Фролова Н.Л., Ломаков О.И., Платонов М.М., 2024

ABSTRACT

Relevance. The Volga is the largest river in Europe, and its basin covers almost one third of the European territory of Russia. Within the Volga basin there are 38 subjects of the Russian Federation, including 8 republics, 29 regions and the city of Moscow. About 30% of agricultural crops are also located within the Volga basin. All this could not but affect the quality of water in the river. At present, many scientific works are devoted to the water quality of the Volga River in separate regions, but there are practically no works summarizing the ecological situation along the entire length of the river. As part of a joint study organized by the non-profit foundation “Clean Hands, Clean Rivers!”, Sberbank PJSC and Lomonosov Moscow State University, as part of the “Volga Day” campaign, simultaneous water sampling was carried out in the largest cities located on the Volga between 2021 and 2023. This action is part of Sberbank’s ESG strategy, which has not only scientific and practical but also educational value. More than 30 thousand people participated in this eco-event in 2023. **Methods.** The content of nutrients and heavy metals was determined in the collected water samples under laboratory conditions. In 2022 and 2023, an attempt was made to assess the impact of cities on water quality by sampling upstream and downstream relative to the city limits. **Results.** Based on the conducted water quality studies, up-to-date data on exceedance of MPC of key pollutants for the Volga basin were obtained. The obtained results were compared with previously published studies and compared with each other.

Keywords: Volga River, water quality, pollutants, heavy metals, Sber.

For citation: 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. DOI:10.35567/19994508-2024-5-98-114.

Received 19.02.2024.

ВВЕДЕНИЕ

Среди крупнейших рек Европы Волга является одной из самых загрязненных в связи с высоким уровнем антропогенной нагрузки [1, 2]. В бассейне Волги расположены крупные промышленные центры, развито сельское хозяйство, причем практически на всем своем протяжении река является источником водоснабжения для населенных пунктов, в т. ч. для городов-миллионников – Нижний Новгород, Казань, Самара, Волгоград.

Качество воды в Волжском бассейне отличается большой неоднородностью, т. к. водосбор реки расположен в нескольких природных и климатических зонах. Помимо этого, в различных частях бассейна существенно различается и соотношение значимости факторов формирования качества воды. Химический состав воды формируется в зависимости от впадения крупных притоков, степени антропогенной нагрузки на ту или иную часть водосбора и ряда других локальных факторов [3].

В 2020 г. фонд «Без рек как без рук» провел экспедицию с целью оценки загрязнения вод Волги микропластиком и определения содержания основных гидрохимических показателей [4]. В 2021–2023 гг. было организовано масштабное исследование, направленное на оценку качества воды реки в пределах крупных населенных пунктов, расположенных на берегах Волги, по результатам комплексного химического анализа отобранных проб (рис. 1).



Рис. 1. Схема расположения створов отбора проб воды из р. Волги.
 Fig. 1. Map of sampling points located on the Volga River.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Волга – самая большая река Европы по площади бассейна, составляющей 1,361 млн км². На его территории расположено более 30 субъектов Российской Федерации, проживает около 40 % населения страны, сосредоточено около 45 % промышленного производства и около 50 % сельскохозяйственного. В результате этого река испытывает значительную антропогенную нагрузку [5].

Для получения данных для анализа качества воды в р. Волге 20 мая синхронно был произведен отбор проб в пределах территории 15 городов, расположенных на ее берегах, – от Твери до Астрахани. Сотрудниками-волонтерами с помощью портативных приборов определялись следующие показатели качества речной воды: температура, электропроводность, величина рН, содержание основных катионов. Далее пробы консервировали и отправляли в испытательный центр «МГУААБ» для определения концентрации следующих показателей:

- содержание биогенных веществ (соединения азота и фосфора), химическое потребление кислорода;
- содержание ионов тяжелых металлов (алюминий, железо, марганец, ванадий, медь, цинк, стронций, молибден и др.).

В 2021 г. отбор проб из реки осуществлялся в центре города-участника акции, в 2022 и 2023 гг. для выявления влияния урбанизированной территории на качество воды отбор проб производился в створах, расположенных по течению выше и ниже городов.

В настоящее время оценка качества воды опирается на нормативные акты, закрепленные законодательством. Тем не менее, разработанные для различных целей (питьевых, хозяйственно-бытовых, рыбохозяйственных) ПДК не могут в полной мере характеризовать реальное качество воды водного объекта [6, 7]. Для оценки качества воды в каждом городе был разработан интегральный показатель, основанный на превышении ПДК различными показателями.

По результатам исследований ниже по течению относительно расположения каждого города-участника акции рассчитаны суммарные показатели загрязненности воды в р. Волге, полученные как среднее арифметическое кратностей превышения содержания каждого компонента над предельно допустимыми концентрациями:

$$\frac{\sum C_i / \text{ПДК}_i}{n}, \quad (1)$$

где C_i – концентрация загрязняющего вещества i -ого компонента;

ПДК $_i$ – предельно допустимая концентрация i -ого компонента;

n – количество изучаемых показателей.

Подобный показатель является упрощенным аналогом ИЗВ (индекса загрязненности вод), закрепленного в нормативе «Санитарными правилами и нормами охраны поверхностных вод от загрязнения СанПиН 2.1.5.980-00».

Гидрометеорологические условия проведения экспедиционных исследований

Гидрометеорологические условия трех лет, в которые проводились исследования, значительно различались. Например, май 2022 г. был существенно холоднее мая предыдущего года, а в 2023 г. температура воздуха в мае была близка к среднегодовым значениям. Так, по данным метеостанции г. Твери температура воздуха в 2021 г. колебалась от +15 до +24 °С, в 2022 г. – от +8 до +12 °С, в 2023 г. – от +10 до +15 °С. Подобная ситуация наблюдалась для всего бассейна Волги. В Нижнем Новгороде средняя температура воздуха 20 мая колебалась в диапазоне +17–24 °С в 2021 г., +5–8 °С в 2022 г., +12–13 °С в 2023 г., в г. Волгограде – +17–22 °С в 2021 г., +10–14 °С в 2022 г. и +19–26 °С в 2023 г. В течение недели, предшествующей отбору проб, на всем протяжении реки не наблюдалось выпадения осадков, которые бы привели к заметному росту уровня воды в Волге.

Повышенной водностью весной отличался 2021 г. В апреле 2022 г. наблюдались более высокие температуры воздуха, чем в апреле 2021 г., в результате чего по данным поста в Нижнем Новгороде максимальный уровень воды весеннего половодья в 2022 г. отмечен 30 апреля (644 см), а в 2021 г. – 8 мая (785 см). День отбора проб, 20 мая, в 2021 г., попал на волну спада половодья, в 2022 г. – на дождевой паводок после спада половодья. При среднем для

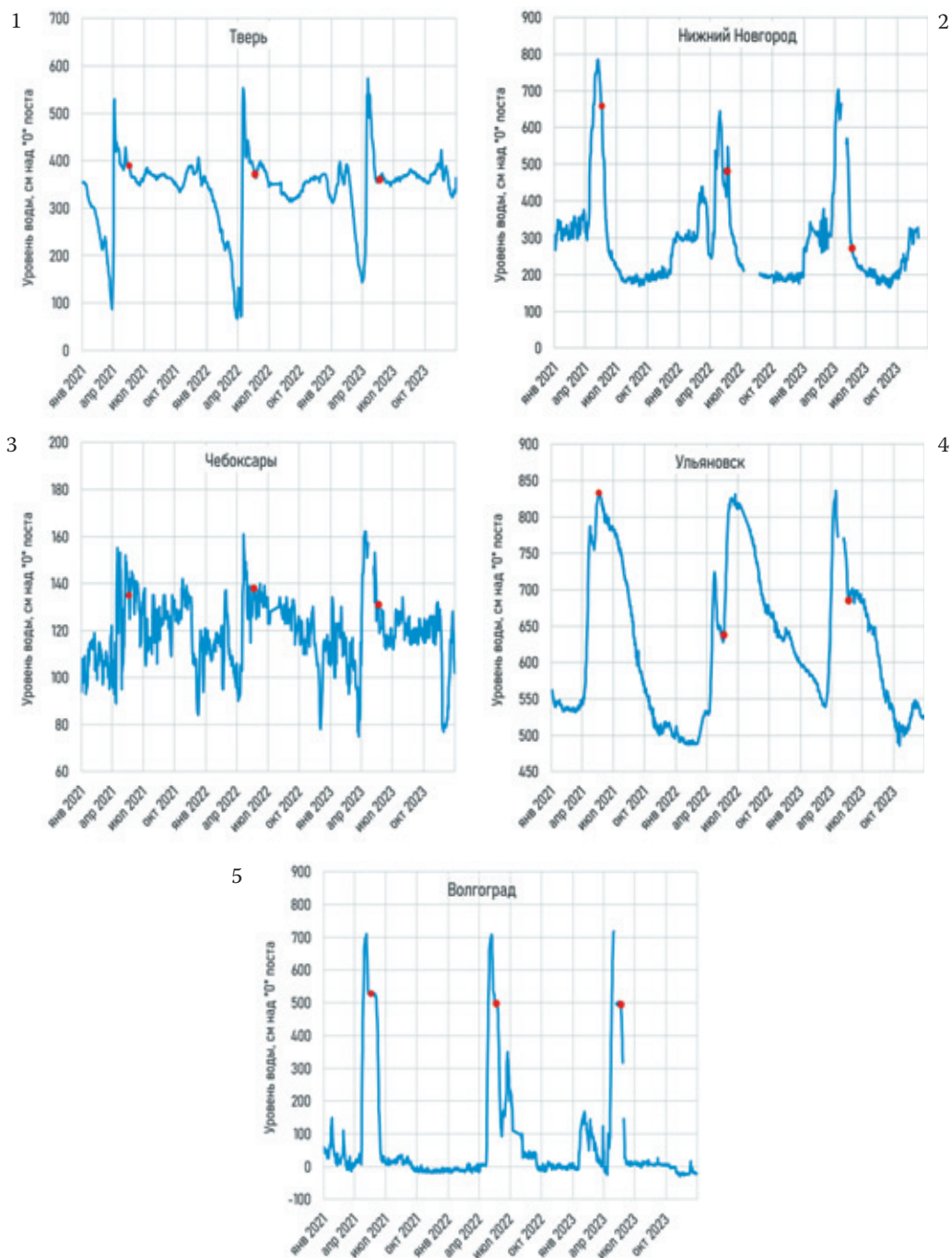


Рис. 2. Изменение уровня воды р. Волги в период с января 2021 г. по март 2023 гг. по данным постов в районах Твери (1), Нижнего Новгорода (2), Чебоксар (3), Ульяновска (4), Волгограда (5).

Fig. 2. Changes in the water level of the Volga River in the period from January 2021 to March 2023 According to the data of posts in the area of Tver (1), Nizhny Novgorod (2), Cheboksary (3), Ulyanovsk (4), Volgograd (5).

20 мая уровне воды в створе Нижнего Новгорода, составляющем 414 см, в 2022 г. уровень воды был равен 480 см, а в 2021 г. – 637 см. По данным поста в г. Астрахани подъем уровня воды в каждом году начался 24 апреля. При этом 20 мая уровень воды был ниже средних значений (532 см): 514 см – в 2021 г. и 498 см – в 2022 г.

В 2023 г. сложилась необычная ситуация. В день отбора проб, 20 мая, в Нижнем Новгороде уровень воды составлял 279 см, что существенно меньше среднего значения, в Астрахани наблюдалась аналогичная ситуация, уровень воды 474 см. В последующий летний период в Волгу поступило воды только 80 % от среднемноголетнего значения¹, по информации Каспийского морского научно-исследовательского центра, дефицит воды составил 45 км³ [8]. Это привело к обмелению реки в ряде регионов: на месте отмелей появились острова, возникли проблемы с судоходством и водозабором воды для питьевых нужд. Данная ситуация обусловлена происходящими климатическими изменениями, которые выражаются в уменьшении количества осадков, сдвиге сроков начала половодья. Кроме того, масштаб маловодья усиливается с ростом объемов воды, необходимых для развития сельского хозяйства. Значительное влияние оказывает также и регулирование реки каскадом ГЭС с учетом того, что все регионы предоставляют свои требования по необходимым объемам воды.

Таким образом, гидрометеорологические условия могли оказывать значительное влияние на продольное распределение параметров качества воды в рассматриваемый период. Различия в водности определяют возможности реки по разбавлению сточных вод, а метеорологические особенности – условия самоочищения, с одной стороны, и интенсивность роста фитопланктона, с другой.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Гидролого-гидрохимические показатели

Согласно величине рН, вода в Волге характеризуется слабощелочной средой. В 2021 г. результаты измерений показали, что на территории всех городов значения рН воды в реке, в целом, находились в допустимых пределах – от 6 до 9 при среднем значении около 8, что является нормой для природных вод. Максимальные значения, до 8,8, получены для Волги на территориях Костромы и Волгограда, что может быть свидетельством начинающегося «цветения» воды на этих участках реки.

В 2022 г. значения рН воды в Волге на изучаемом участке находились в пределах нормы. В районе Ульяновска и Тольятти отмечался рост показателя, при этом в створе Тольятти измеренное значение величины рН составило 9,05. Подобный пик, вероятнее всего, объясняется тем, что проба воды была отобрана в нижнем течении Куйбышевского водохранилища, где из-за меньшей проточности активнее идет процесс фотосинтеза. В 2023 г. измеренные значения рН также находились в пределах санитарно-гигиенических норм, среднее

¹ Вопрос маловодья на Волге прозвучал на прямой линии с Президентом России [Электр. ресурс] // URL: <http://www.caspianmonitoring.ru/2023/12/15/vopros-malovodya-na-volge-prozvuchal-na-pryamoi-linii-s-prezidentom-rossii/> (дата обращения: 08.02.24).

значение составило 8,5. Наибольшее значение величины рН зафиксировано в створе Казани – 9,2. Анализируя распределение рН по всему течению Волги, можно отметить, что повышенные значения отмечаются в верхнем течении (до г. Чебоксары), что является нормальным явлением для крупных рек.

Электропроводность. Измерение электропроводности позволяет косвенно оценить содержание в воде растворенных веществ. Невозможность однозначного пересчета электропроводности в минерализацию связана с тем, что электропроводность зависит от температуры и ионного состава. Во время измерений наблюдалось увеличение величины электропроводности по мере продвижения от верховья Волги к ее устью от 200–250 мкСм/см до 550 мкСм/см и выше. Это связано с региональными особенностями различных областей бассейна. В более засушливых южных регионах снижается доля дождевых осадков в питании реки, возрастает роль поступающих в русло более минерализованных подземных вод. При этом меняется соотношение между ионами: отмечается увеличение доли Na^+ среди основных катионов и снижение доли Mg^{2+} . Минерализация всех проб не превышает 1000 мг/л – порогового значения для питьевой воды.

Биогенные и органические вещества

Химическое потребление кислорода (ХПК). Химическое потребление кислорода является интегральным показателем содержания в воде всего спектра органических веществ. Данный показатель широко применяется при контроле качества воды и характеризует количество кислорода, необходимого для окисления содержащихся в пробе органических веществ. Величина ХПК не нормируется, однако используются рекомендуемые максимальные значения, составляющие 15 мгО/л для питьевого водопользования и 30 мгО/л для рекреационного. Анализы проб воды за три года исследования показывают высокие фоновые величины ХПК для вод р. Волги, особенно для ее верхнего течения. Так, на участке г. Тверь – г. Чебоксары наблюдается превышение отметки 30 мгО/л. Наибольшее значение в верхнем течении зафиксировано в 2023 г. выше г. Дубна – 42,5 мг/л, что почти в три раза превышает гигиенические нормы. Кроме того, существенное превышение допустимых значений наблюдалось ниже по течению г. Нижний Новгород, где величина ХПК достигала 38,5 мг/л. В целом, высокие значения ХПК в верховьях бассейна реки – естественный природный фон, они связаны со значительной заболоченностью этой части водосбора. Однако повышенные значения в пробах, отобранных ниже городов, относительно отобранных выше по течению проб могут свидетельствовать и о воздействии выпусков коммунальных и ливневых сточных вод.

В районе г. Ульяновска наблюдается снижение значения ХПК, что, в первую очередь, связано с впадением р. Камы и наличием Куйбышевского водохранилища выше по течению, удерживающего автохтонное и аллохтонное органическое вещество. Тем не менее, в районе города ХПК не соответствует нормативам. Однако результаты исследования [8] свидетельствуют о том, что с 2016 г. подобное превышение фиксируется ежегодно. Ниже по течению в 2021–2022 гг. значение ХПК не превышало 30 мгО/л, однако в 2023 г. значительное превы-

шение зафиксировано по течению выше г. Тольятти и ниже Самары. Для этих участков значения величин ХПК составили 41 мг/л и 36 мг/л соответственно. В 2021 г. ХПК, не превышающий рекомендаций для питьевого водопользования (15 мгО/л), определен исключительно в створе г. Астрахани, в 2022 г. таких створов было три – Самара, Саратов и Волгоград. В 2023 г. вода соответствовала установленным нормативам по величине ХПК лишь в Саратове, в остальных 15 городах отмечались превышения ПДК.

Соединения азота и фосфора. Азот и фосфор – главные биогенные элементы, содержащиеся в водах суши. Повышенное содержание минеральных форм этих элементов может свидетельствовать об антропогенном загрязнении. Неорганический азот содержится в речных водах, главным образом, в нитратной, нитритной и аммонийной формах, а минеральный фосфор – в форме ортофосфатов. Их концентрации также зависят от времени года и снижаются в летний период, когда процесс потребления биогенных элементов фитопланктоном и их перехода в органическую форму наиболее активен.

Аммонийный азот (NH_4^+) – одна из минеральных форм азота, повышение концентрации которой свидетельствует о недавнем поступлении в воду загрязняющих веществ. Рыбохозяйственный ПДК для аммонийного азота составляет 0,39 мгN/л, а санитарно-гигиенический – 1,55 мгN/л. За два года измерений относительно повышенные концентрации аммонийного азота зафиксированы в верхнем течении, однако они не превышают рыбохозяйственного ПДК. Так, например, в створе г. Дубна за три года наблюдений содержание иона аммония составило 0,10 мгN/л, причем в 2022 г. выше по течению от города – 0,12 мгN/л, а ниже по течению – 0,08 мгN/л. В 2021 и в 2023 годах на всем протяжении течения Волги не было отмечено превышения рыбохозяйственных нормативов концентрации аммонийного азота, в 2022 г. незначительное превышение зафиксировано в г. Ульяновске (0,40 мгN/л).

Нитриты (NO_2^-) – также одна из минеральных форм азота, которая является промежуточной и повышение концентрации которой свидетельствует о загрязнении воды либо формирующихся восстановительных (анаэробных) условиях в водном объекте. Рыбохозяйственный ПДК для нитритного азота составляет 0,02 мгN/л, для санитарно-гигиенического водопользования – 1,00 мгN/л. В 2021 г. содержание нитритного азота во всех точках отбора не превышало рыбохозяйственных нормативов, в 2022 г. превышение было выявлено в створах городов Дубна, Нижний Новгород, Чебоксары, где концентрации нитритного азота составили 0,033 мгN/л (1,65 ПДК), 0,049 мгN/л (2,45 ПДК) и 0,025 мгN/л (1,25 ПДК) соответственно. Наименьшее значение концентрации нитритного азота зафиксировано в створе у г. Ярославля (0,002 мгN/л). В 2023 г. в воде Волги во всех рассматриваемых городах было обнаружено превышение рыбохозяйственного ПДК, однако нарушение санитарно-гигиенического норматива не зафиксировано. Наибольшее значение установлено в створе ниже по течению у г. Тверь (0,49 мгN/л).

Нитраты (NO_3^-) – конечный продукт распада азотсодержащих органических веществ и окисления аммонийных форм азота, поступающих со сточ-

ными водами. В повышенных концентрациях нитраты приводят к ускорению процесса эвтрофикации водного объекта и активно потребляются фитопланктоном в вегетационный период. Санитарно-гигиенический ПДК для нитратного азота составляет 10,2 мгN/л, а рыбохозяйственный ПДК – 9,1 мгN/л. За три года наблюдений в створах городов, расположенных на Волге, не было зафиксировано превышения рыбохозяйственного норматива для нитратного азота. Так, в 2021 г. максимальное значение обнаружено в створе у г. Ульяновска – 6,5 мгN/л. В 2022 г. максимальная концентрация нитратного азота оказалась еще ниже в створе Нижнего Новгорода – 1,170 мгN/л. В 2023 г. наибольшая концентрация отмечена в водах реки на территории Самары – 4,61 мгN/л. В целом можно отметить тенденцию к увеличению показателя по мере продвижения вниз по течению, что свидетельствует об аккумуляции городского азотного загрязнения, поступающего с коммунальными сточными водами в Волгу. Наибольший рост концентрации отмечен на участке Тверь – Кострома. Локальные повышения в створах Казани и Тольятти связаны с локальными источниками загрязнения, которые в перспективе могут ассимилироваться водной экосистемой.

Фосфат-ионы (PO_4^{3-}) – показатель, являющийся, наряду с азотом, ключевым биогенным элементом, высокое содержание которого приводит к избыточному развитию синезеленых водорослей и антропогенной эвтрофикации. Концентрации фосфатов растут при попадании в водный объект сточных вод, содержащих фосфорсодержащие минеральные удобрения, моющие средства, а также при смыве с сельскохозяйственных территорий. Фосфаты токсичны для рыб, в особенности, в сочетании с нитратами, присутствующими в речной воде. Содержание фосфат-ионов не нормируется, для гигиенического и рыбохозяйственного водопользования норматив для фосфора фосфатов зависит от трофического статуса водного объекта и для эвтрофных водоемов составляет 0,2 мгP/л. В 2021–2023 гг. в пределах территорий всех городов, где проводился отбор проб, не было зафиксировано превышения рыбохозяйственного ПДК. В 2022 г. превышение по содержанию фосфора фосфатов в волжской воде зафиксировано в Нижнем Новгороде, оно составило 1,1 ПДК или 0,22 мгP/л.

Основные катионы и ионы металлов

Вопросам аккумуляции и пространственного распределения соединений тяжелых металлов в воде р. Волги посвящено множество работ [9–12]. В естественных условиях ионы тяжелых металлов попадают в водные объекты в результате водной эрозии почв и геологических пород, с атмосферными осадками. Но в настоящее время сточные воды промышленных и сельскохозяйственных предприятий становятся основным источником поступления металлов с антропогенно нарушенных территорий. Определяющим фактором концентрации соединений металлов в воде фактором является речной сток или фаза водного режима, во время которой производился отбор [12, 13].

В отобранных пробах воды определены концентрации более 70 растворенных химических элементов – главных катионов (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+), а также

ионов металлов, (алюминий, железо, марганец, ванадий, медь, цинк, стронций, молибден и др.). Полученные результаты исследований 2021–2023 гг. согласуются с опубликованными данными за предыдущие годы. Так, в статье коллектива авторов под руководством Р.Г. Джамалова [14] отмечается превышение концентрации общего железа и марганца (2+) относительно рыбохозяйственных нормативов. Необходимо отметить, что превышения ПДК по содержанию железа наблюдаются в верхнем течении Волги и до г. Казани. Для водосбора верхнего течения Волги характерна высокая заболоченность, вследствие которой в речную воду в комплексе с гуминовыми кислотами поступает большое количество ионов железа. Ниже Ульяновска концентрации соединений железа снижаются, однако в Астрахани зафиксирован резкий рост, что связано с наличием источников антропогенного загрязнения. По сравнению с опубликованными ранее данными [15], полученные в рамках проведенного исследования результаты свидетельствуют об ухудшении экологической обстановки. Однако сравнение концентраций растворенного железа в пробах 2021–2023 гг. свидетельствует о том, что в настоящее время ситуация стабильная. Концентрация соединений железа в воде превышает санитарно-гигиенические нормативы ПДК в 1,5 раза, в целом превышение ПДК по железу в створах на территории отдельных городов – до 4 раз.

Анализируя пространственное содержание марганца по течению р. Волги, можно отметить, что измеренные концентрации также сопоставимы с результатами, полученными в предыдущие годы. Превышения рыбохозяйственного ПДК были зафиксированы в городах Чебоксары, Кострома и Тверь, что, как и в случае с железом, обусловлено повышенным выносом марганца с заболоченной части водосбора Верхней Волги.

Влияние урбанизированной территории на качество воды

В последнее время все большее внимание уделяется вопросам влияния урбанизированных территорий на качество воды р. Волги [16–19]. Особенностью измерений 2022–2023 гг., как было отмечено ранее, стала попытка оценить это влияние. Для интегральной оценки вклада каждого города рассчитано превышение концентраций ниже города над концентрациями выше по течению для биогенных веществ, соединений тяжелых металлов и величины электропроводности. Далее для 15 створов по течению Волги определено среднее значение превышений над нормативами по всем загрязняющим веществам.

Максимальные превышения получены для створа в г. Самаре, в среднем изменения гидрохимических показателей под воздействием городской агломерации оцениваются в 3,59 раза. Подобное высокое значение может быть объяснено увеличением концентрации марганца в 29 раз в черте города. Однако подобный рост не несет потенциальной опасности для качества волжской воды, т. к. вызван крайне низкими концентрациями марганца в пробе, отобранной в створе выше г. Самары. При этом содержание марганца в пробе воды ниже города составляет лишь 12 % от предельно допустимого.

Таблица. Основные гидрохимические показатели пробы воды р. Волги в сравнении выше и ниже по течению крупных городов (2022 г.)
 Table. The main hydro/chemical indicators of the water samples from the Volga River in comparison with that upstream and downstream of major cities (2022)

Город	Тверь	Дубна	Ярославль	Кострома	Кинешма	Нижний Новгород	Козьмодемьянск	Чебоксары	Казань	Ульяновск	Тольятти	Самара	Саратов	Волгоград	Астрахань
Выше по течению	13,9	13,7	11,8	12,5	14,1	9,4	13,6	11,2	11,8	12,8	15,2	12,0	11,4	14,0	17,4
Ниже по течению	15,2	14,6	11,2	12,5	11,0	12,6	12,6	12,5	13,4	13,1	14,4	12,8	10,6	11,0	13,0
pH															
Выше по течению	8,2	7,9	8,1	8,8	7,9	7,6	7,5	8,1	7,8	6,3	4,4	6,8	8,0	8,8	8,3
Ниже по течению	8,3	7,4	8,0	8,7	8,1	7,6	7,5	8,4	8,6	7,6	4,5	6,8	8,1	7,6	8,2
Электропроводность, мкСм/см															
Выше по течению	246	238	253	281	265	208	207	156	282	573	1093	493	534	686	539
Ниже по течению	284	222	267	246	250	344	250	302	326	465	137	50	551	762	567
Нитраты, мгN/л															
Выше по течению	0,40	0,75	0,87	0,94	0,56	0,70	<0,35	0,76	0,73	6,13	0,99	1,13	0,97	<0,35	
Ниже по течению	0,62	0,68	0,38	0,43	0,70	0,56	0,36	0,76	0,45	6,86	0,89	1,18	0,94	1,09	
Нитриты, мгN/л															
Выше по течению	<0,03	<0,03	<0,03	0,03	<0,03	0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03
Ниже по течению	0,08	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03
Ионы аммония, мгN/л															
Выше по течению	<0,04	0,06	0,08	0,05	0,06	0,07	0,06	0,05	0,06	0,16	0,08	0,07	0,04	0,21	
Ниже по течению	<0,04	0,12	0,05	0,06	0,09	0,14	0,04	<0,04	0,25	0,40	0,05	0,09	0,04	0,09	
Фосфаты, мгP/л															
Выше по течению	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	0,06	0,09	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03
Ниже по течению	0,06	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	0,07	<0,03	0,06	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03

Таблица. Продолжение

Города	Тверь	Дубна	Ярославль	Кострома	Кинешма	Нижний Новгород	Козьмодемьянск	Чебоксары	Казань	Ульяновск	Тольятти	Самара	Саратов	Волгоград	Астрахань
Железо, мг/л															
Выше по течению	0,924	0,339	0,303	0,45	0,801	0,339	0,909	1,209	0,18	0,066	0,165	0,075	0,318	0,057	0,408
Ниже по течению	0,162	0,21	0,201	0,543	0,468	0,279	0,063	0,369	0,264	0,408	0,369	0,048	0,591	0,345	0,051
Марганец, мг/л															
Выше по течению	0,111	0,068	0,043	0,133	0,072	0,089	0,148	0,141	0,037	0,017	0,058	0	0,065	0,02	0,044
Ниже по течению	0,052	0,029	0,058	0,077	0,086	0,066	0,02	0,088	0,03	0,08	0,032	0,012	0,15	0,034	0,024
Бром, мг/л															
Выше по течению	<ПО	0,028	<ПО	0,026	0,026	<ПО	<ПО	<ПО	0,074	0,126	0,102	<ПО	<ПО	0,15	<ПО
Ниже по течению	0,112	0,048	0,07	<ПО	0,026	<ПО	0,102	<ПО	<ПО	<ПО	0,096	0,092	0,022	0,104	0,09
Алюминий, мг/л															
Выше по течению	0,105	0,235	0,1	0,175	0,27	0,11	0,305	0,085	0,08	0,02	0,065	0,01	0,085	0,02	0,135
Ниже по течению	0,08	0,08	0,075	0,255	0,165	0,095	0,025	0,125	0,065	0,15	0,175	0,015	0,185	0,175	0,02
Магний, мг/л															
Выше по течению	6	8	8	9	8,5	8	5,5	6	10,5	11,5	11,5	8	5,5	17,5	8
Ниже по течению	12	12,5	10,5	8	8	8,5	13	7,5	7	6,5	13	12	7,5	14	12
Литий, мг/л															
Выше по течению	0,003	0,0042	0,0015	0,0036	0,0042	0,0018	0,0012	0,003	0,0048	0,0048	0,0051	0,0015	0,0009	0,009	0,0018
Ниже по течению	0,0057	0,0099	0,0048	0,0018	0,0042	0,0015	0,0066	0,0015	0,0012	0,0018	0,006	0,0054	0,0033	0,0063	0,0054
Бериллий, мкг/л															
Выше по течению	0,02	0,02	0,018	0,02	0,038	0,024	0,044	0,02	<ПО	<ПО	<ПО	<ПО	0,018	<ПО	0,018
Ниже по течению	<ПО	0,014	<ПО	0,022	0,018	0,01	<ПО	0,02	0,01	0,026	0,02	<ПО	0,02	0,02	<ПО

Среднее увеличение концентраций химических компонентов ниже г. Ульяновска составляет 2,48 раз. Содержание железа общего в черте города увеличивается в 6 раз, алюминия (3+) – в 8 раз, марганца (2+) – в 5 раз. При этом концентрации ионов лития и магния снижаются в два и более раза в пробе воды, отобранной ниже города. В Волгограде среднее превышение концентрации загрязняющих веществ в пробах, отобранных ниже города над их концентрациями проб выше города, составляет 2,3 раза. Содержание железа общего в волжской воде в черте Волгограда возрастает в 6,5 раза, содержание алюминия – в 9,5 раза, содержание нитратов увеличено в 3 раза, при этом концентрация ионов аммония, характеризующих свежее загрязнение воды сточными водами, снижается от 0,21 мг/л до 0,09 мг/л.

Среднее превышение концентраций загрязнений в створе г. Саратова составляет 1,6 раза. Содержание биогенных веществ сохраняется в реке ниже города на том же уровне, что и выше по течению, в четыре раза возрастает концентрация ионов лития, в два – марганца, железа и алюминия. В Козьмодемьянске среднее превышение концентраций загрязнений в 1,49 раза достигается, главным образом, за счет ионов лития, содержание которого увеличено в 6 раз. Содержание магния (2+) возрастает в 2,3 раза, при этом в черте города в воде Волги снижаются концентрации ионов аммония, марганца, железа, алюминия. В Твери среднее превышение рыбохозяйственных нормативов составляет 1,31 раза. В черте города в речной воде примерно в два раза возрастают концентрации фосфатов, нитритов, магния и лития, при этом содержание ионов железа, марганца и алюминия снижается. В створах отбора проб в Ярославле, Нижнем Новгороде, Дубне, Тольятти, Астрахани, Казани и Чебоксарах среднее превышение концентраций загрязняющих веществ относительно рыбохозяйственных нормативов незначительно и составляет примерно 1,15.

Результаты измерений гидрохимических показателей и температуры воды в исследуемых створах представлены в таблице (см. выше).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные синхронные исследования в 15 городах по течению Волги позволили получить единовременный «снимок» состояния качества воды в реке на протяжении трех лет, различающихся по гидрометеорологическим условиям, водности реки, а также оценить влияние расположенных на берегах городов в формировании химического состава вод Волги. Установлено, что большинство городов в настоящее время не оказывают столь значительного уровня воздействия, которое не могло бы ассимилироваться экосистемой реки. При этом значительную роль в самоочищении вод от городского загрязнения играют водохранилища, расположение которых выше города приводит к удержанию и последовательному снижению содержания органических и биогенных веществ.

Предложенный интегральный показатель воздействия города на экологическое состояние Волги позволил выявить, что локальное увеличение содержания химических веществ в воде может достигать в среднем 3,5 раза. Однако

следует отметить, что в продольном разрезе не обнаруживается однонаправленного роста либо роста, связанного с численностью городского населения в том или ином населенном пункте. В большинстве случаев максимальный рост характерен для исследованных металлов и может быть обусловлен геохимическими особенностями территории, характерными для той или иной природной зоны, через которую протекает Волга, формируя свой сток.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кривичев А.И., Сидоренко В.Н. Актуальные проблемы Волжского бассейна и современные подходы к их решению // Вестник Евразийской науки. 2019. № 6. С. 1–9.
2. Демин А.П. Сброс сточных вод и загрязнение водных объектов в бассейне реки Волга (1990–2018 гг.) // Экология. Экономика. Информатика. Сер. Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. 2020. Т. 1. № 5. С. 138–143. DOI 10.23885/2500-395X-2020-1-5-138-143.
3. Селезнев В.А. Методика оценки и анализа антропогенной нагрузки на реки от точечных источников загрязнения // Известия Самарского научного центра РАН. 2021. № 5. С. 135–143.
4. Lisina A.A., Platonov M.M., Lomakov O.I., Sazonov A.A., Shishova T.V., Berkovich A.K., Frolova N.L. Microplastic abundance in Volga river: Results of a pilot study in summer 2020 // Geography, Environment, Sustainability. 2021. No. № 14 (3). P. 82–93.
5. Гурьев В.А., Ахмадиев Г.М. Научные основы и принципы сохранения и предотвращения загрязнения реки Волги // Бюллетень науки и практики. 2018. Т. 4. № 1. С. 132–136. DOI 10.5281/zenodo.1147039.
6. Локтионова Е.Г., Яковлева А.В. Применение санитарных показателей для оценки качества вод урбанизированных территорий дельты Волги // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 4. С. 281.
7. Kuzovlev V., Vyacheslav V., Irina L. Grigoryeva, Ekaterina A. Chekmareva, and Martin Schletterer. 2024. «Water Quality Monitoring in the Volga Headwaters». Water 16, No. 3: 491. DOI:10.3390/w16030491.
8. Чаукова Е.В., Гусарова В.С. Качество воды в р. Волга в г. Ульяновске // Актуальные проблемы техносферной безопасности: сб. научных трудов. Ульяновск: Ульяновский государственный технический университет, 2020. С. 14–17.
9. Бреховских В.Ф., Волкова З.В., Катунин Д.Н., Казмирук В.Д., Казмирук Т.Н., Островская Е.В. Тяжелые металлы в донных отложениях Верхней и Нижней Волги // Водные ресурсы. 2002. Т. 29. № 5. С. 587–595.
10. Островская Е.В., Бреховских В.Ф., Волкова З.В., Монахов С.К., Курапов А.А., Кочарян А.Г. Тяжелые металлы в системе «Дельта Волги – Северный Каспий» // Юг России: экология, развитие. 2008. № 4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tyazhelye-metally-v-sisteme-delta-volgi-severnyu-kaspiy> (дата обращения: 19.03.2023).
11. Курьякова А.Н. Баланс тяжелых металлов в дельте Волги // Доклады Академии наук. 2011. Т. 439. № 6. С. 818–821.
12. Татарников В.О., Гаврилова Е.В. Многолетняя динамика и прогноз стока тяжелых металлов на Нижней Волге в связи с реализацией государственной программы «Оздоровление Волги» // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. География, Геоэкология. 2019. № 1. С. 85–91.
13. Тютюма Н.В., Кудряшов А.В., Баканева А.А., Хюпинина Е.В. Влияние весеннего половодья р. Волги на миграцию тяжелых металлов в почвах Волго-Ахтубинской поймы // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2018. № 4(52). С. 140–145.
14. Джамалов Р.Г., Сафронова Т.И., Трофимчук М.М., Решетняк О.С., Мягкова К.Г., Власов К.Г. Среднепогодные особенности формирования химического состава и качество вод бассейна Волги // Научные проблемы оздоровления российских рек и пути их решения: сб. научных трудов. Нижний Новгород: Студия Ф1, 2019. С. 68–74.

15. Тырков А.Г., Великородов А.В., Серебряков О.И., Носачев С.Б. Экологическая оценка содержания нефтепродуктов, фенолов и тяжелых металлов в воде и почве Прикаспия // Геология, география и глобальная энергия. 2018. № 1(68). С. 28–34.
16. Полянин В.О., Фашевская Т.Б., Кирпичникова Н.В., Курбатова И.Е., Розенталь О.М., Беляев С.Д., Елизарьев А.Н. Концепция снижения диффузного загрязнения реки Волги. М.: Студия ФЛ. 2020. 120 с.
17. Демин А.П. Сточные воды и качество воды в бассейне реки Волга (2000–2015 гг.) // Ученые записки Российского гидрометеорологического университета. 2017. № 48. С. 55–71.
18. Завальцева О.А. К проблеме оценки экологического состояния и безопасности системы р. Волги в условиях урбанизации // Экология. Риск. Безопасность: материалы Всерос. научно-практ. конф. Курган: Курганский государственный университет, 2020. С. 66–68.
19. Черногаева Г.М., Журавлева Л.Р., Малеванов Ю.А. Интегральная оценка качества воды в бассейне Волги по данным мониторинга в XXI в. // Известия Российской академии наук. Сер. географическая. 2023. № 87(6). С. 875–884.

REFERENCES

1. Krivichev A.I., Sidorenko V.N. Actual problems of the Volga basin and modern approaches to their solution. *Bulletin of Eurasian Science*. 2019. No. 6. P. 1–9 (In Russ.).
2. Demin A.P. Wastewater discharge and pollution of water bodies in the Volga River basin (1990–2018). A. P. Demin. Ecology. Economics. Informatics. Series: System analysis and modeling of economic and ecological systems. 2020. Vol. 1. No. 5. P. 138–143. DOI 10.23885/2500-395X-2020-1-5-138-143 (In Russ.).
3. Seleznev V.A. Methodology of assessment and analysis of anthropogenic load on the rivers from point sources of pollution. *Newsletter of RAS Samara Scientific center*. 2021. No. 5. P. 135–143 (In Russ.).
4. Lisina A. A., Platonov M. M., Lomakov O. M., Lomakov O. I., Sazonov A. A., Shishova T. V., Berkovich A. K., Frolova N. L. Microplastic abundance in Volga river: Results of a pilot study in summer 2020. *Geography, Environment, Sustainability*. No.14 (3). 2021. P. 82–93.
5. Guriev V. A., Akhmadiev G. M. Scientific bases and principles of conservation and prevention of pollution of the Volga River // Bulletin of science and practice. M. Scientific bases and principles of conservation and prevention of pollution of the Volga River. *Bulletin of Science and Practice*. 2018. Vol. 4, No. 1. P. 132–136. DOI 10.5281/zenodo.1147039 (In Russ.).
6. Loktionova E. G. G., Yakovleva L. V. Application of sanitary indicators to assess the water quality of urbanized areas of the Volga Delta. *Modern problems of science and education*. 2012. № 4. P. 281 (In Russ.).
7. Kuzovlev V., Vyacheslav V., Irina L. Grigoryeva, Ekaterina A. Chekmareva, and Martin Schletterer. 2024. “Water Quality Monitoring in the Volga Headwaters”. *Water* 16, №3: 491. <https://doi.org/10.3390/w16030491>
8. Chaukova E.V., Gusarova V.S. Water quality in the Volga River in Ulyanovsk. Actual problems of technosphere safety: II International scientific-practical conference of students, graduate students, young scientists, and teachers: Collection of scientific papers. Ulyanovsk. May 20, 2020. Edited by E.N. Erofeeva, Ulyanovsk. Erofeeva, Ulyanovsk: Ulyanovsk State Technical University. 2020. P. 14–17 (In Russ.).
9. Brekhovskikh V.F., Volkova Z.V., Katunin D.N., Kazmiruk V.D., Kazmiruk T.N., Ostrovskaya E.V., Heavy metals in bottom sediments of the Upper and Lower Volga. *Water Resources*. 2002. Vol. 29. No5. P. 587–595 (In Russ.).
10. Ostrovskaya E. V. V., Brekhovskikh V. F., Volkova Z. V., Monakhov S. S. K., A. A. Kurapov, A. A. Kocharyan. G. Heavy metals in the system “Volga Delta Northern Caspian”. *South of Russia: Ecology, Development*. 2008. No. 4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tyazhelye-metally-v-sisteme-delta-volgi-severnny-kaspiy> (date of reference: 19.03.2023) (In Russ.).
11. Kuryakova A.N. Balance of heavy metals in the Volga Delta. *Reports of the Academy of Sciences*. 2011. Vol. 439. No. 6. P. 818–821 (In Russ.).
12. Tatarnikov V.O., Gavrilova E. V. Multiyear dynamics and forecast of heavy metal runoff in the Lower Volga River in connection with the implementation of the state program “Revitalization of the Volga”. *Newsletter of Voronezh State University*. Series: Geography, Geo/ecology. 2019. № 1. P. 85–91 (In Russ.).

13. Tyutyuma N.V., Kudryashov A.V., Bakaneva A.A., Hyupinina E.V. Influence of spring flooding of the Volga River on the migration of heavy metals in the soils of the Volga-Akhtuba floodplain. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agro-university complex: Science and Higher Professional Education*. 2018. No. 4(52). P. 140–145 (In Russ.).
14. Jamalov R.G., Safronova T.I., Trofimchuk M.M., Reshetnyak O.S., Myagkova K.G., Vlasov K.G. Mid-year peculiarities of the formation of chemical composition and water quality of the Volga basin. *Scientific problems of improvement of Russian rivers and ways to solve them: Collection of scientific papers*, Nizhny Novgorod, September 08-14, 2019. Nizhny Novgorod: Studio F1, 2019. P. 68–74 (In Russ.).
15. Tyrkov A.G., Velikorodov A.V., Serebryakov O.I., Nosachev S.B. Ecological assessment of the content of oil products, phenols and heavy metals in water and soil of the Caspian Sea. *Geology, Geography and Global Energy*. 2018. №1(68). P. 28–34 (In Russ.).
16. Polyanin V.O., Faschevskaya T.B., Kirpichnikova N.V., Kurbatova I.E., Rosenthal O.M., Belyaev S.D., Elizariyev A.N. Concept of reducing diffuse pollution of the Volga River. Moscow: Studio F1 Ltd. 2020. 120 p. (In Russ.).
17. Demin A.P. Wastewater and water quality in the Volga River basin (2000-2015). Academic notes of the Russian State Hydro/meteorological University. *Scientific and theoretical journal*. 2017. No. 48. P. 55–71 (In Russ.).
18. Zavaltseva O. A. To the problem of assessing the ecological state and safety of the R. Volga system in the conditions of urbanization. Ecology. Volga in the conditions of urbanization. *Ecology. Risk. Safety: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference*, Kurgan, October 29-30, 2020. – Kurgan: Kurgan State University, 2020. P. 66–68 (In Russ.).
19. Chernogaeva G.M., Zhuravleva L.R., Malevanov Yu.A. Integral assessment of water quality in the Volga basin according to the monitoring data in the XXI century. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Series geographical*. 2023. № 87(6). P. 875–884 (In Russ.).

Сведения об авторах:

Сазонов Алексей Александрович, канд. геогр. наук, старший преподаватель кафедры гидрологии суши географического факультета, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», 119991, Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1; ORCID 0000-0002-9562-4371; e-mail: sazonov.lesha@gmail.com

Лисина Анастасия Андреевна, инженер, кафедра гидрологии суши географического факультета, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», 119991, Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1; ORCID 0000-0002-8977-7654; e-mail: lisanastya99@mail.ru

Ерина Оксана Николаевна, канд. географ. наук, заведующая лабораторией гидрологии рек и водных ресурсов географического факультета, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», 119991, Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1; ORCID 0000-0001-8579-3852; e-mail: tamiblack@yandex.ru

Фролова Наталья Леонидовна, д-р геогр. наук, профессор, зав. кафедрой гидрологии суши географического факультета, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», 119991, Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1; ORCID 0000-0003-3576-285X; e-mail: frolova_nl@mail.ru

Ломаков Олег Игоревич, генеральный директор, Некоммерческий фонд «Без рек как без рук», Россия, 119049, Москва, Крымский вал, д 3 стр.2; ORCID 0009-0003-1164-862X; e-mail: lomakov@ecoinstrument.ru

Платонов Максим Михайлович, канд. хим. наук, директор по науке, Некоммерческий фонд «Без рек как без рук», Россия, 119049, Москва, Крымский вал, д 3 стр.2; ORCID 0009-0005-1853-8057; e-mail: platonov@ecoinstrument.pro

About the authors:

Alexey A. Sazonov, Candidate of Geographical Sciences, Senior Lecturer, Department of Terrestrial Hydrology, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1, Moscow, 119991, Russia; ORCID 0000-0002-9562-4371; e-mail: sazonov.lesha@gmail.com

Anastasia A. Lisina, Engineer, Department of Terrestrial Hydrology, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1, Moscow, 119991, Russia; ORCID 0000-0002-8977-7654; e-mail: lisanastya99@mail.ru.

Oksana N. Erina, Candidate of Geographical Sciences, Head of the Laboratory of River Hydrology and Water Resources, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1, Moscow, 119991, Russia; ORCID 0000-0001-8579-3852; e-mail: tamiblack@yandex.ru

Natalia L. Frolova, Doctor of Geographical Sciences, Professor, Head of the Department of Terrestrial Hydrology, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1, Moscow, 119991, Russia; ORCID 0000-0003-3576-285X; e-mail: frolova_nl@mail.ru.

Oleg I. Lomakov, General Director, «Without Rivers as Without Hands», «Clean Hands, Clean Rivers», Krymsky Val, 3, p.2, Moscow, 119049, Russia; ORCID 0009-0003-1164-862X; e-mail: lomakov@ecoinstrument.ru.

Maxim M. Platonov, Ph.D., Director of Science, «Without Rivers as Without Hands», Nonprofit Foundation «Clean Hands, Clean Rivers», Krymsky Val, 3, p.2, Moscow, 119049, Russia; ORCID 0009-0005-1853-8057; e-mail: platonov@ecoinstrument.pro

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

Papers in Russian, never published anywhere before, can be accepted for publication. The optimal size of an article is to be 16–24 thousand of characters with blanks, not more than 20 pages including figures and tables.

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

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

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

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

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

References are to be presented in a general list in the end of the paper. References are to be numbered and arranged in a bibliographic list in accordance with GOST P 7.0.5 2008 «Bibliographic reference. General requirements and rules of composition». References in the text are to be given in square brackets (for instance, [4]), in successive order.

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

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

Manuscripts are reviewed and edited in RosNIIVKh editorial office.

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

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

К публикации принимаются ранее не публиковавшиеся статьи на русском языке. Оптимальный объем статей составляет 0,4–0,6 авторского листа (16–24 тыс. знаков с пробелами, не более 20 с., включая рисунки и таблицы).

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

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

Текст набирается **без переносов** с выравниванием по ширине страницы, шрифт Times New Roman, **кегель 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, Н.А. Валек

Подписано в печать 10.10.2024. Дата выхода в свет 24.10.2024.

Формат 70x100^{1/16}. Усл. печ. л. 7,25. Тираж 200 экз. Цена свободная.

Отпечатано в типографии ООО «ДжиЛайм»,

юридический адрес: 620078, г. Екатеринбург, ул. Мира 37-25.

Тел.: +7(343)362-42-28, www.glime.ru, e-mail: g_lime@mail.ru

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

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

Адрес: 117292, Москва, ул. Кедрова, дом. 8, корп. 1

Станция 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 использованием 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: 620049, г. Екатеринбург, ул. Мира, 23
Тел. главного редактора (343) 287-65-71. E-mail: info@waterjournal.ru, www.waterjournal.ru

© ФГБУ РосНИИВХ

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

The title is registered in the State Committee
of the Russian Federation for Press on May 21, 1999. Registration Number 018825

The journal is issued since 1999 6 times a year.

Address of the Publisher and Editorial Board: Ul. Mira, 23, Ekaterinburg 620049 Russia
Chief Editor (343) 287-65-71. E-mail: info@waterjournal.ru, www.waterjournal.ru

© FGBU RosNIIVKh

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

Индекс / Index 39076

