

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

№ 2, 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 озераведения 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 озераведения 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

№ 2, 2024

ЕКАТЕРИНБУРГ
YEKATERINBURG



РОСВОДРЕСУРСЫ

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



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

EDITORIAL BOARD

CHIEF EDITOR

Aleksey E. Kosolapov, 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

Тема номера. Водохозяйственная наука в условиях глобальных вызовов.....5

УПРАВЛЕНИЕ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ

Веб-приложение «Водный режим рек Европейской территории России»: структура и функциональные возможности
Н.Л. Фролова, Т.Е. Самсонов, М.Б. Киреева, В.Н. Семин, А.Л. Энтин.....6

Практическое применение энтропийного индекса для оценки экологического состояния водных экосистем
М.М. Трофимчук.....23

Технология моделирования и прогноза уровней воды на основе согласованных моделей река-море на примере устьевой области реки Дон
И.В. Землянов, А.Е. Павловский, И.Ю. Милютина, С.А. Кудряшов, О.В. Горелиц.....38

Разработка комплекса мероприятий по защите населенных пунктов, расположенных в нижнем течении реки Печоры
С.А. Мирошниченко, А.И. Лучников, С.А. Лепешкин, Д.И. Перепелица, А.А. Тиунов.....51

ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ, ВОДНЫЕ ОБЪЕКТЫ

Антропогенные воздействия на мировые водные ресурсы
Н.И. Коронкевич, Е.А. Барабанова, И.С. Зайцева.....67

Первые результаты изучения пространственно-временной изменчивости содержания и эмиссии метана в Цимлянском водохранилище
М.Г. Гречушникова, И.А. Репина, В.С. Казанцев, Е.В. Усова, М.А. Верещагин, Е.Л. Анпилова.....80

Сток трансграничных рек Республики Беларусь и России в условиях изменяющегося климата
О.М. Таврыкина, М.В. Шмакова, И.А. Булак, А.О. Русина, Е.И. Громадская.....101

Требования к оформлению материалов.....115

CONTENT

The topic of the issue: Watter science in the conditions of global challenges.....5

WATER RESOURCES MANAGEMENT

Web application “Water regime of the rivers of the European part of Russia”:
structure and functionality
*Natalia L. Frolova, Timofey E. Samsonov, Maria B. Kireyeva,
Vladimir N. Semin, Andrey L. Entin*.....6

Practical implementation of the entropy index in assessing
the ecological state of water ecosystems
Mikhail M. Trofimchuk.....23

Simulation and water levels forecast technology based on harmonized river-sea
models on the example of Don River mouth area
*Igor V. Zemlyanov, Andrey E. Pavlovsky, Inga Y. Milyutina,
Stanislav A. Kudryashov, Olga V. Gorelits*.....38

Development of a set of measures to protect against flooding settlements
located in the lower reaches of the Pechora River
*Sergei A. Miroshnichenko, Anton I. Luchnikov, Sergei A. Lepeshkin,
Dmitry I. Perepelitsa, Alexey A. Tiunov*.....51

WATER RESOURCES, WATER BODIES

Anthropogenic impacts on global water resources
Nikolay I. Koronkevich, Elena A. Barabanova, Irina S. Zaitseva.....67

First results of studying of spatial/temporal variability of the methane content and
emission in the Tsimlyansk reservoir
*Maria G. Grechushnikova, Irina A. Repina, Vladimir S. Kazantsev, Elena V. Usova,
Mikhail A. Vereshchagin, Eugenia L. Anpilova*.....80

The flow of transboundary rivers of the Republic of Belarus and Russia in a changing climate
*Aksana M. Taurykina, Marina V. Shmakova, Ivan A. Bulak,
Anastasiya O. Rusina, Alena I. Hramadskaya*.....101

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

Водохозяйственная наука в условиях глобальных вызовов

С 20 по 22 сентября 2023 года на базе Южного федерального университета и Российского научно-исследовательского института комплексного использования и охраны водных ресурсов прошла Всероссийская научно-практическая конференция «Водные ресурсы в условиях глобальных вызовов: экологические проблемы, управление, мониторинг».


В работе конференции участвовало более 200 представителей российских и зарубежных профильных научно-исследовательских, образовательных, проектно-изыскательских и производственных организаций, что свидетельствует об актуальности предложенных к обсуждению научным сообществом вопросов.

В общей сложности, на пленарном и секционных заседаниях было заслушано и обсуждено более 130 докладов, представленных специалистами 64 профильных организаций из 20 регионов России, а также из Беларуси, Грузии, Армении, Венгрии, Франции, Испании, Италии, Ирака. Тематика научных исследований охватывала проблематику изменения качества ресурсов поверхностных и подземных вод в условиях антропогенного воздействия и климатических изменений; экологическое состояние водных объектов и факторы, влияющие на функционирование водных систем; вопросы научно-методического обеспечения гидрологического, гидрохимического и гидробиологического мониторинга, оценки и прогнозирования состояния водных ресурсов; развитие технологий цифровизации управления водной отраслью; использования современных экономико-математических методов и моделей и др.

Очевидно, что обсуждение этих актуальных вопросов не может ограничиться рамками конференции, сегодня мы продолжаем его на страницах нашего журнала.

Веб-приложение «Водный режим рек Европейской территории России»: структура и функциональные возможности

Н.А. Фролова  , Т.Е. Самсонов , М.Б. Киреева , В.Н. Семин ,

А.А. Энтин 

 frolova_nl@mail.ru

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

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Европейская территория России характеризуется разнообразием природных условий и особенностями водопользования. Рассматриваемый регион представляет большой интерес и в связи с тем, что наблюдаемые здесь климатические изменения в значительной степени влияют на водный режим рек. Для интеграции, отображения и анализа данных о водном режиме рек ЕТР и его изменении в научных и образовательных целях силами гидрологов и картографов МГУ имени М.В.Ломоносова разработано веб-приложение «Водный режим рек Европейской территории России». **Методы.** Веб-приложение создано на основе открытых технологий с использованием двухуровневой архитектуры: сервер баз данных (MySQL) и веб-сервер (Apache + OpenLayers). Для построения приведенных в приложении карт использованы данные 625 метеостанций, включающих срочные измерения и суточные величины, данные о запасах воды в снежном покрове по 284 снегомерным маршрутам. В рамках веб-приложения организована возможность выполнения запросов к данным по гидропостам через картографический интерфейс. **Результаты.** Приложение предоставляет доступ к базам данных и картам, характеризующим месячные, годовые и срочные максимальные расходы воды. Отработана функциональность выполнения запросов к данным по гидропостам через картографический интерфейс, возможность выгрузки данных, динамического расчета параметров стока и статистической обработки полученных величин с помощью стандартных критериев, визуализации отдельных параметров в виде графиков. На основе полученных карт выявлен ряд пространственно-временных тенденций, таких, как интенсификация гидрологического цикла; увеличение годового слоя стока в средней полосе Европейской территории России; увеличение абсолютной и относительной неравномерности стока летней межени; снижение максимальных расходов воды; значительное изменение соотношения долей источников питания для большей части рек, наиболее важной особенностью которого является уменьшение снегового питания.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: водный режим, классификация, база данных, тематическое картографирование, геоинформационные технологии, веб-приложение, Европейская территория России.


Финансирование: Методические подходы апробированы в рамках гранта РФФ № 24-17-00084.

Для цитирования: Фролова Н.А., Самсонов Т.Е., Киреева М.Б., Семин В.Н., Энтин А.А., Веб-приложение «Водный режим рек Европейской территории России»: структура и функциональные возможности // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 2. С. 6–22. DOI:10.35567/19994508-2024-2-6-22.

Дата поступления 18.01.2024.

WEB APPLICATION «WATER REGIME OF THE RIVERS OF THE EUROPEAN PART OF RUSSIA»: STRUCTURE AND FUNCTIONALITY

Natalia L. Frolova  , Timofey E. Samsonov , Maria B. Kireyeva , Vladimir N. Semin , Andrey L. Entin 

 frolova_nl@mail.ru

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Relevance. The European territory of Russia (ETR) is characterised by a variety of natural conditions and diverse water use. The region under consideration is also of great interest due to the fact that the observed climatic changes here also significantly influence changes in the water regime of rivers. To integrate, display and analyze data on the water regime of the rivers of the ETR and its changes for scientific and educational purposes, hydrologists and cartographers of the Lomonosov Moscow State University developed a web application “Water regime of the rivers of the ETR”. **Methods.** The application is based on open technologies with the use of two-level architecture: data base server (MySQL) and web-server (Apache + OpenLayers). To plot the maps cited into the application we used the data of 625 meteorological stations that include dated measurements and daily values, as well as data on water resources in snow cover by 284 snow-gauging routs. The web-application provides the possibility to make queries to the hydrological posts’ data through the mapping interface. **Results.** Based on the maps obtained, a number of spatial and temporal trends were identified, such as intensification of the hydrological cycle; increase in the annual runoff layer in the middle belt of the UTR; increase in the absolute and relative irregularity of summer low-water flow; decrease in the maximum water discharge; significant change in the ratio of the shares of water supply sources for most of the UTR rivers, the most important feature of which is a decrease in the share of snow supply.

Keywords: water regime, classifications, databases, mapping, thematic mapping, geo/information technologies, web applications.

Financing: The methodical approaches have been used within the framework of grant RNF No. 24-17-00084.

For citation: Frolova N.L., Samsonov T.E., Kireyeva M.V., Semin V.N., Entin, A.L. WEB application “Water Regime of the Rivers of the European Part of Russia”: Structure and functionality. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2024. No. 1. P. 6–22. DOI: 10.35567/19994508-2024-2-6-22.

Received 18.01.2024.

ВВЕДЕНИЕ

Многочисленные исследования последствий современных изменений климата и их влияния на сток рек [1–3] свидетельствуют о том, что в ряде крупных регионов России, в т. ч. на Европейской территории России (ЕТР), стали очевидными существенные изменения водного режима рек. При высокой вероятности продолжения этой тенденции в ближайшие десятилетия на первый план выходит проблема оценки изменений речного стока, тем более что обеспечение решения задач водохозяйственного и гидротехнического проектирования требует надежного определения параметров режима речного стока.

Водный режим рек – важнейшая характеристика поверхностных вод суши, как компонента природной среды и активного фактора формирования ландшафта. Численные показатели водного режима имеют непосредственный прак-

тический интерес для любой отрасли экономики, связанной с использованием речных вод или подверженной их воздействию. В настоящее время одной из актуальных задач является адаптация водного хозяйства к существующим современным тенденциям изменения характеристик водного режима рек.

Создание специализированных баз данных, содержащих информацию о характеристиках климата и стока рек, тематических электронных ГИС-проектов и карт – современное и весьма актуальное направление развития гидрологии. Учет большого объема гидрометеорологической информации, автоматизация средств обработки и интерпретации данных о характеристиках речного стока, технологии баз данных и геоинформационных систем дают возможность перейти к количественным, построенным на основе точных расчетов параметрам стока и к разработке новых критериев, характеризующих для различных отраслей экономики особенности формирования водного режима рек.

Значительным вкладом в формирование единого информационного пространства на основе объединения информационных ресурсов, получаемых при проведении государственного мониторинга водных объектов организациями различной ведомственной принадлежности, является «Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов Российской Федерации» (АИС ГМВО)¹. Открытый после соответствующей регистрации доступ к размещенным данным позволяет получить целый ряд важных научных и практических результатов во многих областях гидрологии.

В России есть опыт создания и бассейновых ГИС различного целевого назначения и территориального охвата. Первые такие ГИС обеспечивали систематизацию данных многолетних наблюдений и расчет пространственного распределения гидрометеорологических параметров [4]. В последующие годы было разработано множество бассейновых ГИС разного функционального назначения (от визуализации и анализа данных оперативного мониторинга и прогноза наводнений до оценки ландшафтных характеристик, эрозии почв и твердого стока в бассейнах рек). Некоторые из них опубликованы как картографические веб-сервисы в открытом или ограниченном доступе. В частности, ГИС Центра регистра и кадастра², которая может служить источником оперативных данных наблюдений гидрологических постов. Среди наиболее значимых бассейновых ГИС, обеспечивающих визуализацию гидрологических прогнозов, можно выделить ГИС-Амур и ГИС-Волга, разработанные ФГБУ НИЦ «Планета» [5, 6] и систему прогнозирования паводков и раннего оповещения о наводнениях на реках Черноморского побережья Кавказа и бассейна Кубани, разработанную Гидрометцентром России [7].

Среди отечественных разработок следует выделить и геопортал «Речные бассейны Европейской России», разработанный специалистами Института экологии и природопользования Казанского федерального университета³.

¹ Электронный ресурс: <https://gmvo.skniivh.ru> (дата обращения: 10.01.2024).

² Информационная система по водным ресурсам и водному хозяйству бассейнов рек России. Режим доступа: <http://gis.vodinfo.ru> (дата обращения 12.07.2023).

³ Речные бассейны Европейской части России / ActiveMap Online, Казанский федеральный университет, Институт экологии и природопользования, 2015. Режим доступа: <http://bassepr.kpfu.ru> (дата обращения 28.04.2020).

Геопортал предоставляет разнообразные гидрометеорологические данные, сгруппированные по малым водосборам ЕТР. Базовый слой «Бассейны» содержит 53 865 бассейнов малых рек и межприточных пространств. Малые водосборы рассчитаны аналитически по ЦМР GMTED2010 [8] с пространственным разрешением 250 м и по цифровой карте гидрографической сети масштаба 1:1 000 000 с привлечением контуров объектов гидрографии с топографических карт [9, 10].

Гидрологически направленный ресурс FluentHydro разработан для Северо-Запада России⁴. Портал работает в тестовом режиме и содержит набор слоев, отражающих гидрологическую изученность и возможность визуализации сеточных поверхностей, рассчитанных на основе сценариев изменений климата. Также предусмотрена возможность выгрузки информации за период с 2008 по 2017 гг. Необходимо также отметить картографическую базу данных опасных гидрологических явлений в бассейне р. Селенги⁵. Данные об опасных гидрологических явлениях в структуре ГИС привязаны к слою населенных пунктов, в которых они наблюдались, структура их атрибутивного описания представлена в работе [11].

Прообраз национальной ГИС, предоставляющей системный обзор наиболее значимых экстремальных погодных и климатических явлений на территории России, создан в ИГРАН⁶. В системе представлена информация не только о характеристиках опасных гидрологических явлений, но и проанализированные данные об изменениях климата, в т. ч. о повторяемости и интенсивности экстремальных событий, а также тенденции будущих изменений согласно модельным расчетам.

Среди региональных баз данных можно отметить Ecrins (European catchments and rivers network system)⁷. Набор векторных пространственных данных представлен по Европе (в т. ч. ЕТР) и Ближнему Востоку, включает реки, озера, элементарные и агрегированные водосборные бассейны, плотины, препятствия, гидропосты.

CatchX – веб-приложение, позволяющее в пределах выбранного водосборного бассейна визуализировать временные изменения за 25 лет по осадкам, температуре, суммарному испарению, стоку и типам почвенно-растительного покрова. Границы водосборов взяты на весь мир по HydroBASINS – всего 57 646 бассейнов⁸.

В последние годы подобные веб-порталы становятся основой мониторинга и прогнозирования опасных гидрометеорологических явлений. Так, к примеру, сервис Google развивает портал по глобальному прогнозу наводнений на

⁴ FluentHydro, 2019. Режим доступа: <http://185.204.0.167/portal/map.html> (дата обращения 28.04.2020).

⁵ Электронный ресурс: <http://selenga.psu.ru> (дата обращения 10.01.2024).

⁶ Электронный ресурс: <http://extremeclimate.ru> (дата обращения 10.01.2024).

⁷ Ecrins (European catchments and rivers network system) / EU Open Data Portal, European Environment Agency, 2019. Режим доступа: https://data.europa.eu/euodp/en/data/dataset/data_european-catchments-and-rivers-network (дата обращения 28.04.2020).

⁸ CatchX – Catchment Water Explorer App / Esri, ESA Climate Change Initiative, 2017, Earth2Observe, 2014. Режим доступа: <https://ewgis.org/catchx-global/> (дата обращения 28.04.2020).

основе алгоритмов машинного обучения [12, 13]. Ресурс может быть запущен в глобальном масштабе в ближайшие 2–3 года. С использованием алгоритмов машинного обучения начала работу система открытого краткосрочного прогнозирования стока для некоторых рек России – OpenForecast⁹, в основе которой лежат данные гидрологического мониторинга и использование физико-математических моделей глобальной циркуляции атмосферы и океана, а также данные по формированию речного стока.

Среди удачно реализованных национальных систем мониторинга режима водных объектов можно выделить eNud (Австрия) и VIGICRUE (Франция). В большинстве развитых стран Европы архивные и оперативные характеристики стока объединены в рамках одного сервиса и доступны любому пользователю. Обычно такие сервисы имеют встроенный картографический блок, позволяющий найти нужную станцию на карте. Подобная схема реализована для архивов в Финляндии, Австрии и США. Для крупных рек создано большое количество региональных баз данных и сервисов, как, например, проект по мониторингу водных ресурсов в бассейне Дуная (DORIS).

В России оперативная информация по уровням воды официально не является общедоступной и не публикуется Росгидрометом открыто. Отдельные территориальные управления частично размещают оперативную информацию на своих сайтах. Так, например, по Северо-Западному УГМС доступны оперативные уровни воды в Неве и Финском заливе¹⁰. Существующая Единая государственная система информации об обстановке в Мировом океане (ЕСИМО)¹¹ доступна только для учетных записей сотрудников Росгидромета.

На сайте Центра Регистра и Кадастра¹² зарегистрированные ранее пользователи могут получить оперативную информацию по уровням воды на части гидрологических постов в пределах Российской Федерации. Единственной открытой системой оперативных уровней воды на реках России является портал AllRivers¹³. Однако информация здесь носит ознакомительный характер и не является официальной, основная цель портала – поддержка водного туризма в регионах России.

Новым веб-сервисом является портал «Водный режим рек ЕТР»¹⁴, разработанный специалистами кафедры гидрологии суши и картографии и

⁹ OpenForecast: веб-портал по общедоступному гидрологическому прогнозированию. Режим доступа: <https://openforecast.github.io> (дата обращения 28.04.2020).

¹⁰ Карта фактического уровня воды в Финском заливе и реке Неве / ФГБУ Северо-Западное УГМС / Росгидромет. Google, 2020. Режим доступа: http://www.meteo.nw.ru/weather/lo_levelsd.php (дата обращения 28.04.2020).

¹¹ ЕСИМО (Единая Система мониторинга Мирового океана) / Центр океанографических данных ФГБУ ВНИИГМИ-МЦД. Режим доступа: <http://esimo.ru/portal/> (дата обращения 28.04.2020).

¹² Центр Регистра и Кадастра: информационная система по водным ресурсам и водному хозяйству бассейнов рек России, 2014. Режим доступа: <http://gis.vodinfo.ru/> (дата обращения 28.04.2020).

¹³ AllRivers: уровень воды онлайн. Режим доступа: <https://allrivers.info> (дата обращения 28.04.2020).

¹⁴ Водный режим рек ЕТР. Режим доступа: <https://carto.geogr.msu.ru/water-regime-etr/index.html>. (дата обращения 13.01.2024).

кафедры геоинформатики МГУ имени М.В.Ломоносова. На портале реализована привязка данных не только к гидрологическим постам, но и к их бассейнам, предусмотрена возможность выгрузки данных, динамического расчета параметров стока и статистической обработки полученных величин с помощью стандартных критериев, визуализации отдельных параметров в виде графиков. Отдельный блок включает созданные авторами карты. Структуре и особенностям этого веб-приложения и посвящена данная статья.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Доступ к приложению осуществляется через веб-браузер, адрес сайта: <https://carto.geogr.msu.ru/water-regime-etr/index.html>. Веб-приложение создано на основе открытых технологий с использованием двухуровневой архитектуры: сервер баз данных (MySQL) и веб-сервер (Apache + OpenLayers). В рамках веб-приложения организована возможность выполнения запросов к данным по гидропостам через картографический интерфейс.

Пользователям доступны месячные и срочные максимальные расходы воды по более чем 600 гидрологическим постам 237 бассейнов рек Европейской территории России (ЕТР) с 1945 по 2020 годы. Местоположение гидропостов, координаты которых изначально известны с точностью до сотых долей градуса, было уточнено путем привязки к ближайшей точке соответствующего водотока на цифровой топографической карте масштаба 1:1 000 000. Границы бассейнов гидропостов выделены автоматически по цифровой модели GMTED2010 с разрешением 15" с последующей ручной верификацией. Для этого была использована ранее разработанная методика, позволяющая выполнить согласование ЦМР и гидрографической сети, представленной векторными объектами (использовали данные картографических основ ВСЕГЕИ) [15].

Для построения приведенных в приложении карт использованы данные 625 метеостанций, включающие срочные измерения и суточные величины, сведения о запасах воды в снежном покрове по 284 снегомерным маршрутам по данным ВНИИГМИ – МЦД. Кроме того, в представленной работе для исследования изменений режима температуры воздуха и осадков использованы пространственно-временные модели метеорологических характеристик на регулярной сетке (реанализы) ERA-40, EObs и ERA Interim [16]. Общий временной охват данных, благодаря пополнению реанализов после их выхода, включает период 1959–2018 гг.

В базе, составляющей основу приложения, хранятся следующие данные:

- гидрологические посты (два точечных набора данных: отдельно для отображения месячных расходов и для максимальных расходов);
- границы водосборных бассейнов гидрологических постов, для которых известны месячные расходы (полигональный набор данных);
- таблица метаданных постов и водосборов;
- таблицы месячных расходов;
- таблицы максимальных расходов.

Геометрические объекты не содержат значимой семантики, кроме уникального идентификатора поста. Соединение таблиц для выборки, визуализации и расчета производных параметров осуществляется по этому идентификатору.

На основе разработанной базы данных составлена серия из более чем 60 карт параметров водного режима, а также связанных с ними климатических параметров. Единицами картографирования на гидрологических картах являются водосборные бассейны, а также точки гидропостов. Поскольку большинство рассчитанных параметров характеризуют в относительных величинах суммарный сток с водосбора, приуроченного к каждому гидропосту, привязка этих параметров к площадным объектам имеет под собой географические основания и позволяет повысить читаемость карт, выделить характер распределения картографируемых величин по территории. Картографирование по точкам гидропостов осуществлялось в тех случаях, когда распределение расчетных параметров по площади бассейна неправомерно, либо на комплексных картах, где картографируется несколько характеристик и площади бассейнов уже «заняты» отображением другого параметра. Метеорологические параметры картографируются на основе данных реанализов в градусной сетке, единицей картографирования на них является, соответственно, ячейка криволинейного раstra.

Разработанная на основе обозначенных выше принципов серия карт включает аналитические, синтетические и комплексные карты среднемноголетних величин за два периода: «исторический» (до 1977 г.) и «современный» (с 1978 г. по настоящее время). Дополнительно также приводятся карты параметров водосборов: заболоченности, залесенности, распаханности, доли лугов. Карты составлялись в конической равновеликой проекции с параллелями касания 45° с.ш. и 65° с.ш. и центральным меридианом 30° в.д. в масштабе 1:14 000 000. Эта проекция характеризуется отсутствием искажений площадей и умеренными искажениями углов, а масштаб позволяет поместить территорию ЕТР на листе формата А4 при подготовке статичных карт [16].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При загрузке приложения отображаются две компоненты интерфейса: карта и панель выборки. На карте представлены гидрологические посты, данные о которых есть в базе. Выбор гидропоста можно осуществить с помощью карты (нажатием левой кнопки мыши на точке, соответствующей посту) или в панели выборки посредством выбора из выпадающего списка «Гидропост». При выборе гидропоста отображаются границы его водосборного бассейна (рис. 1). Если при этом навести курсор на другой гидропост, его бассейн также будет показан. В правом нижнем углу отображаются метаданные гидропоста: дата открытия и закрытия; река, на которой расположен пост; створ; расстояние от устья реки; принадлежность поста; географические координаты (с точностью до 1 минуты) и высота поста в Балтийской системе высот. Здесь же показаны характеристики водосборного бассейна – площадь, средняя высота, озерность, залесенность.

Опции управления картой стандартны для веб-сервисов такого рода: увеличение/уменьшение масштаба (зуммирование), перемещение (панорамирование).

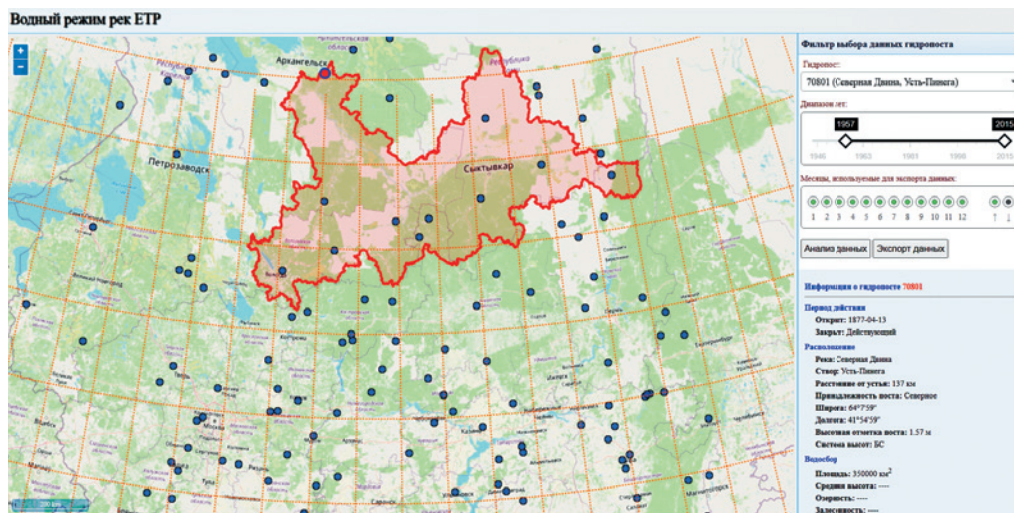


Рис. 1. Общий вид картографического веб-приложения с выделенным гидропостом и границей водосбора.

Fig. 1. General view of the web-mapping application with highlighted gauging station and catchment boundary.

Пользователю доступны две базы данных гидрологических постов: база данных месячных расходов и база данных максимальных расходов. Переключение между ними выполняется в панели выборки. После выбора гидропоста становится доступной панель выбора необходимых лет (перемещение ползунка на графике) и месяцев (только для месячных расходов), а также кнопки «Получить данные» и «Экспортировать данные». Кнопка «Экспортировать данные» позволяет сохранить данные из базы по посту за выбранный период в формате Microsoft Excel. Кнопка «Получить данные» запускает отрисовку графика, отображающего изменение показателя во времени (рис. 2).

В окне графика доступны опции выбора показателя и диапазона данных для отображения. Возможно перемещение графика внутри окна (при зажатой левой кнопке мыши) и масштабирование (с использованием колеса мыши). Первичными данными являются показатели месячных расходов. Все остальные показатели рассчитываются на их основе.

При необходимости можно открыть несколько панелей на разные посты и перемещать их по экрану (рис. 3). При перемещении курсора в окне графика над графиком отображается значение показателя (V) и дата, к которой он относится (T).

В нижней части окна графика отображается временная шкала с разделителем красного цвета, который используется для выбора диапазонов расчета статистических критериев. Разделение гидрологических рядов наблюдений на два хронологических периода и их сравнение позволяет оценить трансформацию водного режима. Наши исследования, как и результаты других авторов, показывают, что современный период берет свое начало примерно с 1978 г., хотя эта граница несколько меняется по территориям (рис. 4).

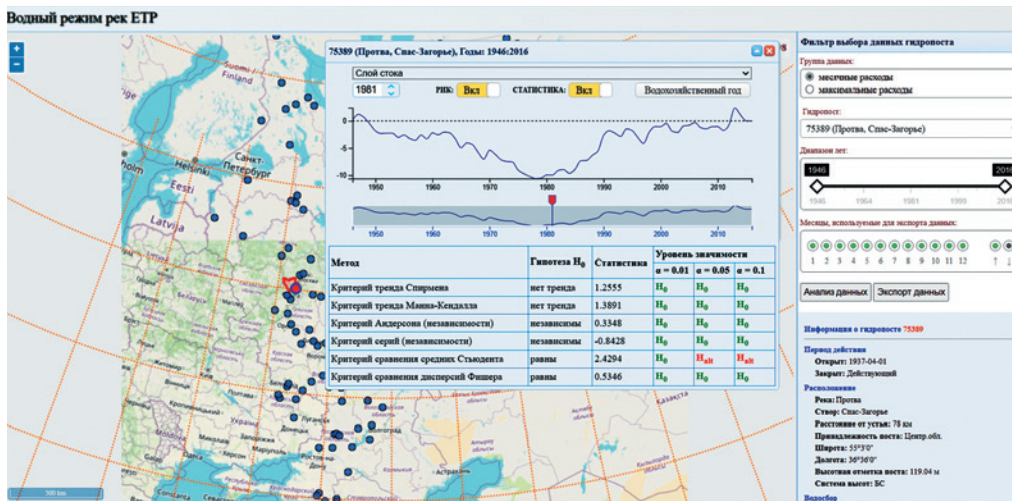


Рис. 2. Панель графиков с отображением данных для выбранного поста.
 Fig. 2. Plots panel showing data for the selected hydrological station

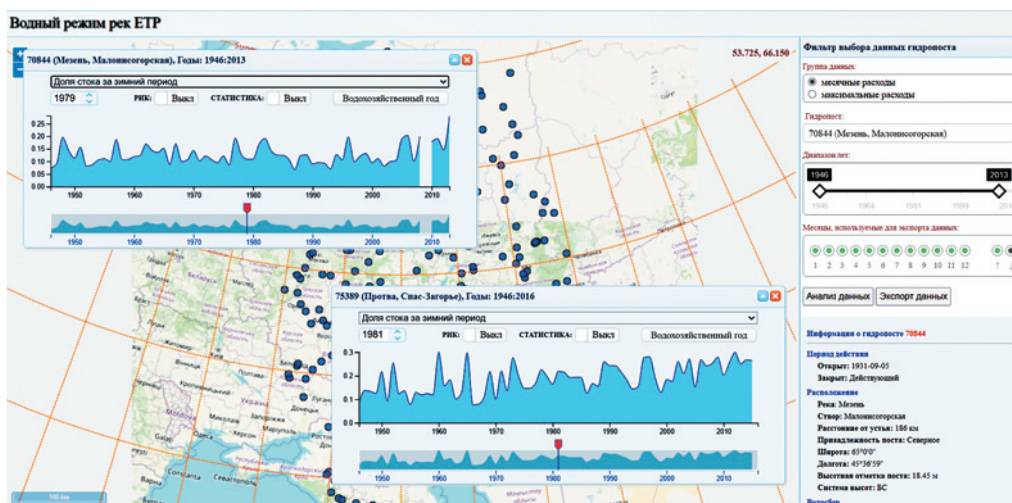


Рис. 3. Несколько графиков в окне браузера.
 Fig. 3. Several plots in the browser window.

Для выбранных данных доступен расчет статистических критериев: критерия тренда Спирмена, критерия тренда Манна-Кендалла, критерия Андерсона (независимости), критерия серий (независимости), критерия сравнений средних Стьюдента и критерия сравнения дисперсий Фишера. Чтобы рассчитать статистические критерии, включается переключатель «Статистика». В таблице, открывающейся внизу основного окна, появляется список критериев, нулевые

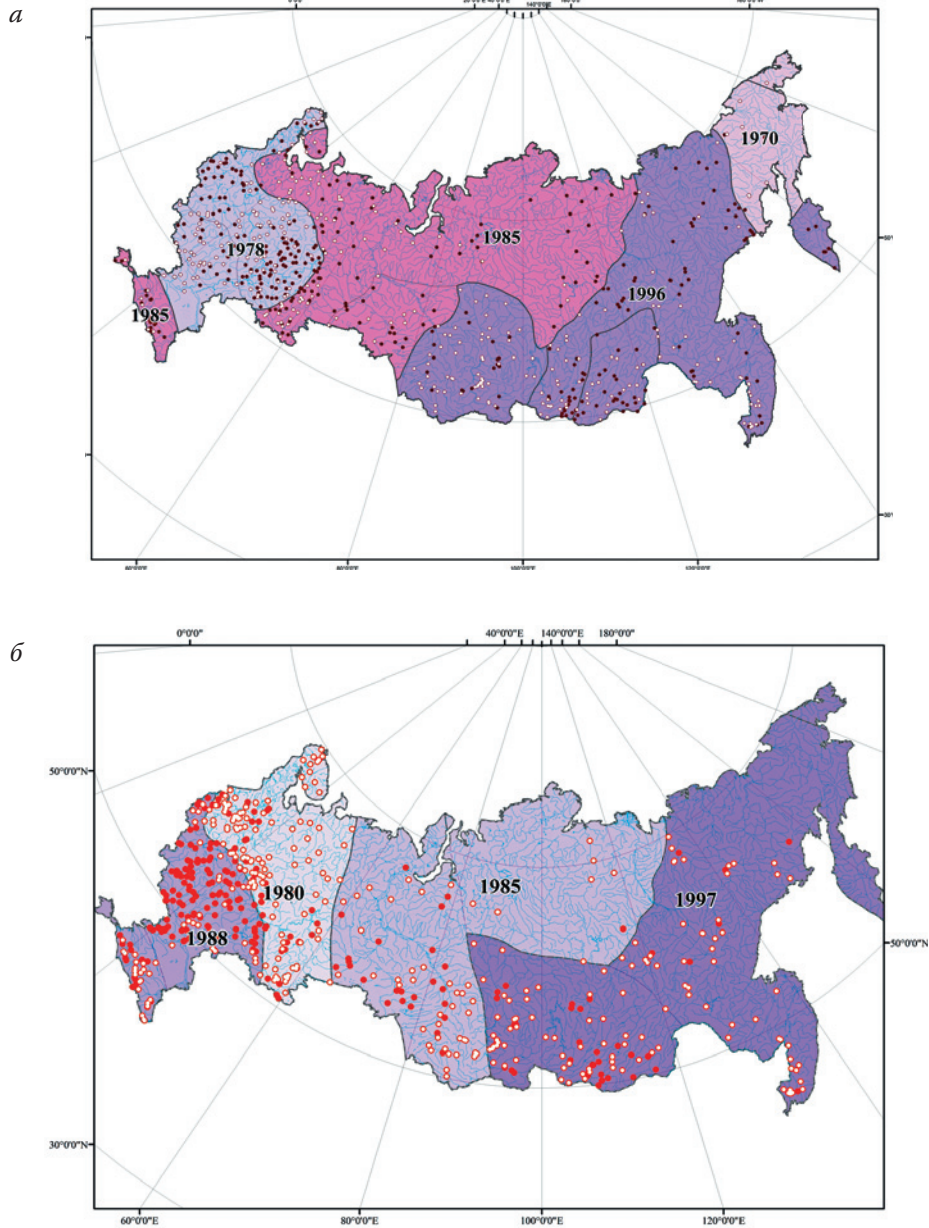


Рис. 4. Распределение даты нарушения стационарности в рядах годового (а) и максимального (б) стоков: точки – используемые гидрологические посты, заливка означает наличие статистической значимости (p -value < 10 %) в обнаружении переломного года [17].

Fig. 4. The distribution of the date of stationarity violation in the series of (a) annual and (b) maximal runoff (the dots show the hydrological gages used, the color means the presence of statistical significance (p -value < 10 %) in the determination of the turning year).

гипотезы, рассчитанное значение статистики, а также решение о принятии или отклонении нулевой гипотезы на разных уровнях значимости (рис. 5).

Для расчета статистических критериев сравнения средних и дисперсий используется разделение выборочной совокупности на два подмножества. Разделение происходит по датам: с помощью поля в левом верхнем углу окна или красного ползунка на шкале времени можно разделить выборочную совокупность на «до» и «после». При изменении даты разделения пересчет статистики выполняется автоматически.

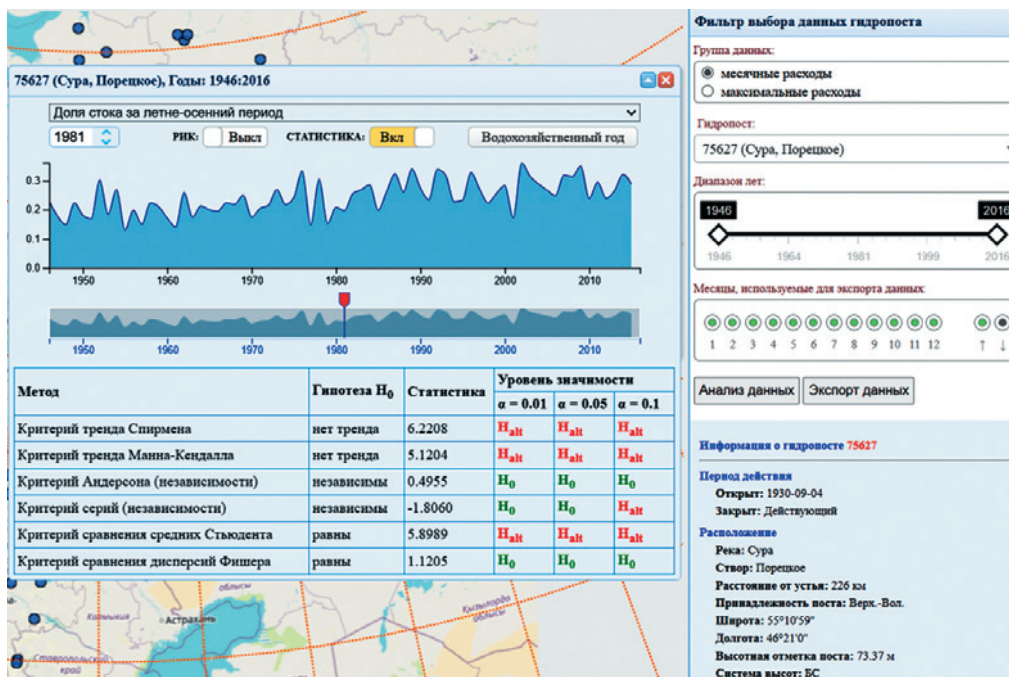


Рис. 5. Список критериев, нулевые гипотезы, рассчитанное значение статистики, а также решение о принятии или отклонении нулевой гипотезы на разных уровнях значимости.

Fig. 5. List of criteria, null hypotheses, calculated value of the statistic, and the decision to accept or reject the null hypothesis at different significance levels.

Переключатель «РИК» служит для включения отображения данных в виде разностной интегральной кривой.

Отдельный блок веб-приложения посвящен картам параметров водного режима, а также связанным с ними климатическим параметрам. Пример карт приведен на рис. 6. Все картографические материалы доступны для скачивания.

Анализ полученных карт показал, что за период 1945–2018 гг., с учетом региональных различий, на ЕТР произошла существенная трансформация водного

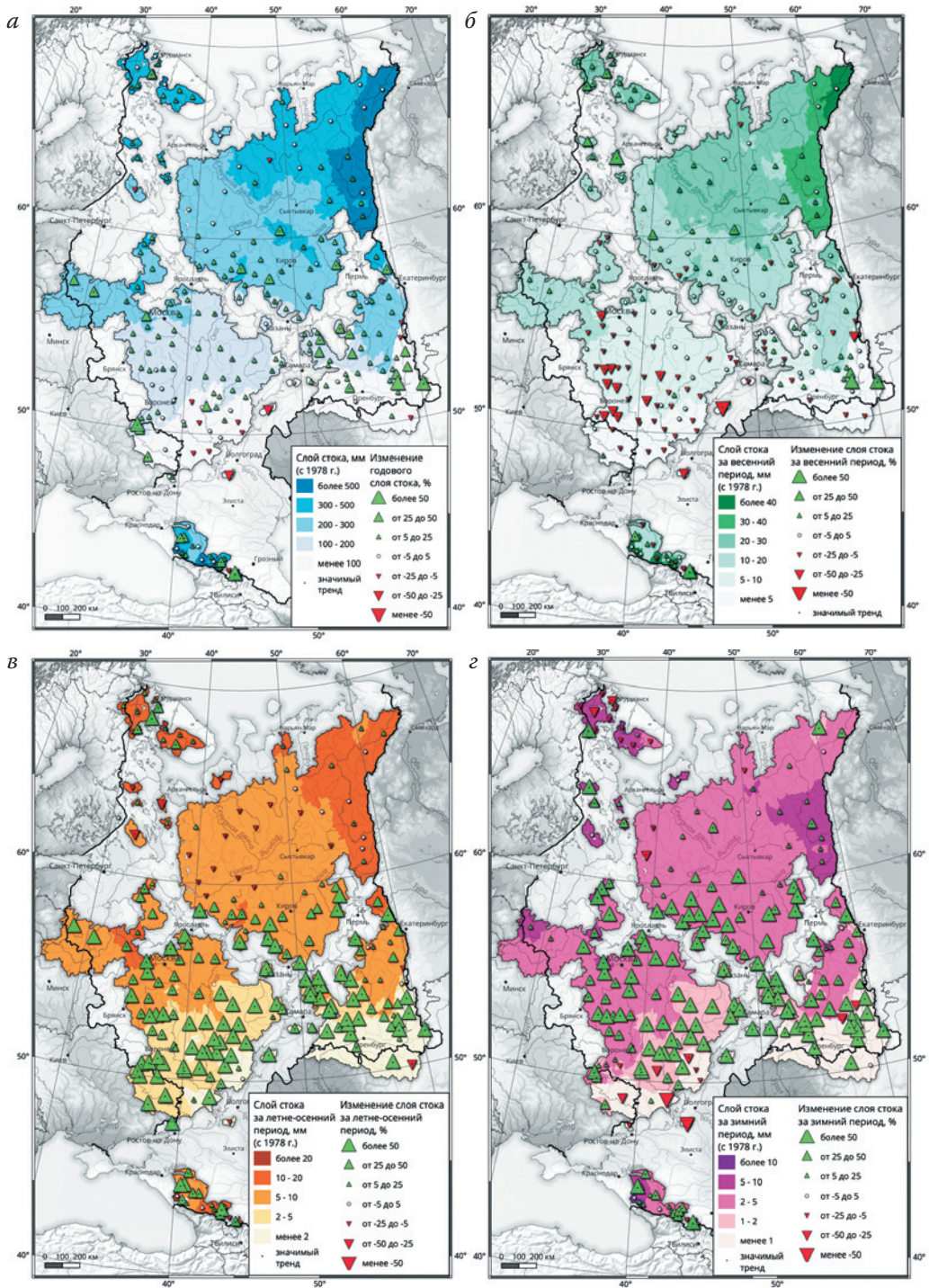


Рис. 6. Изменения слоя стока [17]: а – за год; б – за весенний период; в – за летне-осенний период; z – за зимний период.

Fig. 6. Runoff depth changes: а – year; б – spring period; в – summer-autumn period; z – winter period.

режима, которая стала следствием интенсификации некоторых звеньев гидрологического цикла и проявилась в росте величин и изменении осадков, перераспределении речного стока между сезонами. На большей части ЕТР норма годового слоя осадков за второй период (1978–2018 гг.) по сравнению с первым (1945–1977 гг.) увеличилась незначительно – на 3–9 %. Однако режим выпадения осадков за зимний период претерпел заметную трансформацию. При относительном постоянстве общего количества осадков на большой территории наблюдается существенное увеличение их жидкой компоненты, происходящее во многом за счет сокращения количества твердых осадков. Кроме того, фиксируется значительный рост количества оттепелей (до 20–40 %) и одновременное сокращение числа дней с отрицательными температурами воздуха с запада на восток.

На преобладающем большинстве водосборов водность рек увеличилась на 20–50 % относительно базисного периода. Особенно рост заметен для левобережных притоков Волги и рек северо-западной части Русской равнины. Меньше всего изменения затронули реки Русского Севера и бассейн Дона. Наиболее интенсивное уменьшение максимальных расходов воды фиксируется в бассейнах Дона и Оки. Здесь с конца 1970-х годов снижение максимальных расходов воды составляет в среднем 46 % и 37 % соответственно. Одновременно с этим увеличился разброс дат их прохождения. Заметно снизились весенние максимумы и в нижнем течении Волги. В западной части Русской равнины также фиксируется снижение максимумов весеннего половодья, но здесь оно имеет характер тенденции. На средних и крупных реках северных и восточных районов Европейской территории России тенденция снижения максимумов весеннего половодья практически не выражена. Снижение максимальных расходов воды выявлено для высокогорных водосборов в бассейне Терека (от –5 до –50 %), в то время как для высокогорных водосборов бассейна Кубани заметен рост (25–50 %). Предгорные водосборы в целом испытывают рост максимальных расходов.

На основе проведенных расчетов, связанных с оценкой степени трансформации водного режима и его дальнейшего картографирования, проведена переоценка границ гидрологических сезонов для рек региона, а также многолетних тенденций изменения максимальных суточных расходов воды и времени их прохождения, выявлены пространственные закономерности. Совместный анализ гидрологических и метеорологических данных позволил выделить в общем объеме стока за каждый год составляющие, связанные с грунтовым, сезонным (половодье), паводковым и оттепельным питанием. Анализ полученных данных за два периода свидетельствует о значительном изменении соотношения долей источников питания для большей части рек. Для рек бассейнов Русского Севера по-прежнему преобладает снеговое питание, но для рек бассейна Северной Двины значения уже приближаются к пороговым. В бассейне Верхней Волги в среднем, в основном за счет текущих с северо-востока левобережных притоков, все еще сохраняется преобладание снегового питания. В бассейне Оки, Дона и притоков Средней Волги снеговое питание уже составляет менее 50 %, реки имеют смешанный тип питания с преобладанием подземной составляющей [15, 17].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На портале «Водный режим рек ЕТР», разработанном на кафедрах гидрологии суши и картографии и геоинформатики географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, впервые реализован картографический интерфейс доступа к многолетним рядам расходов по многочисленным гидропостам Европейской территории России. Отображаемые данные привязаны не только к гидрологическим постам, но и к их бассейнам, предусмотрена возможность выгрузки данных, динамического расчета параметров стока и статистической обработки полученных величин с помощью стандартных критериев, визуализации отдельных параметров в виде графиков.

Отдельный блок посвящен созданным картам, на основе которых сделан ряд важных заключений о пространственной картине изменений водного режима. Картографический и статистический анализы совокупности климатических и гидрологических характеристик выявили реакцию режима вод суши на происходящие в климатической системе изменения. Наблюдаемые тенденции проявляются в трендах на потепление и увеличении количества осадков, а также свидетельствуют о нестационарности климата, повышении числа экстремальных событий.

Полученные результаты имеют потенциал для практического использования при управлении водными ресурсами страны, а созданный веб-ресурс позволяет получить комплексное представление об особенностях водного режима анализируемой территории и его многолетней изменчивости, может быть использован в качестве «типового» решения при выполнении аналогичных исследований для других географических регионов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Водные ресурсы России и их использование / под ред. И.А. Шикломанова. СПб.: ГГИ, 2008. 600 с.
2. Георгиевский В.Ю., Шалыгин А.А. Гидрологический режим и водные ресурсы. Гл. 2 // Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем. Гл. 2. М.: Росгидромет, 2012. С. 53–86.
3. Джамалов Р.Г., Фролова Н.Л., Киреева М.Б. и др. Современные ресурсы подземных и поверхностных вод Европейской части России: Формирование, распределение, использование. М.: ГЕОС, 2015. 315 с.
4. Калинин В.Г., Пьянков С.В. Применение геоинформационных технологий в гидрологических исследованиях. Пермь: Алекс-Пресс, 2010. 217 с.
5. Frolov A.V., Asmus V.V., Borshch S.V., Vil'fand R.M., Zhabina I.I., Zatyagalova V.V., Krovotyntsev V.A., Kudryavtseva O.I., Leont'eva E.A., Simonov Y.A., Stepanov Y.A. GIS-Amur system of flood monitoring, forecasting, and early warning // *Russian Meteorology and Hydrology*. 2016. Vol. 41 (3). P. 157–169.
6. Borsch S., Simonov Y., Khristoforov A., Semenova N., Koliy V., Ryseva E., Krovotyntsev V., Derugina V. Russian rivers streamflow forecasting using hydrograph extrapolation method. *Hydrology*. 2022. 9. 1. DOI: 10.3390/hydrology9010001.
7. Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Система прогнозирования паводков и раннего оповещения о наводнениях на реках Черноморского побережья Кавказа и бассейна Кубани // *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*. 2015. № 356. С. 1–247.
8. Danielson J.J., Gesch D.B. Global Multi-resolution Terrain Elevation Data 2010 (GMTED2010). U.S. Geological Survey. 2011. 26 p.

9. Ермолаев О.П., Мальцев К.А., Иванов М.А. Автоматизированное построение границ бассейновых геосистем для Приволжского федерального округа // География и природные ресурсы. 2014. № 3. С. 32–39.
10. Ермолаев О.П., Мальцев К.А., Мухарамова С.С., Харченко С.В., Веденева Е.А. Картографическая модель речных бассейнов Европейской России // География и природные ресурсы. 2017. № 2. С. 27–36.
11. Гармаев Е.Ж., Пьянков С.В., Цыдыпов Б.З., Шихов А.Н., Аюржанаев А.А., Содномов Б.В., Абдуллин Р.К. Структура и информационное наполнение ГИС «Гидроэкологическая безопасность бассейна р. Селенги» // ENVIROMIS-2020: избранные труды Межд. конференции и школы молодых ученых по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды. Томск, 2020. С. 336–339.
12. Matias Y. Keeping people safe with AI-enabled flood forecasting / Search – AI – India, 2018. Режим доступа: <https://www.blog.google/products/search/helping-keep-people-safe-ai-enabled-flood-forecasting/> (дата обращения 28.04.2020).
13. Nevo S.A. Summary of the Google Flood Forecasting Meets Machine Learning Workshop / Google AI Blog, 2019. Режим доступа: <https://ai.googleblog.com/2019/03/a-summary-of-google-flood-forecasting.html> (дата обращения 28.04.2020).
14. Ayzel G., Varentsova N., Erina O., Sokolov D., Kurochkina L., Moreydo V. Open Forecast: The First Open-Source Operational Runoff Forecasting System in Russia // Water. 2019. Vol. 11. P. 1546.
15. Фролова Н.А., Киреева М.Б., Харламов М.А., Самсонов Т.Е., Энтин А.А., Лурье И.К. Картографирование современного состояния и трансформации водного режима рек Европейской территории России // Геодезия и картография. 2020. Т. 81. № 7. С. 14–26.
16. Энтин А. А., Самсонов Т. Е., Лурье И. К. Согласование цифровых моделей рельефа и гидрографической сети для определения границ бассейнов // Геодезия и картография. 2019. № 1. С. 94–101. DOI: 10.22389/0016-7126-2019-943-1-94-101.
17. Frolova N.L., Magritskiy D.V., Kireeva M.B., Grigor'ev V.Yu., Gelfan A.N., Sazonov A.A., Shevchenko A.I. Streamflow of Russian Rivers under Current and Forecasted Climate Changes: A Review of Publications. 1. Assessment of Changes in the Water Regime of Russian Rivers by Observation Data // Water Resources. 2022. 49. № 3. P. 333-350. DOI: 10.1134/S0097807822030046.

REFERENCES

1. Water resources of Russia and their utilization / edited by I.A. Shiklomanov. SPb.: GGI, 2008. 600 p. [In Russ.].
2. Georgievskiy V.Yu., Shalygin A.L. Hydrological regime and water resources. Chapter 2. Methods of Assessment of Climate Change Consequences for Physical and Biological Systems. Chapter 2. Moscow: Roshydromet, 2012. P. 53–86 [In Russ.].
3. Dzhamalov R.G., Frolova N.L., Kireyeva M.B. et al. Modern resources of ground and surface waters of the European part of Russia: Formation, distribution, use. M.: GEOS, 2015. 315 p. [In Russ.].
4. Kalinin V.G., Pyankov S.V. Application of geoinformation technologies in hydrological research. Perm: Alex-Press, 2010. 217 с. [In Russ.].
5. Frolov A.V., Asmus V.V., Borshch S.V., Vil'fand R.M., Zhabina I.I., Zatyagalova V.V., Krovotyntsev V.A., Kudryavtseva O.I., Leont'eva E.A., Simonov Y.A., Stepanov Y.A. GIS-Amur system of flood monitoring, forecasting, and early warning. *Meteorology and hydrology*. 2016. Vol. 41 (3). P. 157–169 [In Russ.].
6. Borsch S., Simonov Y., Khristoforov A., Semenova N., Koliy V., Ryseva E., Krovotyntsev V., Derugina V. Russian rivers streamflow forecasting using hydrograph extrapolation method. *Hydrology*. 2022. 9. 1. DOI: 10.3390/hydrology9010001.
7. Borsch S.V., Simonov Yu.A., Khristoforov A.V. System of flood forecasting and early warning of floods on the rivers of the Black Sea coast of the Caucasus and the Kuban basin. *Hydrometeorological research and forecasts*. 2015. № 356. P. 1–247 [In Russ.].
8. Danielson J.J., Gesch D.B. Global Multi-resolution Terrain Elevation Data 2010 (GMTED2010). U.S. Geological Survey. 2011. 26 p.

9. Yermolaev O.P., Maltsev K.A., Ivanov M.A. Automated construction of basin geosystem boundaries for the Volga Federal District. *Geography and Natural Resources*. 2014. № 3. P. 32–39 [In Russ.].
10. Yermolaev O.P., Maltsev K.A., Mukharamova S.S., Kharchenko S.V., Vedeneyeva E.A. Cartographic model of river basins in European Russia. *Geography and Natural Resources*. 2017. № 2. P. 27–36 [In Russ.].
11. Garmaev E.J., Pyankov S.V., Tsydypov B.Z., Shikhov A.N., Ayurzhanayev A.A., Sodnomov B.V., Abdullin R.K. Structure and information content of GIS “Hydroecological safety of the Selenga River basin”. ENVIROMIS-2020: Selected Proceedings of the International Conference and School of Young Scientists on Measurements, Modeling and Information Systems for Environmental Studies. Tomsk, 2020. P. 336–339 [In Russ.].
12. Matias Y. Keeping people safe with AI-enabled flood forecasting / Search - AI - India, 2018. Access mode: <https://www.blog.google/products/search/helping-keep-people-safe-ai-enabled-flood-forecasting/> (accessed on 28.04.2020).
13. Nevo S. A. Summary of the Google Flood Forecasting Meets Machine Learning Workshop / Google AI Blog, 2019. Access mode: <https://ai.googleblog.com/2019/03/a-summary-of-google-flood-forecasting.html> (accessed on 28.04.2020).
14. Ayzel G., Varentsova N., Erina O., Sokolov D., Kurochkina L., Moreydo V. OpenForecast: The First Open-Source Operational Runoff Forecasting System in Russia. *Water*. 2019. Vol. 11. P. 1546.
15. Frolova N.L., Kireeva M.B., Kharlamov M.A., Samsonov T.E., Entin A.L., Lurie I.K. Cartography of the current state and transformation of the water regime of the rivers of the European territory of Russia. *Geodesy and Cartography*. 2020. Vol. 81. № 7. P. 14–26 [In Russ.].
16. Entin A. L., Samsonov T. E., Lurie I. K. Coordination of digital elevation models and hydrographic network for determining basin boundaries. *Geodesy and Cartography*. 2019. № 1. P. 94–101. DOI: 10.22389/0016-7126-2019-943-1-94-101 [In Russ.].
17. Frolova N.L., Magritskii D.V., Kireeva M.B., Grigor'ev V.Yu., Gelfan A.N., Sazonov A.A., Shevchenko A.I. Streamflow of Russian Rivers under Current and Forecasted Climate Changes: A Review of Publications. 1. Assessment of Changes in the Water Regime of Russian Rivers by Observation Data. *Water Resources*. 2022. 49. № 3. P. 333–350. DOI: 10.1134/S0097807822030046 [In Russ.].

Сведения об авторах:

Фролова Наталья Леонидовна, д-р геогр. наук, профессор, заведующая 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

Самсонов Тимофей Евгеньевич, канд. географ. наук, ведущий научный сотрудник, кафедра картографии и геоинформатики географического факультета, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», 119991, Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1; ORCID 0000-0001-5994-0302; e-mail: tsamsonov@geogr.msu.ru

Киреева Мария Борисовна, канд. географ. наук, доцент, кафедра гидрологии суши географического факультета, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», 119991, Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1; ORCID 0000-0002-8285-9761; e-mail: kireeva_mb@mail.ru

Семин Владимир Николаевич, научный сотрудник, кафедра картографии и геоинформатики географического факультета, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», 119991, Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1; ORCID 0000-0003-4810-6325; e-mail: vnsemin@mail.ru

Энтин Андрей Львович, канд. географ. наук, старший научный сотрудник, кафедра картографии и геоинформатики географического факультета, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», 119991, Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1; ORCID 0000-0002-0350-5587; e-mail: aentin@geogr.msu.ru

About the authors:

Natalia L. Frolova, Dr. Geogr. Sci., Professor, Head of Department of Land Hydrology, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, GSP-1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russian Federation. ORCID 0000-0003-3576-285X; e-mail: frolova_nl@mail.ru.

Timofey E. Samsonov, Candidate of Geographic Sciences (PhD), Assistant Professor, Department of Cartography and Geoinformatics, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, GSP-1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russian Federation. ORCID 0000-0001-5994-0302; e-mail: tsamsonov@geogr.msu.ru.

Maria B. Kireyeva, Candidate of Geographic Sciences (PhD), Geography, Associate Professor, Department of Land Hydrology, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, GSP-1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russian Federation. ORCID 0000-0002-8285-9761; e-mail: kireeva_mb@mail.ru

Vladimir N. Semin, Researcher, Department of Cartography and Geoinformatics, Faculty of Geography, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, GSP-1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russian Federation. ORCID 0000-0003-4810-6325; e-mail: vnsemin@mail.ru

Andrey L. Entin Candidate of Geographic Sciences (PhD), Department of Cartography and Geoinformatics, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, GSP-1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russian Federation. ORCID 0000-0002-0350-5587; e-mail: aentin@geogr.msu.ru

Практическое применение энтропийного индекса для оценки экологического состояния водных экосистем

М. М. Трофимчук  

 m.trofimchuk@gidrohim.mecom.ru

ФГБУ «Гидрохимический институт», г. Ростов-на-Дону, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Оценка изменения биологических систем водных объектов при антропогенном воздействии – важнейшее направление мониторинга состояния и загрязнения поверхностных вод. Проведена оценка состояния более 100 водных объектов Европейской территории России и Сибири в разных природно-климатических зонах с различными уровнями загрязнения и минерализации. **Методы.** Для оценки экологического состояния водных объектов использован энтропийный индекс, в основу расчета которого положены данные государственной наблюдательной сети по концентрации растворенного кислорода и температуре воды. **Результаты.** Выявлен ряд закономерностей динамики термодинамического состояния водных экосистем, позволяющих оценить характер и уровень антропогенной нагрузки. Обсуждены преимущества и перспективы применения предложенного подхода в мониторинге поверхностных вод.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: водные экосистемы, концентрация растворенного кислорода, температура воды, энтропийный индекс, загрязнение, минерализация.

Для цитирования: Трофимчук М.М. Практическое применение энтропийного индекса для оценки экологического состояния водных экосистем // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 2. С. 23–37. DOI: 10.35567/19994508-2024-2-23-37.

Дата поступления 12.10.2023.

PRACTICAL IMPLEMENTATION OF THE ENTROPY INDEX IN ASSESSING THE ECOLOGICAL STATE OF WATER ECOSYSTEMS

Mikhail M. Trofimchuk  

 m.trofimchuk@gidrohim.mecom.ru

Hydro/chemical institute, Roston-na-Donu, Russia

ABSTRACT

Relevance. Assessment of the biological systems' state in case of anthropogenic impact is the most important aspect of monitoring of the surface waters' state and pollution. The state of more than 100 water bodies of the European territory of Russia and Siberia was assessed in various natural and climatic zones with different levels of pollution and different mineralization, as one of the significant environmental factors of natural origin. **Methods.** To assess the ecological state of water bodies, an entropy index was used, the calculation of which was based on data from the State Observation Network on the concentration of dissolved oxygen and water temperature. **Results.** A number of regularities in the dynamics of the thermodynamic state of aquatic ecosystems have been identified, enabling to assess the nature and level of anthropogenic load. The article discusses the advantages and prospects for using the proposed approach in surface water monitoring.

Keywords: aquatic ecosystems, dissolved oxygen concentration, water temperature, entropy index, pollution, mineralization.

For citation: Trofimchuk M.M. Practical implementation of the entropy index in assessing the ecological state of water ecosystems. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2024. No. 2. P. 23–37. DOI: 10.35567/19994508-2024-2-23-37.

Received 12.10.2023.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из важных направлений мониторинга состояния и загрязнения поверхностных вод является оценка изменения состояния биологических систем при антропогенном воздействии [1]. Множество применяемых для этих целей методов [1–10], как правило, трудоемки, требуют участия высококвалифицированных гидробиологов-систематиков, оснащенности лабораторий микроскопами и специальной справочной литературой. Однако при выполнении упомянутых условий остаются нерешенными методологические проблемы. В частности, применение методик, разработанных для оценки органического загрязнения – сапробности, в оценке поликомпонентного загрязнения.

Еще один существенный методологический недостаток упомянутых подходов: они не учитывают высокоинтегрированные, иерархически организованные продукционно-энергетические процессы, протекающие в экосистемах, и не принимают во внимание представление об экосистеме как целостной живой системе, обладающей эмерджентным свойством, не являющимся простой суммой свойств составляющих ее элементов. Не учитывается и тот факт, что «реакция экосистемы на изменение факторов среды отличается от реакции организма. Организм в ответ на изменение факторов изменяет функцию, сохраняя структуру, а экосистема, наоборот, меняет структуру, сохраняя функцию» [11].

Решение проблемы интегральной экологической оценки состояния водных объектов лежит в области термодинамики с ее макроскопическими подходами в описании сложных самоорганизующихся систем. Ранее авторами работ [12–14] была теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность оценки состояния водных экосистем на основе продукционно-деструкционных показателей в термодинамической интерпретации. Однако особенности организации мониторинга водных объектов, проводимого на государственной наблюдательной сети подразделениями Росгидромета, не позволяют выполнять продукционно-деструкционные исследования в классическом исполнении в необходимых масштабах. Вместе с тем, основой для расчета изменения энтропии водных экосистем в зависимости от условий существования могут служить гидрохимические показатели, такие как концентрация растворенного кислорода и температура воды [15].

Цель проведенного исследования – показать возможность практического применения энтропийного индекса для оценки экологического состояния широкого спектра водных объектов различной типологии, генезиса, с различными гидрологическими и гидрохимическими характеристиками и уровнем загрязнения. В рамках проведенной работы были решены следующие задачи: сформирован список водных объектов, представляющих все природно-климатические

зоны России с максимальным охватом минерализации (от ультрагалинных вод оз. Байкал до гипергалинных озер Алтая); проведен расчет энтропийного индекса по многолетним данным государственной наблюдательной сети Росгидромета; на основе анализа полученных данных выявлены характерные особенности динамики временных рядов изменения энтропии водных объектов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Ранее автором был предложен теоретически обоснованный метод оценки состояния водных экосистем на основе изменения энтропии водных экосистем – энтропийного индекса, который рассчитывается по формуле:

$$\Delta S_t = \ln T_2 / T_1, \quad (1)$$

где T_1 – температура воды в водном объекте;

T_2 – температура воды, соответствующая 100 % насыщению кислородом при измеренной концентрации кислорода [16].

В основе метода лежит представление о биотическом балансе вещества и энергии, сбалансированности процессов первичного фотосинтетического продуцирования и деструкции органического вещества. Изменение баланса, вызванное как естественными причинами, так и негативными антропогенными воздействиями, сопровождается соответствующим изменением энтропии водной экосистемы. Таким образом, изменение энтропии экосистемы (энтропийный индекс) характеризует изменение ее состояния. Рост энтропии свидетельствует об ухудшении условий существования экосистемы, усилении процессов деградации.

В рамках этого способа разработана шкала оценки, включающая пять градаций экологического состояния экосистем – от предельно благополучного (значение энтропийного индекса от $-0,123$ до $0,062$) до предельно неблагополучного (значение энтропийного индекса от $0,250$ до $0,312$) (табл. 1) [17].

Таблица 1 Классификация экологического состояния

Table 1. Classification of the ecological status

Класс состояния	Энтропийный индекс	Экологическое состояние
1	$-0,123 - 0,062$	предельно благополучное
2	$0,063 - 0,124$	благополучное
3	$0,125 - 0,187$	удовлетворительное
4	$0,188 - 0,249$	неблагополучное
5	$0,250 - 0,312$	предельно неблагополучное

На основе предложенной классификации проведена оценка состояния более 100 водных объектов Европейской территории России и Сибири в разных широтных зонах с различными уровнями загрязнения по удельному комбинаторному индексу загрязнения воды (УКИЗВ) и различной минерализацией, являющейся одним из существенных факторов окружающей среды природного происхождения. Для анализа использован массив данных за многолетний период (1989–2020 гг.) режимной гидрохимической информации (табл. 2).

Таблица 2. Сравнительная оценка состояния водных объектов (средние значения за период наблюдения, выборочные пункты)

Table 2. Comparative assessment of the water bodies' status (average values over the observation period, sampling points)

Водный объект	Пункт наблюдений	Класс качества по УКИЗВ	Энтропийный индекс	Класс благополучия	Сумма ионов, мг/дм ³
Зона тундры-лесотундры					
р. Печенга	пос. Корзуново	4	0,017	1	75,0
р. Печора	г. Нарьян-Мар	3	0,081	2	84,4
р. Обь	г. Салехард	4	0,086	2	204,7
р. Енисей	г. Дудинка	3	0,030	1	118,1
оз. Имандра	г. Мончегорск	3	0,003	1	36,1
оз. Мюрю	с. Борогонцы	3	0,088	2	753,9
Зона тайги					
р. Печора	с. Усть-Цильма	3	0,024	1	95,5
р. Пельшма	г. Сокол	5	0,164	3	386,3
р. Енисей	г. Кызыл	3	0,021	1	150,0
р. Вычегда	д. Гавриловка	3	0,067	2	103,3
р. Северная Двина	г. Красавино	4	0,030	1	339,8
р. Ангара	д. Татарка	3	0,013	1	162,0
р. Иртыш	г. Ханты-Мансийск	3-4	0,074	2	176,6
р. Карабула	ст. Карабула	4	0,025	1	323,0
оз. Онежское	г. Петрозаводск	2	0,012	1	34,7
оз. Ши́ра	устье р. Сон	4	0,021	1	12 084,5
оз. Телецкое	Кыгинский залив	1-2	0,030	1	86,1
Зона смешанных и широколиственных лесов					
р. Нева	г. Кировск	3	0,008	1	77,2
р. Клязьма	г. Ковров	4	0,050	1	317,7
р. Казанка	г. Казань	4	0,016	1	863,5
р. Преголя	г. Калининград	5	0,025	1	2004,8
р. Блява	г. Медногорск	4	0,038	1	832,6
р. Протва	г. Верея	4	0,026	1	367,9
оз. Неро	г. Ростов	3	0,049	1	314,5

Продолжение таблицы 2

Водный объект	Пункт наблюдений	Класс качества по УКИЗВ	Энтропийный индекс	Класс благополучия	Сумма ионов, мг/дм ³
Лесостепная и степная зоны					
р. Маныч	ст-ца Манычская	4	0,019	1	1548,8
р. Кундрючья	Устье	4	0,021	1	2082,3
р. Ср. Егорлык	г. Сальск	4	0,020	1	3195,4
р. Дон	г. Лиски	4	0,043	1	531,7
р. Обь	с. Фоминское	3	0,022	1	120,3
р. Иртыш	г. Омск	3	0,029	1	182,4
р. Алей	г. Алейск	4	0,080	2	414,4
оз. Ик	пгт Крутинка	3-4	0,038	1	1162,1
оз. Чебаркуль	г. Чебаркуль	3	0,030	1	423,5
р. Енисей	г. Дивногорск	1	0,021	3	107,7
р. Терек	г. Беслан	4	0,046	1	385,58

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Первое, что обращает на себя внимание, это несоответствие установленного по УКИЗВ класса качества воды (ККВ) и экологического состояния большинства водных объектов. Экосистемы 98 % исследованных водных объектов находятся в благополучном и предельно благополучном состоянии, в то время как по степени загрязнения 91 % водных объектов отнесен к категориям от загрязненных до предельно грязных (табл. 2). Этот факт еще раз подчеркивает, что недопустимо отождествление показателя загрязненности воды и состояния экосистемы.

Анализ многолетней динамики энтропийного индекса позволил выявить ряд характерных особенностей в динамике состояния водных экосистем. Типологические особенности водных объектов, обусловленные природно-климатическими условиями их формирования, не оказывают заметного влияния на функциональное состояние экосистем.

Подавляющее большинство экосистем находятся в благополучном состоянии при том, что минерализация среды обитания отличается на несколько порядков. Это отчетливо проявляется при сравнении различных водотоков, каждый из которых протекает в пределах одной природной зоны, и для расположенных в разных природных зонах озерных систем. Так, состояние экосистем р. Печоры в г. Нарьян-Маре с минерализацией 84,4 мг/дм³ и р. Средний Егорлык, выше г. Сальска, с минерализацией от 2271 до 5862 мг/дм³ оценивается как благополучное и предельно благополучное соответственно. Еще один пример – предельно благополучное состояние экосистем оз. Телецкое с максимальной минерализацией воды 128,1 мг/дм³ и оз. Шира, минерализация которого достигает 24 420,4 мг/дм³ (рис. 1).

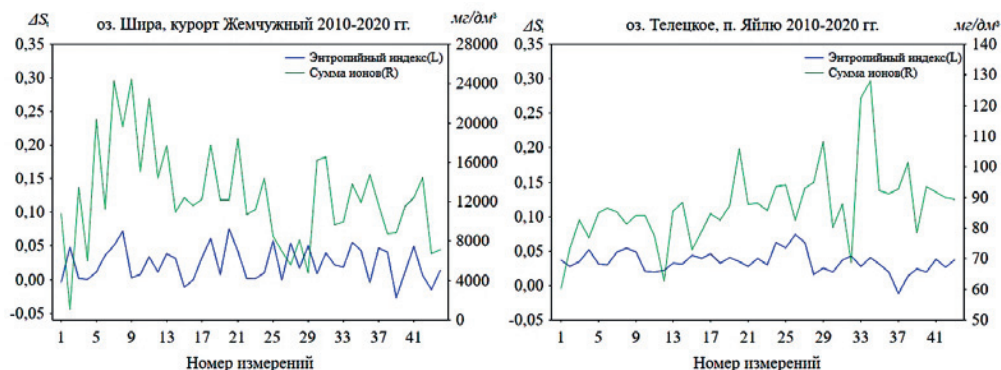


Рис. 1. Одинаковый уровень благополучия экосистем на фоне существенно различных уровней минерализации.
 Fig. 1. The same ecosystems' well-being level on the background of substantially different mineralization levels.

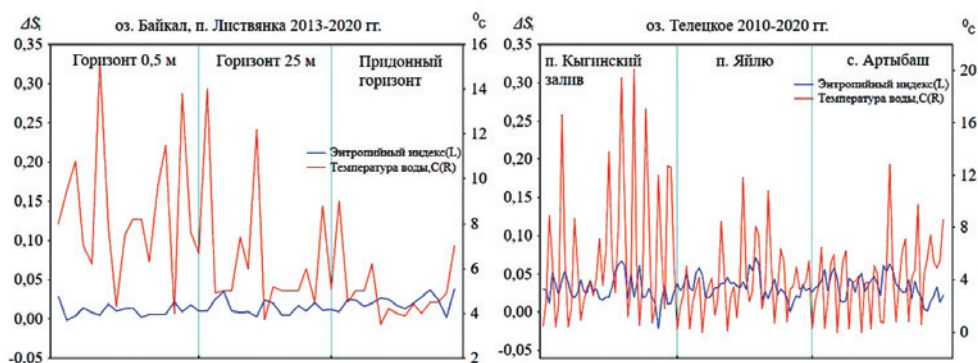


Рис. 2. Одинаковый уровень благополучия экосистем на фоне существенно различных температурных условий и пространственной локализации.
 Fig. 2. The same ecosystems' well-being level on the background of substantially different temperature conditions and spatial localization.

Неизменная динамика энтропийного индекса водного объекта проявляется и на фоне значительных колебаний такого природного фактора, как температура (рис.2). Динамика энтропийного индекса благополучных экосистем в большинстве случаев носит выраженный сезонный характер: в холодное время года значения энтропии возрастают, а при повышении температуры и возобновлении фотосинтетической активности снижаются (рис. 3).

Существенное ухудшение качества воды проявляется в возрастании средних показателей энтропийного индекса и переходе экосистем в разряд менее благополучных. В этом случае оценка состояния водной экосистемы может соответствовать классу качества воды. Речь может идти о длительном интенсивном негативном воздействии загрязняющих веществ на водную экосистему, ограничивающем ее возврат в нормальное состояние (рис. 4).

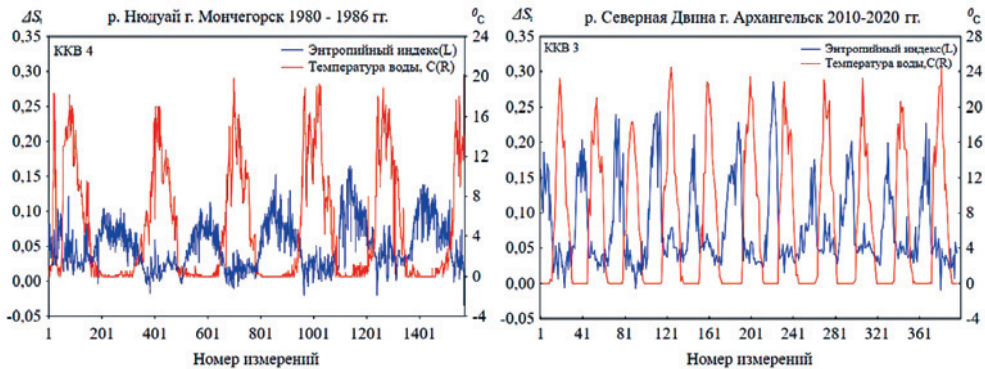


Рис. 3. Сезонная динамика энтропийного индекса водных экосистем и температуры воды.

Fig. 3. Seasonal dynamics of the water ecosystems' entropy index and water temperature changing.

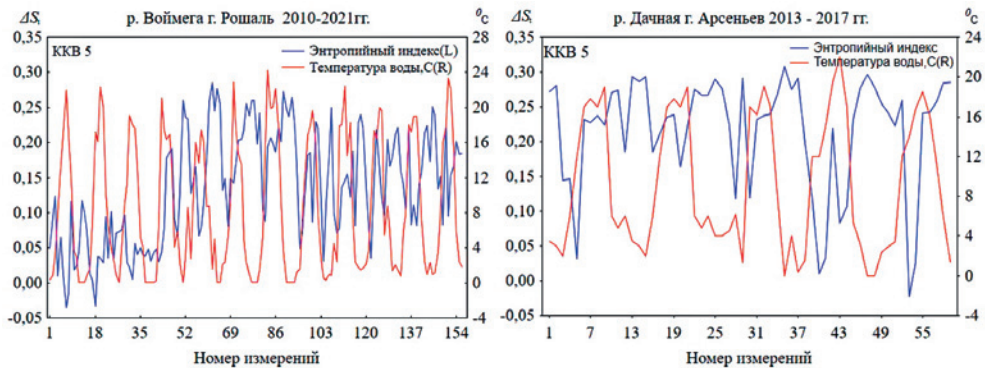


Рис. 4. Нарушение сезонной динамики и возрастание энтропийного индекса при высоком уровне загрязненности (класс качества воды по УКИЗВ – 5) на фоне сезонных колебаний температуры.

Fig. 4. Disturbance of the seasonal dynamics and growth of the entropy index in case of high level of pollution (water quality class 5 by Water Pollution Specific Combinatory Index UKIZV) on the background of the temperature seasonal fluctuations.

Энтропийный индекс хорошо отображает изменения состояния водных экосистем от истоков крупных рек к их устьевым областям. Такие изменения могут быть обусловлены как различными условиями существования экосистем в различных природно-климатических зонах, в частности длительным периодом низких температур и ледостава, так и накопленным загрязняющим эффектом (рис. 5).

Отчетливо проявляется несоответствие класса качества воды и состояния экосистем при сопоставлении динамики энтропийного индекса вдоль течения от верхних створов к нижним. На фоне неизменного уровня загрязненности воды энтропийный индекс регистрирует ухудшение состояния экосистем в районе населенных пунктов и локальных источников загрязнения (рис. 6).

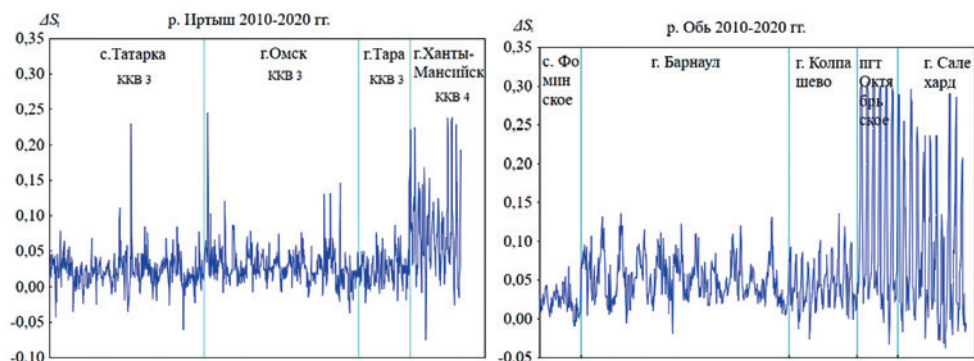


Рис. 5. Изменение энтропийного индекса водных объектов от истоков к устью.
 Fig. 5. The water bodies' entropy index changing from the origin to the mouth.

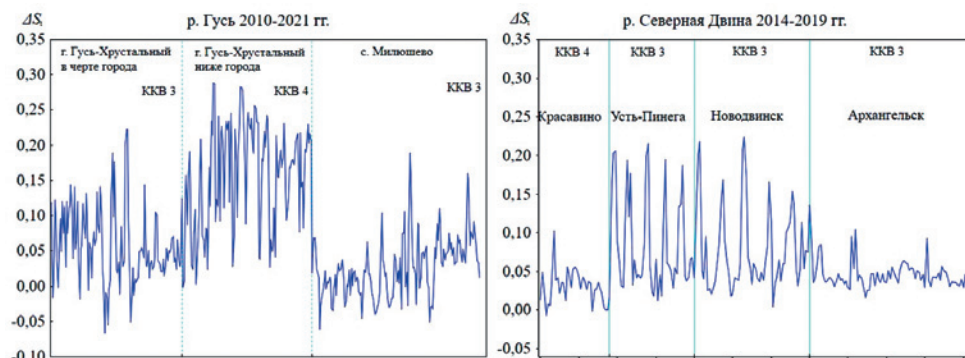


Рис. 6. Пространственные изменения состояния водных экосистем на фоне неизменного класса качества воды.

Fig. 6. Spatial changes of the water ecosystems' state on the background of the unchanged water quality class.

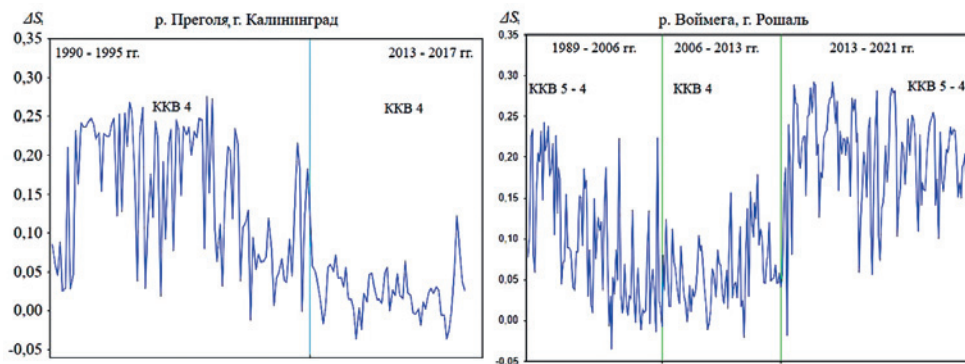


Рис. 7. Многолетнее изменение состояния водных экосистем на фоне неизменного класса качества воды.

Fig. 7. Many-year changes of the water ecosystems' state on the background of the unchanged water quality class.

Аналогичная тенденция отмечается и во временном аспекте (рис. 7). Яркий пример – р. Преголя в пределах г. Калининграда. На протяжении почти 30 лет по уровню загрязненности воду реки относят к четвертому классу качества. При этом состоянии экосистемы было неблагополучным в период 1990–1995 гг., а с 2013 г. перешло в разряд благополучного. Такая же закономерность прослеживается для р. Воймега в г. Рошаль: в период 1989–2022 гг. наблюдался пятый класс качества воды, в то время как очевидна тенденция к улучшению состояния экосистемы реки с 1989 по 2013 гг., а затем его резкое ухудшение.

Анализ динамики энтропийного индекса позволил выявить ряд общих закономерностей, присущих водным объектам различной типологии, с существенно отличающимися условиями формирования гидрохимического режима и качеством воды. Между состоянием экосистемы, уровнем ее благополучия и степенью загрязненности водного объекта нет прямой связи. И это вполне объяснимо. Степень загрязнения характеризует качество окружающей среды, а отклонение энтропии от нормы – состояние экосистемы, существующей в данной окружающей среде, т. е. результат воздействия загрязнения. Состояние экосистемы, уровень ее благополучия, не всегда связаны со степенью загрязненности водного объекта по ряду причин, одна из которых – возможность адаптации экосистемы к негативным воздействиям, другая – возможные трансформации загрязняющих веществ в природных водах, влекущие изменение их токсических свойств. Помимо этого, многие нормируемые вещества не являются ксенобиотиками и в тех или иных концентрациях постоянно присутствуют в водной среде, зачастую многократно превышая законодательно установленные нормы, при этом имея природный генезис. Водные экосистемы проявляют чрезвычайную лабильность, приспосабливаясь к экстремальным условиям среды и сохраняя сбалансированное функционирование за счет изменения видового состава.

В этих условиях неправомерно классифицировать водный объект негативными категориями, не принимая во внимание состояние экосистемы. В то же время очевидно, что реакция водных экосистем на загрязняющие вещества антропогенного происхождения может быть негативной. Увеличение концентрации загрязняющих веществ в воде до критического уровня или их продолжительное воздействие может превысить адаптационные возможности экосистем и привести к изменению их состояния, к той или иной степени деградации. Это проявляется нестабильной временной динамикой, нарушением сезонного ритма и повышенными значениями энтропийного индекса.

При использовании формализованной шкалы оценки состояния водных экосистем следует помнить, что теоретически обоснованными являются верхний и нижний пределы шкалы. Деление шкалы на пять классов в известной степени условно. При оценке степени благополучия экосистемы необходимо учитывать динамический режим ее функционирования, периоды стационарного состояния или их отсутствие. Стационарный режим свидетельствует об установившихся связях и взаимодействиях между биотическими и абиотическими элементами экосистемы, сформировавшимися потоками вещества

и энергии, характерными для данной экосистемы как целостной структуры. Иными словами, только стационарное состояние характеризует экосистему как целостную структуру и адекватно отображает условия среды обитания.

Экспериментально установлено, что устойчивые стационарные состояния водных экосистем вероятны в довольно узких пределах значений отношения деструкции к продукции [13]. Лежащие в этих пределах области фазового пространства выступают в качестве аттракторов оптимального состояния экосистем. Возврат в эту область происходит даже после полной гибели живых компонентов экосистемы при их восстановлении (рис. 8 б). Биота экосистемы подстраивается под внешние условия таким образом, чтобы баланс деструкции и продукции сохранялся оптимальным, независимо от структуры биотического сообщества. При этом проявляется своеобразный экологический гистерезис: смещение восстановленного состояния относительно исходного по координате $|V|$, характеризующей абсолютные значения деструкции (R) и продукции (P) [13].

Таким образом, можно говорить о присущем экосистемам бистабильном состоянии. Причем только одно из них, характеризующее средними значениями отношения деструкции к первичной продукции, близкими к единице ($R/P \approx 1$), является устойчивым аттрактором, к которому стремится состояние экосистемы после спонтанных внутренних или экзогенных пертурбаций. Второе стационарное состояние («стационарный аттрактор») формируется как импактное под влиянием негативного экзогенного воздействия, и после снятия негативной нагрузки и (или) структурной перестройки происходит возврат экосистемы в область оптимального балансового отношения – $R/P \approx 1$ (рис. 8 а, б).

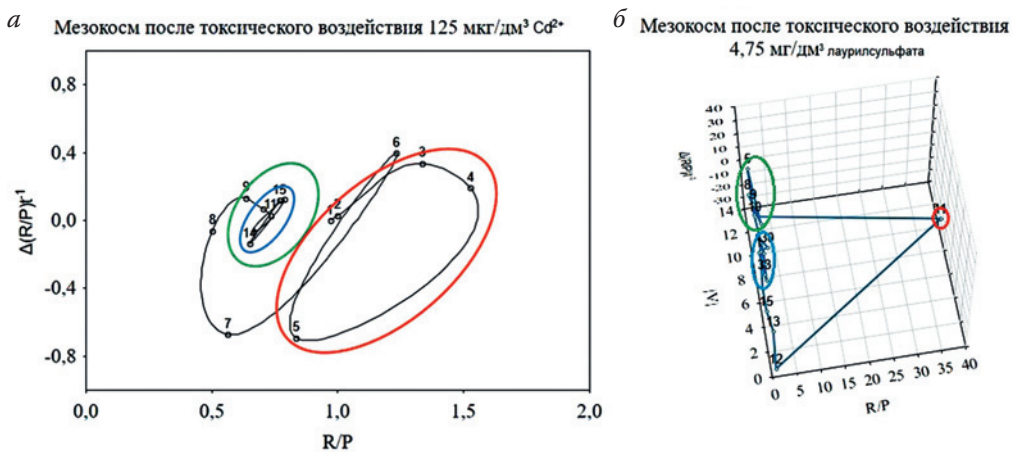


Рис. 8. Фазовые портреты модельных экосистем (мезоэкосистем); а – в двумерном фазовом пространстве; б – в трехмерном фазовом пространстве. Зеленый эллипс – исходное состояние, красный эллипс – импактное, голубой эллипс – восстановленное состояние.

Fig. 8. Phase portraits of the model ecosystems (mezocosmses); а – in two-dimensional phase space; б – in three-dimensional phase space. The green ellipse is the original state; the red ellipse is impact state; the blue ellipse is the restored state.

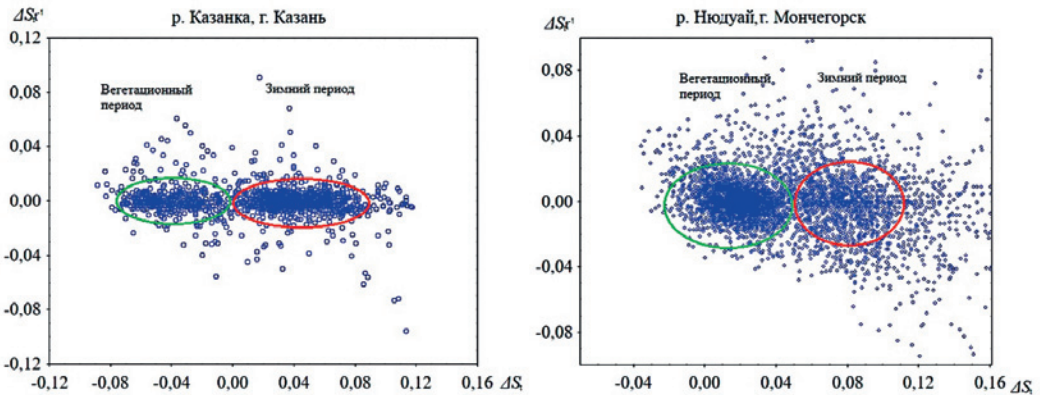


Рис. 9. Сезонное бистабильное состояние экосистемы р. Казанка в г. Казани (по данным ежедневных измерений концентрации кислорода и температуры воды в период 2015–2019 гг.); р. Ньюдуай в г. Мончегорске (ежедекадные измерения в период 1980–2008 гг.).

Fig. 9. Seasonal bi-stable state of the Kazanka River ecosystem (according the data of daily measurements of oxygen concentration and water temperature during the 2015–2019 period); the Nyuduay River in Monchegorsk (measurements every ten days during the 1980–2008 period).

Абстрагируясь от формализованной шкалы оценки состояния экосистем по энтропийному индексу (табл. 1), можно говорить о четырех состояниях экосистем: 1 – благополучное стационарное; 2 – неблагополучное импактное стационарное; 3 – нестационарное, переходное от благополучного к неблагополучному; 4 – нестационарное, переходное от неблагополучного к благополучному. Средние значения энтропийного индекса или других термодинамических параметров, характеризующие переходные состояния, могут соответствовать благополучным оценкам, но динамика параметров переходных периодов в отличие от стационарных – хаотична.

Такая градация состояний более адекватно отражает динамику состояний экосистем. Однако на практике в условиях государственной наблюдательной сети вряд ли реализуема из-за недостаточной частоты измерений необходимых показателей – концентрации кислорода и температуры воды. Но даже без опоры на формализованные оценки энтропийный индекс хорошо отображает пространственно-временные тенденции состояния водных экосистем (рис. 1 – 7).

Как проявление свойства бистабильности экосистем можно рассматривать сезонные колебания энтропийного индекса (рис. 9).

Реализация измерений концентрации растворенного кислорода и температуры воды в автоматическом режиме позволяет организовать оперативный мониторинг с передачей данных по беспроводным каналам связи в непрерывном режиме и выявлять несанкционированные сбросы неочищенных сточных вод (рис. 10).

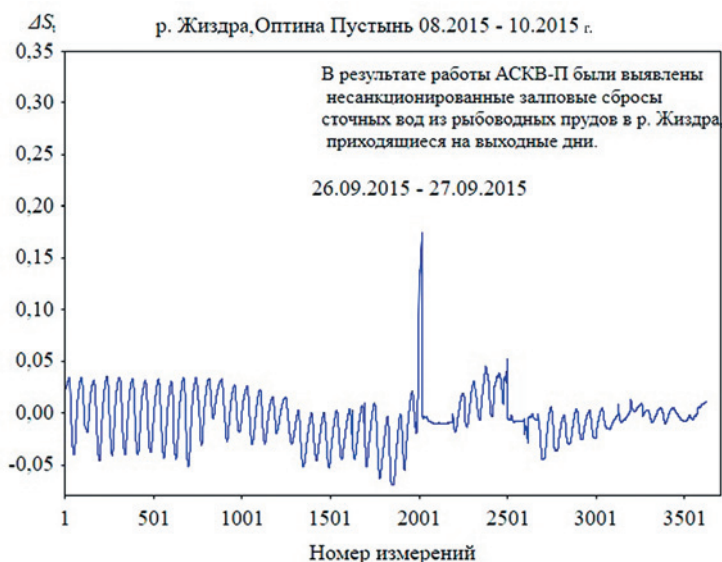


Рис. 10. Энтропийный индекс экосистемы р. Жиздра, Оптина Пустынь по данным передвижной автоматической станции качества воды ФГБУ «НПО Тайфун»: дискретность измерений – 1 мин с усреднением 20 мин, выявлены несанкционированные залповые сбросы сточных вод из рыбоводных прудов в выходные дни.

Fig. 10. The entropy index of the Zhizdra River, Optina Pustyn ecosystem according the data of mobile automatic water quality control station of NPO "Tayfun": measurements discretion is 1 min with 20 min averaging; unauthorized wastewater volley discharges from fishing ponds in the days-off.

ВЫВОДЫ

Оценка состояния водных экосистем – одно из направлений их мониторинга определения уровня загрязнения вод. Не менее важной задачей является оценка качества, в том числе уровня загрязненности воды водных объектов, как среды обитания важных рыбохозяйственных объектов – промысловых рыб и беспозвоночных и их кормовой базы, и как источника питьевого водоснабжения. В этом случае необходимо владеть информацией о качестве воды водных объектов, в т. ч. о концентрациях загрязняющих веществ. Следует отметить, что для оценки состояния конкретных водных объектов необходим детальный анализ всего комплекса гидрохимических и гидробиологических показателей. Чрезмерное сворачивание информации может в отдельных случаях приводить к ошибочным оценочным суждениям.

На наш взгляд, очевидна целесообразность практического применения термодинамической оценки состояния водных экосистем по энтропийному индексу. Предлагаемый подход устанавливает связь между традиционными гидрохимическими показателями качества воды – растворенным кислородом и температурой воды, и термодинамическими параметрами состояния водной экосистемы, позволяет оценивать интегральное состояние водных экосистем как целостных структур на основе термодинамических параметров, т. е. вели-

чинами и в терминах единых для всего многообразия водных объектов, что в известном смысле снимает проблему специфики водных объектов.

Базой для расчета энтропийного индекса служат регулярные данные, получаемые на государственной наблюдательной сети на пунктах всех категорий. Расчет термодинамических параметров основан на инструментальных измерениях, что исключает экспертный субъективизм при оценке состояния экосистем и сводит к минимуму операционные ошибки. Инструментальные измерения, простой алгоритм расчетов и возможность передачи данных по беспроводным каналам связи позволяют организовать мониторинг состояния водных экосистем практически в режиме реального времени. Предложенный способ оценки экологического состояния водных объектов может служить основой для оптимизации системы мониторинга состояния и загрязнения поверхностных вод суши. Данные термодинамического состояния водных экосистем в конкретных физико-химических условиях позволяют получить оценку комплексного воздействия загрязняющих веществ на экосистему в целом.

Энтропийный индекс может быть финальной оценкой экологического состояния водного объекта, если оно отнесено к разряду благополучного. В случае оценки водных объектов как неблагополучных, он может служить основой для принятия решения о более детальных исследованиях. Такой дифференцированный подход к оценке экологического состояния позволяет сократить количество наблюдений за загрязняющими веществами в благополучных водных объектах и более детально исследовать неблагополучные.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Израэль Ю.А. Экология и контроль состояния природной среды. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 376 с.
2. Руководство по гидробиологическому мониторингу пресноводных экосистем. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 240 с.
3. Булгаков Н.Г. Индикация состояния природных экосистем и нормирования факторов окружающей среды. Обзор существующих подходов // Успехи современной биологии. 2002. Т. 122. № 2. С. 115–135.
4. Жукинский В.Н., Оксюк О.П., Цееб Я.Я., Георгиевский В.Б. Проект унифицированной системы для характеристики континентальных водоемов и водотоков и ее применение для анализа качества вод // Научные основы контроля качества поверхностных вод по гидробиологическим показателям. Л.: Гидрометеиздат, 1977. С. 43–53.
5. Абакумов В.А. Контроль качества вод по гидробиологическим показателям в системе Гидрометеорологической службы СССР // Научные основы контроля качества поверхностных вод по гидробиологическим показателям. Л.: Гидрометеиздат, 1977. С. 93–99.
6. Винберг Г.Г. и др. Опыт применения разных систем биологической индикации загрязнения вод. Научные основы контроля качества поверхностных вод по гидробиологическим показателям. Л.: Гидрометеиздат, 1977. С. 124–131.
7. Вудвис Ф. Биотический индекс реки Трент. Макробеспозвоночные и биологическое обследование. Научные основы контроля качества поверхностных вод по гидробиологическим показателям. Л.: Гидрометеиздат, 1977. С. 132–161.
8. Макрушин А.В. Биоиндикация загрязнений внутренних водоемов // Биологические методы оценки природной среды. М.: Наука, 1978. С. 123–137.
9. Методы биоиндикации и биотестирования природных вод. Вып. 2. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 276 с.
10. Унифицированные методы исследования качества вод. Ч. III. Методы биологического анализа вод. М.: Изд-во СЭВ, 1983. 372 с.

11. Керженцев А.С. Новое перспективное научное направление // Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82. № 5. С. 432–440.
12. Никаноров А.М., Трофимчук М.М. Особенности термодинамики внутриводоемных процессов в пресноводных экосистемах при антропогенном воздействии // Доклады Российской академии наук. 2010. Т. 433. № 2. С. 254–256.
13. Никаноров А.М., Трофимчук М.М. Термодинамика внутриводоемных процессов в пресноводных экосистемах при антропогенном воздействии // Водные ресурсы. 2011. Т. 38. № 4. С. 454–463.
14. Никаноров А.М., Трофимчук М.М. Метаболическая мощность экосистем как мера их устойчивости к внешним воздействиям // Доклады Российской академии наук. 2013. Т. 448. № 3. С. 338 – 341.
15. Трофимчук М.М. О возможности оценки экологического состояния водных объектов на основе энтропии // Метеорология и гидрология. 2018. № 7. С. 80–86.
16. Трофимчук М.М. Способ оценки экологического состояния водных объектов. Патент на изобретение № 2721713.
17. Трофимчук М.М. Энтропийный индекс – новые возможности в оценке экологического состояния водных экосистем // Метеорология и гидрология. 2020. № 11. С. 46–52.

REFERENCES

1. Israel Y. A. Ecology and control of the state of the natural environment. L.: Gidrometeoizdat, 1979. 376 p. [In Russ.].
2. Guidelines for hydrobiological monitoring of freshwater ecosystems. SPb.: Gidrometeoizdat, 1992. 240 p. [In Russ.].
3. Bulgakov N.G. Indication of the state of natural ecosystems and regulation of environmental factors. Review of existing approaches. *Advances in modern biology*. 2002. Vol. 122. № 2. P. 115–135 [In Russ.].
4. Zhukinsky V.N., Oksiyuk O.P., Tseeb Y.Y and Georgievsky V.B. A Project of the Unified System for the Description of Continental Water Bodies and Its Application to Water Quality Analysis. *Scientific basis for monitoring the quality of surface waters based on hydrobiological indicators*. Proceedings of the Soviet-English seminar. L.: Gidrometeoizdat, 1977. P. 43–53 [In Russ.].
5. Abakumov V.A. Water quality control by hydrobiological indicators in the system of the Hydrometeorological Service of the USSR. *Scientific basis for monitoring the quality of surface waters based on hydrobiological indicators*. Proceedings of the Soviet-English Seminar. L.: Gidrometeoizdat, 1977. P. 93–99 [In Russ.].
6. Vinberg G. G. et al. Experience in using different systems for biological indication of water pollution. *Scientific basis for monitoring the quality of surface waters based on hydrobiological indicators*. *Proceedings of the Soviet-English Seminar*. L.: Gidrometeoizdat, 1977. P. 124–131 [In Russ.].
7. Woodiwis F. Biotic index of the Trent River. Macroinvertebrates and biological survey. *Scientific basis for monitoring the quality of surface waters based on hydrobiological indicators*. Proceedings of the Soviet-English Seminar. L.: Gidrometeoizdat, 1977. P. 132–161 [In Russ.].
8. Makrushin A.V. Bioindication of pollution of inland water bodies. Biological methods for assessing the natural environment. M.: Nauka, 1978. P. 123–137 [In Russ.].
9. Methods of bioindication and biotesting of natural waters. Vol. 2. L.: Gidrometeoizdat, 1989. 276 p. [In Russ.].
10. Unified methods for studying water quality. Part III. Methods of biological analysis of water. M.: Publishing house CMEA, 1983. 372 p. [In Russ.].
11. Kerzhentsev A.S. A new promising scientific direction. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*. 2012. Vol. 82. № 5. P. 432–440 [In Russ.].
12. Nikanorov A.M., Trofimchuk M.M., Peculiarities in thermodynamics of intra/basin processes in freshwater ecosystems under anthropogenic impact. *Doklady Akademii Nauk.*, 2010. Vol. 433. № 2. P. 254–256 [In Russ.].
13. Nikanorov A.M., Trofimchuk M.M., Thermodynamics of within-water processes in freshwater ecosystems under anthropogenic impact. *Water resources*. 2011. Vol. 38. №. 4. P. 454–463 [In Russ.].

14. Nikanorov A.M., Trofimchuk M.M., Metabolic power of aquatic ecosystems as a measure of their stability to external effects. *Dokl. Akad. Nauk.* 2013. Vol. 448. № 3 [In Russ.].
15. Trofimchuk M.M. On the possibility to assess the ecological state of aquatic ecosystems based on entropy. *Meteorology and hydrology.* 2018. №. 7. P. 80–86 [In Russ.].
16. Trofimchuk M. M. A method for assessing the ecological state of water bodies. Patent for invention No. 2721713 [In Russ.].
17. Trofimchuk M.M. Entropy index: new opportunities in assessing the ecological state of aquatic ecosystems. *Meteorology and hydrology.* 2020. № 11. P. 46–52 [In Russ.].

Сведения об авторе:

Трофимчук Михаил Михайлович, канд. биол. наук, директор ФГБУ «Гидрохимический институт», 344090, Россия, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 198; ORCID: 0009-0006-5025-5927; e-mail: m.trofimchuk@gidrohim.mecom.ru

About the author:

Mikhail M. Trofimchuk, Candidate of Biological sciences, Director, Hydro/chemical Institute, pr. Stachki, 198, Rostov-na-Donu, 344090, Russia; ORCID: 0009-0006-5025-5927; e-mail: m.trofimchuk@gidrohim.com

Технология моделирования и прогноза уровней воды на основе согласованных моделей река-море на примере устьевой области реки Дон

И.В. Землянов  , А.Е. Павловский , И.Ю. Милютинa ,
С.А. Кудряшов , О.В. Горелиц 

 ivz@geocentre.ru

ФГБУ «Государственный океанографический институт имени Н.Н.Зубова»,
Росгидромет, Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. В основе комплексной информационной технологии, разработанной специалистами ГОИН, лежит использование системы согласованных прогностических моделей река – море. Развитие данной технологии и ее применение на различных акваториях позволяет по результатам расчетов получать оценки текущего состояния морей и устьев рек и выполнять прогностические расчеты, что критически важно как при планировании хозяйственной деятельности, так и в случае возникновения чрезвычайных ситуаций. **Методы.** Проведена опытная эксплуатация расчетно-моделирующего комплекса «Дон-модель», предназначенного для краткосрочного прогнозирования уровней воды в судоходном рукаве р. Дон. В основе технологии лежит совместное использование современной гидродинамической модели устьевой области Дона с моделью циркуляции Азовского моря. **Результаты.** В статье приведена оценка достоверности прогноза, представлен анализ результатов прогностических расчетов за период эксплуатации в различных гидрологических условиях, выявлены основные источники возникновения ошибок, рассмотрено влияние качества описания предметной области и задания граничных условий на результаты расчетов, предложены направления повышения качества прогноза.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: морские устья рек, цифровые информационные технологии, гидродинамическое моделирование, устьевая область р. Дон, Азовское море, Таганрогский залив.

Финансирование: Работа выполняется в рамках темы 4.6.12 плана научно-исследовательских и технологических работ Росгидромета «Развитие моделей, методов и технологий мониторинга гидрохимического состояния и загрязнения морей России и оценки гидрологического и гидрохимического состояния морей и морских устьев рек».

Для цитирования: Землянов И.В., Павловский А.Е., Милютинa И.Ю., Кудряшов С.А., Горелиц О.В. Технология моделирования и прогноза уровней воды на основе согласованных моделей река-море на примере устьевой области реки Дон // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 2. С. 38–50. DOI: 10.35567/19994508-2024-2-38-50.

Дата поступления 29.12.2023.

SIMULATION AND WATER LEVELS FORECAST TECHNOLOGY BASED ON HARMONIZED RIVER-SEA MODELS ON THE EXAMPLE OF DON RIVER MOUTH AREA

Igor V. Zemlyanov  , Andrey E. Pavlovsky , Inga Y. Milyutina ,
Stanislav A. Kudryashov , Olga V. Gorelits 

 vz@geocentre.ru

“N.N.Zubov State Oceanographic Institute”, Roshydromet, Moscow, Russia

ABSTRACT

Relevance. The integrated information technology implemented in the Federal State Budgetary Institution “SOI” is based on the use of a system of harmonised river-sea forecast models. The development of this technology and its application in different water areas makes it possible to obtain estimates of the current state of seas and estuaries based on the results of calculations and to perform prognostic calculations, which is critically important both in planning economic activities and in case of emergencies. **Methods.** The results of experimental operation of the calculation–simulation complex “Don-model” designed for short-term forecasting of water levels in the navigable arm of the Don River are presented. The technology is based on the combination of the modern hydrodynamic model of the Don River mouth area with the circulation model of the Azov Sea. **Results.** The article provides an assessment of forecast reliability, presents an analysis of the results of prognostic calculations in different hydrological conditions for the period of operation, identifies the main sources of errors, considers the impact of the quality of the description of the subject area and the setting of boundary conditions on the results of calculations, and suggests ways to improve the quality of level forecasting.

Keywords: sea estuaries, digital information technologies, hydrodynamic simulation, Don River mouth area, the Sea of Azov, Taganrog Bay.

Financing: The work is carried out within the framework of theme 4.6.12 of Roshydromet’s plan of research and technological works “Development of models, methods and technologies for monitoring the hydrochemical state and pollution of Russian seas and assessment of hydrological and hydrochemical state of seas and marine estuaries”.

For citation: Zemlyanov I.V., Pavlovsky A.E., Milyutina I.Y., Kudryashov S.A., Gorelits O.V. Simulation and water levels forecast technology based on harmonized river-sea models on the example of Don River mouth area. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2024. No. 2. P. 38–50. DOI: 10.35567/19994508-2024-2-38-50.

Received 29.12.2023.

ВВЕДЕНИЕ

Ввиду активного освоения приморских территорий и прибрежных акваторий, строительства и эксплуатации гидротехнических сооружений, развития судоходства возрастает значение системного мониторинга состояния морской среды и устьев рек. Данные режимных наблюдений в прибрежной зоне морей и в морских устьях рек могут быть существенно дополнены в результате внедрения гидродинамических моделей диагноза и прогноза гидрологических параметров. Полученные при моделировании данные могут быть использованы для оценки текущего состояния морской среды, планирования морской деятельности, прогноза и предупреждения возникновения опасных гидрологических явлений.

Специалисты Государственного океанографического института имени Н.Н. Зубова (ГОИН) разрабатывают и совершенствуют методы и технологии анализа и расчета гидрологических характеристик для обеспечения экологической безопасности и безопасности мореплавания. В последние десятилетия важным дополнением методов наблюдения становятся технологии моделирования состояния морской среды и устьев рек. С 2018 г. ведутся работы по созданию собственного технологического комплекса, объединяющего гидродинамическую модель устьевой области р. Дон с моделью циркуляции Азовского моря. В результате

разработан расчетно-моделирующий комплекс (РМК) «Дон-модель» и создана автоматизированная технология подготовки и выпуска краткосрочного прогноза уровней в судоходном рукаве р. Дон, которая обеспечивает возможность оперативной ежедневной передачи результатов расчетов заинтересованным пользователям. Учитывая постоянный рост грузоперевозок морским и речным транспортом в регионе Нижнего Дона, совершенствование технологий прогнозирования уровней на судоходных путях представляется актуальной задачей.

В условиях интенсивного развития сгонно-нагонных колебаний на устьевом взморье и в дельте Дона прогноз уровней имеет важное значение при решении задач снижения негативного воздействия вод, обеспечения устойчивого функционирования водохозяйственной инфраструктуры, планирования прохождения судов по участкам судового хода с критическими глубинами в период навигации, снижения издержек по причине вынужденного простоя судов.

Вопросы гидрометеорологического обеспечения экономической деятельности в рассматриваемом регионе на основе методов численного и гидродинамического моделирования рассмотрены в исследованиях, сфокусированных на речной части – устьевом участке р. Дон [1–4], на морской части – Азовском море и Таганрогском заливе [5–8]. Примером совместного использования модели гидродинамики Азовского моря и модели дельты Дона служит программный комплекс Южного научного центра РАН для прогноза уровней затоплений при нагонах, работающий в оперативном полуавтоматическом режиме [9–11].

Разработанная в ГОИН комплексная технология также основана на интеграции модели гидротермодинамики Азовского моря [12] и гидродинамической модели устьевого участка р. Дон [13–14] с целью обеспечения непрерывного и оперативного режима прогнозирования уровней в навигационный период.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Технологический комплекс состоит из морской и устьевой подсистем моделирования. В основе морской подсистемы лежит расчет гидротермодинамики Азовского моря с помощью модели морской циркуляции INMOM (Institute of Numerical Mathematics Ocean Model) [15–17]. Для учета атмосферного воздействия используются прогностические метеорологические характеристики, рассчитываемые над акваторией Азовского моря по региональной атмосферной модели WRF (Weather Research and Forecast Model) [12]. Расчет параметров ветрового волнения производится на основе российской атмосферно-волновой модели (РАВМ) [17–18].

Модель циркуляции Азовского моря позволяет проводить диагностические расчеты состояния морской среды и составлять прогноз на трое суток скорости течения, уровней, температуры и солености воды, а также характеристик морского льда с пространственным разрешением 0,5 км. Поскольку процесс формирования экстремальных уровней воды в устьевой области Дона обусловлен особенностями атмосферной циркуляции [19–23], наличие в рамках технологического комплекса прогностической региональной модели атмосферы дает определенные преимущества по сравнению с другими решениями.

Основа устьевой подсистемы – расчетно-моделирующий комплекс «Дон-модель», предназначенный для выполнения диагностических и прогностических расчетов положения уровенной поверхности, скоростей течения и расходов воды в судоходном рукаве р. Дон. Современная гидродинамическая модель устьевой области Дона создана с использованием программного комплекса для гидродинамического моделирования DELFT-3D, свободно распространяемого программного обеспечения нидерландского независимого института прикладных исследований в сфере поверхностного и подземного стока Deltares¹. Моделирование гидродинамической структуры устьевой области проводится с помощью расчетного модуля DELFT-3D-FLOW, основанного на решении нестационарных уравнений мелкой воды.

В настоящее время верхняя граница расчетной области расположена в районе г. Аксай, нижняя граница проходит по устьевому взморью в 2 км западнее морского края дельты. Для построения цифровой модели рельефа (ЦМР) расчетной области использованы цифровые топографические карты масштаба 1:25 000, морские навигационные карты 1:50 000 для Таганрогского залива и 1:10 000 для судоходных рукавов дельты Дона и устьевое участка до г. Аксай, речные лоции из Атласа единой глубоководной системы европейской части РФ. Расчетная область описывается криволинейной сеткой с переменным шагом, которая позволяет выполнять вычисления с разной степенью подробности в различных районах. Пространственное разрешение сетки на устьевом участке реки (в русловой части и на пойме) составляет 10–50 м, на устьевом взморье изменяется в пределах 300–400 м в продольном направлении и 50–100 м в поперечном.

Расчет гидродинамической структуры устьевой области р. Дон проводится на основе сведений о расходах воды и прогноза хода уровня моря. При прогнозе на следующие сутки на верхней границе расчетной области задается расход воды, равный текущему расходу на гидрологическом посту (г/п) Раздорская. В узлах расчетной сетки на нижней (морской) границе расчетной области задаются спрогнозированные на следующие сутки уровни моря, интегрированные из модели циркуляции Азовского моря. При расчетах используется прогноз скорости и направления ветра в районе морского края дельты, в пределах расчетной области характеристики полей ветра принимаются однородными по пространству. Вычисление прогностических параметров осуществляется в каждом узле расчетной сетки. Результаты расчета уровней воды формируются для контрольных точек в судоходном рукаве р. Дон: Аксай, Ростов-на-Дону, Азов, а также на трассе Азово-Донского судоходного канала на морской границе расчетной области. Прогноз составляется с суточной заблаговременностью и часовой дискретностью.

Автоматизированная технология прогноза уровней в судоходном рукаве р. Дон подразумевает оперативный обмен данными между участниками опытной эксплуатации. Технологическая схема подготовки и выпуска прогноза состоит из следующих этапов:

¹ Delft3D open source software by Deltares. Официальный Интернет-портал свободно распространяемого программного обеспечения Delft3D Нидерландского независимого института прикладных исследований в сфере поверхностного и подземного стока Deltares. Режим доступа: <https://oss.deltares.nl/web/delft3d/>.

На высокопроизводительном вычислительном кластере в рамках морской подсистемы моделирования ежедневно производится прогноз гидрофизических параметров Азовского моря на ближайшие трое суток, включая текущие. После завершения расчетов в автоматическом режиме генерируется файл, содержащий прогноз хода уровня моря в узлах расчетной сети в выбранном створе стыковки морской и устьевой подсистем моделирования. Также формируется файл с прогностической информацией о полях ветра.

Отдел гидрологических прогнозов Ростовского гидрометцентра ежедневно направляет в ГОИН текущую информацию о расходе воды р. Дон на г/п Раздорская. Одновременно с этим ежедневно передаются данные наблюдений за уровнем воды на г/п Аксай, Ростов-на-Дону, Азов и мг/п Таганрог за предшествующие сутки для оценки достоверности прогноза.

В рамках РМК «Дон-модель» полученные данные о текущем расходе воды р. Дон преобразуются в начальные условия для моделирования. Результаты прогноза уровня Азовского моря на следующие сутки из файла морской подсистемы моделирования интерполируются в узлы расчетной сетки на нижней границе расчетной области устьевой подсистемы моделирования. Вместе с данными о ветре указанная информация используется в качестве входных данных в устьевой подсистеме моделирования, в рамках которой выполняются расчеты гидродинамической структуры устьевой области Дона.

Результаты расчета формируются в виде почасового прогноза уровня воды в судоходном рукаве р. Дон на следующие сутки в четырех контрольных точках: Аксай, Ростов-на-Дону, Азов, Азово-Донской морской судоходный канал. Расчетные данные автоматически пересылаются потребителям прогноза.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В 2021–2023 гг. специалисты ГОИН совместно с сотрудниками Северо-Кавказского УГМС проводили опытную эксплуатацию РМК «Дон-модель», в рамках которой были запущены прогностические расчеты в оперативном режиме, проведена проверка работоспособности программно-технологического комплекса, выявлены и устранены технические неполадки, налажен и автоматизирован процесс передачи данных, обеспечена оперативная доставка прогноза потребителям. Прогностические расчеты выполняли в безледный период.

Оценка достоверности выполняемых прогностических расчетов проведена согласно РД 52.27.759-2011 «Наставление по службе прогнозов»² на основе сравнения смоделированных уровней воды в контрольных точках с фактическими данными об уровнях воды на г/п Аксай, Ростов-на-Дону, Азов и мг/п Таганрог. При вычислениях ошибок прогноза использованы данные по указанным постам в стандартные и в дополнительные сроки наблюдений, а также ежечасные данные с автоматических гидрологических комплексов на г/п Азов и Ростов-на-Дону, что позволило расширить выборку и провести более точную оценку достоверности прогноза.

² РД 52.27.759–2011. Наставление по службе прогнозов. Разд. 3. Ч. III. Служба морских гидрологических прогнозов. М.: Триада ЛТД, 2011. 189 с.

В целом за период опытной эксплуатации модели в 2021–2023 гг. оправдываемость прогноза уровней в среднем для всех постов составила более 65 %, на морской границе – 70 %, в контрольных точках: Азов – 68 %, Ростов – 72 %, Аксай – 61 %. В весенне-летний период значения оправдываемости в основном близки к 80 % с вариациями в диапазоне 60–90 %. В осенний период отмечено снижение оправдываемости прогноза в среднем до 40 %.

Исходя из естественной суточной изменчивости уровней в пунктах наблюдений, колебавшейся в периоды опытной эксплуатации от 24 до 40 см, допустимые ошибки на разных постах составляли от 16 до 27 см. Среднегодовые абсолютные ошибки прогноза уровней за период эксплуатации были меньше допустимых, в среднем 17 см, а в разных контрольных точках изменялись в пределах 13–21 см. Среднемесячные абсолютные ошибки прогноза уровней весной и летом находились в пределах допустимого – в среднем 13 см, тогда как осенью отклонения стабильно превышали допустимые значения и составляли в среднем 25 см, достигая в разное время 30–33 см.

Результаты оценки оправдываемости прогноза за 2021 и 2022 г. более подробно представлены в статьях [13, 14]. Средняя оправдываемость прогноза в контрольных точках за апрель–ноябрь 2023 г.: морская граница – 80 %, Азов – 72 %, Ростов-на-Дону – 68 %, Аксай – 60 %. Сравнение результатов моделирования с натурными данными за период опытной эксплуатации в апреле–ноябре 2023 г. в графическом виде приведено на рисунке.

Среднемесячные абсолютные ошибки прогноза уровней в апреле–августе 2023 г. зафиксированы в диапазоне 6–18 см, а в сентябре–ноябре – 17–32 см, что превышало допустимые значения в контрольных створах. Причем, если в весенне-летний период положительные и отрицательные отклонения, в основном, компенсируют друг друга, осенью наблюдается систематическое превышение расчетных уровней над фактическими. Также отмечается снижение размаха сгонно-нагонных колебаний относительно естественного: смоделированные экстремальные значения уровней в среднем на 20–40 см отличаются от наблюдаемых. В контрольном створе Азов – наиболее близком к морскому краю дельты – такие отклонения наиболее значительны. По данным наблюдений, как сгоны, так и нагоны в створе Азова наступают раньше и распространяются быстрее и интенсивнее, чем это прогнозируется на основе моделирования. Величина колебаний уровня в створе Ростов-на-Дону снижается за счет распластывания волн сгонов и нагонов в пределах дельты, в Аксае влияние сгонно-нагонных колебаний становится еще меньше, и модель лучше воспроизводит их амплитуду.

Анализ характера ошибок прогноза уровней в судоходном рукаве Дона в разных гидрологических ситуациях в процессе опытной эксплуатации модели за несколько лет позволил выявить ряд факторов, влияющих на качество прогноза. К основным причинам ошибок моделирования относится точность граничных условий и качество описания расчетной области.

Расход воды на верхней границе моделирования в створе Аксай задается по данным о расходах воды в вершине устьевой области р. Дон – ст. Раздорская,

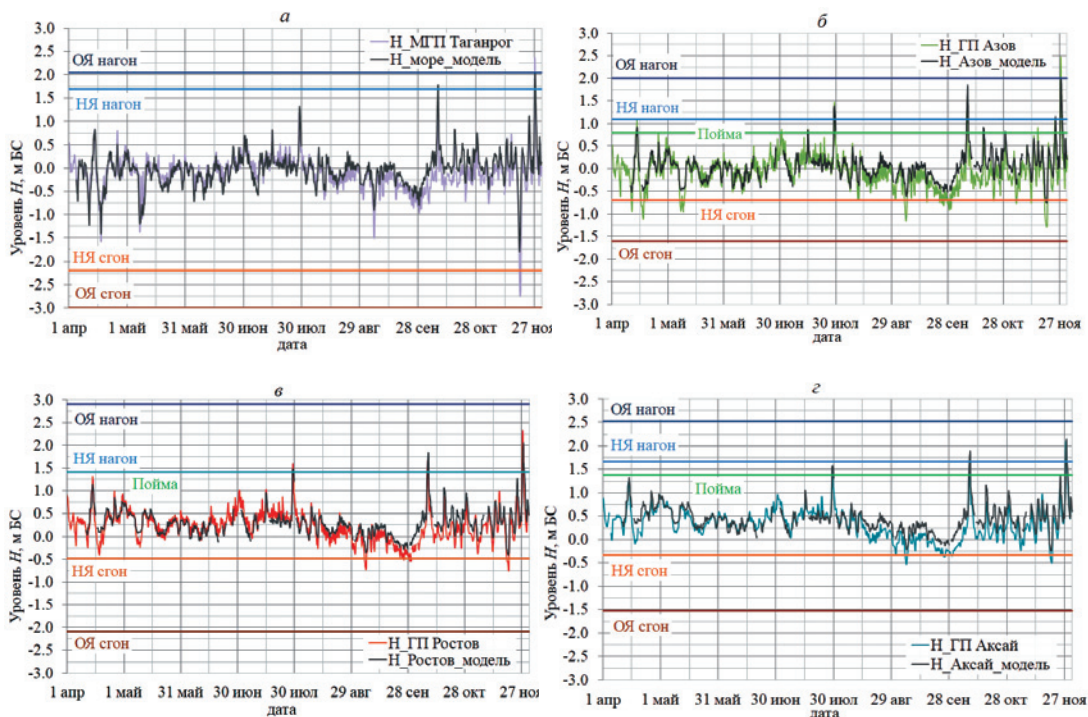


Рисунок. Наблюдаемые и спрогнозированные уровни воды за период опытной эксплуатации в 2023 г. в контрольных точках: *а* – морская граница / Таганрог; *б* – Азов; *в* – Ростов-на-Дону; *г* – Аксай. На графиках нанесены критические отметки уровней: ОЯ – опасное явление, НЯ – неблагоприятное явление, пойма – выход воды на пойму.

Fig. 1. Observed and predicted water levels for the experimental operation period in 2023 at the control points: *а* – sea border / Taganrog; *б* – Azov; *в* – Rostov-on-Don; *г* – Aksai. Critical marks of levels are plotted on the graphs: HE – hazardous event, AE – adverse event, floodplain – water outflow on the floodplain.

выше которой нагонные колебания уровня обычно не распространяются [22]. Использование данных по этому посту имеет ряд преимуществ. Во-первых, это минимизирует искажение значений расхода воды под влиянием сгонно-нагонных колебаний и согласуется с расчетным временем добега между створами. Во-вторых, замыкающий расходный пост бассейна учитывает суммарный приток как по основному руслу Дона после сбросов Цимлянского гидроузла, так и сток наиболее крупных притоков – рек Сал и Северский Донец. Приращение стока от ст. Раздорской принято равным нулю, как это было сделано в работах [4, 24].

При анализе результатов расчетов уровней воды на устьевом участке р. Дон за периоды опытной эксплуатации РМК «Дон-модель» отмечено несколько особенностей роли расхода воды, поступающего в устьевую область. Величина расхода воды оказывает наибольшее влияние на формирование уровня в основном русле Дона выше дельты – в Аксае и Ростове-на-Дону. Ход уровня в основном дельтовом рукаве Старый Дон в Азове в большей степени определяется колебаниями уровня моря. Данное наблюдение согласуется с аналогич-

ными выводами [4], полученными на основе расчетов для широкого диапазона расходов воды.

Влияние заданных расходов воды на верхней границе расчетной области на результаты моделирования было особенно заметно в период опытной эксплуатации в 2023 г. В процессе обработки результатов в связи с технологическими сбоями при передаче данных о расходах воды было забраковано 26 суток расчетов. На случай отсутствия текущей информации в рамках технологического комплекса предусмотрено задавать базовое фиксированное значение расхода $335 \text{ м}^3/\text{с}$ на верхней границе. Это обусловлено тем, что когда проводились пробные ретроспективные расчеты за март–ноябрь 2020 г. и начиналась опытная эксплуатация РМК «Дон-модель» в оперативном режиме в безледный период 2021–2022 гг., значения расходов воды на г/п Раздорская изменялись в пределах $200\text{--}520 \text{ м}^3/\text{с}$ и составили в среднем за период расчетов $338 \text{ м}^3/\text{с}$. Однако в апреле–ноябре 2023 г. средние расходы воды на г/п Раздорская составляли уже $663 \text{ м}^3/\text{с}$ и варьировали от 520 до $950 \text{ м}^3/\text{с}$. В результате неверно задаваемое значение расхода на верхней границе сильно влияло на гидрологическую структуру устьевого участка реки и расчетные уровни, особенно в Аксае и Ростове-на-Дону. Выявленные технологические проблемы были устранены в процессе эксплуатации, а при отсутствии данных в качестве входного условия теперь принимается предыдущее известное значение расхода воды.

Важную роль при сопряжении устьевой и морской моделей играет выбор створа их стыковки, в котором полученные по модели морской циркуляции данные прогноза уровней будут использоваться в качестве входных условий для устьевой подсистемы моделирования. В процессе опытной эксплуатации выявлено, что расположение нижней границы в 2 км западнее морского края дельты недостаточно для качественного воспроизведения динамики вод на устьевом взморье, особенно во время экстремальных сгонов, когда она оказывается в зоне осушки. Подготовлена новая расширенная расчетная сетка, включающая область до Таганрога, что позволит более точно моделировать отток воды с акватории устьевого взморья и даст наглядное представление о пространственных масштабах сгонов.

При использовании прогностической информации об уровнях моря в качестве входной информации для расчета гидродинамической структуры устьевой области выявлена проблема влияния ошибок прогноза уровня моря на качество итогового расчета. Ошибки прогноза уровней на устьевом участке реки наследуют ошибки морской модели: отмечается занижение амплитуды сгонно-нагонных колебаний уровня моря и периодические систематические отклонения среднего прогнозируемого уровня моря от фактического, особенно заметные в осенний период. Так, даже при правильной динамике хода спрогнозированных уровней моря, значительные отклонения средних значений существенно ухудшают оправдываемость прогноза. Такие ошибки могут быть вызваны как внутренними параметрами модели морской циркуляции и недоучетом факторов, оказывающих большее влияние в переходные сезоны, так и ошибками перевода результатов расчетов в Балтийскую систему высот.

Поскольку модель циркуляции Азовского моря изначально рассчитывает отклонение уровня моря от невозмущенной поверхности [12], необходимо провести дополнительные исследования возможности их оперативного и корректного приведения к Балтийской системе высот.

Качество описания расчетной области, в первую очередь, соответствие используемой ЦМР фактическим данным, является одним из важных факторов, влияющих на результаты моделирования, поскольку особенности рельефа определяют основные закономерности движения потока. В процессе анализа результатов расчетов определен ряд погрешностей гидродинамической модели устьевой области, не зависящих от условий на нижней границе и качества прогноза уровня моря.

Анализ полученных данных в разных гидрологических условиях показывает, что в модели существуют проблемы, связанные с распределением воды по рукавам дельты, которые усугубились в условиях повышенного стока 2023 г. по сравнению с предыдущими расчетными периодами. Наблюдается недостаточный отток воды по рукавам и протокам центральной и северной частям дельты в Таганрогский залив, что приводит к завышению уровней воды в основном дельтовом рукаве Старый Дон. Дополнительный анализ спутниковых снимков во время осенних сгонов 2019 и 2021 гг. позволил выявить области, где модель недостаточно точно воспроизводит гидравлическую связь между основными рукавами дельты Дона и водами Таганрогского залива на устьевом взморье. Причиной несоответствия результатов моделирования фактическим данным признана недостаточная подробность цифровой модели рельефа, на основе которой выполняются расчеты. Необходимо уточнение рельефа русловой сети рукавов и проток нижней дельты, для которых в настоящее время недостаточно данных о глубинах, а также основных гирл, устьевого бара и устьевого взморья на участке сопряжения речных вод с морскими.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный в Государственном океанографическом институте имени Н.Н.Зубова расчетно-моделирующий комплекс «Дон-модель», объединяющий гидродинамическую модель устьевой области Дон с моделью циркуляции Азовского моря, представляет собой прототип комплексной системы прогнозирования состояния морской среды и устьев рек. Опытная эксплуатация РМК «Дон-модель» в 2021–2023 гг. показала, что технология краткосрочного прогноза уровня судоходного рукава Дона успешно функционирует в оперативном режиме в составе комплексного прогнозирования уровня Азовского моря. Выявленные типичные ошибки при создании подобной системы могут быть учтены и устранены при дальнейших разработках совмещенных моделей устьевых областей рек.

К основным направлениям повышения качества прогноза уровня в устьевой области р. Дон следует отнести уточнение ЦМР в пределах расчетной области, выявление и устранение причин систематического завышения прогнозируемых значений уровней моря, более точное определение нижней границы области моделирования.

Перспективы развития РМК «Дон-модель» в составе комплексной технологии прогноза состояния Азовского моря связаны с использованием результатов прогноза уровня в судоходном рукаве р. Дон в качестве консультативного метода в Ростовском гидрометцентре, а также с доступностью оперативной информации для организаций, осуществляющих морскую деятельность и обеспечивающих навигацию.

Благодарности: Авторы выражают благодарность сотрудникам отдела гидрологических прогнозов Ростовского гидрометцентра Северо-Кавказского УГМС за активное участие в процессе опытной эксплуатации РМК «Дон-модель» и оперативный обмен данными.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беликов В.В., Борисова Н.М., Алексюк А.И., Румянцев А.Б., Глотко А.В., Шурухин Л.А. Гидравлическое обоснование проекта Багаевского гидроузла с применением численного гидродинамического моделирования // Гидротехническое строительство. 2018. № 5. С. 19–35.
2. Бубер А.А., Бубер А.А. Разработка гидродинамической модели Нижнего Дона // Современные проблемы развития мелиорации и пути их решения (Костяковские чтения): сб. трудов молодых ученых. М.: ВНИИГиМ, 2020. С. 100–106. DOI:10.37738/VNIIGIM.2020.17.94.018.
3. Чикин А.А., Клещенков А.В., Чикина Л.Г. Один из подходов к численному исследованию гидрологии дельтовой области Дона // Водные ресурсы. 2021. Т. 48. № 5. С. 492–499. DOI:10.31857/S0321059621050072.
4. Чикин А.А., Клещенков А.В., Чикина Л.Г. Численное исследование влияния расхода воды на уровенный режим в устьевой области Дона // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35. № 4. С. 355–366. DOI:10.22449/0233-7584-2019-4-355-366.
5. Филиппов Ю.Г. О влиянии стока р. Дон на уровень воды в Таганрогском заливе // Метеорология и гидрология. 2015. № 2. С. 76–80.
6. Филиппов Ю.Г. Свободные колебания уровня Азовского моря // Метеорология и гидрология. 2012. № 2. С. 78–82.
7. Попов С.К., Лобов А.А. Краткосрочные прогнозы колебаний уровня Азовского моря в безледный период 2017 года // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 3 (369). С. 104–118.
8. Фомин В.В., Полозок А.А., Фомина И.В. Моделирование циркуляции вод Азовского моря с учетом речного стока // Морской гидрофизический журнал. Севастополь. 2015. № 1. С. 16–28.
9. Шевердяев И.В., Бердников С.В., Клещенков А.В. Применение программного комплекса NES-RAS для моделирования гидрологического режима дельты Дона // Экология. Экономика. Информатика. Сер. Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. 2017. Т. 1. № 2. С. 113–122. DOI:10.23885/2500-395X-2017-1-2-113-122.
10. Шевердяев И.В., Клещенков А.В., Третьякова И.А. Опыт гидрологического моделирования нагонов в дельте Дона // Наука Юга России. 2019. Т. 15. № 3. С. 54–62. DOI:10.7868/S25000640190306.
11. Berdnikov S.V., Dashkevich L.V., Kulygin V.V., Sheverdyayev I.V., Tretyakova I.A., Yaitskaya N.A. EX-MARE – forecasting system of natural hazards in the Azov sea region // Geography, Environment, Sustainability. 2018. Vol. 11. No. 2. P. 29–45. DOI: 10.24057/2071-9388-2018-11-2-29-45.
12. Фомин В.В., Дианский Н.А. Расчет экстремальных нагонов в Таганрогском заливе с использованием моделей циркуляции атмосферы и океана // Метеорология и гидрология. 2018. № 12. С. 69–80.
13. Землянов И.В., Павловский А.Е., Милютин И.Ю., Горелиц О.В., Сапожникова А.А. Краткосрочный прогноз уровней воды в устьевой области р. Дон на основе гидродинамического моделирования // Водные ресурсы. 2022. Т. 49. № 5. С. 596–607. DOI: 10.31857/S0321059622050170.
14. Землянов И.В., Милютин И.Ю., Павловский А.Е., Фомин В.В., Дианский Н.А., Кудряшов С.А. Прогноз уровня в судоходном рукаве устьевой области р. Дон на основе

- согласованных гидродинамических моделей река-море // Водные ресурсы в условиях глобальных вызовов: экологические проблемы, управление, мониторинг: сб. трудов Всероссийской научно-практ. конф. Т. 1. Южный федеральный университет. Новочеркасск: Лик, 2023. С. 265–271.
15. Гусев А.В., Дианский Н.А. Воспроизведение циркуляции Мирового океана и ее климатической изменчивости в 1948–2007 гг. с помощью модели INMOM // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2014. Т. 50. № 1. С. 3–15. DOI:10.7868/S0002351513060072.
 16. Дианский Н.А. Моделирование циркуляции океана и исследование его реакции на короткопериодные и долгопериодные атмосферные воздействия. М.: Физматлит, 2013. 272 с.
 17. Дианский Н.А., Фомин В.В., Кабатченко И.М., Грузинов В.М. Воспроизведение циркуляции Карского и Печорского морей с помощью системы оперативного диагноза и прогноза морской динамики // Арктика: экология и экономика. 2014. № 1 (13). С. 57–73.
 18. Кабатченко И.М., Матушевский Г.В., Резников М.В., Заславский М.М. Моделирование ветра и волн при вторичных термических циклонах на Черном море // Метеорология и гидрология. 2001. № 5. С. 61–71.
 19. Поляков Б.В. Гидрология бассейна реки Дона. Волго-Донская водная магистраль. Проект 1927–1928 гг. Вып. VIII / под ред. А.С. Аксамитного. Ростов-на-Дону: Изд-во Управления главного инженера строительства Волго-Дона, 1930. 331 с.
 20. Родионов Н.А. Гидрология устьевой области Дона. М.: Гидрометеиздат, 1958. 96 с.
 21. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Проект «Моря СССР». Т. V. Азовское море / под ред. Ф.С. Терзиева. СПб.: Гидрометеиздат, 1991. 236 с.
 22. Михайлов В.Н. Устья рек России и сопредельных стран: прошлое, настоящее и будущее. М.: ГЕОС, 1997. 413 с.
 23. Скриптунов Н.А., Горелиц О.В. О сгонно-нагонных колебаниях уровня воды в устьях рек // Водные ресурсы. 2001. Т. 28. № 2. С. 196–202.
 24. Симов В.Г., Дьяков Н.Н., Шевела Л.А. Приток речных вод в Азовское море // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2010. № 23. С. 145–152.

REFERENCES

1. Belikov V.V., Borisova N.M., Aleksuk A.I., Rumyancev A.B., Glotko A.V., Shuruhin L.A. Hydraulic justification of the Bagaevsky HPP project based on numerical hydrodynamic modelling. *Hydraulic engineering*. 2018. No. 5. P. 16–35 [In Russ.].
2. Buber A.A., Buber A.L. Development of a hydrodynamic model of the lower Don. Modern problems of land reclamation development and ways of their solution (Kostyakov readings). *Materials of the conf. forum of young scientists*. Moscow: VNIIGIM, 2020. P. 100–106. DOI:10.37738/VNIIGIM.2020.17.94.018 [In Russ.].
3. Chikin A.L., Kleshchenkov A.V., Chikina L.G. An approach to numerical studies of the hydrology of Don Delta area. *Water Resources*. 2021. Vol. 48. № 5. P. 492–499. DOI:10.31857/S0321059621050072 [In Russ.].
4. Chikin A.L., Kleshchenkov A.V., Chikina L.G. Numerical study of the water flow effect on the water level in the Don Mouth. *Marine Hydro/physics Journal*. 2019. Vol. 35, № 4. pp. 355–366. DOI:10.22449/0233-7584-2019-4-355-366 [In Russ.].
5. Philippov Yu.G. About the Don River runoff influence on the water level in the Taganrog Bay. *Meteorology and Hydrology*. 2015. No. 2. P. 76–80 [In Russ.].
6. Philippov Yu.G. Free fluctuations of the Azov Sea level. *Meteorology and Hydrology*. 2012. № 2. P. 78–82 [In Russ.].
7. Popov S.K., Lobov A.L. Short-term forecasts of the Azov Sea level variations during the iceless period in 2017. *Hydro/meteorological researches and forecasts*. 2018. № 3 (369). P. 104–118 [In Russ.].
8. Fomin V.V., Polozok A.A., Fomina I.N. Simulation of the Azov Sea water circulation taking into account river flow. *Marine hydro/physical Journal. Sevastopol*, 2015. No. 1. P. 16–28 [In Russ.].
9. Sheverdyayev I.V., Berdnikov S.V., Kleshchenkov A.V. HEC-RAS using for hydrologic regime modeling on the Don's delta. *Ecology. Economics. Informatics. Ser. System analysis and modelling of economic and ecological systems*. 2017. Vol. 1. № 2. P. 113–122. DOI: 10.23885/2500-395X-2017-1-2-113-122 [In Russ.].

10. Sheverdyaev I.V., Kleshchenkov A.V., Tretyakova I.A. The hydrological modeling of surges at the delta of the river Don. *Science in the South of Russia*. 2019. Vol. 15. № 3. P. 54–62. DOI:10.7868/S25000640190306 [In Russ.].
11. Berdnikov S.V., Dashkevich L.V., Kulygin V.V., Sheverdyaev I.V., Tretyakova I.A., Yaitskaya N.A. EX-MARE– forecasting system of natural hazards in the Azov sea region. *Geography, Environment, Sustainability*. 2018. Vol. 11. № 2. P. 29–45. DOI:10.24057/2071-9388-2018-11-2-29-45 [In Russ.].
12. Fomin V.V., Dianskii N.A. Calculation of extreme surges in the Taganrog Bay using atmospheric and ocean circulation models. *Meteorology and Hydrology*. 2018. № 12. P. 69–80 [In Russ.].
13. Zemlyanov I.V., Pavlovsky A.E., Milyutina I.Yu., Gorelits O.V., Sapozhnikova A.A. Short-term forecast of water levels in Don Mouth area using hydrodynamic simulation. *Water Resources*. 2022. Vol. 49. № 5. P. 596–607. DOI: 10.31857/S0321059622050170 [In Russ.].
14. Zemlyanov I.V., Milyutina I.Yu., Pavlovsky A.E., Fomin V.V., Dianskii N.A., Kudryashov S.A. Level forecast in the navigable arm of the Don mouth based on coordinated river-sea hydrodynamic models. *Water Resources under Global Challenges: Environmental Problems, Management, Monitoring: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation in 2 vol. Vol. 1. Water resources under global challenges: environmental problems, management, monitoring*. Southern Federal University. Novocherkassk: Lik, 2023. P. 265–271 [In Russ.].
15. Gusev A.V., Dianskii N.A. Reproducing the World Ocean Circulation and its climatic variability for 1948-2007 by INMOM model. *Physics of the Atmosphere and Ocean*. 2014. Vol. 50. № 1. P. 3–15. DOI:10.7868/S0002351513060072 [In Russ.].
16. Dianskii N.A. Ocean circulation modelling and study of its response to short- and long-period atmospheric forcing. Moscow: Fizmatlit, 2013. 272 p. [In Russ.].
17. Dianskii N.A., Fomin V.V., Kabatchenko I.M., Gruzinov V.M. Reproduction of the Kara and Pechora Seas circulation using the system of operational diagnosis and forecast of marine dynamics. *Arctic: Ecology and Economics*. 2014. №1 (13). P. 57–73 [In Russ.].
18. Kabatchenko I.M., Matushevsky G.V., Reznikov M.V., Zaslavsky M.M. Modeling of wind and waves during secondary thermal cyclones in the Black Sea. *Meteorology and Hydrology*. 2001. № 5. P. 61–71 [In Russ.].
19. Polyakov B.V. Hydrology of the Don River Basin. Volga-Don waterway. Project 1927-1928. Vol. VIII / ed. by A.S. Aksamitniy. Rostov: Chief Engineer Office of the Volga-Don construction, 1930. 331 p. [In Russ.].
20. Rodionov N.A. Hydrology of the Don mouth area. Moscow: Hydromet, 1958. 96 p. [In Russ.].
21. Hydrometeorology and hydrochemistry of the USSR seas. Project “Seas of the USSR”. Vol.V. Azov sea / ed.by F.S. Terziev. SPb.: Hydromet, 1991. 236 p. [In Russ.].
22. Mikhailov V.N. River estuaries of Russia and neighbouring countries: past, present and future. M.: GEOS, 1997. 413 p. [In Russ.].
23. Skriptunov N.A., Gorelits O.V. About runoff and surge fluctuations of water level in river mouths. *Water Resources*. 2001. Vol. 28. № 2. P. 196–202 [In Russ.].
24. Simov V.G., Dyakov N.N., Shevela L.A. River water inflow to the Azov Sea. *Environmental safety of coastal and shelf zones and integrated use of shelf resources*. 2010. № 23. P. 145–152.

Сведения об авторах:

Землянов Игорь Владимирович, канд. физ.-мат. наук, заместитель директора, ФГБУ «Государственный океанографический институт имени Н.Н.Зубова», 119034, Россия, Москва, Кропоткинский переулок, д. 6; ORCID: 0000-0001-5652-512X; e-mail: ivz@geocentre.ru

Павловский Андрей Евгеньевич, канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник, ФГБУ «Государственный океанографический институт имени Н.Н.Зубова», 119034, Россия, Москва, Кропоткинский переулок, д. 6; ORCID: 0009-0002-6749-444X; e-mail: pae2001@yandex.ru

Милютина Инга Юрьевна, младший научный сотрудник, ФГБУ «Государственный океанографический институт им. Н. Н. Зубова», 119034, Россия, Москва, Кропоткинский переулок, д. 6; ORCID: 0009-0007-0601-0735; e-mail: lynx-inga@rambler.ru;

Кудряшов Станислав Александрович, ведущий инженер, ФГБУ «Государственный океанографический институт имени Н.Н.Зубова», 119034, Россия, Москва, Кропоткинский переулок, д. 6; ORCID: 0009-0007-8736-9554; e-mail: trsh@inbox.ru;

Горелиц Ольга Владимировна, старший научный сотрудник, ФГБУ «Государственный океанографический институт им. Н. Н. Зубова», 119034, Россия, Москва, Кропоткинский переулок, д. 6; ORCID: 0000-0002-1419-9036; e-mail: gorelits@mail.ru;

About the authors:

Igor V. Zemlyanov, Candidate of Physical/mathematical Sciences, Deputy Director, N.N. Zubov State Oceanographic Institute (SOI), Kropotkinskiy per., 6, Moscow 119034, Russia. ORCID: 0000-0001-5652-512X; e-mail: ivz@geocentre.ru; phone: +7 (499) 246 64 48

Andrey E. Pavlovsky, Candidate of Physical/mathematical Sciences, Chief Researcher, N.N. Zubov State Oceanographic Institute (SOI), Kropotkinskiy per., 6, Moscow 119034, Russia. ORCID: 0009-0002-6749-444X; e-mail: pae2001@yandex.ru;

Inga Y. Milyutina, Junior Researcher, N.N. Zubov State Oceanographic Institute (SOI), 119034, Russia, Moscow, Kropotkinskiy Lane, 6. ORCID: 0009-0007-0601-0735; e-mail: lynx-inga@rambler.ru;

Stanislav A. Kudryashov, Leading Engineer, Zubov's State Oceanographic Institute (SOI), Kropotkinskiy per., 6, Moscow 119034, Russia. ORCID: 0009-0007-8736-9554; e-mail: trsh@inbox.ru;

Olga V. Gorelits, Senior Researcher, Zubov's State Oceanographic Institute (SOI), Kropotkinskiy per., 6, Moscow 119034, Russia. ORCID: 0000-0002-1419-9036; e-mail: gorelits@mail.ru.

Разработка комплекса мероприятий по защите населенных пунктов от затопления в нижнем течении реки Печоры

С.А. Мирошниченко¹  , А.И. Лучников^{1,2} , С.А. Лепешкин¹ ,
Д.И. Перепелица² , А.А. Тиунов² 

 kama2100@mail.ru

¹ ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Камский филиал, г. Пермь, Россия

² Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь, Россия

АННОТАЦИЯ







Актуальность. Практически ежегодно населенные пункты, расположенные в пойме р. Печоры подвергаются негативному воздействию вод. Наиболее значительный материальный ущерб наносится территориям при прохождении весеннего половодья. Для защиты населения от негативного воздействия вод разработаны на основе проведения комплексного исследования территории научно обоснованные рекомендации. **Методы.** В рамках комплексного исследования выполнено пространственно-временное обобщение характеристик гидрологического режима р. Печоры с учетом современной гидрометеорологической информации. Сформирована единая база данных картографической и гидрологической информации, выполнено компьютерное моделирование (гидродинамическая модель участка нижнего течения р. Печоры). Определена сметная стоимость предлагаемых противопаводковых мероприятий и их эффективность. **Результаты.** На основе проведенного исследования рекомендован комплекс противопаводковой защиты населенных пунктов, расположенных в нижнем течении р. Печоры.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: негативное воздействие вод, нижнее течение р. Печоры, противопаводковые мероприятия.

Для цитирования: Мирошниченко С.А., Лучников А.И., Лепешкин С.А., Перепелица Д.И., Тиунов А.А. Разработка комплекса мероприятий по защите населенных пунктов от затопления в нижнем течении реки Печоры // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 2. С. 51–66. DOI: 10.35567/19994508-2024-2-51-66.

Дата поступления 25.01.2024.

DEVELOPMENT OF A SET OF MEASURES TO PROTECT AGAINST FLOODING SETTLEMENTS LOCATED IN THE LOWER REACHES OF THE PECHORA RIVER

Sergei A. Miroshnichenko¹  , Anton I. Luchnikov^{1,2} , Sergei A. Lepeshkin¹ ,
Dmitry I. Perepelitsa² , Alexey A. Tiunov² 

 kama2100@mail.ru

¹ Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection Kama Branch, Perm, Russia

² Perm Federal Research Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia

© Мирошниченко С.А., Лучников А.И., Лепешкин С.А., Перепелица Д.И., Тиунов А.А., 2024

ABSTRACT

Relevance. Almost every year, settlements located in the floodplain of the Pechora River are negatively affected by water. The most serious material damage is caused to these settlements as a result of their flooding during the passage of the spring flood. To protect them from flooding, it was necessary to develop scientifically sound recommendations based on a comprehensive study. **Methods.** As part of a comprehensive study, a spatial and temporal generalization of the characteristics of the hydrological regime of the Pechora River was performed, taking into account modern hydrometeorological information; the formation of a unified database of cartographic and hydrological information (including the results of field research and archival materials and DDZ); computer modeling (hydrodynamic model of the lower reaches of the river Pechora), as well as the estimated cost of the proposed flood control measures, which make it possible to determine the effectiveness of measures for the engineering protection of territories from the negative effects of water. **Results.** Based on the conducted research, a flood protection complex for settlements located in the lower reaches of the Pechora River was recommended, consisting of engineering, administrative and preventive measures.

Keywords: water negative impact, the Pechora River lower reaches, measures against flood.

For citation: Miroshnichenko S.A., Luchnikov A.I., Lepeshkin S.A., Perepelitsa D.I., Tiunov A.A. Development of a set of measures to protect against flooding settlements located in the lower reaches of the Pechora River. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2024. No. 2. P. 51–66. DOI: 10.35567/19994508-2024-2-51-66.

Received 25.01.2024.

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с Водным кодексом Российской Федерации¹ под негативным воздействием вод понимается затопление, подтопление территорий или разрушение берегов водных объектов. Временные затопления населенных пунктов, расположенных в пойменной части рек на незарегулированных участках, происходят в результате подъема уровня вод в период весеннего половодья. Рассматриваемая проблема является наиболее актуальной для северных территорий нашей страны.

Для северных рек значительное повышение уровня воды в период прохождения весеннего половодья, прежде всего, связано с большим количеством снеготаяния, накопленных в холодный период, и дружностью снеготаяния, а также наличием заторных явлений, характерных для многоводных северных рек, текущих с юга на север. Заторы льда формируют самые опасные и повторяющиеся наводнения. Они усиливают подъем уровня в русле, что способствует выходу речных вод на пойму и затоплению расположенных на ней объектов. Интенсивный ледоход, навалы льда на берегах, давление ледяных масс на сооружения приводят к значительному материальному ущербу.

За период весеннего половодья длительностью 50–60 дней (с конца апреля по середину июня) может проходить до 70 % всего годового стока реки. В результате прохождения весеннего половодья редкой обеспеченности при затоплении населенных пунктов возникает угроза безопасности населению, на-

¹ Водный кодекс Российской Федерации. ФЗ от 03.06.2006 г. № 74-ФЗ (ред. от 25.12.2023) (с изм. и доп., вступ. в силу с 30.12.2023) [Электр. ресурс]. Режим доступа: Водный кодекс РФ от 3 июня 2006 г. № 74-ФЗ. ГАРАНТ (garant.ru) (дата обращения 02.02.2024).

носятся ущерб объектам экономики. Периодические затопления, сравнимые со стихийным бедствием, характерны и для крупнейшей на северо-востоке Европейской территории России реки – Печоры. Для разработки научно обоснованных рекомендаций по предотвращению негативного воздействия вод для нижнего течения р. Печоры сотрудниками Камского филиала ФГБУ РосНИИВХ в 2020–2022 гг. выполнена по заданию Двинско-Печорского БВУ научно-исследовательская работа.

Река Печора берет начало на западном склоне Северного Урала, протекает по Печорской низменности в северо-западном направлении и впадает в Печорскую губу Баренцева моря (бассейн Северного Ледовитого океана). Общая длина реки составляет 1809 км, площадь водосбора – 322 000 км², средний годовой расход воды в устье – 4120 м³/с.

На рис. 1 представлена область проведенного исследования – участок р. Печоры в нижнем течении протяженностью 425 км по судовому ходу, от с. Усть-Цильма до устья реки. Здесь р. Печора протекает по территории двух субъектов Российской Федерации – Республика Коми (Усть-Цилемский муниципальный район) и Ненецкий автономный округ (Заполярный муниципальный район). На исследуемом участке выявлено 34 населенных пункта, подверженных негативному воздействию вод, в т. ч. административный центр Ненецкого автономного округа – г. Нарьян-Мар.

Случаи негативного воздействия вод на территориях данных населенных пунктов подтверждены материалами МЧС и администрациями поселений.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для решения задачи по разработке научно обоснованных рекомендаций проведено комплексное исследование, включающее анализ фондовых материалов, в т. ч. многолетних рядов наблюдений за водным и ледовым режимами, полевые изыскания и натурные обследования, картографические работы, гидродинамическое моделирование.

Выполненная научно-исследовательская работа состояла из четырех этапов. В ходе первого были сформированы запросы в различные ведомства и федеральные структуры (МЧС, Северное УГМС, Двинско-Печорское БВУ, администрации сельсоветов) для согласования и получения разрешений на проведение работ, а также предоставление архивных материалов, гидрометеорологических данных. Согласована с Двинско-Печорским БВУ программа комплексных инженерно-геодезических и инженерно-гидрологических изысканий, составлена физико-географическая характеристика района работ. Собрана и проанализирована необходимая гидрометеорологическая информация.

В ходе второго этапа на территории 34 населенных пунктов, расположенных в затапливаемой пойме р. Печоры, проведен комплекс полевых исследований. Изыскания выполнялись с целью получения достоверной и актуальной информации об участках разрушения берегов, о максимальных уровнях подъема вод в периоды весеннего половодья, морфометрических характеристиках реки. Для этого были проведены геодезические работы по планово-высотной привязке

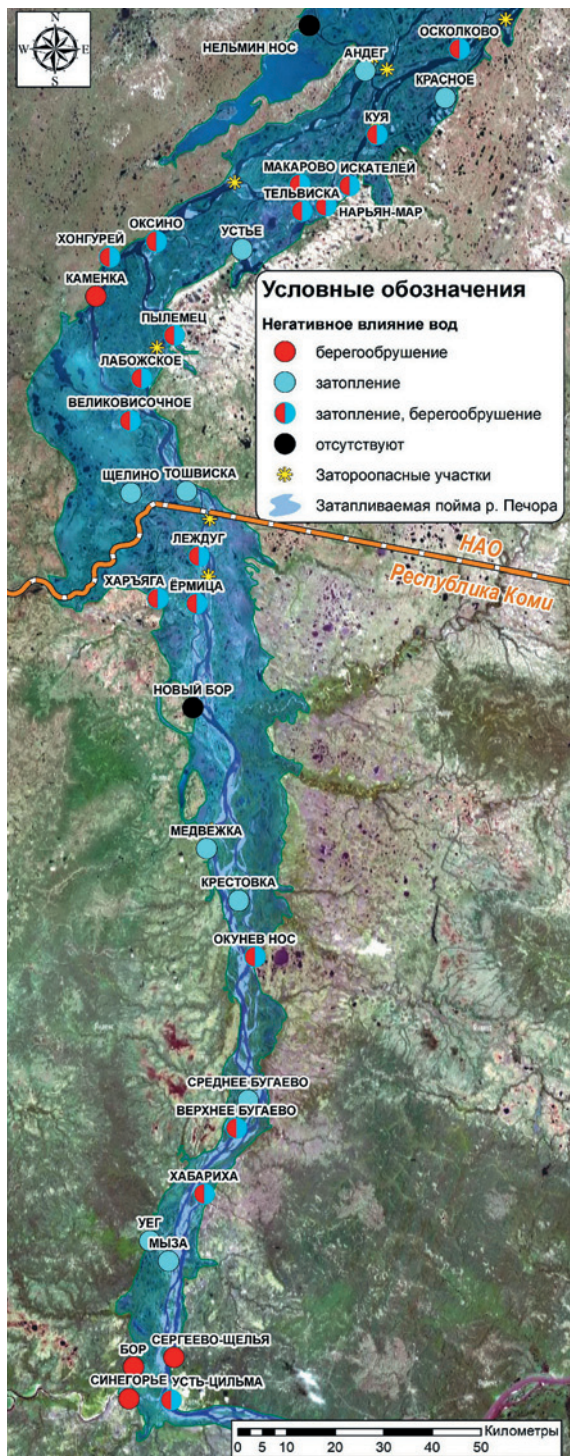


Рис. 1. Участок исследования в нижнем течении р. Печоры.
 Fig. 1. The study area of the lower course of the Pechora River.

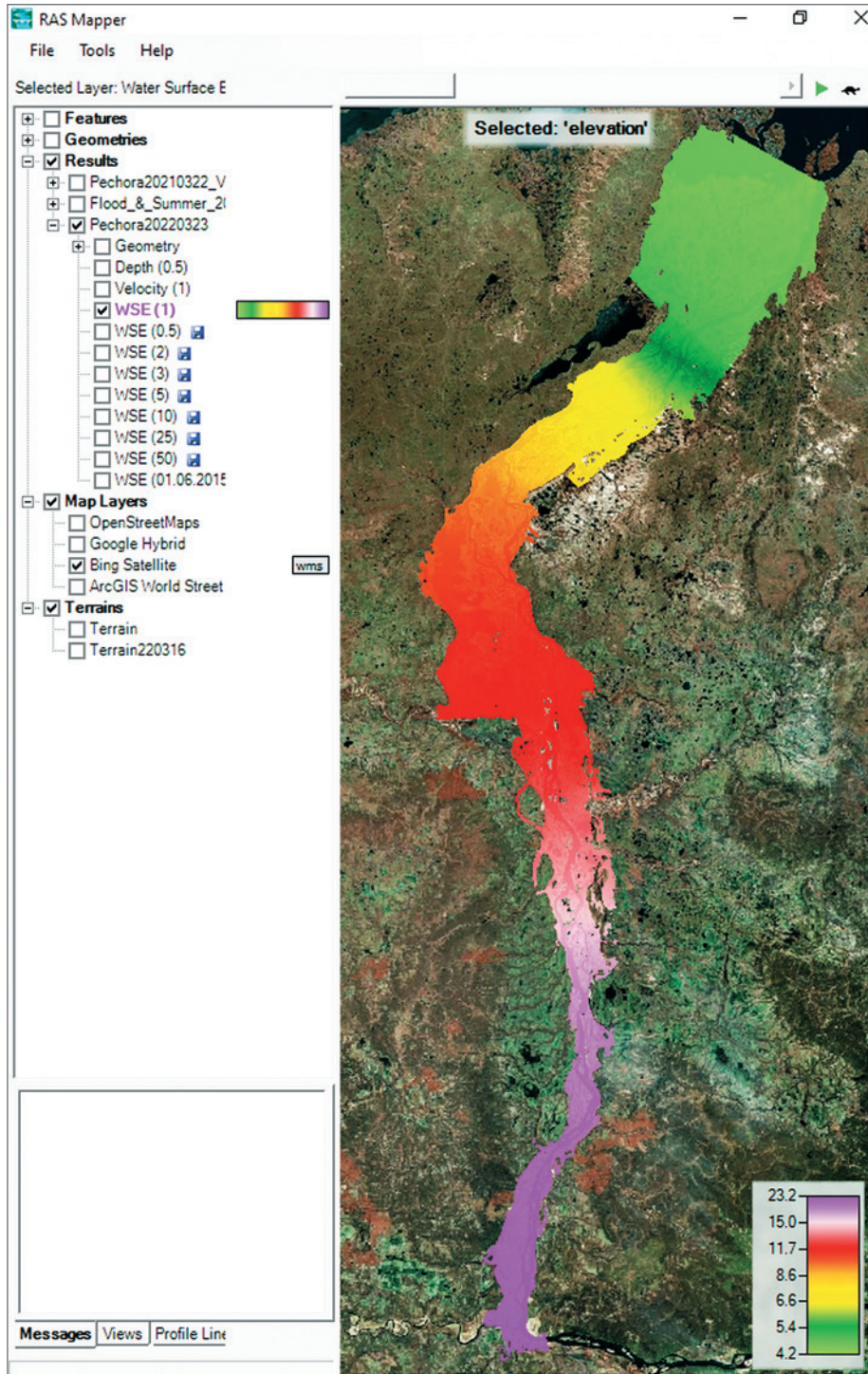


Рис. 2. Картограмма участка исследования на р. Печора в программном модуле HEC-RAS.
 Fig. 2. Cartography of the research site on the Pechora River in the software module HEC-RAS.

обследуемых участков, рекогносцировочные обследования береговой зоны, гидрографические и гидрометрические работы, а также опросы местных жителей. В ходе изысканий отработана методика получения детальных цифровых моделей рельефа (для расчета зон затопления) и ортофотопланов местности (для актуализации ситуационных планов) на достаточно протяженных участках с жилой застройкой с применением современного геодезического оборудования, включая использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [1].

Полученные материалы (более 2000 га аэрофотосъемки), а также актуальные данные ДЗЗ (DEM), карты судового хода (лоции) послужили основой для разработки гидродинамической модели (рис. 2) в одномерной постановке (HEC-RAS). Необходимость использования гидродинамической модели, в первую очередь, была определена огромной протяженностью участка исследования, а также разреженностью сети стационарных гидрологических постов Росгидромета. Модель позволила рассчитать наивысшие уровни воды различной обеспеченности в населенных пунктах, не охваченных гидрологическими наблюдениями.

Третий этап исследования был посвящен анализу современного водного режима р. Печоры и русловых процессов. По материалам наблюдений за гидрологическим режимом реки на стационарных постах сети Росгидромета

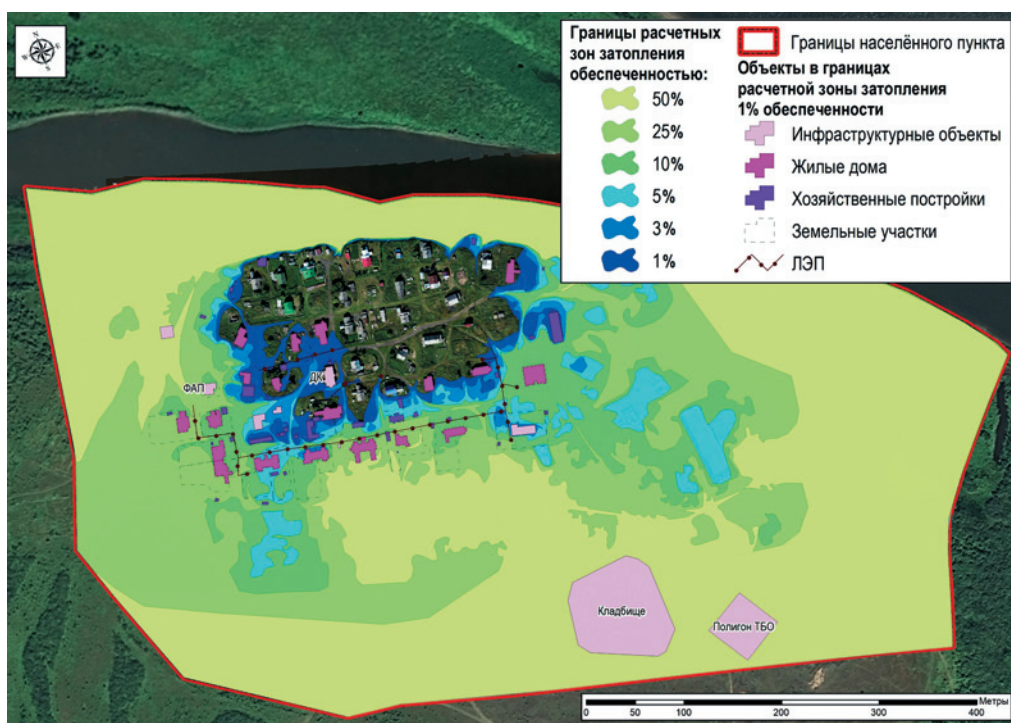


Рис. 3. Пример картосхемы расчетных зон затопления при прохождении весеннего половодья для д. Куя, Ненецкий автономный округ.

Fig. 3. An example of cartographic diagram of calculated flooding zones during the passage of the spring flood for the village of Kuya, Nenets Autonomous Okrug.

(Северное УГМС) с учетом современных данных до 2021 г. выполнены расчеты основных гидрологических характеристик, в т. ч. обеспеченных значений уровней и расходов воды весеннего половодья. В соответствии с требованиями СП 33-101-2003 все ряды проверены на однородность. По результатам анализа данных Северного УГМС (табл. 1) получены следующие основные выводы:

– волна половодья на р. Печоре имеет сложный, распластаный во времени вид, что определяет формирование высших уровней за год как при ледоходе, так и в условиях свободного русла;

– по данным наблюдений высшие уровни формировались за период с ледовыми явлениями в 19 % случаев на верхнем участке исследования (район с. Усть-Цильма), в 47–71 % случаев в центральной части (участок в районе с. Ёрмицы и с. Оксино), в 48–94 % случаев в нижней части (участок в районе г. Нарьян-Мар и д. Осколково);

– наиболее затороопасен участок р. Печоры вблизи с. Ёрмицы, где повторяемость заторов льда достигает 53 %. Здесь высший уровень за год примерно в половине случаев формируется при открытой воде, в половине – при тех или иных ледовых явлениях, при этом наибольших значений высшие уровни воды достигают при ледоходе или заторе льда.

Таблица. 1. Условия формирования высших уровней воды на р. Печоре

Table 1. Conditions for the formation of higher water levels on the Pechora River

Гидрологический пост, период наблюдений	Расстояние от устья, км	Затор		Ледоход		Чисто	
		P, %	Средний/высший уровень, см	P, %	Средний/высший уровень, см	P, %	Средний/высший уровень, см
с. Усть-Цильма, 1951–2021 гг.	425	1	774/774	18	888/1018	81	976/1219
с. Ёрмицы, 1951–2021 гг.	236	31	990/1124	16	993/1125	53	957/1099
с. Оксино, 1951–1964 гг., 1976–2017 гг.	141	16	699/773	55	705/846	29	681/816
г. Нарьян-Мар, 1981–2021 гг.	100	0	—	48	545/672	30	517/647
д. Андег, 1981–2021 гг.	53	3	531/531	88	557/667	9	488/535
д. Осколково, 1981–2021 гг.	53	0	—	94	572/696	6	534/537

Анализ материалов ДЗЗ, актуальных ортофотопланов и результатов рекогносцировочных обследований позволил выявить участки берегоразрушения в границах 22 населенных пунктов. Для этих населенных пунктов составлены картосхемы положения берега через 25 лет (прогнозные оценки)

с описанием объектов жилой застройки и инфраструктуры, попадающих в зону возможного обрушения.

На основе разработанной для всего участка исследования численной гидродинамической модели р. Печоры рассчитаны уровни и определены границы зон затопления при прохождении весеннего половодья 1 %, 3 %, 5 %, 10 %, 25 % и 50 % обеспеченности. Составлены картосхемы расчетных зон затопления (рис. 3) для всех населенных пунктов с отображением актуальных сведений о жилой застройке и объектах инфраструктуры.

Для каждого населенного пункта проведена оценка вероятностного ущерба от затопления для объектов экономики и жилищно-коммунального хозяйства на основе Методики². Вероятный прогнозный ущерб рассчитан по формуле (1) пункта 1.15 Методики:

$$Y_n = \sum Z_i \times P \times K_n, \quad (1)$$

где $\sum Z_i$ – сумма затрат или удельный показатель стоимости ущерба, нанесенного территориям и объектам паводками различной обеспеченности, в расчете на 1 га затопляемой площади, млн руб. в ценах 2005 г.;

P – площадь, подверженная негативному воздействию вод, га;

K_n – индекс-дефлятор.

Обобщение результатов по расчетным зонам затопления и накопленной информации выполнялось в разработанном едином ГИС-проекте. Результаты расчетов с использованием геоинформационной системы показали, что величина прогнозного ущерба по всем населенным пунктам для паводка 1 % обеспеченности составляет порядка 26 500 млн руб., в т. ч. по населенным пунктам Республики Коми – 2 100 млн руб. (табл. 2). Наибольшему ущербу от затопления могут быть подвержены населенные пункты Ненецкого автономного округа: г. Нарьян-Мар (~ 13 500 млн руб.), Рабочий поселок Искателей (~ 3 300 млн руб.), с. Великовисочное (~ 1 620 млн руб.).

При прохождении весеннего половодья 1 % обеспеченности в 32 населенных пунктах (с общей численностью населения порядка 44 тыс. чел.) отмечается затопление жилой застройки, где проживает около 24,5 тыс. чел. (~ 56 %). Количество населения, проживающего в зонах, подверженных негативному воздействию вод (при 50 % обеспеченности), составляет более 4,5 тыс. чел. (~ 10 %).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проблематикой защиты от наводнения населенных пунктов занимались в разные годы такие исследователи, как Б.Д. Зайков [2], Г.И. Швец [3], А.Б. Авакян [4], М.Н. Истомина [5] и др. Применение защитных дамб для снижения рисков затоплений при прохождении экстремально высоких паводков рассмотрено в работах [6–10]. В целом мероприятия по защите территории от наводнений можно разделить на три основные группы – инженерные, превентивные и административные.

² Методика оценки вероятного ущерба от вредного воздействия вод и оценки эффективности осуществления превентивных водохозяйственных мероприятий. ФГУП «ВИЭМС», 2005.

При разработке научно обоснованных рекомендаций по предотвращению негативного воздействия вод р. Печоры использовали архивные сведения, результаты полевых работ и расчетные данные, собранные в ходе трех этапов исследования. Основным отличием проведенного исследования от ранее выполненных мероприятий по противопаводковой защите населенных пунктов Крайнего Севера является использование в работе гидродинамической модели при расчете границ зон затопления в условиях достаточно разреженной государственной сети наблюдений на рассматриваемом участке р. Печоры, а также применение современных геоинформационных технологий как для обработки и систематизации полученных экспедиционных материалов наблюдений, так и при детальном расчете ущерба населенным пунктам от вероятного затопления. Такой комплексный подход, основанный на применении современных информационных технологий и направленный на решение задач по снижению негативного воздействия вод, позволяет выработать наиболее эффективные рекомендации по защите населенных пунктов от затопления.

Инженерные мероприятия базируются на возведении технических сооружений или проведении других работ по минимизации негативных последствий при прохождении высоких паводков. Выполненный на заключительном этапе анализ инженерных мероприятий по защите населенных пунктов от затопления выявил, что наиболее эффективным для исследуемого участка р. Печоры является строительство защитных дамб с использованием местной ресурсной базы. Другие мероприятия (дноуглубление, спрямление русла, строительство перехватывающих плотин, подъем высоты уровня населенного пункта) неэффективны и имеют более высокую стоимость реализации. Более подробно анализ противопаводковых мероприятий для исследуемого участка р. Печоры представлен в работе [11].

При проектировании инженерной защиты прибрежной территории водотоков в качестве расчетного принимают максимальный уровень воды с вероятностью превышения в зависимости от класса сооружений инженерной защиты. При этом определение абсолютной отметки гребня сооружения выполняется в зависимости от класса ответственности сооружений с учетом надбавки на инженерный запас, высоты нагона и наката волны в соответствии с СП 58.13330.2019³. Определение планового положения сооружений выполнено на основании расчетных зон затопления для уровня высоких вод 1 % обеспеченности (1 раз в 100 лет).

При реализации таких проектов для предотвращения размыва защитных дамб при прохождении весеннего половодья, как правило, предусматривается установка и крепление железобетонных плит у основания дамбы, а также отвод образующихся на территории ливневых вод, обустройство съездов. Стоимость строительства защитных дамб для всех населенных пунктов оценивается в сумму 25 500 млн руб. в ценах 2022 г., без учета дополнительных затрат, связанных с доставкой грузов и организацией строительных работ. Кроме того, для обслу-

³ СП 58.13330.2019. Свод правил. Гидротехнические сооружения. Основные положения. СНиП 33-01-2003. (утв. и введен в действие Приказом Минстроя России от 16.12.2019 № 811/пр) (ред. от 09.08.2023).

живания предлагаемых дамб необходимо создать эксплуатирующую организацию, на баланс которой должны быть переданы все построенные объекты.

При условии реализации инженерных мероприятий (строительство дамб) вероятный (прогнозный) ущерб по всем населенным пунктам снизится при паводке 1 % обеспеченности с 25 500 млн руб. до 9 290 млн руб., при паводке 3 % обеспеченности с 23 500 млн руб. до 236 млн руб. Для паводков 50 % обеспеченности, наблюдающихся практически ежегодно, величина вероятного (прогнозного) ущерба будет снижена до 0,001 млн руб.

Учитывая длительные сроки реализации инженерных мероприятий по защите населения от негативного воздействия вод р. Печоры, особое внимание в настоящее время необходимо уделять организации и выполнению превентивных мер, направленных на снижение вероятного материального ущерба от затопления населенных пунктов. Превентивные мероприятия по снижению негативного воздействия паводковых вод условно можно разделить на три основные группы⁴:

1 группа – мероприятия организационно-профилактического характера;

2 группа – плановые практические превентивные мероприятия;

3 группа – оперативные мероприятия, выполняемые непосредственно при ухудшении паводковой обстановки.

Из списка мероприятий организационно-профилактического характера для исследуемого участка р. Печоры выделяются:

– разработка и ежегодная корректировка перечня затороопасных и паводкоопасных участков и объектов, попадающих в зону затопления (подтопления);

– корректировка существующих правил землепользования и застройки поселений и документации по планировке территорий с учетом зон затопления (подтопления);

– планирование мероприятий по предотвращению негативного воздействия вод и организация строительства систем и сооружений инженерной защиты паводкоопасных районов.

Из списка мероприятий 2 группы для исследуемого участка р. Печоры могут быть эффективны:

– инженерно-технические мероприятия по ослаблению прочности льда;

– проведение берегоукрепительных и дноуглубительных работ;

– регулирование стока и отвод поверхностных и подземных вод.

В список мероприятий 3 группы, которые выполняются непосредственно при ухудшении паводковой обстановки и проводятся при «активной фазе» прохождения паводкоопасного периода, в соответствии с прогнозом затопления в паводковых районах для исследуемого участка р. Печоры входят:

– уточнение планов по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций;

– доведение до органов местного самоуправления информации о существующих ограничениях использования территории на землях, подверженных затоплению;

⁴ Методические рекомендации по организации подготовки и сопровождения паводкоопасного периода на территории субъекта Российской Федерации (утв. МЧС России 11.10.2021 № МР-9-1).

- информирование граждан о прогнозе наводнения, организация разъяснительной работы по действиям населения в ходе половодья;
- устройство быстровозводимых дамб и обвалований;
- подсыпка, искусственное повышение поверхности территории;
- проведение при необходимости заблаговременной эвакуации населения из зон затопления;
- развертывание пунктов временного размещения;
- оборудование объездных маршрутов для автотранспорта.

В качестве административного мероприятия выделяется соблюдение положений статьи 67.1 Водного кодекса Российской Федерации, в соответствии с которой в границах зон затопления, подтопления запрещается строительство объектов капитального строительства, не обеспеченных сооружениями и (или) методами инженерной защиты территорий и объектов от негативного воздействия вод. Исходя из этого, установление зон затопления и подтопления является специальным защитным мероприятием и осуществляется для предотвращения негативного воздействия вод и ликвидации его последствий. Порядок установления, изменения и прекращения существования зон затопления, подтопления определен Постановлением Правительства Российской Федерации от 18 апреля 2014 г. № 360 «О зонах затопления, подтопления»⁵. Жители имеют право знать, находится ли населенный пункт, в котором они проживают, в зоне возможного затопления. Кроме того, для домохозяйств, попадающих в зону затопления 1 % обеспеченности, следует проработать возможность переселения на более безопасные территории.

Проведение работы по установлению границы зоны затопления при прохождении весеннего половодья 1 % обеспеченности на территории всех населенных пунктов и представление данных в Единый государственный реестр недвижимости с дальнейшим соблюдением требований статьи 67.1 Водного кодекса Российской Федерации является важным административным мероприятием, которое позволит значительно снизить негативное воздействие паводковых вод р. Печоры.

В качестве альтернативы представленной выше инженерной защиты рассчитана эффективность проведения мероприятий по переселению жителей, попадающих в зону возможного затопления при паводке 1 % обеспеченности. Рассматривалось участие граждан в программе по переселению, осуществляемой в соответствии с Федеральным законом «О жилищных субсидиях гражданам, выезжающим из районов Крайнего Севера и приравненных к ним местностей»⁶. Как показали расчеты, экономически нецелесообразно проводить переселение жителей в наиболее крупных населенных пунктах, таких как г. Нарьян-Мар, Рабочий поселок Искателей. Для небольших населенных пунктов мероприятия по переселению жителей экономически более эффективны по сравнению со строительством защитных дамб.

⁵ Постановление Правительства РФ от 18.04.2014 № 360 (ред. от 17.08.2022) «О зонах затопления, подтопления» (вместе с «Положением о зонах затопления, подтопления»).

⁶ Федеральный закон от 25.10.2002 № 125-ФЗ (ред. от 20.07.2020). «О жилищных субсидиях гражданам, выезжающим из районов Крайнего Севера и приравненных к ним местностей».

Анализ полученных данных показал, что наибольший эффект проведения первоочередных мер, направленных на предотвращение негативного воздействия вод р. Печоры, будет достигнут в результате реализации двух мероприятий – переселения жителей и строительства защитных дамб (табл. 2). Целесообразность проведения мероприятий и перечень населенных пунктов определяли согласно принципам экономической эффективности (ущерб от воздействия вод р. Печоры больше, чем стоимость проведения мероприятия).

Таблица 2. Первоочередность мероприятий, направленных на предотвращение негативного воздействия вод р. Печоры, по принципу экономической эффективности (в порядке эффективности вложенных средств)
Table 2. Priority of measures aimed at preventing the harmful effects of the waters of the Pechora River in compliance with the principle of economic efficiency (in the order of efficiency of invested funds)

Населенный пункт	Величина вероятного вреда при паводке 1 % обеспеченности, млн рублей	Тип наиболее эффективного мероприятия	Затраты на реализацию мероприятия, млн руб.	Эффективность мероприятий, руб/руб. вложенных средств
Ненецкий автономный округ				
Куя	258	переселение	24,7	10,4
Осколково	129	переселение	16,5	7,8
Лабожское	1090	переселение	181	6,0
Устье	56	переселение	12,4	4,5
Щелино	130	переселение	28,8	4,5
Тельвиска	816	переселение	210	3,9
Тошвиска	204	переселение	57,7	3,5
Красное	1570	переселение	466	3,4
Великовисочное	1620	переселение	503	3,2
Макарово	316	переселение	103	3,1
Оксино	880	переселение	342	2,6
Андег	304	переселение	161	1,9
Пыльмец	52,2	переселение	28,8	1,8

Продолжение таблицы 2

Населенный пункт	Величина вероятного вреда при паводке 1 % обеспеченности, млн рублей	Тип наиболее эффективного мероприятия	Затраты на реализацию мероприятия, млн руб.	Эффективность мероприятий, руб/руб. вложенных средств
Нарьян-Мар	13500	строительство защитной дамбы	8770	1,5
Искателей	3280	строительство защитной дамбы	2360	1,4
Хонгурей	4,64	переселение	4,10	1,1
Итого на реализацию по НАО			13 096	
Республика Коми, Усть-Цилемский район				
Медвежка	102	переселение	3,90	26,2
Мыза	87,4	переселение	11,7	7,5
Харьяга	202	переселение	42,8	4,7
Крестовка	68,5	переселение	15,6	4,4
Леждуг	75,6	переселение	23,3	3,2
Ёрмица	357	переселение	140	2,6
Среднее Бугаево	382	переселение	187	2,0
Верхнее Бугаево	125	переселение	66,1	1,9
Хабариха	157	переселение	101	1,6
Окунев Нос	52,6	переселение	38,9	1,4
Итого на реализацию по Республике Коми Усть-Цилемский район			428	
По всем населенным пунктам			13 524	

Общая стоимость предлагаемых первоочередных мероприятий в Ненецком автономном округе и Республике Коми с соблюдением принципа экономической эффективности составит 13 524 млн руб.: Ненецком автономном округе – 13 096 млн руб., Республика Коми – 428 млн руб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С применением современных информационных технологий проведено комплексное исследование для решения задач по разработке научно обоснованных

ванных рекомендаций по защите от затопления населенных пунктов, расположенных в нижнем течении реки Печоры:

– по материалам наблюдений за гидрологическим режимом р. Печоры на стационарных постах наблюдательной сети Росгидромета с учетом современных данных до 2021 г. выполнены все необходимые гидрологические расчеты, в т. ч. обеспеченных значений уровней воды весеннего половодья;

– проведено рекогносцировочное обследование с целью фиксации отметок максимальных уровней подъема воды на территории населенных пунктов, анкетирование населения;

– выполнены инженерно-геодезические и гидрологические изыскания, отработана методика получения детальных цифровых моделей рельефа и ортофотопланов местности (для актуализации ситуационных планов) с использованием БПЛА в условиях Крайнего Севера;

– для моделирования зон затопления (программного комплекса НЕС-RAS) разработана и верифицирована численная гидродинамическая модель исследуемого участка р. Печоры протяженностью более 425 км в одномерной постановке;

– разработана информационная база данных на основе ГИС, включающая картографический материал с зонами затопления, данные о гидрометеорологической изученности отдельных гидрологических характеристик, информацию о русловых процессах и другие данные, характеризующие проявления негативного воздействия вод.

На основе анализа материалов исследования установлено, что практически ежегодно на рассматриваемом участке р. Печоры затоплению подвержены 28 населенных пунктов. Общая величина прогнозного ущерба для паводка 1 % – обеспеченности составляет 26,5 млрд руб., в т. ч. по населенным пунктам Ненецкого автономного округа – 24,4 млрд руб., Республики Коми – 2,10 млрд руб. На территориях, подверженных негативному воздействию вод, проживает более 24 тыс. человек, из которых практически ежегодно с последствиями затопления сталкиваются порядка 4,5 тыс. жителей.

Наиболее оптимальным инженерным вариантом защиты населенных пунктов от затопления в нижнем течении р. Печоры является строительство защитных дамб. Другие рассмотренные инженерные мероприятия неэффективны и имеют более высокую стоимость реализации. Наибольший эффект от мероприятий, направленных на предотвращение негативного воздействия вод р. Печоры, будет достигнут в результате переселения жителей и строительства защитных дамб.

Учитывая длительные сроки реализации инженерных мероприятий по защите населения от негативного воздействия вод р. Печоры, особое внимание в настоящее время необходимо уделять организации и выполнению превентивных мер. Соблюдение требований статьи 67.1 Водного кодекса Российской Федерации позволит снизить вероятный материальный ущерб от затопления населенных пунктов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лучников А.И., Голдобин Н.А., Лепешкин С.А. Опыт комплексных натурных исследований с применением БПЛА при решении задач по оценке зон затопления территорий населенных пунктов (на примере реки Печоры) // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2023. № 2. С. 55–68. DOI: 10.35567/19994508_2023_2_4.

2. Зайков Б.Д. Высокие половодья и паводки на реках СССР за историческое время. Л.: Гидрометеиздат, 1954. 135 с.
3. Швец Г.И. Выдающиеся гидрологические явления на юго-западе СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 244 с.
4. Авакян А.Б., Полюшкин А.А. Наводнения. М.: Знание, 1989. 46 с.5.
5. Добровольский С.Г., Истомина М.Н. Наводнения мира. М.: Геос, 2006. 256 с.
6. Шайтан, В.С. Крепления земляных откосов гидротехнических сооружений / В. С. Шайтан. М.: Стройиздат, 1974. 352 с.
7. Левкевич В.Е. Крепление берегов и верховых откосов подпорных сооружений гидроузлов Беларуси. Минск: БНТУ, 2019. 172 с.
8. Лепихин А.П. К оценке эффективности применения дамб для снижения рисков затоплений при прохождении экстремально высоких паводков // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2006. № 6. С. 27–32.
9. Макаров К.Н. Основы проектирования берегозащитных мероприятий. М.: ПНИИИС Госстроя РФ, 1999. 236 с.
10. Шаликовский А.В. Обоснование возможности использования защитных дамб для регулирования паводкового стока // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2016. № 5. С. 63–75. DOI: 10.35567/1999-4508-2016-5-5.
11. Перепелица Д.И., Тиунов А.А., Лепихин А.П., Андреев С.Р., Голдобин Н.А., Лепешкин С.А. Выбор противопаводковых мероприятий с использованием вычислительных экспериментов (на примере нижнего течения реки Печоры) // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2023. № 2. С. 69–89. DOI: 10.35567/19994508_2023_2_5.

REFERENCES

1. Luchnikov A.I., Goldobin N.A., Lepeshkin S.A. The experience of complex field studies using UAVs in solving problems of assessing flood zones of populated areas (on the example of the Pechora River). *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2023. No. 2. P. 55–68. DOI: 10.35567/19994508_2023_2_4 [In Russ.].
2. Zaikov B.D. High floods and floods on the rivers of the USSR in historical time. L.: Gidrometeoizdat, 1954. 135 p. [In Russ.].
3. Shvets G.I. Outstanding hydrological phenomena in the south-west of the USSR. L.: Gidrometeoizdat, 1972. 244 p. [In Russ.].
4. Avakian A.B., Polyushkin A.A. Floods - Moscow: Znanie, 1989. 46 p. [In Russ.].
5. Dobrovolsky S. G., M. N. Istomina M. N. Floods of the world. Moscow: Geos, 2006. 256 p. [In Russ.].
6. Shaitan V.S. Fastening of earthen slopes of hydraulic structures. M.: Stroyizdat, 1974. 352 p. [In Russ.].
7. Levkevich V.E. Fastening of banks and upper slopes of retaining structures of hydroelectric power plants in Belarus. Minsk: BNTU, 2019. 172 p. [In Russ.].
8. Lepikhin A.P. To assess the effectiveness of dams to reduce the risks of flooding during extremely high floods. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2006. No. 6. P. 27–32 [In Russ.].
9. Makarov K.N. Fundamentals of designing coastal protection measures. M.: PNIIS Gosstroy of the Russian Federation, 1999. 236 p. [In Russ.].
10. Shalikovsky A.V. Justification of the possibility of using protective dams to regulate flood runoff. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2016. No. 5. P. 63–75. DOI: 10.35567/1999-4508-2016-5-5 [In Russ.].
11. Perepelitsa D.I., Tiunov A.A., Lepikhin A.P., Andreev S.R., Goldobin N.A., Lepeshkin S.A. The choice of flood control measures using computational experiments (on the example of the lower reaches of the Pechora River). *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2023. No. 2. P. 69–89. DOI: 10.35567/19994508_2023_2_5 [In Russ.].

Сведения об авторах:

Мирошниченко Сергей Анатольевич, канд. геогр. наук, руководитель филиала, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Камский филиал, Россия, 614002, г. Пермь, ул. Николая Островского, 113; ORCID: 0009-0007-5335-9761; e-mail: kama2100@mail.ru

Лучников Антон Игоревич, ведущий инженер-исследователь, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Камский филиал, Россия, 614002, г. Пермь, ул. Николая Островского, 113; ведущий инженер, ФГБУН «Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, Россия, 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78А; ORCID: 0000-0002-0660-2462; e-mail: luchnikovanton@gmail.com

Лепешкин Сергей Александрович, научный сотрудник, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Камский филиал, Россия, 614002, г. Пермь, ул. Николая Островского, ORCID: 0000-0002-2308-4396; e-mail: lepehkin_sa@mail.ru

Перепелица Дмитрий Ильич, начальник проектного отдела, ООО «Западно-Уральский институт водных и экологических проблем», Россия, 614002, г. Пермь, ул. Николая Островского, 113; инженер, лаборатория проблем гидрологии суши, «Горный институт Уральского отделения Российской академии наук» – филиал ФГБУН «Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук», Россия, 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78А; ORCID: 0000-0003-2499-7899; e-mail: perepelitsa_di@mail.ru

Тиунов Алексей Александрович, ведущий инженер-программист, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Камский филиал, Россия, 614002, г. Пермь, ул. Николая Островского, 113; ведущий инженер, лаборатория проблем гидрологии суши, «Горный институт Уральского отделения Российской академии наук» – филиал ФГБУН «Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук», Россия, 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78А; ORCID: 0000-0003-2015-8828; e-mail: alexey.tiunov@gmail.com

About the authors:

Sergei A. Miroshnichenko, Candidate of Geographical Sciences, Head, Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection Kama Branch, ul. Nikolay Ostrovsky, 113, Perm, 614002, Russia; ORCID: 0009-0007-5335-9761; e-mail: kama2100@mail.ru

Anton I. Luchnikov, Leading Engineering Researcher, Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection Kama Branch, ul. Nikolay Ostrovsky, 113, Perm, 614002, Russia; Leading Engineer, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, ul. Sibirskaya, 78A, Perm, 614007 Russia; ORCID: 0000-0002-0660-2462; e-mail: luchnikovanton@gmail.com

Sergey A. Lepeshkin, Researcher, Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection Kama Branch, ul. Nikolay Ostrovsky, 113, Perm, 614002, Russia; ORCID: 0000-0002-2308-4396; e-mail: lepehkin_sa@mail.ru

Dmitry I. Perepelitsa, Head of the Project Department, West Ural Institute of Water and Environmental Problems, ul. Nikolay Ostrovsky, 113, Perm, 614002, Russia; Engineer, Laboratory of Land Hydrology Problems, “Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences” - branch of the Federal State Budgetary Institution of Science of the Perm Federal Research Center Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, ul. Sibirskaya, 78A, Perm, 614007, Russia; ORCID: 0000-0003-2499-7899; e-mail: perepelitsa_di@mail.ru

Aleksey A. Tiunov, Lead Software Engineer, Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection Kama Branch, ul. Nikolay Ostrovsky, 113, Perm, 614002, Russia; Senior Engineer, Laboratory of Land Hydrology Problems, “Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences” – branch of the Federal State Budgetary Institution of Science of the Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (“Ural Branch of the Russian Academy of Sciences”), ul. Sibirskaya, 78A, Perm, 614007, Russia; ORCID: 0000-0003-2015-8828; e-mail: alexey.tiunov@gmail.com

Антропогенные воздействия на мировые водные ресурсы

Н.И. Коронкевич  , Е.А. Барабанова , И.С. Зайцева 

 koronkevich@igras.ru

Институт географии Российской академии наук, Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Большинство исследований по оценке антропогенного влияния на мировые водные ресурсы (если не учитывать весьма дискуссионный парниковый эффект) выполнены довольно давно. Рассматривались, как правило, лишь отрасли водного хозяйства, использовались различные исходные данные и методические подходы. В данной статье впервые комплексно оценивается влияние на мировые водные ресурсы, ресурсы отдельных континентов и России, в т. ч. их наиболее обжитой части, диффузного стока с сельскохозяйственных полей и урбанизированных территорий, а также полного водопотребления из всех источников (водозабора), безвозвратного водопотребления, объема сточных вод, общего объема антропогенно измененных вод, влияющих на качество воды рек и водоемов. **Методы.** Выполнен статистический и географо-гидрологический анализы исходной информации. **Результаты.** Средний многолетний мировой диффузный сток с пашни и урбанизированных территорий оценен в размере более 2200 км³/год (немногим более 5 % от общих ресурсов речного стока). В России он составил 3 %. Мировое водопотребление достигло почти 4500, безвозвратное – 2450 км³/год, а объем сточных вод – более чем 2000 км³/год. Безвозвратное водопотребление – почти 6 % ресурсов мирового стока, в Азии – более 12 % местного стока, в России – около 2 %. Установлено, что если судить по кратности разбавления речным стоком всех антропогенно измененных вод, которая весьма невелика для большинства рассматриваемых регионов и мира в целом, то значительная часть мировых водных ресурсов загрязнена.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: мир, континент, Россия, сток, пашня, урбанизированная территория, водопотребление, сточные воды, антропогенно измененные воды, загрязнение.

Финансирование: Исследование выполнено в рамках темы государственного задания Института географии РАН FMWS-2024-0007 (1021051703468-8).

Для цитирования: Коронкевич Н.И., Барабанова Е.А., Зайцева И.С. Антропогенные воздействия на мировые водные ресурсы // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 2. С. 67–79. DOI: 10.35567/19994508-2024-2-67-79.

Дата поступления 27.12.2023.

ANTHROPOGENIC IMPACTS ON GLOBAL WATER RESOURCES

Nikolay I. Koronkevich  , Elena A. Barabanova , Irina S. Zaitseva 

 koronkevich@igras.ru

Institute of Geography RAS, Moscow, Russia

ABSTRACT

Relevance. Most of the studies on the assessment of anthropogenic impact on world water resources (if we do not take into account the highly controversial greenhouse effect) have been

© Коронкевич Н.И., Барабанова Е.А., Зайцева И.С., 2024

carried out for quite a long time ago. At the same time, usually only water management was considered, different initial data and methodological approaches were used. This article for the first time considers impact on the world's water resources, the water resources of individual continents and Russia, including their most populated part, of diffuse runoff from agricultural fields and urbanized territories, as well as water intake, irretrievable consumption, wastewater volume, total volume of anthropogenically altered waters affecting the water quality of rivers and reservoirs. **Methods.** We have performed statistical and geographical-hydrological generalization of the initial information. **Results.** The average long-term global diffuse runoff from arable land and urbanized areas is estimated at more than 2200 km³/year (slightly more than 5 % of the world river runoff). In Russia, it was 3 %. Global water consumption is estimated at almost 4500, irrevocable – at 2450 km³/year, and the volume of wastewater is more than 2000 km³/year. Irretrievable water consumption accounted for almost 6 % of the world's runoff resources, in Asia – more than 12 % of local runoff, in Russia – about 2%. As we have stated, judging by reciprocal dilution of all anthropogenically modified waters, being very small for most regions under consideration and the world as a whole, a significant part of the world's water resources is polluted.

Keywords: world, continent, Russia, runoff, arable land, urbanized territory, water consumption, irretrievable consumption, wastewater, anthropogenically modified waters, pollution

Financing: The research was carried out within the framework of the state assignment for the Institute of Geography RAS FMWS-2024-0007 (1021051703468-8).

For citation: Koronkevich N.I., Barabanova E.A., Zaitseva I.S. Anthropogenic impacts on global water resources. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2024. No. 2. P. 67–79. DOI: 10.35567/19994508-2024-2-67-79.

Received 27.12.2023.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы все более актуально звучит вопрос – грозит ли водным ресурсам мира количественное и качественное истощение? Насколько реален водный «голод» планеты? Во многом это обусловлено растущим антропогенным воздействием на водные ресурсы и сопутствующим загрязнением рек и водоемов. Разработан целый ряд прогнозов и оценок антропогенного влияния на них [1–6 и др.]. Однако полученные в этих работах результаты существенно различаются. В большинстве из них рассматривается лишь водопотребление на различные нужды, не учитываются другие виды деятельности человека, изменяющие условия формирования стока (основного вида водных ресурсов) и качество вод. Отметим, в частности, что диффузный сток как с урбанизированных площадей, так и с сельскохозяйственных полей, является, наряду со сточными водами, одной из главных причин загрязнения рек и водоемов, как это показано в исследовании [7]. Таким образом, проблема комплексной оценки антропогенного воздействия на водные ресурсы, даже без учета современного изменения климата, антропогенное происхождение которого является дискуссионным, остается недостаточно изученной.

Цель данной статьи – представить оценку современного, на уровне 2021 г., антропогенного воздействия на водные ресурсы мира, в т. ч. его наиболее обжитой части, на основе последних данных с учетом как водопотребления,

так и воздействия на них стока с урбанизированных площадей и с пашен. В работе использованы результаты более ранних исследований авторов по оценке влияния на мировые водные ресурсы (их количество и качество) водопотребления на различные нужды (с учетом дополнительного испарения с акватории водохранилищ) и урбанизированных площадей [8, 9 и др.]. В числе главных задач – определение стока с неорошаемых сельскохозяйственных полей, общей величины диффузного стока, объема антропогенно измененных вод (диффузный сток и сточные воды), поступающих в реки и водоемы, кратности их разбавления речным стоком как косвенного показателя степени загрязнения водных ресурсов, а также сравнение общей водохозяйственной и гидроэкологической ситуации в мире и России.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исходная информация получена из различных статистических справочников^{1,2,3}, опубликованных работ, среди которых особое внимание обращено на сведения о мировом водопотреблении, содержащиеся в [4]. Основные методы – статистические и сравнительное географо-гидрологическое обобщение исходной информации. Несколько подробнее о некоторых из них.

Сначала об определении величины диффузного стока. Для определения его величины с пахотных угодий рассчитывалась поверхностная составляющая речного стока для рассматриваемых регионов. По М.И. Львовичу [2] ее доля составляет для Европы – 66 %, Азии – 74 %, Африки – 65 %, Северной Америки – 68 %, Южной Америки – 67 %, Австралии и Океании – 76 %, мира в целом – 69 %, а в России, по нашим расчетам, она равна 76 %. Эти соотношения были использованы и применительно к полному речному стоку по данным [4], а также к стоку с наиболее обжитой части рассматриваемых регионов. Согласно [8], наиболее обжитая часть территории мира составляет 55,9 млн км²; Зарубежной Европы – 5,2; Зарубежной Азии – 12,2; Африки – 5,0; Северной Америки – 9,7; Южной Америки – 8,0; Австралии и Океании – 1,4; России – 4,4 млн км². С учетом России наиболее обжитая часть Европы оценивается в 7,6 млн км², Азии – в 14,2 млн км².

Поверхностная составляющая формируется стоком сполгих (в основном до 5°) склонов, на которых, как правило, располагаются пахотные угодья, и стоком с площади, занимаемой гидрографической сетью (долины рек, овраги, балки) и крутосклонами, относительно слабо затронутыми земледелием, где условия формирования стока гораздо более благоприятны, чем на пологих склонах. В лесостепной и степной зонах Русской равнины эти части водосборной площади формируют примерно одинаковые объемы стока, несмотря на то что их площади соотносятся как 80 % и 20 %

¹ FAO: AQUASTAT database. Режим доступа: www.fao.org/aquastat/en/ (дата обращения 15.02.2023).

² О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2021 году. Государственный доклад. М.: Минприроды России; МГУ имени М.В. Ломоносова, 2022. 684 с.

³ Водные ресурсы и водное хозяйство России в 2018 году (стат. сборник). М.: НИА-Природа, 2019. 274 с.

[10], т. е. слой поверхностной составляющей стока с площади гидрографической сети и крутосклонов примерно в четыре раза выше, чем с пологих склонов. Это соотношение, за неимением других данных, использовано для расчета стока с пашни наиболее обжитых территорий рассматриваемых регионов мира.

Площадь пашни меняется от года к году. Ее величина принята по данным ФАО¹ на начало XXI в. и составила для мира в целом около 1380 млн га, Европы – 294, Азии – 499, Африки – 175, Северной Америки – 96, Южной Америки – 268, Океании и Австралии – 58, России – 130 млн га. Умножением рассчитанного слоя стока с обжитой территории на всю площадь пашни определяется объем общего среднего многолетнего стока с пашни региона. Принято, что в наиболее обжитых районах располагается 80 % всей пашни того или иного региона. Эта же 80-процентная доля использована и при расчете общей величины стока с урбанизированной территории и объема сточных вод на наиболее обжитой территории.

Водопотребление в мире и на отдельных континентах, включая полное (водозабор), безвозвратное и объем сточных вод, с учетом возвратных вод с орошаемых земель, сначала определено примерно для 2017 г. путем осреднения двух прогнозных вариантов Государственного гидрологического института (ГГИ) на 2010 и 2025 гг. [4]. Один из них, так называемый «условный» сценарий (УС), другой – сценарий «устойчивого развития» (СУР). Полученные осредненные величины оказались близкими к тому, что дают данные ФАО на 2017 г. [9]. С учетом средних годовых темпов нарастания водопотребления определена его величина на уровне 2021 г.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 1 и табл. 2 представлены величины полного речного стока всех рассматриваемых регионов и их наиболее обжитой части, а также диффузного стока с пашни и урбанизированных площадей. Вероятно, не совсем правильно говорить о поверхностном стоке с пашни, определенным указанным выше методом, т. к. поверхностная составляющая, особенно в лесной зоне, частично входящей в наиболее обжитые территории, включает и сток инфильтрационного происхождения – верховодку. Поэтому представленный в табл. 2 сток больше собственно поверхностного (по поверхности почвы), но это, скорее всего, не преувеличивает объем выносимых с полей загрязняющих веществ, в основном биогенных, их содержание обычно велико и в верховодке. Более того, значительная часть биогенов выносится в реки и водоемы с подземным стоком, формирующимся на пашне [11]. Следует отметить, что представленные в таблицах величины речного и диффузного стоков соответствуют не конкретному году, а их среднему многолетнему значению.

Таблица 1. Величина полного речного и диффузного стока со всей территории рассматриваемых регионов, км³/год
 Table 1. The volume of total river and diffuse runoff from the entire territory of the regions under consideration, km³/year

Регион	Сток			
	полный речной	с пашни	с урбанизированных площадей	диффузный, всего
Европа	2900	244	158	402
Азия	13510	569	262	831
Африка	4050	194	41	235
Северная Америка	7890	259	217	476
Южная Америка	12030	138	77	215
Австралия и Океания	2400	38	9	47
Мир	42780	1442	764	2206
Россия	4120	98	23	121

Таблица 2. Величина полного речного и диффузного стока с наиболее обжитой части рассматриваемых регионов, км³/год
 Table 2. The volume of total river and diffuse runoff from the most populated part of the regions under consideration, km³/year

Регион	Сток			
	полный речной	с пашни	с урбанизированных площадей	диффузный, всего
Европа	1620	195	126	321
Азия	3400	455	211	666
Африка	3010	156	33	189
Северная Америка	2620	208	174	382
Южная Америка	2400	111	62	173
Австралия и Океания	350	30	7	37
Мир	13420	1155	613	1768
Россия	700	78	19	97

На Азию в связи с большой площадью пашни приходится почти 40 % общего мирового стока с пашни, лишь 3 % – на Австралию с Океанией, на Россию – почти 7 %. По отношению к полному речному стоку доля стока с пашни для указанных регионов составляет, соответственно, немногим более 4 %, 1,6 и около 2,4 % при среднем многолетнем значении для мира в целом – около 3,4 %. Для наиболее обжитой территории при сохранении примерно той же доли регионов в общем стоке с пашни существенно повышается его доля в речном стоке. Так, в Азии – до более 13 %, Австралии и Океании – до более 9 %, России – до 11 %, а мира в целом – почти до 9 %.

Слой стока с урбанизированных территорий многократно, особенно в теплый период года, превышает слой стока с пашни, но ввиду сравнительно небольших площадей во всех рассматриваемых регионах (в мире в целом 3 %, в России – 1,1 %) уступает по объему стока с пахотных угодий. Менее всего различий между ними в Европе (0,6) и Северной Америке (0,8), где расположены наибольшие площади урбанизированных территорий. Наименьшее соотношение стока с урбанизированных площадей и с пашни (0,2 и несколько выше) – в Африке, Австралии с Океанией и в России.

На Азию и Северную Америку приходится соответственно 34 % и 28 % мирового стока с урбанизированных территорий, на Европу – 20 %, на остальные регионы существенно меньше, в т. ч. на Россию – менее 3 %. По отношению к речному стоку с наиболее обжитой части выделяются Европа (7,7 %), Северная Америка (6,7 %), Азия (6,2 %), на остальные регионы приходится 1–3 % при среднем значении для мира 4,6 %.

Самый большой общий диффузный сток (с пашни и урбанизированных площадей) наблюдается на территории Азии (38 % от его общей величины в мире), но в общем объеме речного стока это сравнительно небольшой объем (6,2 %), для Северной Америки, соответственно, эти данные составляют почти 22 % и 6 %. В Европе доля общего диффузного стока в речном достигает почти 14 %. В других регионах долевое участие диффузного стока в полном речном значительно меньше: для России – 3 %, а в среднем для мира – немногим более 5 %. Гораздо более весомо отношение общего диффузного стока к речному в наиболее обжитых районах мира (табл. 2). В Европе и Азии это около 20 %, в Северной Америке и в мире в целом – более 14 %.

Суммарное водопотребление из всех источников (водозабор) в мире, по нашим расчетам, составило в 2021 г. 4489 км³, из них 2842 пришлось на долю сельского хозяйства (в основном орошаемого земледелия), 514 – на коммунальное хозяйство, 893 – промышленность, 240 – водохранилища (дополнительное испарение с их акватории). Заметим, что в 2021 г. суммарный водозабор был почти в 7,8 раза превышал объемы 1900 г., в 2,3 раза – 1960 г. и более чем в 1,2 раза – 1990 г. Величины водозабора за периоды, предшествующие 2021 г., заимствованы из [5]. Мировое безвозвратное водопотребление составило 2447 км³, в т. ч. в сельском хозяйстве 2007, коммунальном – 68 км³, в промышленности – 132, на водохранилища пришлось 240 км³. Структура мирового

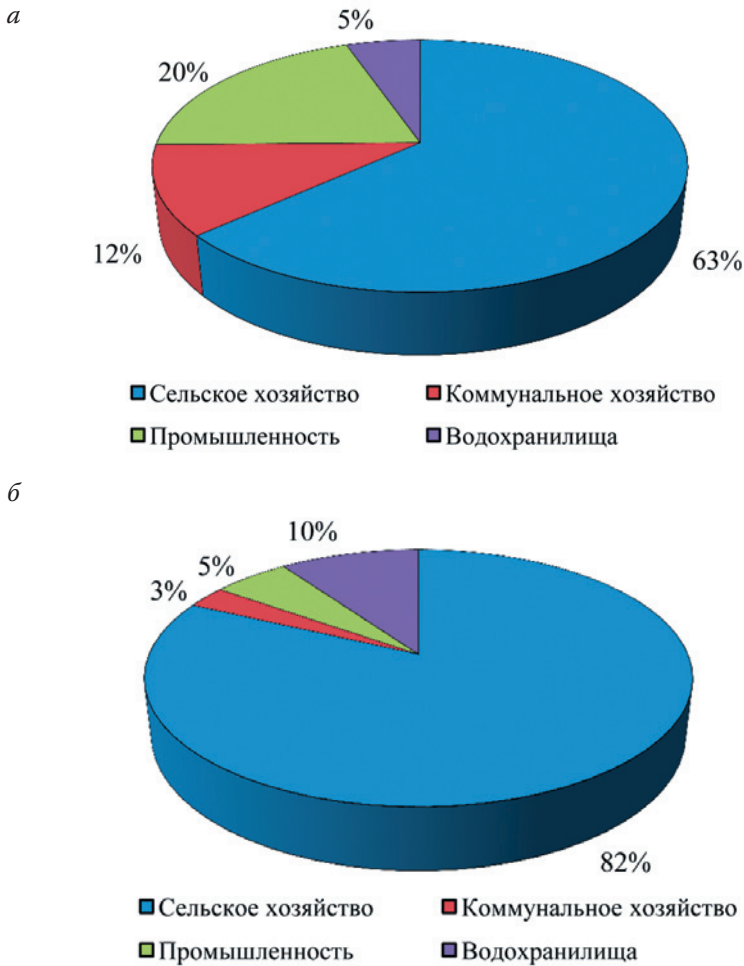


Рис. 1. Структура полного (*a*) и безвозвратного (*б*) водопотребления:
1 – сельское хозяйство, 2 – коммунальное хозяйство,
3 – промышленность, 4 – водохранилища.

Fig. 1. The structure of full (*a*) and irrevocable (*b*) water consumption:
1 – agriculture, 2 – utilities, 3 – industry, 4 – reservoirs.

водопотребления представлена на рис. 1. Таким образом, на долю сельского хозяйства приходится более 60 % полного водопотребления (водозабора) и свыше 80 % безвозвратного. Принято, как уже указывалось выше, что 80 % мирового водопотребления относится к наиболее обжитым районам.

В табл. 3 представлено распределение полного и безвозвратного водопотребления по континентам. Наибольший объем водопотребления приходится на Азию, главным образом, за счет широкого распространения здесь орошаемого земледелия, наиболее водоемкого потребителя.

Таблица 3. Суммарное полное и безвозвратное водопотребление на уровне 2021 г.

Table 3. Total water consumption and volume of irretrievable consumption at the level of 2021

Регионы	Водопотребление			
	полное		безвозвратное	
	км ³	%	км ³	%
Европа	466	10,4	228	9,3
Азия	2796	62,2	1648	67,4
Африка	304	6,8	197	8,1
Северная Америка	665	14,8	246	10,0
Южная Америка	224	5,0	108	4,4
Австралия и Океания	34	0,8	20	0,8
Мир	4489	100	2447	100

Примерно 80 % объема водопотребления, представленного в табл. 3, приходится на наиболее обжитую часть, причем в мире безвозвратное водопотребление составляет 1957 км³/год, в Европе – 182, Азии – 1318, Африке – 158, Северной Америке – 197, Южной Америке – 86, Австралии и Океании – 16 км³/год. В России забор воды на уровне 2021 г. был немногим более 64 км³, а с учетом дополнительных потерь на испарение с акватории водохранилищ – около 75 км³ при общем безвозвратном водопотреблении 39 км³, что составляет менее 2 % от соответствующих мировых показателей. При этом в России до последнего времени имело место снижение водопотребления.

Приведенный объем безвозвратного водопотребления, очевидно, несколько отличается от величины вызванного им уменьшения стока, поскольку оно определялось по разнице полного водопотребления с включением и отбора морских вод (в России несколько более 3 км³/год), подземных вод, часть из которых не связана с речным стоком, и общего объема сточных вод, частично сбрасываемых в моря, глубокие подземные горизонты. Все это преувеличивает объем уменьшения стока. С другой стороны, в водохозяйственной статистике не учитывается значительная часть водопотребления малыми предприятиями, а также то, что нередко сточные воды, особенно в теплоэнергетике, подогреты и способствуют увеличению испарения при

попадании в реки и водоемы. Предполагается некоторое преуменьшение стока и из-за частичного включения в состав сточных вод диффузного стока с урбанизированных площадей. Таким образом, имеют место процессы, неоднозначно влияющие на величину уменьшения речного стока, что дает основание предполагать их взаимную компенсацию и близость величин указанных выше значений безвозвратного водопотребления и снижения стока. Однако для более точной оценки соответствующие данные по большинству регионов отсутствуют. Для России имеются более детальные сведения о водопотреблении, но при сравнении с другими регионами включение этих данных нарушит единообразие оценки.

С учетом изложенного выше, анализ табл. 4 свидетельствует о том, что безвозвратные изъятия воды в целом пока мало сказываются на величине речного стока в мире и на континентах. Больше всего доля безвозвратного водопотребления (практически уменьшения стока) в Азии. В среднем же в мире она составляет около 6 %. В России эта доля по отношению к речному стоку менее 1 %. Гораздо больше доля безвозвратного водопотребления в обжитой части, достигая почти 40 % в Азии, почти 15 % в мире в целом. В России она составляет почти 4 %.

Таблица 4. Соотношение безвозвратного водопотребления воды и речного стока, %

Table 4. The ratio of irretrievable water consumption and river runoff, %

Регионы	Вся территория	Наиболее обжитая часть
Европа	7,9	11,1
Азия	12,2	38,7
Африка	4,9	5
Северная Америка	3,1	7,5
Южная Америка	0,9	3,6
Австралия и Океания	0,9	4,6
Мир	5,7	14,6

В табл. 5 представлены данные по объему сточных вод и общему объему антропогенно измененных вод с учетом диффузного стока (см. табл. 1), влияющих на качество воды. Как видно, больше всего тех и других вод в Азии. В России их около 160 км³/год, в т. ч. сточных вод 36 км³/год (что может быть несколько преувеличено за счет части диффузного стока с урбанизированных площадей), причем в наиболее обжитой части – примерно 30 км³/год.

Таблица 5. Объем сточных вод и общий объем антропогенно измененных вод, влияющих на качество воды, км³
 Table 5. The volume of wastewater and the total volume of anthropogenically modified waters affecting water quality, km³

Регион	Вся территория		Наиболее обжитая часть	
	сточные воды	антропогенно измененные воды	сточные воды	антропогенно измененные воды
Европа	238	640	190	511
Азия	1148	1979	918	1584
Африка	107	342	86	275
Северная Америка	419	895	335	717
Южная Америка	116	331	93	266
Австралия и Океания	14	61	11	48
Мир	2042	4248	1633	3400

Для суждения о влиянии деятельности человека на качество вод в данном исследовании использован такой показатель, как кратность разбавления сточных и всех антропогенно измененных вод речным стоком. Результаты представлены на рис. 2. Для большинства регионов она весьма невелика и для сточных вод, особенно, для общего объема антропогенно измененных вод. В первую очередь, это касается наиболее обжитых районов (рис. 2б), что косвенно свидетельствует о загрязнении значительной части водных ресурсов мира. Тем более, что фактическая кратность разбавления еще ниже из-за неучтенного антропогенного уменьшения стока, хотя следует считаться и с тем, что многие наиболее обжитые регионы, помимо местных водных ресурсов, располагают притоком из малоосвоенных районов. Некоторое увеличение стока связано с урбанизированными территориями. Следует учитывать, что и перечень источников загрязнения водных объектов не исчерпывается сточными водами и диффузным стоком с водосборов. Загрязнения поступают на поверхность водных объектов непосредственно из атмосферы, от судоходства, рекреации на воде.

Поскольку мы не располагаем для большинства районов мира данными непосредственных наблюдений за качеством воды водных объектов, а также сведениями о степени загрязнения и очистки сточных вод и диффузного стока (часть из них остается условно чистыми), высказано, конечно, весьма ориентировочное суждение. Так, в России официально загрязненными счита-

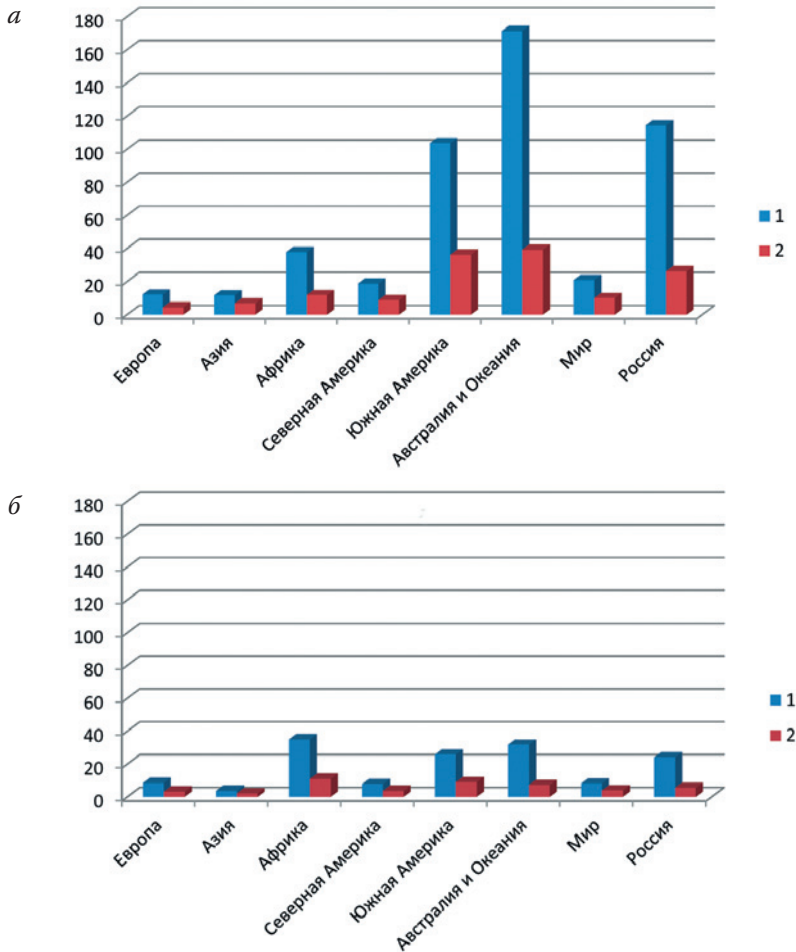


Рис. 2. Кратность разбавления сточных (1) и антропогенно измененных (2) вод: *а* – на всей территории; *б* – на наиболее обжитой части.

Fig. 2. Reciprocal dilution of wastewater (1) and anthropogenically modified (2) waters: *a* – throughout the territory, *б* – in the most inhabited part.

ется примерно лишь 1/3 всех сточных вод. Тем не менее, как представляется, выполненные ориентировочные расчеты, служат еще одним подтверждением того, что угроза качественного истощения водных ресурсов в результате их антропогенного загрязнения весьма велика, а в наиболее обжитых районах существует и угроза их количественного истощения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые для оценки антропогенного воздействия на мировые водные ресурсы учтено не только традиционное водопотребление (водозабор, безвозвратное водопотребление, сточные воды), но и диффузный сток с пашни и урбанизированных территорий, как в целом для всех рассматриваемых регионов (мир, континенты, Россия), так и для их наиболее обжитой части.

Если безвозвратное изъятие стока при водопотреблении довольно невелико по отношению к общим водным ресурсам рассматриваемых регионов и составляет в среднем около 6 % для всего мира, достигая максимума в Азии (более 12 %) и в Европе (около 8 %), то в их наиболее обжитой части безвозвратный расход уменьшает местный речной сток в мире почти на 15 %, в Азии – почти на 40 %, в Европе – на 11 %. Учет диффузного стока более чем вдвое увеличивает в мире объем антропогенно измененных вод, влияющих на качество воды, по сравнению с расчетом, основанном на учете только сточных вод. В результате кратность разбавления общего объема антропогенно измененных вод, особенно в наиболее обжитых районах, становится очень небольшой (в мире в среднем лишь в четыре раза, в ряде районов еще меньше), что косвенно свидетельствует о загрязнении значительной части водных ресурсов.

В России в целом антропогенное воздействие на водные ресурсы значительно ниже, чем в мире и в ряде других регионов. Но это не исключает наличия целого ряда районов с острыми водными проблемами. Безусловно, выполненные оценки носят ориентировочный характер и требуют уточнения и детализации, хотя, на наш взгляд, в целом довольно адекватно характеризуют общую гидроэкологическую ситуацию с антропогенным воздействием на водные ресурсы в мире.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калинин Г.П. Проблемы глобальной гидрологии. Л.: Гидрометеиздат, 1968. 377 с.
2. Львович М.И. Мировые водные ресурсы и их будущее. М.: Мысль, 1974. 448 с.
3. Мировой водный баланс и водные ресурсы Земли. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 638 с.
4. Водные ресурсы России и их использование / под ред. И.А. Шикломанова. СПб.: Государственный гидрологический институт, 2008. 600 с.
5. Falkenmark M., Lindth G. How can we cope with the water resources situation by the year 2015 & // AMBIO. 1974. N 3 (3-4). P. 114–121,
6. Richa I. Contribution to the analysis of the hydrological cycle and of the water consumption cycle, Study CS/WL Academia (Prague), 1982. P. 12–111.
7. Диффузное загрязнение водных объектов: проблемы и решения / Коллективная монография под рук. В.И. Данилова-Данильяна. М.: РАН, 2020. 512 с.
8. Коронкевич Н.И., Барабанова Е.А., Мельник К.С. Влияние урбанизированных территорий на мировой речной сток // Известия РГО. 2020. Т. 152. № 5. С. 58–67. DOI: 10.31857/S086960712005002X.
9. Коронкевич Н.И., Барабанова Е.А., Зайцева И.С. Оценка современного водопотребления в мире и на континентах, его влияние на годовой речной сток // Вестник Российской академии наук. 2022. Т. 92. № 3. С. 256–264. DOI: 10.31857/S0869587322030057.
10. Коронкевич Н.И. Водный баланс Русской равнины и его антропогенные изменения. М.: Наука, 1990. 205 с.
11. Долгов С.В., Швыдкий В.О., Штамм Е.В. Закономерности формирования баланса азота и фосфора на речных водосборах в центральной лесостепи Русской равнины в 1990–2020 гг. // Известия РАН. Серия географическая. 2021. Т. 85. № 3. С. 355–367. DOI: 10.31857/s2587556621030031.

REFERENCES

1. Kalinin G.P. Problems of global hydrology. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1968. 377 p. [In Russ.].
2. Lvovich M.I. World water resources and their future. Moscow: Mysl, 1974. 448 p. [In Russ.].
3. World water balance and water resources of the Earth. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1974. 638 p. [In Russ.]

4. Water resources of Russia and their use / I.A. Shiklomanov (ed.). St. Petersburg: State Hydrological Institute, 2008. 600 p. [In Russ.].
5. Falkenmark M., Lindth G. How can we cope with the water resources situation by the year 2015&. *AMBIO*. 1974. N 3 (3-4). P. 114–121.
6. Richa I. Contribution to the analysis of the hydrological cycle and of the water consumption cycle, Study CS/WL Academia (Prague), 1982. P. 12–111.
7. Diffuse pollution of water bodies: problems and solutions. Collective monograph under the direction of V.I. Danilova-Danilyan. M.: RAS, 2020. 512 p. [In Russ.].
8. Koronkevich N.I., Barabanova E.A., Melnik K.S. The influence of urbanized territories on world river flow. *Izvestiya RGO*. 2020. Vol. 152. No. 5. P. 58–67. DOI: 10.31857/S086960712005002X [In Russ.].
9. Koronkevich N.I., Barabanova E.A., Zaitseva I.S. Assessment of modern water consumption in the world and on continents, its impact on annual river flow. *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2022. Vol. 92. No. 3. P. 256–264. DOI: 10.31857/S0869587322030057 [In Russ.].
10. Koronkevich N. I. The water balance of the Russian plain and its anthropogenic changes. M.: Nauka, 1990. 205 p. [In Russ.].
11. Dolgov S.V., Shvydkiy V.O., Strain E.V. Regularities of the formation of nitrogen and phosphorus balance in river catchments in the central forest-steppe of the Russian plain in 1990-2020. *Izvestiya RAS. Seriya Geograficheskaya*. 2021. Vol. 85. No. 3. P. 355–367. DOI: 10.31857/s2587556621030031 [In Russ.].

Сведения об авторах:

Коронкевич Николай Иванович, д-р геогр. наук, профессор, Институт географии Российской академии наук, Россия, 119017, Москва, Старомонетный пер., 29, стр. 4; ORCID 0000-0001-7282-1113; e-mail: koronkevich@igras.ru

Барбанова Елена Алексеевна, канд. геогр. наук, Институт географии Российской академии наук, Россия, 119017, Москва, Старомонетный пер., 29, стр. 4; ORCID 0000-0003-4455-5756; e-mail: barabanova@igras.ru

Зайцева Ирина Сергеевна, канд. геогр. наук, Институт географии Российской академии наук, Россия, 119017, Москва, Старомонетный пер., 29, стр. 4; ORCID 0000-0002-4953-1932; e-mail: zaitseva@igras.ru

About the authors:

Nikolay I. Koronkevich, Doctor of Geographical Sciences, Professor, Institute of Geography, Russian Academy of Sciences; Staromonetny lane, 29, Moscow, 119017, Russia; ORCID 0000-0001-7282-1113; e-mail: koronkevich@igras.ru

Elena A. Barabanova, Candidate of Geographical Sciences, Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Staromonetny lane, 29, Moscow, 119017, Russia; ORCID 0000-0003-4455-5756; e-mail: barabanova@igras.ru

Irina S. Zaitseva, Candidate of Geographical Sciences, Institute of Geography, Russian Academy of Sciences; Staromonetny lane, 29, Moscow, 119017, Russia; ORCID 0000-0002-4953-1932; e-mail: zaitseva@igras.ru

Первые результаты изучения пространственно-временной изменчивости содержания и эмиссии метана в Цимлянском водохранилище

М.Г. Гречушникова^{1,2}  , И.А. Репина³ , В.С. Казанцев³ , Е.В. Усова⁴ ,
М.А. Верещагин⁴ , Е.Л. Анпилова⁴ 

 allavis@mail.ru

¹ ФГБУН «Институт водных проблем Российской академии наук», Москва, Россия

² ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Москва, Россия

³ ФГБУН «Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук», Москва Россия

⁴ ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», г. Ростов-на-Дону, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Исследование посвящено анализу результатов измерения содержания и удельного потока метана с поверхности Цимлянского водохранилища по данным измерений в летне-осенний период 2021–2023 гг. Крупнейший искусственный водный объект на юге Европейской территории России недостаточно изучен в отношении эмиссии парниковых газов. **Методы.** Определение эмиссии проводилось методом «плавучих камер», пробы обработаны на хроматографе Хроматэк-Кристалл 5000.2. Комплекс работ включал изучение характеристик донных отложений, распределения температуры воды и растворенного кислорода. **Результаты.** По полученным результатам выявлена межгодовая изменчивость содержания и удельного потока метана, связанная с особенностями гидрологической структуры Цимлянского водохранилища в зависимости от погодных условий, а также пространственная изменчивость, обусловленная различием характера донных отложений и глубины станций.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Цимлянское водохранилище, метан, донные отложения, температура воды, растворенный кислород, стратификация.

Финансирование: Анализ данных выполнен в рамках работ по гранту РФФ 24-27-00034.

Для цитирования: Гречушникова М.Г., Репина И.А., Казанцев В.С., Усова Е.В., Верещагин М.А., Верещагин М.А., Анпилова Е.Л. Первые результаты изучения пространственно-временной изменчивости содержания и эмиссии метана в Цимлянском водохранилище // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 2. С. 80–100. DOI: 10.35567/19994508-2024-2-80-100.

Дата поступления 22.01.2024.

First results of studying of spatial/temporal variability of the methane content and emission in the Tsimlyansk reservoir

Maria G. Grechushnikova^{1,2}  , Irina A. Repina³ , Vladimir S. Kazantsev³ ,
Elena V. Usova⁴ , Mikhail A. Vereshchagin⁴ , Eugenia L. Anpilova⁴ 

 allavis@mail.ru

© Гречушникова М.Г., Репина И.А., Казанцев В.С., Усова Е.В., Верещагин М.А., Верещагин М.А., Анпилова Е.Л., 2024

¹Russian Academy of Sciences Institute of Water Problems, Moscow, Russia

²M.V. Lomonosov Moscow University, Moscow, Russia

³Russian Academy of Sciences A.M. Obukhov Institute of Physics of Atmosphere, Moscow, Russia

⁴Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection, Rostov-na-Donu, Russia

ABSTRACT

Relevance. This study is devoted to the analysis of results of measuring methane content and specific flow from the Tsimlyansk reservoir surface according to the data collected in the summer-autumn period of 2021–2023. The greatest artificial water body in the south of the Russia's European territory is not adequately surveyed in respect of the greenhouse gases emission. **Methods.** Determination of the emission was carried out with the “floating chamber” method; the samples were processed with Chromatic-Crystal 500.2 chromatograph. Work package included investigation of the bottom sediments characteristics, water temperature and dissolved oxygen distribution. **Results.** The obtained results revealed inter/annual variability of the methane content and specific flow connected with special features of the Tsimlyansk reservoir in terms of weather conditions, as well as spatial variability caused by the difference in the bottom sediments character and the stations' depth.

Key words: the Tsimlyansk reservoir, methane, bottom sediments, water temperature, dissolved oxygen, stratification.

Financing: The data analysis has been done within the framework of works on RNF 24-27-00034 grant.

For citation: Grechushnikova M.G., Repina I.A., Kazantsev V.S., Usova E.V., Vereshchagin M.A., Anpilova E.L. First results of studying of spatial/temporal variability of the methane content and emission in the Tsimlyansk reservoir. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2024. No. 2. P. 80–100. DOI: 10.35567/19994508-2024-2-80-100.

Received 22.01.2024.

ВВЕДЕНИЕ

В связи с учетом выбросов парниковых газов изучение эмиссии метана различными экосистемами остается актуальной научной задачей. Искусственные водоемы являются дополнительным антропогенным источником метана. Оценок эмиссии метана с водохранилищ мира проведено достаточно много, но при этом они значительно различаются – от 2 до 122 Тг/год ($69 \text{ ТгCH}_4/\text{год}$ [1], $95\text{--}122 \text{ ТгCH}_4/\text{год}$ [2], $2\text{--}4 \text{ ТгCH}_4/\text{год}$ [3], $4,8 \text{ ТгCH}_4/\text{год}$ [4], $18,7 \text{ ТгCH}_4/\text{год}$ [5], $17,9 \text{ ТгCH}_4/\text{год}$ [6], $10,1 \text{ ТгCH}_4/\text{год}$ [7]). Такое существенное различие оценок связано с тем, что измерения проводились в разное время, различными методами, не учитывалась межсезонная и межгодовая изменчивость, отсутствовала единая методика оценки суммарной площади водоемов. Кроме того, в проведенных исследованиях отличаются и методы группировки водохранилищ.

Для разработки количественных значений квот выбросов парниковых газов необходимо изучить пространственно-временные масштабы их эмиссии из водохранилищ. По сравнению с исследованиями, проведенными в Бразилии, Канаде, США, Китае и европейских странах, в России такими наблюдениями до недавнего времени было охвачено мало водоемов [7, 8]. Согласно выполненным ранее исследованиям [6, 9, 10], основными факторами, влияю-

щими на эмиссию метана, являются трофический статус водоема, его глубина, термический и кислородный режимы, условия водообмена. Именно многофакторность процессов затрудняет параметризацию удельного потока и его диагностические и прогностические расчеты, поскольку помимо диффузного потока метан может выделяться в виде пузырьков. Этот процесс носит весьма нестационарный характер, зависит от колебаний атмосферного давления, активности бентоса, он неравномерен в пространстве [11].

Большой разброс характерных значений удельного потока метана с водохранилищ в пределах одной климатической зоны (полярной, умеренной субтропической и тропической) ставит под сомнение глобальные оценки эмиссии метана с водоемов [4], поскольку этот подход не учитывает такие особенности водоемов, как морфологическое строение и проточность. Ввиду уникальности каждого искусственного водного объекта даже при наличии их типизации и общих черт гидроэкологического режима невозможно произвести измерения в абсолютном большинстве водоемов для надежной оценки удельного потока. Дополнительным инструментом в этой ситуации может стать математическое моделирование [12, 13], но для настройки модели конкретного водоема необходимы данные о его режиме и входные параметры для валидации.

Цимлянское водохранилище – один из крупнейших водоемов на юге Европейской территории России, аккумулирующий сток р. Дон. В пределах его акватории сочетаются различные типы аквальных комплектов, что свидетельствует о большой пространственной изменчивости характеристик водоема. Цель исследования – измерение и анализ содержания и удельного потока метана с поверхности Цимлянского водохранилища. Выбор данного водного объекта обусловлен его малой изученностью по сравнению с водохранилищами Волжского каскада [14].

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Цимлянское водохранилище на р. Дон образовано в 1952 г. Цимлянской плотинной. Мелководная зона с глубинами до 2 м занимает при НПУ ~10 % площади. Зона осушки может занимать до четверти от максимальной площади акватории водохранилища (при падении уровня воды до 31,5 м БС)¹. Акваторию водохранилища подразделяют на четыре плеса (Верхний – Калачёвский, Чирской, Потёмкинский – Центральный и Приплотинный), которые различаются морфометрическими, гидрологическими и биологическими особенностями. Водосборная площадь Цимлянского водохранилища (255 000 км²) сильно распахана и подвержена водной и ветровой эрозии. В пределах площади водосбора располагаются крупные промышленные центры – города Липецк и Воронеж.

Ледостав на Цимлянском водохранилище наблюдается с середины декабря по конец марта. Весной верхний участок водохранилища быстрее освобождается ото льда, принимая теплые паводковые воды, осенью приплотинный участок замерзает почти на месяц позже, чем верхний. Летом разница темпе-

¹ Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР. Цимлянское, водораздельные и Манычские водохранилища. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 291 с.

ратуры воды между участками почти не наблюдается: наибольшие градиенты температуры воды (до 1,5 °С/м) отмечаются в июне и в июле. Суточная амплитуда температуры воды при ясной штилевой погоде может достигать 5 °С¹.

Кислородный режим водохранилища в период открытой воды благоприятный. При интенсивном «цветении» фитопланктона в поверхностных горизонтах отмечается перенасыщение воды кислородом. Дефицит кислорода даже в поверхностных горизонтах в летний период наблюдается, как правило, в аномально жаркие периоды. В придонных горизонтах дефицит кислорода присутствует регулярно в конце июля-начале августа. Ежегодно на Цимлянском водохранилище наблюдается «цветение» воды вследствие интенсивного роста водорослей. Сообщество фитопланктона характеризуется доминированием синезеленых, в т. ч. образующих токсины видов *Microcystis aeruginosa*, *Aphanisomenon flos-aquae*, *Anabaena flos-aquae* [15]. Причина сильного «цветения» – особенности гидрометеорологических условий Цимлянского водохранилища: прогрев толщи воды весной, продолжительные высокие значения температуры летом, сохранение их осенью в сочетании с длительными штилевыми периодами и обеспеченностью биогенными веществами. По биомассе, численности фитопланктона и концентрациям в воде хлорофилла «а» трофический статус водохранилища колеблется по участкам в широком диапазоне: от мезотрофного (на верхнем участке) до эвтрофного и даже гипертрофного (на приплотинном) [16].

Донные отложения в Цимлянском водохранилище представлены песками и илами, включающими илистый песок, песчанистый и глинистый ил. На дне водохранилища происходит накопление большого количества раковин моллюсков, приводящее местами к формированию слоя ила с ракушками. На верхнем участке водоема отложения формируются за счет наносов, поступающих с речным стоком Дона, на среднем и нижнем – за счет обрушения и перестроения берегов [17]. Наиболее мелкозернистые грунты распространены в старом русле р. Дон. Глинистые илы обнаружены в устьях притоков Дона, образующих в настоящее время заливы рек Аксай Курмоянский и Чир. Кроме того, илистые грунты распространены вблизи активно размываемых берегов. Глинисто-песчаные илы широко представлены на приплотинном участке¹, пески в виде сплошного массива – в Кривском сужении. Цимлянское водохранилище характеризуется широким распространением легко разрушаемых лёссовидных пород и аллювиально-флювиогляциальных песков в обрывах, имеет низкую лесистость берегов, поэтому их разрушение с разной степенью интенсивности происходит и в настоящее время.

Цимлянское водохранилище осуществляет многолетнее регулирование стока, используется комплексно для судоходства, ирригации, гидроэнергетики, рыбного хозяйства, водоснабжения, рекреации. Серьезные экологические проблемы водоема обусловлены загрязнением его вод хозяйственно-бытовыми и промышленными сточными водами (относится к классу загрязненных и грязных, 50 % проб воды не отвечает санитарно-гигиеническим нормам), ежегодным интенсивным развитием синезеленых водорослей (во время «цветения» в водохранилище часто преобладают виды, способные выделять в водную среду

токсины), вплоть до нарушения нормальной работы водозаборов. Наблюдаются также интенсивные процессы разрушения берегов: 41,3 % протяженности берегов подвержены абразии. Общий уровень загрязненности Цимлянского водохранилища по удельному комбинаторному индексу загрязненности воды (УКИЗВ) многие годы держится на уровне 3–4 классов качества воды – «загрязненная» – «грязная», особенно на верхнем участке водохранилища, где отмечены единичные случаи высокого загрязнения нефтепродуктами [18].

Комплексные съемки проведены 9–10 августа 2021 г., 8 августа 2022 г., 17–18 июля в приплотинной части Цимлянского водохранилища и 27 сентября – 1 октября 2023 г. – на акватории всего водоема. На рис. 1 представлено расположение станций отбора проб.

Измерение температуры воды, растворенного кислорода и электропроводности воды производили зондами YSI ProOdo и Pro30 с точностью 0,1 мг/л, 0,2 °C и 1 мкСм/см. Пробы воды отбирали батометром Рутнера объемом 0,5 л. Метеорологические параметры (температуру воздуха, скорость ветра и давление) измеряли метеостанцией Kestrel 5500 Weather на борту судна.

Удельный поток исследуемых парниковых газов из воды в атмосферу определяли методом «плавающих камер» [19] в трехкратной повторности. На станции герметичные пластиковые камеры с известными объемом и площадью основания экспонировались на водной поверхности в течение 20 мин. В склянки объемом 20 мл, предварительно заполненные в лаборатории насыщенным раствором NaCl, шприцом отбирали воздух из камеры в начале и в конце времени экспозиции. Значения удельного потока метана определяли по разности концентрации метана в камере в начале и в конце эксперимента. Во время экспозиции камер производилась запись метеопараметров с метеостанции. Глубину станции измеряли эхолотом, фиксировали начальные и конечные координаты дрейфа.

Во время экспозиции камер параллельно отбирали пробы воды с разных горизонтов на станциях батометром Рутнера, из которого воду откачивали в шприц объемом 60 мл, стравливали лишний объем воды до 40 мл и набирали 20 мл воздуха. Затем интенсивно встряхивали шприц 2–3 мин, чтобы перевести растворенный метан в равновесие с газообразной фазой [20]. Далее 20 мл воздуха закачивали в склянку с раствором NaCl, как и в описанном выше методе отбора воздуха из камер. Чтобы учесть содержание метана в воздухе, на каждой станции измерений, где производился отбор проб воды на содержание метана, отдельно отбирали пробу воздуха.

Для определения концентрации метана в полученной пробе применяли газовый хроматограф Хроматэк-Кристалл 5000.2 производства ЗАО «Хроматэк» (г. Йошкар-Ола) с пламенно-ионизационным детектором. Определение содержания метана в каждой пробе проводили в трехкратной повторности. В качестве газа-носителя использовали азот (99,999 % чистоты) с расходом 30 мл/мин. Расход водорода – 20 мл/мин, воздуха – 200 мл/мин. Калибровку хроматографа осуществляли с использованием газовых смесей с концентрациями метана 0,49 ppm, 5,3 ppm, 10,3 ppm, 100 ppm и 1000 ppm.

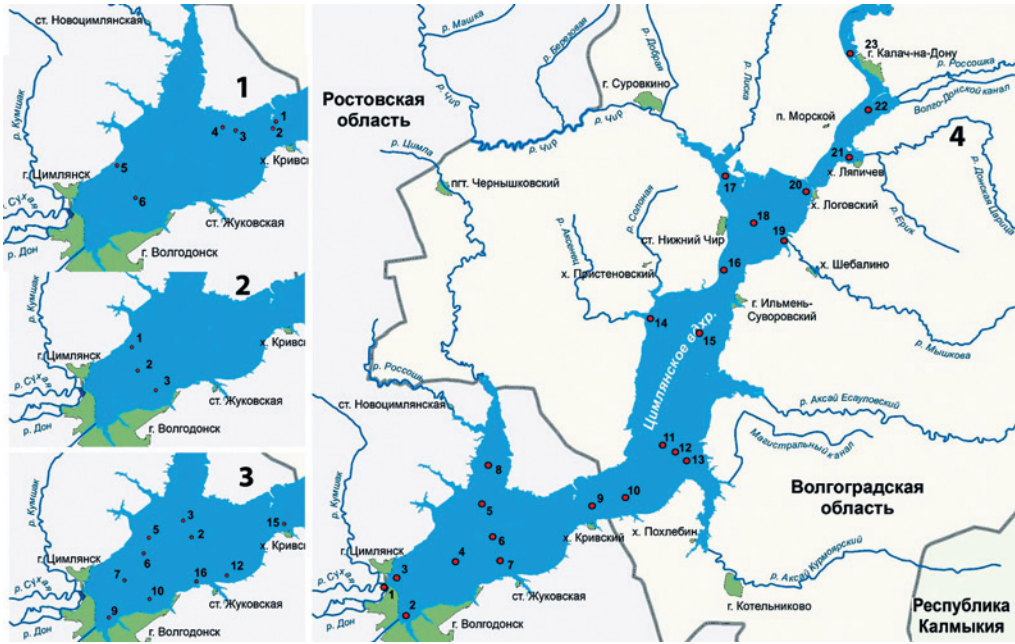


Рис. 1. Схема расположения станций измерений: 9–10 августа 2021 г. (1), 8 августа 2022 г. (2), 17–18 июля 2023 г. (3), 27 сентября – 1 октября 2023 г. (4).
Fig. 1. The scheme of the gauging stations location: August 9–10, 2021 (1), August 8, 2022 (2), July 17–18, 2023 (3), September 27–October 1, 2023 (4).

Пробы донных отложений отобраны в 2021–2022 гг. дночерпателем Экмана-Бэрджа, в 2023 г. – трубкой ГОИН. Определение содержания органического вещества (ОВ) в донных отложениях производили методом потерь при прокаливании². В период съемки 27 сентября – 1 октября 2023 г. проведен отбор проб на химические анализы таких показателей, как БПК, ХПК, цветность, ионы азота, фосфаты, органический углерод. Анализ проведен в лаборатории РосНИИВХ по стандартным методикам.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Выполненные съемки различались по погодным условиям и структуре водной толщи. Первая декада августа 2021 г. характеризовалась жаркой антициклонической погодой, во время съемки температура воздуха составляла 28–30,2 °С при практически штилевой погоде, атмосферное давление 1000,2–1004,2 Гпа. На глубоководных станциях 2, 3 и 5 (от 12 до 20 м) в придонных горизонтах наблюдались бескислородные условия, на станциях 3 и 5 разница температуры поверхностного и придонного слоев составила 5,7 и 7,2 °С соответственно. В 2022 г. в день измерений погода стояла менее жаркая (27,1–28,9 °С) и более ветреная (2–2,6 м/с), при давлении 1013,2 ГПа. Водная толща была менее стратифицирована, разница температуры поверхностного и придонного слоев не превышала 2,5 °С. В период измерений в июле 2023 г. был выражен внутрисуточный

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

ход температуры воды с перепадом 4,7–5,3 °С (19,6–27,7 °С) при скорости ветра 2–6 м/с, давление снижалось от 1011,3 до 1006,4 ГПа. При этом разница температуры поверхностного и придонного слоев не превышала 1,6 °С. В конце сентября 2023 г. она не превышала 1,8 °С. Зато разность содержания растворенного кислорода варьировала от 0 до 8,2 мг/л, наиболее низкая концентрация наблюдалась в придонных горизонтах на глубоководных станциях у плотины 3 и 4 (рис. 1, схема 4): 1 и 3,3 мг/л) и в средней части (10, 12, 13: 1.7, 2.7, 2,6 мг/л). В период экспедиционных наблюдений в сентябре температура воздуха изменялась в пределах 18–24,3 °С, скорость ветра 0–3,8 м/с, давление снижалось.

Описанные выше гидрометеорологические условия определили особенности содержания и эмиссии парниковых газов в атмосферу. Результаты их определения приведены в табл. 1 и табл. 2.

Таблица 1. Содержание метана на различных горизонтах станций измерений при проведении съемок

Table 1. The methane content at various gauging stations' horizons during the surveys

Станция	Н, м	CH ₄ , мкл/л	Станция	Н, м	CH ₄ , мкл/л	Станция	Н, м	CH ₄ , мкл/л
9–10 августа 2021 г.			27 сентября – 1 октября 2023 г.					
1	0	16.6	2	0	1.1	1	0	5.6
1	2	12.2	2	8.5	1.88	1	4.5	5.1
2	0	0.6	3	0	1.15	13	0	1.1
2	12	59.7	3	24	10.9	13	10	2.4
3	0	4.7	4	0	0.56	14	0	546.6
3	11	6.3	4	17	9.6	14	2	870.8
3	13	698.2	5	0	0.51	15	0	2.7
3	18	1702	5	7	4.06	15	6.5	1.8
4	0	3.2	6	0	0.48	16	0	4.1
4	4	5.0	6	2	0.25	16	6	4.7
5	0	5.0	6	5	0.3	17	0	4.2
5	14	5.4	6	10	0.65	17	3	8.1
5	17	1215	7	0	0.72	18	0	3.6
5	20	2300	7	13.6	1.16	18	4.5	7.4
6	0	8.7	9	0	0.75	19	0	8.5
6	7	7.7	9	12.3	5.66	19	1.8	нд
8 августа 2022 г.			10	0	0.31	20	0	5.8
1	0	1.3	10	12	0.54	20	2.8	6.3
1	5	0.8	11	0	2.18	21	0	13.3

Продолжение таблицы 1

Станция	Н, м	CH ₄ , мкл/л	Станция	Н, м	CH ₄ , мкл/л	Станция	Н, м	CH ₄ , мкл/л
1	10	0.8	11	2	1.45	21	1.9	21.4
1	15	6.3	11	5	0.92	22	0	14.4
2	0	0.9	11	9.5	1.59	22	2	11.2
2	5	1.0	12	0	0.61	23	0	4.9
2	13	6.5	12	10	0.72	23	5.6	12.0
3	0	4.0			<i>Примечание: 17–18 июля 2023 г. по техническим причинам производили измерение только удельного потока метана</i>			
3	2	3.8						
3	7	5.3						

Донные отложения в Цимлянском водохранилище распределены неоднородно. В русловой ложбине преобладают тонкодисперсные илы с большим содержанием органического вещества оливкового или черного цвета. На затопленной пойме распространены отложения, содержащие преимущественно раковины моллюсков с небольшой долей ила. В окрестностях абразионных берегов – много опесчаненных илов. Мощные илистые отложения выявлены ниже ответвления Донского магистрального канала. Ниже впадения р. Солоняя у правого берега грунт очевидно загрязнен, поскольку имел неприятный запах.

Таблица 2. Удельный поток (УП) метана и характер донных отложений на станциях измерений в 2021–2023 гг.

Table 2. The methane specific flow and the bottom sediments character at gauging stations in 2021-2023

Станция	Нст., м	УП CH ₄ , мгС/м ² сут (мин-макс)	ОВ,%	Донные отложе- ния	Ст.	Нст., м	УП CH ₄ , мгС/м ² сут	Донные отложения
9–10 августа 2021 г.					27 сентября–1 октября 2023 г.			
1	2.5	13.4	нд	песок	1	4.5	10.6	верхний слой раковины, ниже раковины в плотном суглинке
2	12	46.5	26.1	оливко- вый ил	2	8.5	6.6	ил, темная колонка со светлым наилком с песком

Продолжение таблицы 2

Станция	Нст., м	УП CH_4 , мгС/м ² сут (мин-макс)	ОВ,%	Донные отложе- ния	Ст.	Нст., м	УП CH_4 , мгС/м ² сут	Донные отложения
3	18.5	94.1 (40.1–123.7)	29.9	черный ил	3	24	2.6	ил без наилка, плотный тем- но-коричневый
4	4	19.5	нд		4	17	1.3	глинистый ил
5	20	72.5	11.4	оливковый ил	5	7	1.7	песок
6	7.5	88.5 (47.6–129.40)	нд	раковины	6	10	0.6	песок
8 августа 2022 г.					7	13.6	0.2	темный ил, сверху свет- лый наилок с песком
1	15	2.4	нд	нд	9	12.3	0.3	грунт, ила почти нет
2	13	3	нд	нд	10	12	0	песок с жид- ким наилком
3	7	нд	нд	нд	11	9.7	5.4	раковины
17–18 июля 2023 г.					12	10	1	раковины
2	15.5	1.6	нд	нд	13	10	1.1	верхние 20 см ил олив- ковый, ниже суглинок
3	12	0.3	нд	нд	14	2	нд	темный мелко- дисперсный ил
5	17.2	1.3	нд	нд	15	6.9	4.3	заиленные раковины верхние 15 см, ниже грунт с растительны- ми остатками
6	16.9	4.9	нд	нд	16	4.8	2.9	заиленные раковины верхние 20 см, ниже плотный грунт

Продолжение таблицы 2

Станция	Нст., м	УП CH_4 , мгС/м ² сут (мин-макс)	ОВ,%	Донные отложе- ния	Ст.	Нст., м	УП CH_4 , мгС/м ² сут	Донные отложения
7	13.9	4	нд	нд	17	6	48.3	заиленные раковины верхние 20 см, ниже плотный грунт
9	5	2.5	нд	нд	18	3	3.1	верхний слой раковины, ниже черный плотный грунт
10	6.6	2.2	нд	нд	19	1.8	418.3	нд
12	14.9	0.64	нд	нд	20	2.8	8.3	грунт плотный, после моста возможен смыл ила из-за сужения потока
15	13.2	0.28	нд	нд	21	1.9	11.3	грунт илистый с песчаной примесью, серый с черным
16	12.1	15.4 (3.4–35.6)	нд	нд	22	2	466	светлый жидкий ил верхние 10 см, ниже уплотненный, внизу колонки черный
В 2023 г. определение ОВ% методом ППП не производилось; при больших различиях измеренного потока на станции камерами дополнительно приведены его максимальные и минимальные значения					23	5,6	74	ил

Примечание: нд – нет данных; Нст. – глубина станции.

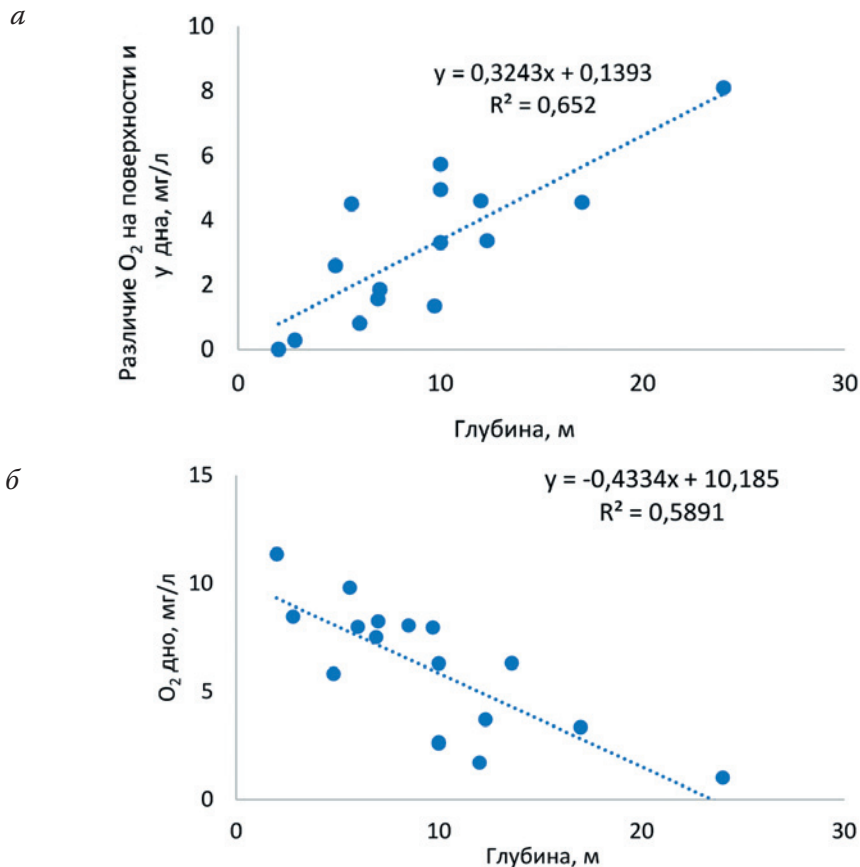


Рис. 2. Связь глубины станции и содержания растворенного кислорода в поверхностном и придонном слоях (а); глубины и содержания растворенного кислорода в придонном слое (б).

Fig. 2. Connection between the station depth and dissolved oxygen content in surface and near-bottom layers (a); depths and dissolved oxygen content in the near-bottom layer (b).

Анализ наиболее многочисленных измерений в сентябре 2023 г. показал, что наблюдается довольно тесная связь глубины станции и разницы содержания кислорода в поверхностном и придонном слоях (рис. 2а). Связано это, главным образом, со снижением содержания кислорода у дна на наиболее глубоких станциях. Из анализа исключили данные по станциям 2 и 7, где наблюдался апвеллинг, а также приустьевые заливы Донской Царицы, Мышковы и Чира, где условия формирования донных отложений и стратификации отличаются от условий основной акватории из-за влияния впадающих притоков.

Распределение растворенного кислорода – один из ключевых факторов, определяющих содержание и эмиссию метана, поскольку при его дефиците окисление происходит менее активно. В поверхностном слое его содержание зависит от процессов фотосинтеза и динамического перемешивания. Минимальные значения растворенного кислорода зафиксированы на станциях 7

(из-за сгона) и 9, 10 и 13 в утренние часы, а также в нижнем бьефе, куда сбрасывается вода из глубинных горизонтов. Содержание кислорода в придонном горизонте обусловлено процессами деструкции в придонной воде и грунтах, а также связано с антропогенной нагрузкой.

Содержание метана в водной толще в значительной степени определяется распределением растворенного кислорода. Анализ вертикального распределения метана показывает, что наибольшее его содержание на большинстве станций характерно для придонного горизонта. Незначительное превышение в поверхностном слое на некоторых станциях может быть обусловлено активной деструкцией органических веществ, наличием антропогенного загрязнения (ниже г. Калач-на-Дону) и активным пузырьковым потоком метана. Разность содержания метана на поверхности и у дна в целом увеличивается с глубиной из-за наличия дефицита кислорода, но эта связь имеет низкий коэффициент корреляции из-за множества причин, определяющих содержание метана в воде.

Наибольшие концентрации метана выявлены в 2021 г. при распространении верхней границы бескислородной зоны на глубоководных станциях до горизонтов 12–15 м. Подобные условия в другие годы отсутствовали, но при снижении содержания кислорода на станции 3 до 1 мг/л в придонном горизонте концентрация метана достигла 10,9 мкл/л. Повышенное содержание метана выявлено в верховьях водохранилища: выше г. Калач-на-Дону, ниже Донского магистрального канала и в приустьевом заливе р. Донская Царица. Эти участки характеризовались наличием темного тонкодисперсного ила, первая станция расположена в зоне выклинивания подпора с аккумуляцией наносов, последние две могут испытывать загрязнение от селитебной территории. На остальной акватории водохранилища в период съемок 2022–2023 гг. концентрация метана не превышала 10 мкл/л. Повышенная концентрация на станции 14 обусловлена дефицитом кислорода на этом участке даже в поверхностных слоях. Источник загрязнения на станции напрямую не выявлен, но был зафиксирован сильный запах навоза на прибрежной территории.

На большей части станций осредненный удельный поток метана не превышал 15 мгС/м²сут за исключением съемки в 2021 г. В приустьевых заливах, где аккумулируются приносимые притоками взвешенные вещества и где затруднен водообмен из-за наличия зарослей макрофитов, удельный поток существенно выше: в среднем до 418,3 мгС/м²сут возле устья р. Мышкова, в менее заросшем заливе р. Чир – 48,3 мгС/м²сут, а в хорошо аэрированном заливе р. Донская Царица удельный поток был наименьший – 11,3 мгС/м²сут. Высокое значение удельного потока выявлено на станции 25 в зоне выклинивания подпора и аккумуляции донных отложений (74,0 мгС/м²сут). Наибольший поток в сентябре 2023 г. был характерен для станции 22 (в среднем 466 мгС/м²сут), что может быть связано не только с аккумуляцией донных отложений, но и с влиянием сточных вод г. Калач-на-Дону.

В период выраженной стратификации летом 2021 г. в приплотинном районе водохранилища наблюдались значения удельного потока метана на 1–2 порядка больше, чем в остальные съемки (88 против 1,3–5 мгС/м²сут), что говорит

о большой временной изменчивости потока и значимой роли синоптических условий и проточности водоема, которые определяют характер стратификации. В качестве иллюстрации различий гидрологической структуры на рис. 3 приведено вертикальное распределение температуры воды и растворенного кислорода во время съемок 9–10 августа 2021 г. и 27 сентября–1 октября 2023 г. Выбраны пары станций, находящиеся относительно близко друг от друга (рис. 1). Очевидно, что на станциях в середине приплотинного района с наибольшей длиной разгона ветра слой скачка наиболее заглублен (15–16 м против 10–12 на верхней границе района). В 2021 г. даже на мелководной станции выражено уменьшение содержания растворенного кислорода ко дну. Данная иллюстрация показывает, что значительная концентрация метана в придонном слое воды (табл. 1) возможна при наличии бескислородной зоны мощностью несколько метров, как это установлено по съемкам 2021 г.

В работе [21] проанализированы условия возникновения дефицита кислорода в Цимлянском водохранилище. Необходимое условие формирования гипоксии – замедление вертикального обмена. Отмечено, что по данным метеостанции Цимлянск среднегодовая повторяемость штилевой погоды за период 1966–2018 г. выросла с 28 до 43 %, а максимальная повторяемость штиля приходится на летние месяцы. Это означает, что в последнее время выросло число случаев с высокими значениями удельного потока метана, как в период съемки 2021 г.

Следует отметить, что в период исследований 2021 г. атмосферное давление было наименьшим, что также способствовало увеличению потока мета-

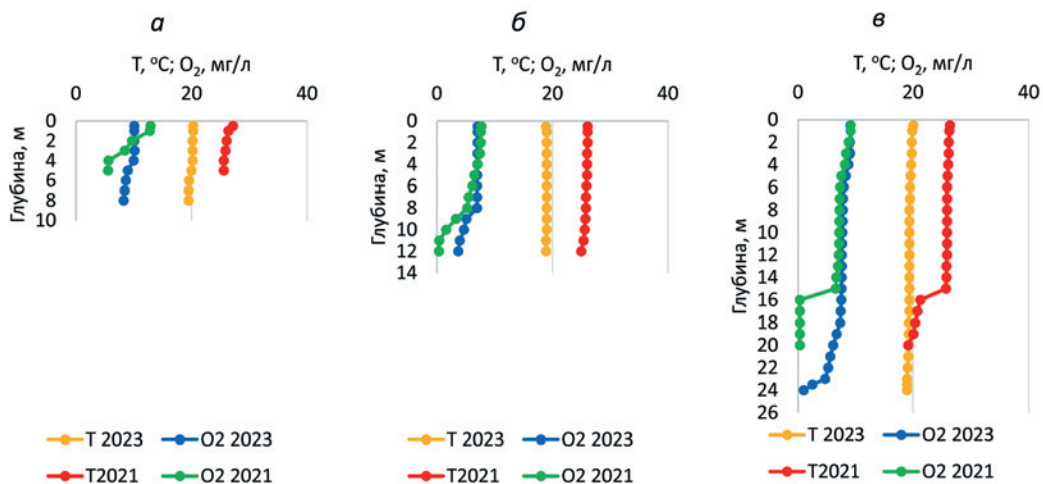


Рис. 3. Распределение температуры воды и растворенного кислорода 9–10 августа 2021 г. и 27 сентября–1 октября 2023 г. на близко расположенных станциях: а – 4 и 5; б – 2 и 9; в – станции 5 и 3.

Fig. 3. Distribution of water temperature and dissolved oxygen, August 9–10, 2021 b September 27 – October, 2023 at the closely situated stations: а – 4 and 5; б – 2 and 9; в – stations 5 and 3.

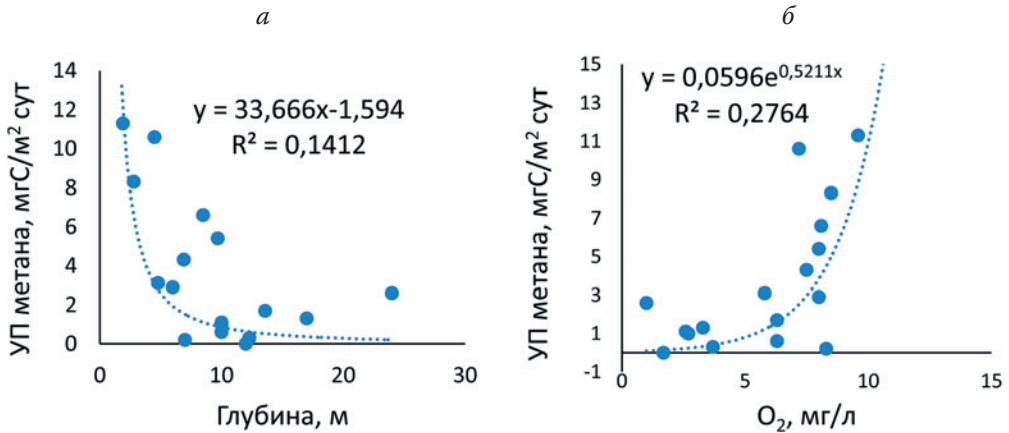


Рис. 4. Связь удельного потока метана с глубиной станции (а) и содержанием растворенного кислорода в придонном слое (б) по данным съемки в сентябре 2023 г.
 Fig. 4. Connection of the methane specific flow with the station depth (a) and the dissolved oxygen content in the near-bottom layer (b) according to the survey data in September, 2023.

на по сравнению с другими съемками, что демонстрирует пример сравнения данных станций в приплотинном районе: станции 5 и 6 на рис. 1 (1); станции 1–3 на рис. 1 (2); станции 6, 7, 10 на рис. 1 (3) и 4–7 на рис. 1 (4).

На рис. 4 показана связь удельного потока метана с глубиной станции и содержанием растворенного кислорода в придонном слое по данным съемки в сентябре 2023 г. Из массива исключены станции с максимальными значениями потока из-за нарушения однородности условий генерации метана (мелководные заливы, в которых происходит аккумуляция принесенных взвешенных веществ небольшими притоками, а также аккумуляция отмирающей массы макрофитов), по этой же причине не рассматривались одновременно данные всех съемок (различия стратификации).

Выявлена положительная связь содержания кислорода у дна и удельного потока метана (рис. 4б). Это, казалось бы, противоречит тому, что метан преобладает в анаэробной среде. Дело в том, что большое значение для удельного потока имеет такой фактор, как глубина станции. Пузырьки и молекулы метана преодолевают большее расстояние до поверхности воды у глубоководных станций. При этом происходит частичное окисление метана, что снижает значения удельного потока, несмотря на его более значительное содержание в придонных горизонтах в бескислородных условиях. Этот факт иллюстрирует рис. 4а. Данные зависимости имеют низкий коэффициент корреляции из-за многофакторности, определяющей величину удельного потока, однако иллюстрируют основные закономерности.

Следует отметить и такую закономерность, – чем больше удельный поток метана, тем больше его изменчивость из-за пузырьковой составляющей (рис. 5). Измеренные большие значения удельного потока были относительно близки на единственной станции 22 в вечернее время при штилевой погоде.

Газирующие грунты при малой глубине (2 м) давали устойчивый поток, который мало окислялся. Исследования на других станциях выполнялись при волнении 1–2 балла. Большая глубина, насыщение кислородом верхнего слоя водной толщи могли способствовать дифференциации пузырькового потока. Поэтому крайне важно производить измерения несколькими камерами или выполнять несколько повторностей экспозиции.

При соотнесении полученных данных по эмиссии и содержанию метана с результатами гидрохимического анализа следует отметить следующее. Повышенные значения потока и концентрации метана приурочены к приустьевым заливам рек Мышковы, Чира, в меньшей степени к р. Донская Царица, а также к верховьям водохранилища. Для этих участков характерны повышенные значения цветности воды, БПК. В целом эти показатели уменьшаются от верховьев к плотине (цветность от 50 до 25 град., БПК от 6,4–6,9 до 2,5–3), что указывает на процессы самоочищения воды водохранилища и разбавления поступающих с притоками загрязнений при смешении с основной водной массой. В нижнем районе следует отметить повышенные значения ХПК и БПК на станции 5 напротив залива, что может быть обусловлено поступлением загрязнений с водосборов рек Россошь и Цимла. ХПК имеет повышенные значения на станциях 5, 6, 7, 10, 14 и 21 и с характерными значениями содержания и потока метана не соотносится. Содержание растворенного органического углерода ($C_{орг}$) изменяется в водоеме в пределах 4,8–11,7 мг/л с минимумом в придонных слоях приплотинного района и максимумом у поверхности на

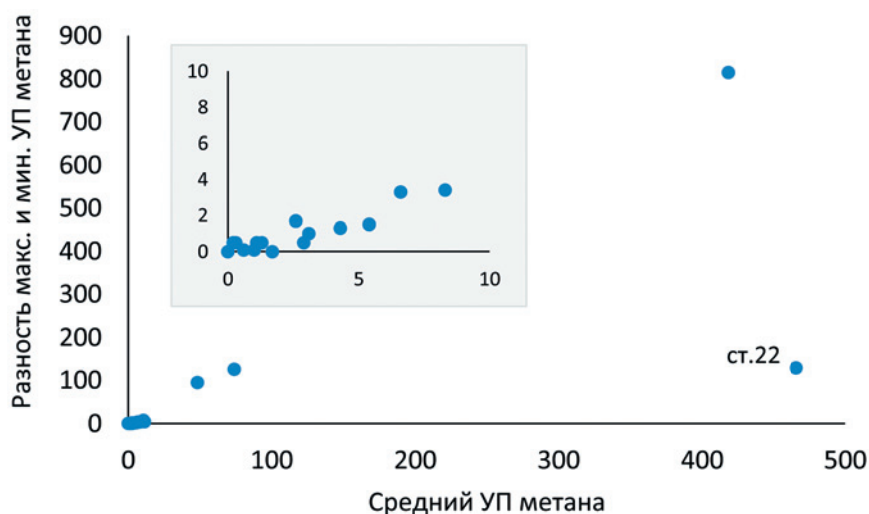


Рис. 5. Связь значений средней величины удельного потока метана и разности его минимальных и максимальных значений, мгС/м²сут. Врезка иллюстрирует зависимость при малых значениях потока.

Fig. 5. Connection between the methane specific flow average value and the difference of its minimal and maximal values, mgC/m²day. The inset illustrates the dependence with low values of the flow.

станциях 5, 6, 15 и 16. Повышенное содержание $C_{\text{орг}}$ выявлено в приустьевых заливах рек Донская Царица и Мышкова (10,5–11,8 мг/л), а максимальное – на станции 14 (11,3–15,1 мг/л). Статистически значимая связь содержания метана в воде и $C_{\text{орг}}$ отсутствует. Это обусловлено тем, что содержание метана в пределах одного водоема зависит от множества факторов, которые весьма разнородны: глубина станции, содержание кислорода в придонной воде, толщина бескислородной зоны, пересыщение кислородом верхних горизонтов, температура воды и грунтов, атмосферное давление.

Данные химических анализов подтвердили критическое состояние участка в районе станции 14, где выявлено наибольшее содержание метана и близкие к бескислородным условия. На этой станции установлено значительное количество иона аммония, что свидетельствует о фекальном загрязнении, содержание фосфатов превышает уровни на других станциях на порядок, зафиксировано максимальное значение ХПК и цветности.

Таблица 3. Средние значения удельного потока метана для морфологических районов за периоды съемок, мгС/м²сут

Table 3. Average values of the methane specific flow for morphologic areas over the surveys period, mgC/m²day

Район		9–10 августа 2021 г.	8 августа 2022 г.	17–18 июля 2023 г.	27 сентября–1 октября 2023 г.
х. Кривский – плотина	Станции	5.6	1, 2, 3	2–14	2–7
	УП	68.7	2.7	2.18	2.2
устье Аксай К. – х. Кривский	Станции	1, 2, 3, 4		15	9, 10
	УП	30.0		0.28	0.15
г. Ильмень Суворовский – устье Аксай Курмоярский	Станции				11–15
	УП				3.0
х. Логовской – г. Ильмень Суворовский	Станции				16–18, 20
	УП				15.7
Выше х. Логовской	Станции				22, 23
	УП				270
Приустьевые заливы	Станции			16	17, 19, 21
	УП			15,4	159.2

В заключении работы было проведено сопоставление полученных данных с характерными значениями удельного потока метана для водохранилищ уме-

ренной зоны, приведенными в работе Johnson M. S. et al. [7]. Рассчитанные с учетом обобщенных фактических наблюдений и климатических показателей среднемесячные значения диффузионного и пузырькового потока для июля, августа и сентября составили 10,5; 9,0; 6,8 и 180; 173 и 120 мгС/м²сут [7]. Как следует из данных табл. 3, фактически измеренные значения удельного потока метана, осредненные по морфологическим районам Цимлянского водохранилища на основной акватории меньше на 1–2 порядка и только в верховьях и приустьевых заливах имеют такую же величину. Это еще одно доказательство, что вопрос изучения эмиссии метана из водохранилищ все еще открыт и требует систематизации продолжительных по наблюдениям массивов данных для адекватной глобальной оценки.

ВЫВОДЫ

В рамках проведенного исследования выявлена значительная неоднородность содержания и удельного потока метана в Цимлянском водохранилище. Их значения обусловлены химическим составом воды, характером донных отложений, глубиной станции, содержанием растворенного кислорода, поступлением водных масс притоков и даже атмосферным давлением. Определена «горячая точка» водоема возле с. Попов с катастрофической ситуацией по загрязнению воды.

Установлено, что фотосинтез в поверхностном слое и хорошее перемешивание, способствующие аэрации воды, сокращают поток метана из донных отложений при окислении. На большинстве станций в 2022–2023 гг. в придонном горизонте отсутствовала аноксия, что способствовало снижению потока метана на поверхности.

Наибольшие значения потока метана приурочены к верховьям водохранилища и приустьевым заливам притоков, где происходит седиментация и формирование илистых, богатых органическим веществом донных отложений. Дополнительный фактор, увеличивающий генерацию и выход метана, – антропогенное загрязнение.

На станциях с заиленным песком и ракушечником удельный поток метана относительно невелик. Станции в приустьевых заливах и на основной акватории нельзя рассматривать как однородные, поскольку имеет место отличие гидрологического и гидрохимического режимов (например, повышенное содержание органического углерода на станциях в заливах, различные условия осадконакопления).

Выявленная значительная пространственная неоднородность удельного потока метана на акватории Цимлянского водохранилища подтверждает необходимость продолжения исследования формирования газового режима водоема посредством проведения съемок, поскольку непрерывные измерения на одной станции по методике, разработанной для наземных карбоновых полигонов, нерепрезентативны в масштабе всего водоема. В то же время изменения гидрологической структуры под влиянием внешних условий (погода, проточность) требуют проведения регулярных измерений, что весьма трудно-

затратно. Поэтому оптимальным решением может быть постоянный мониторинг на нескольких репрезентативных станциях по длине водоема в сочетании с периодическими подробными съемками.

По предварительным данным последней подробной съемки мониторинговыми станциями следует назначить станции 5, 9, 15, 18, 22 и 23, где удельный поток метана близок к среднему, а также станции в приустьевых заливах – 14, 17, 19, 21. Для подтверждения выбора желательно произвести еще 2–3 подробные съемки при различных гидрологических условиях (уровень воды, стратификация).

Благодарности. Авторы благодарят Я.В. Куликову за помощь в проведении полевых работ в июле 2023 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. St. Louis V.L., Kelly C.A., Duchemin E., Rudd J.W.M., Rosenberg D.M. Reservoir surfaces as sources of greenhouse gases to the atmosphere: a global estimate // *Bioscience* 50, 2000. P. 766–775.
2. Giles J. Methane quashes green credentials of hydropower // *Nature*. 2006. Vol. 444. P. 524–525. DOI: 10.1038/444524a.
3. Lima I., Ramos F., Bambace L., Rosa R. Methane emissions from large dams as renewable energy resources: a developing nation perspective // *Mitigation Adaptation Strategy Global Change*. 2006. Vol. 13. P. 1381–1386. DOI: 10.1007/s11027-007-9086-5.
4. Varis O., Kumm M., Härkönen S., Huttunen J. T. Greenhouse Gas Emissions from Reservoirs in: *Impacts of Large Dams: A Global Assessment*. Water Resources Development and Management / edited by Tortajada C., Altinbilek D., Biswas A., Springer, Berlin, Heidelberg. P. 69–94. DOI: 10.1007/978-3-642-23571-9_4, 2012.
5. Li S., Zhang Q. Carbon emission from global hydroelectric reservoirs revisited // *Environmental science and pollution research international*. 2014. Vol. 21. P. 131–137.
6. Deemer B. et al. Greenhouse Gas Emissions from Reservoir Water Surfaces: A New Global Synthesis // *BioScience*. 2016. Vol. 66. № 11. P. 949–964.
7. Johnson M. S. et al. Spatiotemporal methane emission from global reservoirs // *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2021. DOI: 10.1029/2021JG006305.
8. Елистратов В.В. и др. Исследования эмиссии парниковых газов с водохранилищ ГЭС России // *Гидротехническое строительство*. 2014. № 11. С. 52–58.
9. Гречушникова М.Г., Школьный Д.И. Оценка эмиссии метана водохранилищами России // *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. 2019. № 2. С. 58–71. DOI: 10.35567/1999-4508-2019-2-5.
10. Tortajada C., Altinbilek D., Biswas K. *Impact of large dams: A Global Assessment* // Berlin: Water Resources Development and Management. 2012. 410 p.
11. Harrison J., Deemer B., Birchfield M., O'Malley M. Reservoir Water-Level Drawdowns Accelerate and Amplify Methane Emission // *Washington: Environmental Science and Technology*. 2016. Vol. 1. P. 1–11.
12. Stepanenko V. et al. LAKE 2.0: a model for temperature, methane, carbon dioxide and oxygen dynamics in lakes // *EGU: Geoscientific Model Development*. 2016. No. 9. P. 977–2006.
13. Степаненко В. М. Математическое моделирование теплового режима и динамики парниковых газов в водоемах суши: автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М., 2018. 361 с.
14. Репина И.А., Гречушникова М.Г., Фролова Н.Л. и др. Содержание и потоки метана в Волжских водохранилищах // *Известия Российской академии наук. Сер. геогр.*, 2023. Т. 87. № 6. С. 899–913. DOI: 10.31857/S2587556623060080.
15. Сиделев С.И., Голоколенова Т.Б., Чернова Е.Н., Русских Я.В. Анализ фитопланктона Цимлянского водохранилища (Россия) на наличие цианобактериальных гепато- и нейротоксинов // *Микробиология*. 2015. Т. 84. № 6. С. 732–742. DOI: 10.7868/S0026365615060130.

16. Бакаева Е.Н., Игнатова Н.А. Качество вод приплотинной части Цимлянского водохранилища в условиях цветения синезеленых микроводорослей // Глобальная ядерная безопасность. 2013. № 1(6). С. 23–28.
17. Лобойко В.Ф., Зубов И.А. Роль факторов среды и антропогенного воздействия в формировании современной экосистемы Цимлянского водохранилища // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса. 2009. № 2(14). С. 26–32.
18. Хоружая Т.А., Минина Л.И. Оценка экологического состояния Цимлянского, Пролетарского и Веселовского водохранилищ // Метеорология и гидрология. 2017. № 5. С. 116–122.
19. Bastviken D. et al. Methane emissions from lakes: Dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate // *Global Biochemical Cycles*. 2004. 18. DOI:10.1029/2004GB002238.
20. Bastviken D., Santoro A., Marotta H. Methane emissions from Pantanal, South America, during the low water season: toward more comprehensive sampling // *Environmental Science and Technology*. 2010. 44(14). P. 5450–5455.
21. Кульгын В.В. Анализ условий возникновения зон дефицита кислорода в Цимлянском водохранилище // *Экология. Экономика. Информатика. Сер.: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем*. 2019. Т.1. № 4. С. 180–185.

REFERENCES

1. St.Louis V.L., Kelly C.A., Duchemin E., Rudd J.W.M., Rosenberg D.M. Reservoir surfaces as sources of greenhouse gases to the atmosphere: a global estimate. *Bioscience* 50. 2000. P. 766–775.
2. Giles J. Methane quashes green credentials of hydropower. *Nature*. 2006. Vol. 444. P. 524–525. DOI: 10.1038/444524a.
3. Lima I., Ramos F., Bambace L., Rosa R. Methane emissions from large dams as renewable energy resources: a developing nation perspective. *Mitigation Adaptation Strategy Global Change*. 2006. Vol. 13. P. 1381–1386. DOI: 10.1007/s11027-007-9086-5.
4. Varis O., Kumm M., Härkönen S., Huttunen J. T.: Greenhouse Gas Emissions from Reservoirs in: Impacts of Large Dams: A Global Assessment. *Water Resources Development and Management*, edited by Tortajada C., Altinbilek D., Biswas A., Berlin, Heidelberg. P. 69–94. DOI: 10.1007/978-3-642-23571-9_4, 2012.
5. Li S., Zhang Q. Carbon emission from global hydroelectric reservoirs revisited. *Environmental science and pollution research international*. 2014. Vol. 21. P. 131–137.
6. Deemer B. et al. Greenhouse Gas Emissions from Reservoir Water Surfaces: A New Global Synthesis. *BioScience*. 2016. Vol. 66. № 11. P. 949–964.
7. Johnson M. S. et al. Spatiotemporal methane emission from global reservoirs. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2021. DOI: 10.1029/2021JG006305.
8. Elistratov V.V. et al. Studies of the greenhouse gases emission from reservoirs of Russian thermal power plants. *Gidrotekhnicheskoye stroitelstvo [Hydro/engineering construction]*. 2014. No. 11. P. 52–58 [In Russ.].
9. Grechushnikova M.G., Shkolniy D.I. Assessment of the methane emission from Russian reservoirs. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2019. № 2. P. 58–71. DOI: 10.35567/1999-4508-2019-2-5 [In Russ.].
10. Tortajada C., Altinbilek D., Biswas K. Impact of large dams: A Global Assessment. *Berlin: Water Resources Development and Management*. 2012. 410 p.
11. Harrison J., Deemer B., Birchfield M., O`Malley M. Reservoir Water-Level Drawdowns Accelerate and Amplify Methane Emission. *Washington: Environmental Science and Technology*. 2016. Vol. 1. P. 1–11.
12. Stepanenko V. et al. LAKE 2.0: a model for temperature, methane, carbon dioxide and oxygen dynamics in lakes. *Geo/scientific Model Development*. 2016. No. 9. P. 977–2006.
13. Stepanenko V.M. Mathematic simulating of the greenhouse gases thermal regime and dynamics in land water bodies: avtoref. dis. ... d-ra fiz.-mat. nauk. Moscow, 2018. 361 p. [In Russ.].
14. Repina I.A., Grechushnikova M.G., Frolova N.L. et al. The methane content and flows in the Volga reservoirs. *Izvestia Rossiyskoy akademiyi nauk [Newsletter of the Russian Academy of Sciences]. Series: Geography*, 2023. Vol. 87. No. 6. P. 899–913. DOI: 10.31857/S2587556623060080 [In Russ.].

15. Sidelev S.I., Golokolenova T.B., Chernova E.N., Russkikh Y.V. Analysis of the Tsimlyansk reservoir (Russia) phytoplankton for presence of cyanobacterial hepato- and neuro- toxins. *Microbiology*. 2015. Vol. 84. No. 6. P. 732–742. DOI: 10.7868/S0026365615060130 [In Russ.].
16. Bakaeva E.N., Ignatova N.A. Water quality of the near-dam part of the Tsimlyansk reservoir in the conditions of blue-green micro/algae “blooming”. *Global nuclear safety*. 2013. No. 1(6). P. 23–28 [In Russ.].
17. Loboyko V.F., Zubov I.A. The role of environmental factors and anthropogenic impact in formation of the current ecosystem of the Tsimlyansk reservoir. *Newsletter of the Lower Volga Agrarian/ university center*. 2009. No. 2(14). P. 26–32 [In Russ.].
18. Khoruzhaya T.A., Minina L.I. Assessment of ecological status of the Tsimlyansk, Proletarsky and Veselovsky reservoirs. *Meteorology and hydrology*. 2017. No. 5. P. 116–122 [In Russ.].
19. Bastviken D. et al. Methane emissions from lakes: Dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate. *Global Biogeochemical Cycles*. 2004. 18. DOI:10.1029/2004GB002238 [In Russ.].
20. Bastviken D., Santoro A., Marotta H. Methane emissions from Pantanal, South America, during the low water season: toward more comprehensive sampling. *Environmental Science and Technology*. 2010. 44(14). P. 5450–5455.
21. Kulygin V.V. Analysis of conditions for appearance of the oxygen deficit zones in the Tsimlyansk reservoir. *Ecology. Economics*. IT. Series: System analysis and simulating of economic and ecological systems. 2019. Vol. 1. No. 4. P. 180–185 [In Russ.].

Сведения об авторах:

Гречушникова Мария Георгиевна, канд. геогр. наук, ФГБУН «Институт водных проблем Российской академии наук», Россия, Москва, ул. Губкина д. 3; географический факультет, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»; ORCID: 0000-0001-6376-2473; e-mail: allavis@mail.ru

Репина Ирина Анатольевна, д-р физ.-мат. наук, ФГБУН «Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН», Россия, Москва, Пыжевский пер., д. 3; Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ имени М.В. Ломоносова, ORCID: 0000-0001-7341-0826, e-mail: repina@ifaran.ru

Казанцев Владимир Сергеевич, канд. биол. наук, ФГБУН «Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН», Россия, Москва, Пыжевский пер., д. 3; ORCID: 0000-0002-0156-0566; e-mail: kazantsev@ifaran.ru

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

Анпилова Евгения Леонидовна, канд. хим. наук, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», г. Россия, Ростов-на-Дону, ул. Ченцова, здание 10а; ORCID 0009-0009-2196-809X; e-mail: anpilova.jane@gmail.com

Верещагин Михаил Алексеевич, гидрохимик 1 категории, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Россия, г. Ростов-на-Дону, ул. Ченцова, здание 10а; ORCID 0009-0004-9841-7644; e-mail: zigr57@gmail.com

About the authors:

Maria G. Grechushnikova, Candidate of Geographic Sciences, Russian Academy of Sciences Institute of Water Problems, ul. Gubkina, 3, Moscow, Russia; M.V. Lomonosov Moscow University Geographical Department; ORCID: 0000-0001-6376-2473; e-mail: allavis@mail.ru

Irina A. Repina, Doctor of Physical/mathematical Sciences, Russian Academy of Sciences A.M. Obukhov Institute of Physics of Atmosphere, Pyzhevsky per., 3, M.V. Lomonosov Moscow University Research Computation Center, Moscow, Russia; ORCID: 0000-0001-7341-0826, e-mail: repina@ifaran.ru







Vladimir S. Kazantsev, Candidate of Biologic Sciences, Russian Academy of Sciences A.M. Obukhov Institute of Physics of Atmosphere, Pyzhevsky per., 3, Moscow, Russia; ORCID: 0000-0002-0156-0566; e-mail: kazantsev@ifaran.ru


Elena V. Usova, Head, Department of water quality studies and analytical activity, Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection, ul Chentsova, 10a, Rostov-na-Donu, Russia; ORCID 0009-0003-5800-3706; e-mail: chimanalit@inbox.ru

Eugenia L. Anpilova, Candidate of Chemical Sciences, Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection, ul Chentsova, 10a, Rostov-na-Donu, Russia; ORCID 0009-0009-2196-809X; e-mail: anpilova.jane@gmail.com

Mikhail A. Vereshchagin, 1 category Hydro/chemistry Expert, Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection, ul Chentsova, 10a, Rostov-na-Donu, Russia; ORCID 0009-0004-9841-7644; e-mail: zigr57@gmail.com

Сток трансграничных рек Республики Беларусь и России в условиях изменяющегося климата

О.М. Таврыкина¹  , М.В. Шмакова² , И.А. Булак¹ , А.О. Русина¹ ,
Е.И. Громадская¹ 

 tavrykina@mail.ru

¹ Республиканское унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт комплексного использования водных ресурсов», г. Минск, Республика Беларусь

² Институт озераведения Российской академии наук – обособленное структурное подразделение ФГБУН «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук», Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. В настоящее время в связи с растущей антропогенной нагрузкой и изменением климата востребованы исследования интенсивности и направленности динамики водных ресурсов, затрагивающих трансграничные водотоки, с целью их безопасного использования и сохранения. В связи с этим актуальным представляется анализ стока крупных трансграничных рек Беларуси и России – Западная Двина и Сож. **Методы.** Для расчетов использованы данные наблюдений на стационарных гидрометрических створах р. Западная Двина с 1877 по 2021 гг. и р. Сож с 1897 по 2021 гг. и данные наблюдений на метеостанции г. Смоленска за температурой воздуха и атмосферными осадками. Методами математической статистики проанализированы внутригодовое распределение и многолетние ряды стока и метеорологических величин. **Результаты.** Наиболее значимые перемены в стоке трансграничных рек определены в его внутригодовом распределении. Теплые зимы повлияли на повышение стока в зимний период, что привело к уменьшению объемов половодья исследуемых водотоков. При этом в результате роста температуры воздуха в регионе увеличился слой испарения с водосборной площади. Однако повышенное количество атмосферных осадков обусловило увеличение стока для исследованных рек.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: трансграничные реки, р. Западная Двина, р. Сож, расход воды, климат, осадки, температура, внутригодовое распределение.

Для цитирования: 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.

Дата поступления 29.12.2023.

THE FLOW OF TRANSBOUNDARY RIVERS OF THE REPUBLIC OF BELARUS AND RUSSIA IN A CHANGING CLIMATE

Aksana M. Taurykina¹  , Marina V. Shmakova² , Ivan A. Bulak¹ ,
Anastasiya O. Rusina¹ , Alena I. Hramadskaya¹ 

 tavyrkina@mail.ru

¹Central Research Institute for Complex Use of Water Resources, Minsk, Republic of Belarus

²Institute of Limnology RAS, Saint-Petersburg, Russia

ABSTRACT

Relevance. Currently, due to the growing anthropogenic load and climate change, studies of the intensity and direction of the dynamics of water resources affecting transboundary watercourses are in demand in order to use and preserve them safely. In this regard, it is relevant to analyze the flow of large transboundary rivers of Belarus and Russia – the Western Dvina and Sozh. **Methods.** For calculations, the data of observations at stationary hydrometric sites of the Western Dvina River from 1877 to 2021 and the Sozh River from 1897 to 2021 and observation data at the meteorological station were used. Smolensk for air temperature and precipitation. The methods of mathematical statistics were used to analyze the intraannual distribution and long-term series of runoff and meteorological values. **Results.** The most significant changes in the flow of transboundary rivers are determined in its intra-annual distribution. Warm winters determined an increase in runoff in winter, which led to a decrease in the volume of flooding of the studied watercourses. At the same time, as a result of the increase in air temperature in the region, the evaporation layer from the catchment area increased. However, the increased amount of precipitation caused an increase in runoff for the studied rivers.

Keywords: transboundary rivers, Western Dvina, Sozh, water drain, water discharge, climate, precipitation, temperature, intra-annual distribution.

For citation: 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: 10.35567/19994508-2024-2-101-114.

Received 29.12.2023.

ВВЕДЕНИЕ

Вызванное изменением климата уменьшение водности рек в настоящее время относится к одному из наиболее актуальных направлений исследований гидрологии¹ [1]. Существенные преобразования водного режима рек понизили предсказуемость запасов воды и спроса на нее, привели к ухудшению качества воды, усугубили ее дефицит на засушливых территориях и поставили под угрозу устойчивое развитие, хозяйственную деятельность, безопасность и условия проживания населения на этих территориях [2, 3].

Как известно, формирование речного стока определяется выпавшими в течение года осадками, увлажненностью предшествующего периода, температурой и водохозяйственной деятельностью на водосборе и в пределах реки [4–7]. Многолетний водный режим рек характеризуется преобладающим типом питания, который, в свою очередь, зависит от физико-географического положения водного объекта и, как следствие, климата [8–14]. Наблюдаемые

¹ Изменение климата и вода. Аналитическая записка механизма «ООН – водные ресурсы», 2019. 8 с.

в последние десятилетия повышение температуры воздуха и количества атмосферных осадков, изменение внутригодового распределения этих величин обусловили уменьшение мощности снежного покрова, что определило существенные перемены внутригодового распределения стока водотоков [7–14].

Масштабы водопользования и его воздействия на окружающую среду в настоящее время достигли таких размеров, что экологические требования, предъявляемые к сохранению водных экосистем, и даже сама по себе возможность использования водных ресурсов становятся лимитирующим фактором социально-экономического развития. Увеличение потребления воды в сочетании с неравномерным распределением водных ресурсов по территории и, что крайне важно, во времени, практически неконтролируемое загрязнение водных объектов требуют более детальных исследований стока в лимитирующие периоды и сезоны.

Для предотвращения негативных последствий изменения климата, повышения эффективности предпринимаемых мер по смягчению его воздействия на водные объекты необходимо проводить совместные исследования по изучению изменений водного режима рек на трансграничных водотоках для выработки стратегических решений их сохранения и восстановления.

Цель данной работы – анализ влияния климатических изменений на сток трансграничных рек Беларуси и России – Западная Двина и Сож – за весь период наблюдений на этих водотоках.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования выбраны трансграничные водотоки Республики Беларусь и России – большие равнинные реки Западная Двина и Сож.

Западная Двина берет начало на Валдайской возвышенности из оз. Корякино (Тверская обл., Россия) на высоте 220 м над уровнем моря, впадает в Рижский залив Балтийского моря (Латвия). Ее длина от истока до устья – 1020 км, из которых в пределах Беларуси протекает 328 км среднего течения реки^{2,3} [15]. Общая площадь водосбора – 87,9 тыс. км². Питание реки смешанное, преимущественно снеговое с большой долей грунтового. Особенность режима – высокое весеннее половодье, низкая летне-осенняя межень с частыми дождевыми паводками, устойчивая зимняя межень. На территории Беларуси на р. Западная Двина функционируют две гидроэлектростанции – Витебская и Полоцкая ГЭС с проектной мощностью 40 МВт и 21,66 МВт соответственно.

Река Сож – крупнейший левый приток Днепра длиной 648 км, площадью водосбора 42,1 тыс. км². В пределах Беларуси находится 493 км общей протяженности реки. Сож берет свое начало на Смоленско-Московской возвышенности в 12 км к югу от Смоленска^{4,5}. Водосбор р. Сож асимметричный, более развит по левобере-

² Ресурсы поверхностных вод СССР. Гидрологическая изученность. Т. 5. Белоруссия и верхнее Поднепровье / под редакцией Н.Д. Шека. Ленинград: ГИМИЗ, 1963. 304 с.

³ Блакітная кніга Беларусі: Энцыкл. Мн.: БелЭн, 1994. 415 с.

⁴ Сож // Большая советская энциклопедия / под ред. А.М. Прохорова. М.: Советская энциклопедия, 1969–1978.

⁵ Сож // Словарь современных географических названий. Рус. геогр. общество. под общ. ред. акад. В.М. Котлякова. Институт географии РАН. Екатеринбург: У-Фактория, 2006.

жью, грушевидной формы: верхняя его часть находится на юго-западной окраине Смоленской возвышенности, средняя – на Оршанско-Могилёвской равнине; нижняя – в границах Гомельского Полесья. Река используется для судоходства, частично для промышленного водоснабжения и рыбного промысла.

Анализ многолетних изменений стока воды и климатических показателей российской части бассейна Западной Двины за период 1966–2015 гг. показал повышение температуры воздуха с одновременным увеличением количества атмосферных осадков и речного стока, при этом изменение тренда слоя стока носило нелинейный характер относительно тренда количества выпавших осадков и всегда его превышало [16]. Однако сток на территории республики распределен неравномерно, в настоящее время наиболее уязвимым является южная часть территории, где наблюдается снижение стока, в особенности это характерно для малых рек.

Вместе с тем, исследования, проведенные А.А. Волчком [3] для минимального стока, показали, что для 16 % рек Беларуси отсутствует однородность данных летне-осеннего минимального стока и для 5 % – зимнего (возможная причина – интенсивная хозяйственная деятельность на водосборах рек). Частично ненарушенный режим наблюдался для летне-осеннего минимального стока на 21 % исследуемых рек, для зимнего – на 31 % (возможная причина – естественные колебания водности или сопоставимые с ними незначительные воздействия). Полностью однородные ряды для 63 % рек летне-осеннего минимального стока и 64 % рек зимнего стока могут свидетельствовать о ненарушенном водном режиме или синхронности антропогенных воздействий и колебаний водного режима.

В основу дальнейших расчетов легли данные наблюдений на гидрометрических створах р. Западная Двина – г. Витебск с 1877 по 2021 гг., р. Сож – г. Славгород с 1897 по 2021 гг., данные наблюдений на метеостанции г. Смоленска за температурой воздуха с 1888 по 2022 гг. и атмосферными осадками за период 1944 – 2022 гг.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Расчеты

На рис. 1 представлен хронологический ход среднегодовой температуры воздуха и годовых слоев осадков по метеостанции г. Смоленска и среднегодовых расходов воды на створах р. Западная Двина – г. Витебск и р. Сож – г. Славгород, а также линии трендов для этих величин. Согласно линейным трендам за исследуемый период температура воздуха в г. Смоленске увеличилась на 1,8 °С, существенно повысился годовой слой осадков – на 237 мм/год, а среднегодовые расходы воды уменьшились на 8 м³/с и 12 м³/с для р. Западная Двина и р. Сож, соответственно.

В соответствии с климатологическими базовыми нормами ВМО⁶ на рис. 2 приведен хронологический ход исследуемых величин для трех 30-летних кли-

⁶ Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации. Санкт-Петербург, 2017. 106 с.

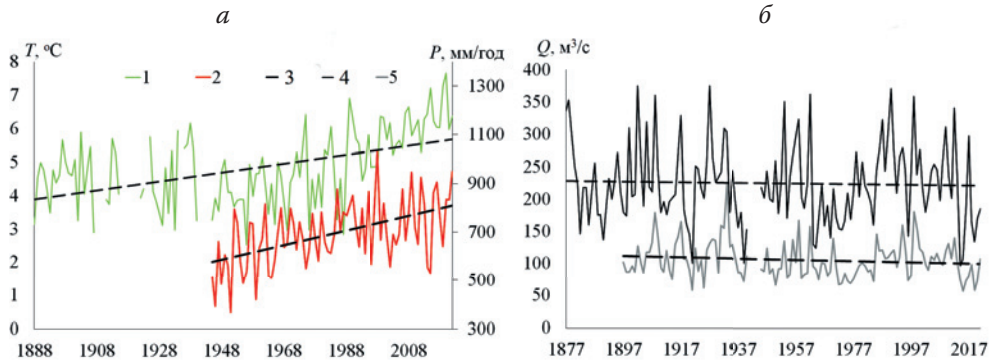


Рис. 1. Хронологический ход метеорологических величин по м/ст г. Смоленска (а) и среднегодовых расходов воды (б): 1 – среднегодовая температура воздуха, T , °C; 2 – годовые слои осадков, P , мм/год; 4 – среднегодовые расходы воды р. Западная Двина – г. Витебск, Q , м³/с; 5 – среднегодовые расходы воды р. Сож – г. Славгород, Q , м³/с; 3 – линии трендов исследуемых величин.

Fig. 1. Chronological run of meteorological values at the Smolensk meteorological station (a) and average annual discharge of water (b): 1 is average annual air temperature, T , °C; 2 is annual precipitation layers, P , mm/year; 4 is average annual water discharge of the Zapadnaya Dvina River – Vitebsk, Q , m³/s; 5 is average annual water discharge of the Sozh River – Slavgorod, Q , m³/s; 3 is the studied values trend lines.

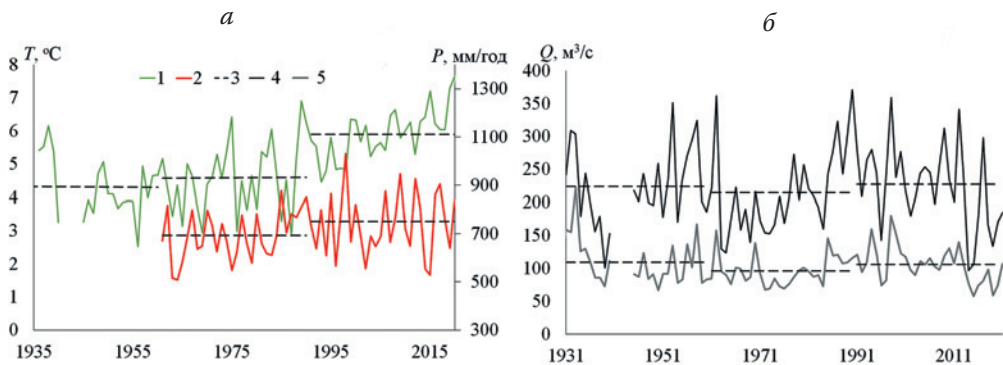


Рис. 2. Хронологический ход метеорологических величин (а) и среднегодового расхода воды (б) для трех климатических периодов: 1 – среднегодовая температура воздуха, T , °C; 2 – годовые слои осадков, P , мм/год; 4 – среднегодовые расходы воды р. Западная Двина – г. Витебск Q , м³/с; 5 – среднегодовые расходы воды р. Сож – г. Славгород Q , м³/с; 3 – линии средних значений за периоды 1931–1960 гг., 1961 – 1990 гг. и 1991–2020 гг.

Fig. 2. Chronological run of meteorological values (a) and average annual water discharge (b) for three climatic periods: 1 is average annual air temperature, T , °C; is annual precipitation layers, P , mm/year; 4 is average annual water discharge of the Zapadnaya Dvina River – Vitebsk, Q , m³/s; 5 is average annual water discharge of the Sozh River – Slavgorod, Q , m³/s; 3 is average values lines over the 1931–1960, 1961–1990, and 1991–2020 periods.

матических периодов: 1931–1960 гг., 1961–1990 гг. (исторический базовый климатический период) и 1991–2020 гг. (текущий базовый климатический период). В табл. 1 представлены статистические параметры исследуемых величин для базового и текущего климатических периодов, а также абсолютные и относительные отклонения исследуемых величин. Согласно данным табл. 1, температура воздуха (T , °C) в текущем климатическом периоде увеличилась по сравнению с базовым на 0,86 °C, годовые слои осадков – на 48 мм/год или на 6,9 %, среднегодовые расходы воды (Q , м³/с) увеличились на 12 м³/с (5,6 %) для створа р. Западная Двина – г. Витебск и на 9 м³/с (9,3 %) для створа р. Сож – г. Славгород.

Таблица 1. Статистические параметры исследуемых величин для двух климатических периодов

Table 1. Statistical parameters of the studied values for two climatic periods

Величина	Среднее			Среднее квадратичное отклонение			Отклонения между базовым и текущим климатическими периодами	
	1931–1960 гг.	1961–1990 гг.	1991–2020 гг.	1931–1960 гг.	1961–1990 гг.	1991–2020 гг.	абс.	относительное, %
T , °C	4,33	5,03	5,89	0,96	1,07	0,76	0,86	
P , мм/год	–	693	741	–	99	129	48	6,9
Q , м ³ /с р. Западная Двина – г. Витебск	224	215	227	59	64	63	12	5,6
Q , м ³ /с р. Сож – г. Славгород	110	97	106	36	23	29	9	9,3

Ряды исследуемых величин подчиняются нормальному закону распределения (согласно критерию Колмогорова-Смирнова при уровне значимости $\alpha=0,3$), поэтому в дальнейших оценках использованы методы параметрической статистики. В табл. 2 представлены статистические параметры исследуемых метеорологических рядов и рядов среднегодовых расходов воды. Проверка этих рядов для двух климатических периодов на однородность^{7,8,9} [17] показала, что по дисперсии (критерий Фишера) все ряды однородны для уровня значимости $\alpha=0,10$, по средним значениям (критерий Стьюдента) ряды

⁷ Новый двухуровневый подход к «климатическим нормам» // Гидрометцентр России. Режим доступа: <https://meteoinfo.ru/news/1-2009-10-01-09-03-06/11151-03062015-1-r> (дата обращения 03.02.2020).

⁸ Статистические методы. Статистическое представление данных. Ч. 4. Выявление и обработка выбросов. ГОСТ Р ИСО 16269-4-2017. М.: Стандартинформ, 2017. 53 с.

⁹ Статистические методы. Статистическое представление данных. Точечная оценка и доверительный интервал для среднего. ГОСТ Р 50779.22 2005. М.: Стандартинформ, 2005. 11 с.

неоднородны лишь для среднегодовой температуры воздуха для того же уровня значимости (табл. 2). При этом для уровня значимости $\alpha=0,1$, согласно критерию Стьюдента, незначительными являются тренды среднегодовых расходов воды, тогда как тренды годовых слоев осадков и среднегодовой температуры воздуха значимы (табл. 2).

Таблица 2. Проверка статистических гипотез*

Table 2. Checking of statistical hypothesis

Величина	$H_0 (I)$	$H_0 (II)$	$H_0 (III)$
м/ст г. Смоленск			
T, °C	$t > t_{\alpha} = 0.1$	$F < F_{\alpha} = 0.1$	$t > t_{\alpha} = 0.1$
P, мм/год	$t < t_{\alpha} = 0.1$	$F < F_{\alpha} = 0.1$	$t > t_{\alpha} = 0.1$
р. Западная Двина – г. Витебск			
Q, м ³ /с	$t < t_{\alpha} = 0.1$	$F < F_{\alpha} = 0.1$	$t < t_{\alpha} = 0.1$
р. Сож – г. Славгород			
Q, м ³ /с	$t < t_{\alpha} = 0.1$	$F < F_{\alpha} = 0.1$	$t < t_{\alpha} = 0.1$

Примечание: * – $H_0 (I)$ и $H_0 (II)$ – гипотезы о равенстве выборочных средних и дисперсии (критерии Стьюдента и Фишера); $H_0 (III)$ – гипотеза о значимости тренда (критерий Стьюдента); α – уровень значимости; t и F – статистики Стьюдента и Фишера; $t_{кр}$ и $F_{кр}$ – критические значения статистик Стьюдента и Фишера.

Внутригодовое распределение исследуемых величин для трех климатических периодов отражено на рис. 3. Как следует из представленных данных, среднемесячная температура воздуха заметно увеличивается во втором и третьем климатических периодах с ноября по май. Месячные слои осадков увеличиваются в течение всего года в сравнении с первым климатическим периодом. Исключение составляют июль, август и сентябрь, когда слои осадков текущего климатического периода несколько ниже. Половодье рек Западная Двина и Сож значительно уменьшилось последовательно для второго и третьего климатических периодов, тогда как зимний период, наоборот, характеризуется увеличением стока.

На рис. 4 представлены квартильные диаграммы внутригодового распределения среднемесячных значений уровня воды исследуемых рек для двух климатических периодов, совмещенные с линией медианы этой величины. В данном построении рассматривается 1,5 интерквартильный размах IQR , за пределами которого данные наблюдений интерпретируют как возможные выбросы [17–19]. Согласно полученным результатам заметных изменений в интерквартильном размахе среднемесячных значений расхода воды для р. Западная Двина не наблюдается, тогда как для р. Сож фиксируется значительное уменьшение размаха в период половодья в апреле в текущем климатическом периоде.

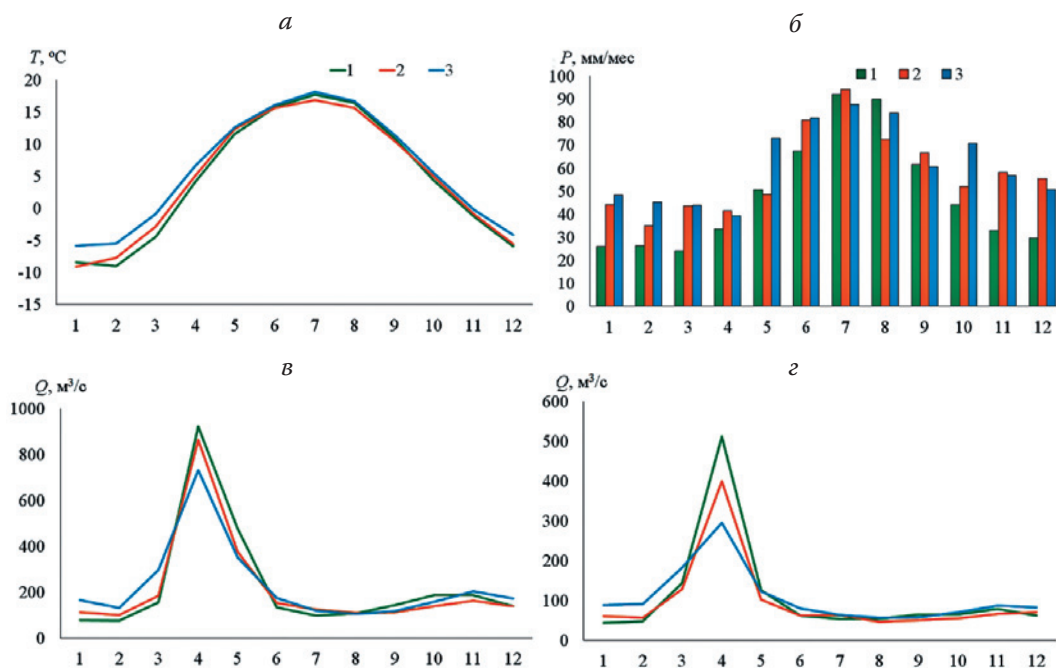


Рис. 3. Внутригодовое распределение среднемесячной температуры воздуха (а), месячных слоев осадков (б) на м/ст г. Смоленск; среднегодовых расходов воды р. Западная Двина – г. Витебск (в) и р. Сож – г. Славгород (г) для периодов 1931–1960 гг. (1), 1961–1990 гг. (2) и 1991–2020 гг. (3).

Fig. 3. Intra/annual distribution of the average monthly air temperature (а), monthly precipitation layers (б) at the Smolensk meteorological station; average annual water discharges of the Zapadnaya Dvina River – Vitebsk (в) and the Sozh River – Slavgorod (г) for the 1931–1960 (1), 1961–1990 (2) and 1991–2020 (3) periods.

На рис. 5 представлены суммарные и разностные интегральные кривые исследуемых величин для определения дат нарушения однородности. Согласно этим кривым, для среднегодовых расходов воды исследуемых водотоков и слоев осадков характерно отсутствие резких скачков и изменений на графике (интегральная кривая практически укладывается в прямую линию, обозначенную пунктиром), что свидетельствует об отсутствии отдельных дат нарушения однородности. При этом для ряда среднегодовой температуры воздуха в 1926 и 1997 годах можно увидеть выраженные переломные точки сначала на понижение, а затем на повышение температуры. В целом следует заметить, что водность рек хорошо сопряжена с количеством осадков, за исключением нескольких последних лет рассматриваемого периода. Это объясняется существенным увеличением температуры воздуха, определившим рост испарения, что обусловило уменьшение водности водотоков.

Согласно данным наблюдений за более чем вековой период, сток рек Западная Двина и Сож уменьшался со средней скоростью 18 и 10 $\text{м}^3/\text{с}$ в год соответственно. В целом, такое уменьшение стока водотоков рассматриваемого региона определено повышением температуры воздуха и увеличением вследствие этого испарения с подстилающей поверхности водосбора. При этом в текущем кли-

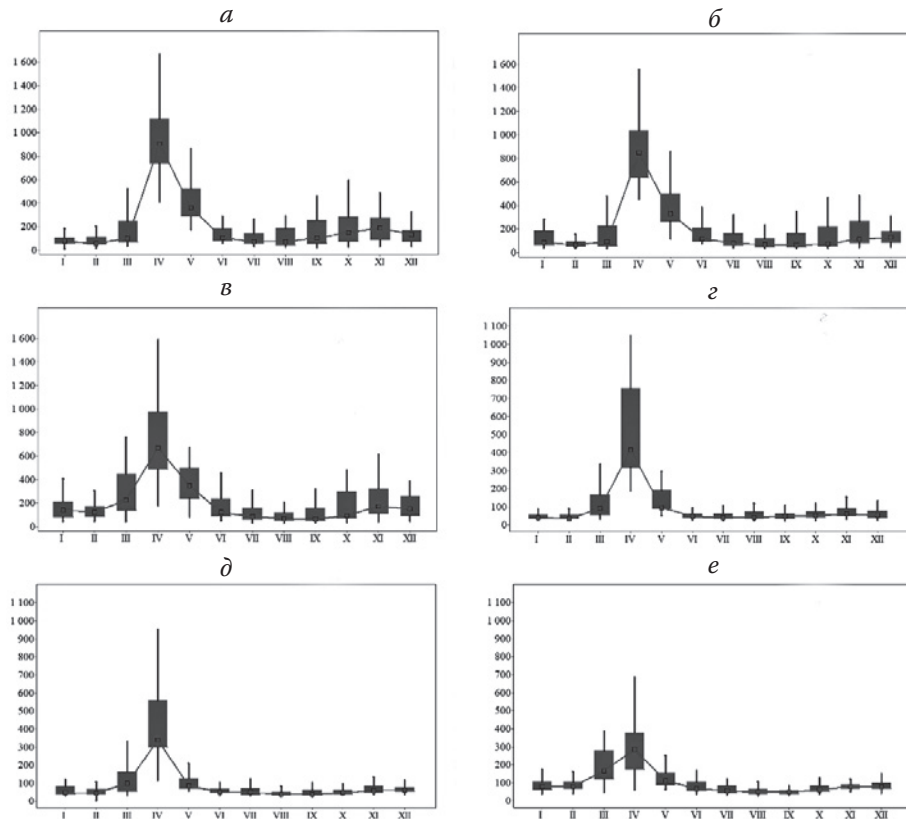


Рис. 4. Квартильные диаграммы среднемесячных значений расхода воды с обозначенной линией медианы: *a* – р. Западная Двина – г. Витебск, 1931–1960 гг.; *б* – 1961–1990 гг.; *в* – 1991–2020 гг.; *з* – 1931–1960 гг.; *д* – 1961–1990 гг.; *е* – 1991–2020 гг. для створа р. Сож – г. Славгород.

Fig. 4. Quartile diagrams of average monthly water discharges with the designated median line: *a* – is the Zapadnaya Dvina – Vitebsk, 1931–1960; *б* – is 1961–1990; *в* – is 1991–2020; *з* – is 1931–1960; *д* – is 1961–1990; *е* – is 1991–2020.

матическом периоде в сравнении с базовым среднегодовые расходы воды незначительно увеличились на 5,6 % для р. Западная Двина и на 9,3 % для р. Сож.

Наиболее существенные изменения пришлось на внутригодовое распределение стока, что связано с увеличением расхода воды в зимний период и его уменьшением в период половодья. Подобные тенденции во внутригодовом распределении характерны для водотоков средней полосы России и Беларуси и объясняются заметными повышением температуры воздуха в зимний период. Так, температура в январе по м/ст г. Смоленска увеличилась более, чем на 2,5 °С в последнем климатическом периоде по сравнению с базовым. В результате перераспределения стока в течение года среднемесячные расходы воды за январь и февраль повысились почти в два раза, тогда как максимальные среднемесячные расходы воды за половодье уменьшились на 73 % для р. Западная Двина и на 26 % для р. Сож. Сток весеннего половодья при этом уменьшился на 8 % и 12 % соответственно.

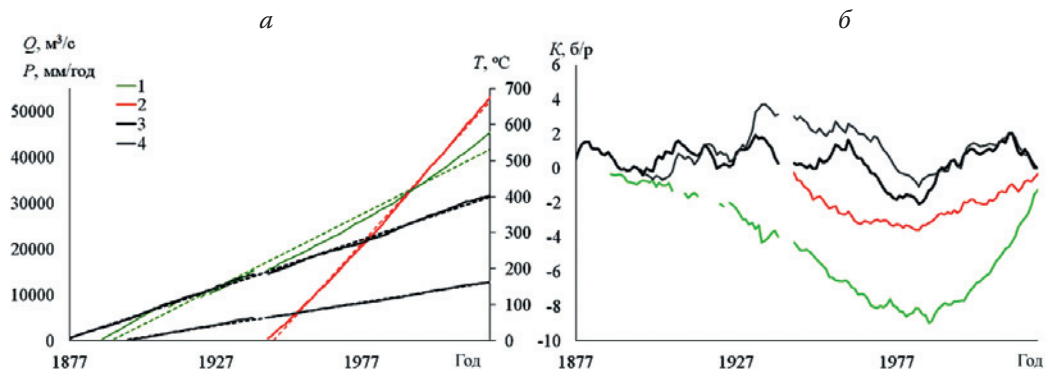


Рис. 5. Суммарные (а) и разностные (б) интегральные кривые среднегодовой температуры воздуха (1) и слоев осадков (2) по м/ст г. Смоленска, средних годовых расходов воды, р. Западная Двина – г. Витебск (3) и р. Сож – г. Славгород (4).

Fig. 5. Total (a) and differential (b) integral curves of average air temperature (1) and precipitation layers (2) at the Smolensk meteorological station, average annual water discharges, the Zapadnaya Dvina River – Vitebsk (3) and the Sozh River – Slavgorod (4).

Полученные данные хорошо сопоставимы с исследованиями других авторов [3, 4, 12], где приведена информация о повышении зимних температур, увеличении периода оттепелей, месячных слоев осадков и, как следствие, перераспределении внутригодового стока. При этом водность меженных периодов увеличилась, а максимальные расходы и слои половодья снизились. В зимний период наблюдается повышение стока для всех водотоков республики, в то время как в весенний, летний и осенний периоды на территории Беларуси прослеживается разная направленность стока, отмечается его снижение по югу и западу территории и увеличение по северу и северо-востоку. Подобные изменения в большей степени проявляется на малых и средних реках.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наблюдающиеся в последние годы современные климатические изменения проявляются, помимо изменения средних значений метеорологических величин, также в увеличении частоты встречаемости аномальных климатических явлений. Вслед за повышением температуры, экстремальным характером выпадения осадков, проявляющимся в увеличении повторяемости периодов с большим количеством выпадающих осадков и их продолжительным отсутствием, уменьшением мощности снежного покрова, оттепелями и т. д., закономерно происходит более резкое изменение стока рек в течение года, что потенциально повышает риск возникновения опасных гидрологических явлений.

Проведенный анализ данных наблюдений для трех тридцатилетних климатических периодов 1931–1960 гг., 1961–1990 гг. (исторический базовый климатический период) и 1991–2020 гг. (текущий базовый период) по м/ст г. Смоленска показал повышение температуры в текущем базовом периоде на 0,86 °C с одновременным увеличением годовых слоев осадков на 48 мм/год (6,9%). При этом отмечается незначительное увеличение среднегодовых рас-

ходов воды рек Западная Двина и Сож – на 5,6 % для створа р. Западная Двина – г. Витебск и на 9,3 % для створа р. Сож – г. Славгород.

По состоянию внутригодового распределения стока отмечено его значительное перераспределение, выражающееся в увеличении расхода воды в зимний период и его снижении в период половодья. Так, среднемесячные расходы воды за зимние месяцы повысились почти в два раза, тогда как максимальные среднемесячные расходы воды за половодье уменьшились на 73 % для р. Западная Двина и на 26 % для р. Сож. Сток весеннего половодья при этом уменьшился на 8 % и 12 % соответственно.

Проведенный анализ динамики речного стока за более, чем столетний период (144 года для р. Западная Двина и 124 года для р. Сож) показал, что, согласно линейному тренду, сток исследуемых водотоков уменьшался со средней скоростью 18 и 10 м³/с в год соответственно. Однако в последнем климатическом периоде по сравнению с базовым наблюдается незначительное увеличение расходов воды на реках Западная Двина и Сож вместе с повышением температуры и количества атмосферных осадков и существенное перераспределение стока в течение года. Также следует отметить, что по отношению к многолетнему периоду количество маловодных лет в последнем климатическом периоде для исследуемых водотоков не увеличилось, тогда как количество многоводных лет для р. Западная Двина стало больше, а для р. Сож осталось прежним.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеевский Н.И., Фролова Н.А., Антонова М.М., Игонина М.И. Оценка влияния изменений климата на водный режим и сток рек бассейна Волги // *Вода: химия и экология*. № 4. 2013. С. 3–12.
2. Жапаркулова Е.Д. Тенденция изменения климата на современном этапе, прогноз на период до 2050 г. и его влияние на водность рек ледниково-снегового питания (на примере трансграничной реки Куркуреу-Суу, Таласский бассейн) // *Гидрометеорология и экология*. № 4. 2019. С. 70–82.
3. Волчек А.А., Грядунова О.И. Минимальный сток рек Беларуси. Брест: БрГУ. 2010. 300 с.
4. Парфомук С.И. Анализ многолетних колебаний годового стока воды реки Западная Двина // *Вестник Полоцкого государственного университета*. Сер. В: Прикладные науки. 2006. № 3. С. 178–182.
5. Гольберг М.А., Волобуева Г.В., Комаровская Е.В. Изменение основных климатических характеристик Беларуси в XX веке // *Доклад Национальной академии наук Беларуси*. Т. 47. 2003. № 1. С. 119–123.
6. Логинов В.Ф., Некрасова А.А., Данилович И.С. Поверхностные воды Беларуси // *Экологический бюллетень*. 2003. С. 21–25.
7. Карягин Ф.А. Об изменениях речных систем малых рек под влиянием антропогенной деятельности в условиях Чувашской Республики // *Проблемы гидрометеорологического обеспечения хозяйственной деятельности в условиях изменяющегося климата: сб. докл. Межд. научн. конф.* Минск, 2015. С. 63–65.
8. Фролова Н. Л. Гидрология рек. Антропогенные изменения речного стока: уч. пособие для вузов. М.: Изд-во Юрайт, 2023. 115 с.
9. Фролова Н.А., Киреева М.Б., Джамалов Р.Г. Изменения водного режима и сезонного стока рек ЕТР и их влияние на экстремальные гидрологические ситуации // *V Всероссийская научн. конф. «Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов»*. М., 2015. С. 345–348.

10. Лопух П.С., Герменчук М.Г., Партасенок И.С. Основные направления гидрометеорологических исследований в условиях нестабильного климата // Проблемы гидрометеорологического обеспечения хозяйственной деятельности в условиях изменяющегося климата: материалы Межд. научн. конф. Минск, 2015. С. 34–40.
11. Лопух П.С., Партасёнок И.С. Влияние атмосферной циркуляции на формирование гидрологического режима рек Беларуси. Минск: БГУ, 2013. 216 с.
12. Сикан А.В., Байдук О.В. Влияние изменения климата на водный режим рек южной и восточной частей Республики Беларусь // Гидрология. 2015. № 40. С. 61–70.
13. Кошелева Е.Д. Водность рек Алтайского края в условиях изменения климата // Известия Алтайского отделения Русского географического общества. 2023. № 2 (69). С. 5–16.
14. Шайдылдаева Н.М., Усубалиев Р.А., Мандычев А.Н. Влияние изменения климата на водность рек Чычкан и Бала-Чычкан Кетмен-Тюбинской котловины // Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана. 2022. № 3. С. 87–92.
15. Физическая география Витебской области: уч. пособие / под ред. А.Н. Галкина. Витебск: ВГУ имени П.М. Машерова, 2021. 235 с.
16. Домнин Д.А. Многолетние и внутригодовые изменения стока воды с российской части бассейна реки Западная Двина как отклик на колебания климатических параметров / Ученые записки РГГМУ. 2018. Вып. № 51. С. 63–70.
17. Малинин В.Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации: учебник. Т. 2. Анализ временных рядов и случайных полей. СПб.: РГГМУ, 2020. 196 с.
18. McGill R., Tukey J. W., Larsen W.A. Variations of Box Plots. *The American Statistician*. 1978. Vol. 32. No. 1. P. 12–16.
19. Tukey J.W. *Exploratory Data Analysis*. Reading MA: Addison-Wesley Publishing Co, 1977. 711 p.

REFERENCES

1. Alekseevsky N.I., Frolova N.L., Antonova M.M., Igonina M.I. Assessment of the impact of climate change on the water regime and river flow in the Volga basin. *Water: chemistry and ecology*. No. 4. 2013. P. 3–12 [In Russ.].
2. Zhaparkulova E.D. The trend of climate change at the present stage, forecast for the period up to 2050 and its impact on the water content of glacial-snow supply rivers (on the example of the transboundary Kurkureu-Suu River, Talas basin). *Hydrometeorology and Ecology*. No. 4. 2019. P. 70–82 [In Russ.].
3. Volchek A.A., Gryadunova O.I. The minimum flow of the rivers of Belarus. A.S. Pushkin Brest State University. Brest: BrGU. 2010. 300 p. [In Russ.].
4. Parfomuk S.I. Analysis of long-term fluctuations in the annual water flow of the Western Dvina River. *Bulletin of the Polotsk State University. Series B: Applied Sciences*. 2006. No. 3. P. 178–182 [In Russ.].
5. Golberg M.A., Volobueva G.V., Komarovskaya E.V. Changes in the main climatic characteristics of Belarus in the twentieth century. *Dokl. The National Academy of Sciences of Belarus*. Vol. 47. 2003. No. 1. P. 119–123 [In Russ.].
6. Loginov V.F., Nekrasova L.A., Danilovich I.S. Surface waters of Belarus. *Environmental bulletin*. 2003. P. 21–25 [In Russ.].
7. Karyagin F.A. On changes in the river systems of small rivers under the influence of anthropogenic activity in the conditions of the Chuvash Republic. *Problems of hydrometeorological support of economic activity in a changing climate: materials of the International Scientific Conference, 5-8 May 2015 Minsk, 2015*. P. 63–65 [In Russ.].
8. Frolova N. L. Hydrology of rivers. Anthropogenic changes in river flow: a textbook for universities. M.: Yurait Publishing House, 2023. 115 p. [In Russ.].
9. Frolova N.L., Kireeva M.B., Jamalov R.G. Changes in the water regime and seasonal flow of rivers of the ETR and their impact on extreme hydrological situations. *In Russian Scientific Conference "Fundamental problems of water and water resources"*, Moscow, September 15–18, 2015. M., 2015. P. 345–348 [In Russ.].

10. Lopukh P.S., Hermenchuk M.G., Partasenok I.S. The main directions of hydrometeorological research in an unstable climate. *Problems of hydrometeorological support of economic activity in a changing climate: materials of the International Scientific Conference*, 5–8 May 2015 Minsk, 2015. P. 34–40 [In Russ.].
11. Lopukh P.S., Partasenok I.S. The influence of atmospheric circulation on the formation of the hydrological regime of the rivers of Belarus. Minsk: BSU, 2013. 216 p. [In Russ.].
12. Sikan A.V., Baiduk O.V. The influence of climate change on the water regime of rivers in the southern and eastern parts of the Republic of Belarus. *Hydrology*. 2015. No. 40. P. 61–70 [In Russ.].
13. Kosheleva E.D. The water content of the rivers of the Altai Territory in the context of climate change. *Proceedings of the Altai branch of the Russian Geographical Society*. 2023. No. 2 (69). P. 5–16 [In Russ.].
14. Shaidyldaeva N.M., Usubaliev R.A., Mandychev A.N. The impact of climate change on the water content of the Chychkan and Bala-Chychkan rivers of the Ketmen-Tyubinsk basin. *Science, new technologies and innovations of Kyrgyzstan*. 2022. No. 3. P. 87–92 [In Russ.].
15. Physical geography of the Vitebsk region: a textbook. Edited by A.N. Galkin. Vitebsk: VSU, 2021. 235 p. [In Russ.].
16. Domnin D.A. Many-year and intra/urban changes of the water runoff from the Russian part of the Zapadnaya Dvina River basin as a response to fluctuations of the climatic parameters. *Uchenye zapiski RGGMU*. 2018. No. 51. P. 63–70 [In Russ.].
17. Malinin V.N. Statistical methods of analysis of hydrometeorological information: textbook. In 2 volumes: Vol. 2. Analysis of time series and random fields. St. Petersburg: RSHMU, 2020. 196 p. [In Russ.].
18. McGill R., Tukey J. W., Larsen W.A. Variations of Box Plots. *The American Statistician*. 1978. Vol. 32. No. 1. P. 12–16 [In Russ.].
19. Tukey J.W. *Exploratory Data Analysis*. Reading MA: Addison-Wesley Publishing Co, 1977. 711 p. [In Russ.].

Сведения об авторах:

Таврыкина Оксана Михайловна, канд. с.-х. наук, доцент, начальник отдела гидрологии и водоохранных территорий, РУП «Центральный научно-исследовательский институт комплексного использования водных ресурсов», 220086, Республика Беларусь, г. Минск, ул. Славинского, 1, корп. 2; ORCID 0009-0008-4662-0690; e-mail: tavrykina@mail.ru

Шмакова Марина Валентиновна, д-р геогр. наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория математических методов моделирования, Институт озероведения Российской академии наук (ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН), 196105, Россия, Санкт-Петербург, ул. Севастьянова, 9; ORCID 0000-0002-2393-0070; e-mail: m-shmakova@yandex.ru

Булак Иван Александрович, заведующий сектором использования водных ресурсов, РУП «Центральный научно-исследовательский институт комплексного использования водных ресурсов», 220086, Республика Беларусь, г. Минск, ул. Славинского, 1, корп. 2; ORCID 0000-0002-8275-3983; e-mail: i_bulak@tut.by

Русина Анастасия Олеговна, научный сотрудник, сектор использования водных ресурсов, РУП «Центральный научно-исследовательский институт комплексного использования водных ресурсов», 220086, Республика Беларусь, г. Минск, ул. Славинского, 1, корп. 2; ORCID 0009-0002-8936-796X; e-mail: omgwk@cricuwr.by

Громадская Елена Ивановна, начальник отдела поверхностных вод, РУП «Центральный научно-исследовательский институт комплексного использования водных ресурсов», 220086, Республика Беларусь, г. Минск, ул. Славинского, 1, корп. 2; ORCID 0009-0000-3379-4167; e-mail: elena.gromadskaya@yandex.ru

About the authors:

Aksana M. Taurykina, PhD, Associate Professor, Head of hydrology and water protection areas department of the Central Research Institute for Complex Use of Water Resources, ul. Slavinskogo,1/2, Minsk 220086, Republic of Belarus; ORCID 0009-0008-4662-0690; e-mail: tavyrkina@mail.ru

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

Ivan A. Bulak, Head of the water resources sector of the Central Research Institute for Complex Use of Water Resources, ul. Slavinskogo,1/2, Minsk 220086, Republic of Belarus; ORCID 0000-0002-8275-3983; e-mail: i_bulak@tut.by

Anastasiya O. Rusina, Researcher, Water Resources Sector, Central Research Institute for Complex Use of Water Resources, ul. Slavinskogo,1/2, Minsk 220086, Republic of Belarus; ORCID 0009-0002-8936-796X; e-mail: omgwk@cricuwr.by

Alena I. Hramadskaya, Head of the Surface Water Department, Central Research Institute for Complex Use of Water Resources, ul. Slavinskogo,1/2, Minsk 220086, Republic of Belarus; ORCID 0009-0000-3379-4167; e-mail: elena.gromadskaya@yandex.ru

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 20.05.2024. Дата выхода в свет 04.06.2024.

Формат 70x100¹/₁₆. 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

Станции метро: Академическая, Профсоюзная

Телефон: 8 (499) 125-52-79

E-mail: water@favr.ru, <http://voda.mnr.gov.ru>

ФГБУ РОССИЙСКИЙ НИИ КОМПЛЕКСНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ И ОХРАНЫ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

ФГБУ РосНИИВХ – научное подразделение Федерального агентства водных ресурсов, создан для научного обеспечения государственных функций управления 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.

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: 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: 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

