

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

№ 3, 2023



ИЗДАНИЕ ЖУРНАЛА
ОСУЩЕСТВЛЯЕТСЯ В РАМКАХ
ГОСУДАРСТВЕННОГО ЗАДАНИЯ,
УТВЕРЖДЕННОГО ФЕДЕРАЛЬНЫМ
АГЕНТСТВОМ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ



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)

Заслоновский В.Н., д-р техн. наук, профессор, Забайкальский государственный университет (Чита, Россия)

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

Козлов Д.В., д-р техн. наук, профессор, Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева (Москва, Россия)

Никифоров А.Ф., д-р хим. наук, профессор, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина (Екатеринбург, Россия)

Румянцев В.А., д-р геогр. наук, академик РАН, профессор, Институт озероведения РАН (Санкт-Петербург, Россия)

Селезнёв В.А., д-р техн. наук, профессор, Институт экологии Волжского бассейна РАН (Тольятти, Россия)

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)

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

МЕЖДУНАРОДНЫЙ СОВЕТ

Бурлибаев М.Ж., д-р техн. наук, профессор, Академия водохозяйственных наук РФ (Алматы, Республика Казахстан)

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

№ 3, 2023

ЕКАТЕРИНБУРГ
YEKATERINBURG



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)

Valeriy N. Zaslونovskiy, Dr. Sc. (Technical), Professor, Transbaikalian State University (Chita, 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, K.A. Timiryazev Russian State Agrarian University (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)

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)

Sergey V. Yasinskiy, Dr. Sc. (Geographical), Russian Academy of Sciences Institute of Geography (Moscow, Russia)

INTERNATIONAL BOARD

Malik Zh. Burlibayev, Dr. Sc. (Technical), Professor, Kazakhstan Agency of Applied Ecology (Almaty, Kazakhstan)

Bardukh K. Gabrielyan, Dr. Sc. (Biological), Professor, National Academy of Sciences of the Republic of Armenia (Yerevan, Armenia)

Günter Blöschl, Professor, Institute of Hydraulic Engineering and Water Resources Management (Vienna, Austria)

Dragan A. Savić, Professor, Centre for Water Systems University of Exeter (Exeter, Great Britain)

Carlo Gualteri, Professor, Federico II University (Napoli, Italy)

Q.J. Wang, Professor, University of Melbourne (Melbourne, Australia)

Slobodan P. Simonovic, Ph.D, University of Western Ontario (Ontario, Canada)

EXECUTIVE EDITOR

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

СОДЕРЖАНИЕ

УПРАВЛЕНИЕ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ

- Использование мобильных IT-средств для решения задач управления водными ресурсами при эксплуатации орошаемых участков
В.И. Коржов, И.В. Коржов, Д. А. Кудравец, О.В. Сорокина, Е.А. Волкова.....5
- Оценка привноса загрязнителей с атмосферными осадками на акватории и водосборные территории залива Петра Великого
Н.Н. Бортин, Д.Н. Василевский, Л.Н. Василевская, И.А. Лисина.....17

ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ, ВОДНЫЕ ОБЪЕКТЫ

- Многолетние изменения основных составляющих приходной части водного баланса крупнейших водохранилищ азиатской территории России
А.В. Измайлова, Т.В. Фуксова, К.А. Дубровская.....36
- Повышение температуры воды Куйбышевского водохранилища и риски водопользования
К.В. Селезнева, А.В. Селезнева, В.А. Селезнев.....49
- Влияние метеофакторов, свойств снега и климатических изменений на испарение с поверхности снежного покрова
С.А. Лавров.....63
- Содержание тяжелых металлов в воде рек Центрального Кавказа (бассейн реки Терек)
Ф.А. Атабиева, А.С. Отарова.....89
- Поиски и разведка месторождений пресных подземных вод в олигоценых палеодолинах Южного Зауралья
А.В. Скалин, В.А. Скалин, А.А. Скалин.....102

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

- Экология водных систем: применение ингибиторов коррозии для очистки сточных вод
Г.Б. Браяловский, А.Ф. Никифоров, О.Б. Насчетникова, Е.В. Мигалатий.....114
- Требования к оформлению материалов.....123

CONTENT

WATER RESOURCES MANAGEMENT

- The use of mobile IT-tools for solving of water management tasks
in the operation of irrigated plots
*V.I. Korzhov, I.V. Korzhov, D.A. Kudravets,
O.V. Sorokina, E.A. Volkova*.....5
- Evaluation of pollutants with atmospheric precipitation
in water areas and catchment areas of Peter the Great
N.N. Bortin, D.N. Vasilevsky, L.N. Vasilevskaya, I.A. Lisina.....17

WATER RESOURCES, WATER BODIES

- Long-term changes in the main components of the incoming part
of the water balance of the largest reservoirs in the Asian territory of Russia
A.V. Izmailova, T.V. Fuksova, K.A. Dubrovskaya..... 36
- The increase in the Kuibyshev Reservoir water temperature
and the risks of water use
K.V. Selezneva, A.V. Selezneva, V.A. Seleznev.....49
- Influence of meteorological factors, snow properties
and climatic changes on evaporation from the snow cover surface
S.A. Lavrov.....63
- Heavy metals content in the water of the rivers of the Central Caucasus
(the Terek River basin)
F.A. Atabieva, A.S. Otarova.....89
- Searching and surveying of the sweet groundwater deposits
in Oligocene paleovalleys of the Southern Trans-Ural
A.V. Skalin, V.A. Skalin, A.A. Skalin.....102

ECOLOGICAL ASPECTS OF WATER/ECONOMIC ACTIVITIES

- Ecology of aquatic systems: Application
of corrosion inhibitors for waste water treatment
G.B. Brayalovskiy, O.B. Naschetnikova, A.F. Nikiforov, E.V. Migalatiy.....114
- Requirements to the material to be accepted.....123

Использование мобильных IT-средств для решения задач управления водными ресурсами при эксплуатации орошаемых участков

В.И. Коржов¹ , И.В. Коржов² , Д.А. Кудравец^{1,2} , О.В. Сорокина¹ ,
Е.А. Волкова² 

 kvi.vi@yandex.ru

¹Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт им. А.К. Кортунова
ФГБОУ ВО «Донской государственный аграрный университет»,
г. Новочеркасск, Россия

²ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного
использования и охраны водных ресурсов», г. Ростов-на-Дону, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Современные требования к использованию и охране природных ресурсов определяют необходимость повышения качества и оперативности научных и инженерно-технических решений. Одним из основных направлений повышения эффективности принимаемых решений является использование средств информационно-технологической поддержки. В представленной работе акцентировано внимание на актуальности создания и применения мобильных IT-средств, показаны их возможности при реализации практических задач управления водными ресурсами. **Методы.** Объектами исследования, на которых продемонстрированы эти возможности, определены орошаемые участки, являющиеся одними из значимых водопотребителей водохозяйственного комплекса. В качестве средств информационно-технологической поддержки использовано специально разработанное программное приложение, ориентированное на применение в составе широкодоступных компьютерных средств и гаджетов. Определен алгоритм принятия решений при управлении водными ресурсами на водохозяйственном объекте с применением мобильных IT-средств. **Результаты.** Проведенное моделирование управления водными ресурсами на исходном орошаемом участке позволило определить численные значения и графики водоподдачи и водопотребления по интервалам управления, режимы работы регулирующей емкости, насосных агрегатов головного водозаборного сооружения. Показано, что мобильные IT-средства могут широко использоваться для решения ряда других задач, связанных с организацией и проведением работ на водохозяйственных объектах – планированием водопользования, эксплуатацией технических средств и сооружений, автоматизацией инженерно-технических расчетов и т. п. Сформулированы рекомендации по созданию и применению мобильных IT-средств.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: водные ресурсы, управление, орошаемые участки, информационные технологии, мобильные компьютерные средства, прикладное программное обеспечение.

Для цитирования: Коржов В.И., Коржов И.В., Кудравец Д.А., Сорокина О.В., Волкова Е.А. Использование мобильных IT-средств для решения задач управления водными ресурсами при эксплуатации орошаемых участков // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2023. № 3. С. 5-16. DOI: 10.35567/19994508_2023_3_1.

Дата поступления 13.04. 2023.

© Коржов В.И., Коржов И.В., Кудравец Д.А., Сорокина О.В., Волкова Е.А., 2023

THE USE OF MOBILE IT TOOLS FOR SOLVING OF WATER MANAGEMENT TASKS IN THE OPERATION OF IRRIGATED PLOTS

Victor I. Korzhov¹  , Ivan V. Korzhov² , Dmitriy A. Kudravetz^{1,2} ,
Oksana V. Sorokina¹ , Ekaterina A. Volkova² 

 kvi.vi@yandex.ru

¹Novocherkassk reclamation engineering institute named after A.K. Kortunov.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Don State Agrarian University", Novocherkassk, Russia

²Federal State Budgetary Institution "Russian Research Institute for Complex Use and Protection of Water Resources", Rostov-on-Don, Russia

ABSTRACT

Relevance. Modern requirements for the use and protection of natural resources determine the need to improve the quality and efficiency of scientific and engineering decisions. One of the main ways of such improvement is the use of information and technological support tools. The supplied work is focused on the urgency and significance of creation and application of mobile IT-tools, and it demonstrates their potential in realization of practical tasks of water resources management. **Methods.** Irrigated plots as one of the significant water consumers within the water management complex stakeholders, have been identified as the objects on which these capabilities have been demonstrated. A specially designed software application, oriented on widely available computer tools and gadgets, has been used as an information-technological support tool. A decision-making algorithm for water resources management at the water management facility under conditions of using mobile IT tools has been determined. **Results.** Conducted simulation of water resources management on initial irrigated plot allowed determining numerical values and schedules of water supply and water consumption by management intervals, regulating capacity operation modes, pumping units operation modes of head water intake structure. In addition, it is noted that mobile IT tools can be widely used to solve a number of other tasks related to organization and carrying out works at water management facilities: planning of water use, operation of technical facilities and structures, automation of engineering calculations, etc. Recommendations on the creation and application of mobile IT tools in the sector are formulated.

Keywords: water resources, management, irrigated areas, operation, information technology, mobile computing, software applications.

For citation: Korzhov V.I., Korzhov I.V., Kudravets D.A., Sorokina O.V., Volkova E.A. The use of mobile IT-tools for solving of water management tasks in the operation of irrigated plots. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2023. No. 3. P. 5-16. DOI: 10.35567/19994508_2023_3_1.

Received 13.04. 2023.

ВВЕДЕНИЕ

Использование водных ресурсов при эксплуатации орошаемых земель – сложный процесс, требующий учета и оценки большого количества факторов, начиная от источника водных ресурсов и заканчивая водно-физическими характеристиками почв, потребностями во влаге растений, текущими природно-климатическими условиями и т. д. [1–3]. Кроме этого, следует учитывать и технологические возможности современных технических средств, используемых при организации и проведении орошения: насосных станций, дождеваль-ных машин, подпорно-регулирующих гидротехнических сооружений [4, 5]. Их несогласованная работа может приводить к необоснованным потерям или

дефицитам воды и, как следствие, – к потерям урожайности орошаемых сельскохозяйственных культур, нарушениям экологического равновесия мелиорируемых земель, дефициту водных ресурсов на водохозяйственном участке и т. п. [6].

Повысить качество принимаемых технических решений, в т. ч. и связанных с управлением водными ресурсами, в настоящее время можно с помощью использования специальных программно-компьютерных средств и технологий [7–9]. Их применение для решения задач управления водными ресурсами бассейнов рек, водохранилищ, отдельных гидротехнических комплексов, оросительных систем доказало свою актуальность и эффективность [10–13]. При этом, как правило, использовались и используются достаточно мощные средства информационно-технологической поддержки, специально разработанное программное обеспечение, единые базы данных^{1,2} [14, 15]. Разработка и эксплуатация таких средств требует значительных затрат, привлечения усилий больших научно-технических коллективов, проведения соответствующей подготовки кадров и т. п.

Иначе обстоят дела у «рядовых» водопользователей, работающих непосредственно «на земле» и занимающихся эксплуатацией относительно небольших водохозяйственных участков. Применение «больших» ИТ-средств непосредственно в контуре эксплуатации этих участков существенно ограничено, что связано с высокой стоимостью этих средств, сложностью их эксплуатации и с недостаточной оперативностью применения. Таким образом, возникает потребность в разработке относительно простых средств информационно-технологической поддержки («малых» ИТ-средств), которые могли бы работать практически на всех видах широкодоступных и недорогих компьютерных устройствах и гаджетах, а также предусматривать возможность оперативной адаптации к конкретным условиям применения.

В связи этим целью представленной работы являлось акцентирование внимания на актуальности создания и применения «малых» ИТ-средств, ориентированных на решение локальных научно-технических задач, а также демонстрация их возможностей для решения практических задач управления водными ресурсами на водохозяйственных объектах нижнего уровня.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объектов, для которых были продемонстрированы возможности управления водными ресурсами с использованием мобильных ИТ-средств, определены орошаемые участки, водоподача на которые осуществляется с использованием водозаборных насосных станций, а водопотребление – с применением дождевальных машин в соответствии с планами полива сельскохо-

¹ Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022612277 Российская Федерация. Программа имитационного моделирования режимов подачи воды на орошаемый участок с использованием бассейна-регулятора: № 2022611321: заявл. 02.02.2022; опублик. 09.02.2022 / О.В. Сорокина, В.И. Коржов, И.В. Ольгаренко [и др.]; ФГБОУ ВО «Донской государственный аграрный университет». EDN DZENSU.

² Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021664539 Российская Федерация. Программа имитационного моделирования режимов водоподачи на орошаемое поле на заданный период регулирования: № 2021619068: заявл. 09.06.2021; опублик. 08.09.2021 / О.В. Сорокина, В.И. Коржов, И.В. Ольгаренко, И.В. Коржов; ФГБОУ ВО «Донской гос. аграрный унив-т». EDN NМKHAJ.

зяйственных культур. Как правило, для согласования графиков водоподачи и водопотребления в контуре управления используются регулирующие емкости.

Алгоритм управления водными ресурсами на таких объектах предполагает:

- управление эксплуатацией насосных агрегатов головного водозаборного сооружения;
- оперативный контроль уровня воды в регулирующих емкостях;
- управление режимами забора воды, подаваемой на орошаемый участок из регулирующих емкостей.

При этом одновременно должен осуществляться оперативный контроль за процессом полива сельскохозяйственных культур, включающий оценку складывающейся на объекте водохозяйственной, природно-климатической, эксплуатационной и других ситуаций.

Укрупненный алгоритм принятия решений по управлению водными ресурсами на орошаемом участке представлен на рис. 1.

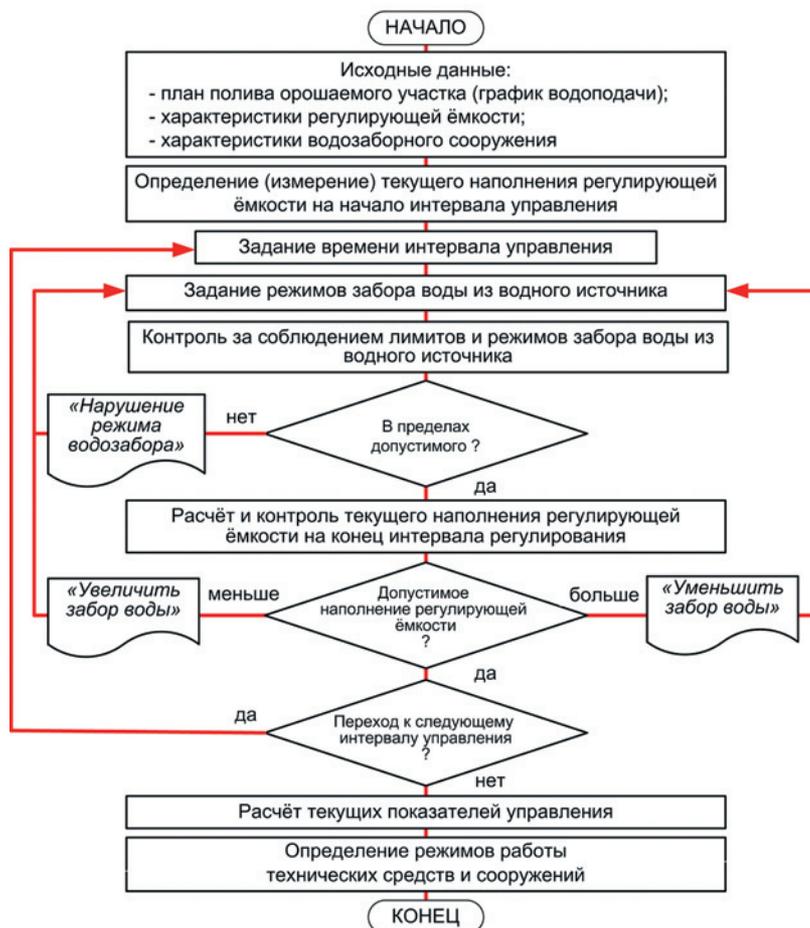


Рис. 1. Укрупненный алгоритм принятия решений по управлению водными ресурсами при эксплуатации орошаемого участка.

Fig. 1. An enlarged decision-making algorithm for organizing and conducting water management in the operation of an irrigated area.

Для моделирования режимов управления водными ресурсами на объекте и определения его количественных и качественных показателей применена «Программа имитационного моделирования режимов подачи воды на орошаемый участок с использованием бассейна-регулятора» [16], экранная форма которой представлена на рис. 2.

Программа обеспечивает моделирование возможных режимов подачи из водного источника на основе данных о сроках и нормах полива орошаемого участка, технических характеристик регулирующей емкости и допустимых режимов забора воды из этого источника.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ:										
Интервал управления, ч	24.0									
План забора воды на орошаемый участок по интервалам управления:										
№ интервала управления->	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Расход, л/с	140	70	0	140	70	140	210	70	0	0
Объем, тыс.м³	12.096	6.048	0.000	12.096	6.048	12.096	18.144	6.048	0.000	0.000
Характеристики регулирующей емкости:										
- максимальный объем регулирования, тыс.м³ =	20.0									
- минимальный объем регулирования, тыс.м³ =	1.0									
- объем на начало управления, тыс.м³ =	13.0									
ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ УПРАВЛЯЕМОГО ОБЪЕКТА ПО ИНТЕРВАЛАМ УПРАВЛЕНИЯ:										
№ интервала регулирования->	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Объем максимальный	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
Объем минимальный	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Объем текущий	13.00	12.14	13.00	17.32	9.54	10.41	9.54	2.63	7.82	12.14
Объем водоподачи	11.23	6.91	4.32	4.32	6.91	11.23	11.23	4.32	4.32	4.32
Объем водозабора	-12.10	-6.05	0.00	-12.10	-6.05	-12.10				
Баланс	-0.86	0.86	4.32	-7.78	0.86	-0.86				
УПРАВЛЕНИЕ ПОДАЧЕЙ ВОДЫ НА ОБЪЕКТ ПО ИНТЕРВАЛАМ УПРАВЛЕНИЯ:										
№ интервала регулирования->	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Расход 1-го насосного агр., л/с	80	80	0	0	80	80	80	80	0	0
Расход 2-го насосного агр., л/с	50	0	50	50	0	50	50	50	50	50
Суммарный расход, л/с	130	80	50	50	80	130	130	130	50	50
Объем нараст.итогом, тыс.м³	11.232	18.14	22.46	26.78	33.7	44.93	56.16	67.39	71.71	76.03
Инструкция:	- ячейки для ввода исходных данных; - ячейки с автоматически рассчитываемыми значениями - ячейки с поясняющим текстом									

Рис. 2. Экранная форма «Программы имитационного моделирования режимов подачи воды на орошаемый участок с использованием бассейна-регулятора».

Fig. 2. Screen form «Simulation programs for simulation of water supply regimes to an irrigated plot using a basin regulator».

Программа включает: зону ввода данных интервала управления, ч; зону ввода данных о планируемых заборах воды на орошаемый участок по интервалам управления, л/с; зону ввода данных о технических характеристиках регулирующей емкости; зону ввода данных о расходах воды, подаваемых на орошаемый участок из водного объекта, л/с; зону табличного контроля за текущими параметрами объекта управления (рис. 2).

Следует отметить, что данная программа реализована на базе популярного и общедоступного в условиях реальной работы на объектах орошаемого земледелия средства – пакета Microsoft Office. В соответствии с этим состав ре-

шаемых в программе задач определяется функциональными возможностями этого пакета. Однако это не означает, что эта и другие задачи не могут решаться с помощью других программно-компьютерных средств и пакетов, которые могут быть использованы в составе мобильных ИТ-средств.

В качестве реального объекта водопользования был выбран орошаемый участок, входящий в состав Миусской оросительной системы Ростовской области. Его местоположение на плане и контур, для которого проводилось управление водными ресурсами, представлены на фрагменте схемы Миусской оросительной системы (рис. 3).



Рис. 3. Местоположение орошаемого участка на Миусской оросительной системе и контур, для которого обрабатывалось управление водными ресурсами.

Fig. 3. Location of the irrigated area on the Miuss irrigation system and the contour for which water management was conducted.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Задача управления водными ресурсами состояла в том, чтобы, исходя из декадного плана подачи воды на орошаемый участок и оперативных данных о запасах воды в регулирующей емкости, определить режимы подачи воды к участку из водного объекта (распределительного канала МР-1 Миусской оросительной системы).

Структура контура, для которого обрабатывался алгоритм управления на исходном орошаемом участке, представлена на рис. 4. Контур управления включает: головное водозаборное сооружение (насосную станцию), забирающую воду из канала МР-1; участок закрытого трубопровода, транспортирующего воду в регулирующую емкость (бассейн суточного регулирования); регулирующую емкость; мелиоративную насосную станцию; шестипольный орошаемый участок.

В качестве исходных данных приняты:

- интервал управления – 24 ч;

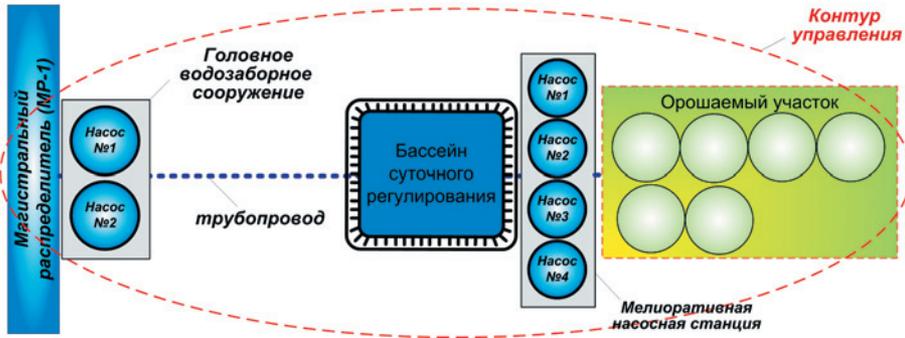


Рис. 4. Структура контура управления водными ресурсами на исходном орошаемом участке.

Fig. 4. Structure of the contour, for which water management was carried out on the initial irrigated plot.

- режимы забора воды на орошаемый участок по интервалам управления (табл. 1);
- количество насосных агрегатов на водозаборном сооружении – 2 ед.;
- производительность насосных агрегатов головного водозаборного сооружения: первый насосный агрегат 80 л/с, второй насосный агрегат 50 л/с;
- данные регулирующей емкости: минимально допустимый объем воды – 1,0 тыс. м³, максимально допустимый объем воды – 20 тыс. м³;
- объем в регулирующей емкости на начало управления – 13 тыс. м³.

Таблица 1. Режимы забора воды на орошаемый участок по интервалам управления
Table 1. Water intake modes per an irrigated plot of management intervals

Интервал управления	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Расходы, л/с	140	70	0	140	70	140	210	70	0	0

Примечание: данные о режимах забора воды взяты из заявки на водоподачу, сформированной в соответствии с планом полива орошаемого участка. Для этого использована «Программа имитационного моделирования режимов водоподачи на орошаемое поле на заданный период регулирования» [17], ориентированная на применение мобильных ИТ-средств. Ее описание выходит за рамки настоящей работы.

Моделирование управления осуществлялось посредством имитационного «включения-выключения» насосных агрегатов головного водозаборного сооружения (ввода соответствующих значений их расходов) и контроля за объемами воды в регулирующей емкости в соответствии с алгоритмом управления, представленном на рис. 1.

По результатам применения вышеописанных ИТ-средств определены следующие параметры управления водными ресурсами на исходном объекте водопользования:

1. Численные значения подаваемых и забираемых объемов воды по интервалам управления (табл. 2).
2. Графики подачи и забора воды на объекте водопользования (рис. 2).
3. Режимы работы регулирующей емкости (рис. 6).

Таблица 2. Численные значения объемов подачи и забора воды по интервалам управления, тыс. м³Table 2. Numerical values of water supply and water intake volumes in respect of management intervals, thousand m³

Интервал управления	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Водоподача	11,2	6,9	4,3	4,3	6,9	11,2	11,2	11,2	4,3	4,3
Водозабор	12,1	6,1	0,0	12,1	6,1	12,1	18,1	6,1	0,0	0,0
Баланс	-0,9	0,8	4,3	-7,8	0,8	-0,9	-6,9	5,1	4,3	4,3

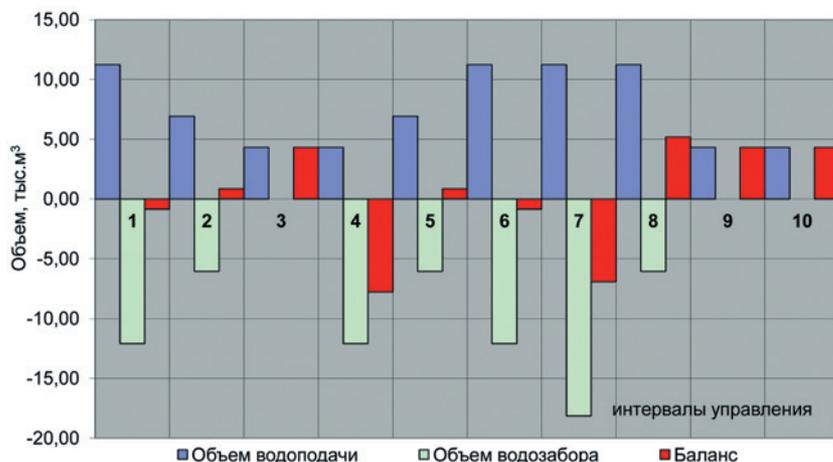
РЕЖИМЫ ПОДАЧИ И ЗАБОРА ОБЪЕМОВ ВОДЫ НА ОБЪЕКТЕ ПО ИНТЕРВАЛАМ УПРАВЛЕНИЯ, ТЫС.М³**Рис. 5.** Графики подачи и забора воды на объекте.

Fig. 5. Water supply and intake schedules at the site.

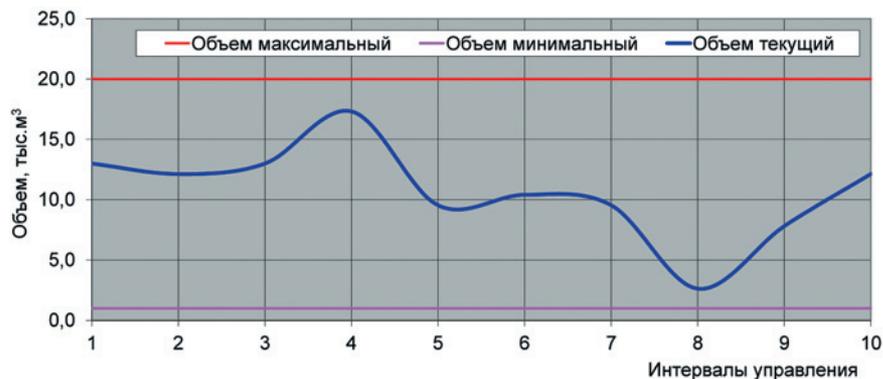
ГРАФИК СРАБОТКИ ОБЪЕМОВ В РЕГУЛИРУЮЩЕЙ ЕМКОСТИ ПО ИНТЕРВАЛАМ УПРАВЛЕНИЯ, ТЫС. М³**Рис. 6.** Режимы работы регулирующей емкости.

Fig. 6. Modes of operation of the regulating reservoirs.

Одновременно с этим был рассчитан ряд оперативных результатов управления (см. рис. 2), а также решена одна из основных задач технической эксплуатации, обеспечивающей подачу воды на объект водопользования насосной станции, – определение режимов работы насосных агрегатов (табл. 3).

Таблица 3. Режимы работы насосных агрегатов насосной станции («+» – включен, «-» – выключен)

Table 3. The pumping station pumping units operation modes («+» is “on”, «-» is “off”)

Интервал управления	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Первый агрегат	+	+	-	-	+	+	+	+	-	-
Второй агрегат	+	-	+	+	-	+	+	+	+	+

Продемонстрированные возможности мобильных ИТ-средств по решению задач управления водными ресурсами при эксплуатации орошаемых участков позволяют сделать вывод, что при относительной простоте и небольшой стоимости они значительно повышают качество и оперативность принимаемых инженерно-технических решений. Это подтверждается опытом разработки и применения других мобильных ИТ-средств, используемых для информационно-технологической поддержки целого ряда практических задач, связанных с управлением водными ресурсами и эксплуатацией водохозяйственных систем и объектов [18]:

- планированием водопользования;
- определением режимов эксплуатации и технического обслуживания средств и сооружений, используемых на водохозяйственных объектах;
- проведением различного рода инженерно-технических расчетов;
- автоматизацией рутинных работ и т. п.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Опыт создания мобильных ИТ-средств позволяет сформулировать следующие рекомендации по их разработке и применению:

1. В качестве технических носителей разрабатываемых средств желательно использовать широкодоступные и относительно недорогие компьютерные средства (персональные компьютеры, мобильные телефоны, планшеты и другие гаджеты).
2. Разрабатываемые средства должны обеспечивать возможность их оперативной адаптации на конкретных объектах, учитывать их уникальность, условия эксплуатации, сезонность работы и т. п.
3. Техническое и информационно-программное обслуживание разрабатываемых средств должно, в основном, осуществляться усилиями персонала, обеспечивающего эксплуатацию водохозяйственных объектов.
4. Разрабатываемые средства должны максимально возможно обеспечивать информационную совместимость как с аналогичными ИТ-средствами, используемыми на водохозяйственном объекте, так и с другими средствами информационно-технологической поддержки разных уровней.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дубенок Н.Н., Болотин Д.А., Новиков А.А., Болотин А.Г. Эффективность использования водных ресурсов в орошаемом земледелии // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2018. № 3 (51). С. 83–90.
2. Юрченко И.Ф. Планирование системного водораспределения: современное состояние и приоритетные направления совершенствования // Мелиорация и гидротехника. 2023. Т. 13. № 1. С. 184–199.

3. Щедрин В.Н., Кожанов А.Л., Коржов В.И., Коржов И.В. Особенности моделирования распределения водных ресурсов на системах двойного регулирования водного режима почв // Мелиорация и водное хозяйство. 2022. № 1. С. 38–42. DOI: 10.32962/0235-2524-2021-6-38-43.
4. Щедрин В.Н., Колганов А.В., Васильев С.М., Чураев А.А. Оросительные системы России: от поколения к поколению. Ч. 1. Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2013. 395 с.
5. Ткачев А.А. Современные проблемы в управлении водораспределением в магистральных каналах оросительных систем // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. 2021. Т. 11. № 2. С. 1–23. DOI: 10.31774/2222-1816-2021-11-2-1-23.
6. Сенчуков Г.А., Воеводина Л.А. Использование водных ресурсов в федеральных учреждениях мелиоративной отрасли // Мелиорация и гидротехника. 2023. Т. 13. № 1. С. 101–117.
7. Щедрин В.Н., Коржов В.И., Белоусов А.А. Подходы к формированию принципов создания современных мелиоративных систем и объектов // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. 2020. № 3(39). С. 170–188. DOI: 10.31774/2222-1816-2020-3-170-188. EDN LCTTCSO.
8. Юрченко И.Ф. Системы поддержки принятия решений как фактор повышения эффективности управления мелиорацией // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. 2017. № 2(26). С. 195–200.
9. Щедрин В.Н., Васильев С.М., Слабунов В.В. [и др.] Подходы к формированию информационной системы «Цифровая мелиорация» // Информационные технологии и вычислительные системы. 2020. № 1. С. 53–64. DOI: 10.14357/20718632200106.
10. Косолапов А.Е. Совершенствование процесса управления водными ресурсами бассейна реки на основе автоматизированных информационно-советующих систем: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Екатеринбург, 1996. 44 с. EDN ZJXQCSJ.
11. Коржов В.И. Информационно-технологическое обеспечение водопользования на оросительных системах // Известия вузов Северо-Кавказского региона. 2006. С. 127. EDN QKYNOR.
12. Юрченко И.Ф., Трунин В.В. Автоматизированное управление водораспределением на межхозяйственных оросительных системах // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2012. № 2. С. 178–184.
13. Коржов И.В., Журавлев А.А. Информационно-аналитический инструментарий при управлении режимами работы гидроузла Белгородского водохранилища // Успехи современного естествознания. 2020. № 6. С. 67–74.
14. Ольгаренко В.И., Ольгаренко Г.В., Ольгаренко И.В. [и др.] Программный комплекс планирования водопользования для оросительных систем на основе информационных технологий. 2017. № 5. С. 39–43.
15. Селюков В.И., Скачедуб Е.А. Информационное обеспечение системы управления водопользованием на Миусской оросительной системе // Ресурсосберегающие экологически устойчивые технологии в сельскохозяйственном производстве: мат-лы Междунар. науч.-практ. конф. (Шумаковские чтения совм. с заседанием секции РАСХН), Новочеркасск: Лик, 2010. С. 209–214. EDN SYXELT.
16. Коржов В.И. Использование средств информационно-технологической поддержки на мелиоративных системах. ООО «Лик», 2022. 167 с.
17. Yurchenko I.F. Information support for decision making on dispatching control of water distribution in irrigation // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1015. P. 042063. DOI: 10.1088/1742-6596/1015/4/042063.
18. Yurchenko I.F. Automatization of water distribution control for irrigation // International Journal of Advanced and Applied Sciences. 2017. Vol. 4. Iss. 2. P. 72–77.
19. Xiang X., Li Q., Khan Q., Ibrahim O. Urban water resource management for sustainable environment planning using artificial intelligence techniques // Environmental Impact Assessment Review. January 2021. 86 p. Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com> (дата обращения 28.02.2023).
20. Issaou, M., Jellali S., Zorpas A., Dutournie P. Membrane technology for sustainable water resources management: Challenges and future projections / Sustainable Chemistry and Pharmacy. April 2022. 25 p. Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com> (дата обращения 28.02.2023).

REFERENCES

1. Dubenok N. N., Bolotin D. A., Novikov A. A., Bolotin A. G. Effectiveness of water use in irrigated agriculture. *Proceedings of the Nizhnevolzhskiy agro-university complex: science and higher professional education*: a collection, 2018. no. 3 (51). P. 83–90 (In Russ.).

2. Yurchenko I. F. Planning of system water allocation: current state and priority directions of improvement. *Land reclamation and hydrotechnics*. 2023. Vol. 13. No. 1. P. 184–199. Access mode: <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2023-13-1-184-199> (circulation date 28.02.2023) (In Russ.).
3. Shchedrin V. N., Kozhanov A.L., Korzhov V.I., Korzhov I. V. Peculiarities of modeling of water allocation on the systems of dual regulation of the water regime of soils. *Land Reclamation and Water Management*. 2022. No. 1. P. 38–42. DOI: 10.32962/0235-2524-2021-6-38-43 (In Russ.).
4. Shchedrin V. N., Kolganov A. V., Vasiliev S.M., Churaev A.A. Irrigation systems of Russia from generation to generation. In 2 parts. Part 1. Novocherkassk: SRSTU (NPI), 2013. 395 c. (In Russ.).
5. Tkachev A. A. Modern problems in water distribution management in main canals of irrigation systems. *Scientific Journal of the Russian Research Institute of Land Reclamation Problems*. 2021. Vol. 11. No. 2. P. 1–23. DOI 10.31774/2222-1816-2021-11-2-1-23. (In Russ.).
6. Senchukov G.A., Voevodina L.A. Use of water resources in federal institutions of ameliorative sector. *Amelioration and Hydraulic Engineering: collection*, 2023. Vol. 13, No. 1. P. 101–117. Access mode: <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2023-13-1-101-117> (circulation date 28.02.2023) (In Russ.).
7. Shchedrin V. N., Korzhov V. I., Belousov A. A. Approaches to the formation of principles of modern reclamation systems and facilities. *Scientific Journal of the Russian Research Institute of Land Reclamation Problems*. 2020. № 3(39). P. 170–188. DOI: 10.31774/2222-1816-2020-3-170-188 (In Russ.).
8. Yurchenko I. F. Decision support systems as a factor in improving the efficiency of land reclamation management. *Scientific Journal of the Russian Research Institute of Land Reclamation Problems*. 2017. No 2(26). P. 195–200 (In Russ.).
9. Shedrin V.N., Vasiliev S.M., Slabunov V. V. [et al.] Approaches to the formation of the information system “Digital land reclamation”. *Information technologies and computing systems*. Vol. No. 1. P. 53–64. DOI: 10.14357/20718632200106 (In Russ.).
10. Kosolapov A.E. Improvement of river basin water management process based on automated information-advisory systems: Ph. Ekst., 1996. 44 p. (In Russ.).
11. Korzhov V. I. Information-technological support of water use in irrigation systems. Rostov-on-Don: *Izvestiya vuzov [News of higher education institutions]*. Sev.-Kav. reg., 2006. 127 p. (In Russ.).
12. Yurchenko I.F., Trunin V. V. Automated management of water allocation in inter-farm irrigation systems. *Proceedings of the Nizhnevolskiy agro-university complex: science and higher professional education*, 2012. No. 2. P. 178–184 (In Russ.).
13. Korzhov I. V., Zhuravlev A. A. Information-analytical toolkit for managing the operating regimes of the Belgorod reservoir hydroscheme. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya [Achievements of contemporary sciences]*. Vol. No. 6. P. 67–74. (In Russ.).
14. Olgarenko V. I., Olgarenko G. V., Olgarenko I. B. [et al.] Software complex of water use planning for irrigation systems based on information technology. 2017. No. 5. P. 39–43. (In Russ.).
15. Selukov V.I., Skachadub E. A. Information support for water use management system on the Miuss irrigation system. *Resource-saving environmentally sustainable technologies in agricultural production: Mat. Shumakov readings in conjunction with the session of the section of the Russian Academy of Agricultural Sciences*, Novocherkassk: Lik, 2010. P. 209–214 (In Russ.).
16. Korzhov V.I. The use of information-technological support on reclamation systems: LLC “Lik”, 2022. 167 p. (In Russ.).
17. Yurchenko I.F., 2018. Information support for decision making on dispatching control of water distribution in irrigation. *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 1015. P. 042063. DOI: 10.1088/1742-6596/1015/4/042063 (In Russ.).
18. Yurchenko I. F. Automatization of water distribution control for irrigation / *International Journal of Advanced and Applied Sciences*. 2017. Vol. 4. Iss. 2. P. 72–77.
19. Xiang, X, Li, Q, Khan, Q, Ibrahim, O Urban water resource management for sustainable environment planning using artificial intelligence techniques. *Environmental Impact Assessment Review*. January 2021. 86 p. Access regime: <https://www.sciencedirect.com> (дата обращения 28.02.2023).
20. Issaou M, Jellali S., Zorpas A., Dutournie P. Membrane technology for sustainable water resources management: Challenges and future projections // *Sustainable Chemistry and Pharmacy*. April 2022. 25 p. Access regime: <https://www.sciencedirect.com> (дата обращения 28.02.2023).

Сведения об авторах:

Коржов Виктор Иванович, канд. техн. наук, профессор, Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт им. А.К. Кортунова ФГБОУ ВО «Донской государственный аграрный университет», 346428, Россия, Ростовская область, г. Новочеркасск, Пушкинская улица 111; ORCID: 0009-0001-3634-1806; e-mail: kvi.vi@yandex.ru

Коржов Иван Викторович, заведующий отделом информационно-аналитического обеспечения комплексного использования и охраны водных объектов, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», 344037, Россия, Ростовская область, г. Ростов-на-Дону, ул. Ченцова, 10а; ORCID: 0009-0004-7450-7768; e-mail: ivkorzhov@yandex.ru

Кудравец Дмитрий Анатольевич, аспирант, Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт им. А.К. Кортунова ФГБОУ ВО «Донской государственный аграрный университет», 346428, Россия, Ростовская область, г. Новочеркасск, Пушкинская улица 111; главный специалист отдела по проектированию водоохраных зон, прибрежных защитных полос и береговых линий, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», 344037, Россия, Ростовская область, г. Ростов-на-Дону, ул. Ченцова, 10а; ORCID: 0009-0004-2351-9873; e-mail: dimas_062@mail.ru

Сорокина Оксана Викторовна, ведущий специалист, отдел разработки проектов водоохраных зон, прибрежных защитных полос и береговых линий – сектор ведения каталогов проектных материалов, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», 344037, Россия, Ростовская область, г. Ростов-на-Дону, ул. Ченцова, 10а; (ФГБУ РосНИИВХ); ORCID: 0009-0007-6822-2549; e-mail: oksana.sorokina27@gmail.com

Волкова Екатерина Александровна, аспирант, Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт им. А.К. Кортунова ФГБОУ ВО «Донской государственный аграрный университет», 346428, Россия, Ростовская область, г. Новочеркасск, Пушкинская улица 111; ORCID: 0009-0007-6471-4490; e-mail: 7katerina7tomashevich7@mail.ru.

About the author:

Victor I. Korzhov, Candidate of Technical Sciences, Professor, A.K. Kortunov Novochoerkassk Reclamation Engineering Institute, “Don State Agrarian University”, ul. Pushkinskaya, 111, Novochoerkassk 346428, Russia; ORCID: 0009-0001-3634-1806; e-mail: kvi.vi@yandex.ru

Ivan V. Korzhov, Head of the Department of Information and Analytical Support for Integrated Use and Protection of Water Bodies, Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection, ul. Chentsova, 10A, Rostov-on-Don, 344037, Russia; ORCID: 0009-0004-7450-7768; e-mail: ivkorzhov@yandex.ru

Dmitriy A. Kudravetz, Post-graduate Student, A.K. Kortunov Novochoerkassk reclamation engineering institute “Don State Agrarian University”, ul. Pushkinskaya, 111, Novochoerkassk 346428, Russia; Chief Specialist of the Department for Design of Water Protection Zones, Coastal Protective Strips and Shorelines, Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection, ul. Chentsova, 10A, Rostov-on-Don, 344037, Russia; ORCID: 0009-0004-2351-9873; e-mail: dimas_062@mail.ru

Oksana V. Sorokina, Leading Specialist, Department for development of projects of water protection zones, coastal protective strips and shorelines, Sector for the maintenance of catalogs of project materials, Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection, ul. Chentsova, 10A, Rostov-on-Don, 344037, Russia; ORCID: 0009-0007-6822-2549; e-mail: oksana.sorokina27@gmail.com

Ekaterina A. Volkova, Post-graduate Student, A.K. Kortunov Novochoerkassk reclamation engineering institute, “Don State Agrarian University”, ul. Pushkinskaya, 111, Novochoerkassk 346428, Russia; ORCID: 0009-0007-6471-4490; e-mail: 7katerina7tomashevich7@mail.ru

Оценка привноса поллютантов с атмосферными осадками на акватории и водосборные территории залива Петра Великого

Н.Н. Бортин¹ ✉, Д.Н. Василевский¹, Л.Н. Василевская² , И.А. Лисина² 

✉ nbortin@mail.ru

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

² ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», г. Владивосток, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. В последние годы прогрессирующее загрязнение вод прибрежных морских акваторий в совокупности с глобальным потеплением климата оказывает негативное воздействие на морские экосистемы. Считается, что основными источниками загрязнения вод являются локальные бытовые, промышленные сточные воды и нефтепродукты. Однако имеются и другие мощные внешние источники загрязнения – это атмосферный и материковый сток, которые формируются в виде выпадения поллютантов с атмосферными осадками на морские акватории и их водосборные территории. **Методы.** Использованы материалы международной станции сети EANET «Приморская» по привносу поллютантов с атмосферными осадками и данные наблюдений за атмосферными осадками в пунктах Росгидромета, расположенных на водосборной территории залива Петра Великого за 2008–2020 гг. **Результаты.** Определена ежегодная масса поступления растворенных веществ на морские акватории и водосборные территории рек бассейна залива Петра Великого. Показано, что содержание основных ионов в атмосферных осадках за рассматриваемый период увеличилось на 40 % и лишь в 2019 и 2020 гг. (по причине локдауна) отмечено некоторое снижение в динамике привноса содержания сульфатов и суммарного азота в трансграничном переносе с сопредельных территорий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: кислотность атмосферных осадков, сеть EANET, поллютанты, водосборная территория, акватория залива Петра Великого.

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания «Разработка научно обоснованных показателей допустимых воздействий на водные объекты прибрежных морских акваторий залива Петра Великого (Приморский край) и рекомендаций по снижению негативного антропогенного воздействия» по разделу «Научно-аналитическое обеспечение деятельности территориальных органов Росводресурсов».

Для цитирования: Бортин Н.Н., Василевский Д. Н., Василевская Л.Н., Лисина И.А. Оценка привноса поллютантов с атмосферными осадками на акватории и водосборные территории залива Петра Великого // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2023. № 3. С. 17-35. DOI: 10.35567/19994508_2023_3_2.

Дата поступления 18.04.2023.

EVALUATION OF THE DYNAMICS OF POLLUTANT FALLOUT WITH ATMOSPHERIC PRECIPITATION ON THE WATERSHED AREAS AND WATER AREAS OF PETER THE GREAT BAY

Nikolay N. Bortin¹ , Denis N. Vasilevsky¹, Lyubov N. Vasilevskaya² ,
Irina A. Lisina² 

 nbortin@mail.ru

¹ Far Eastern Branch of FSBI Russian Research Institute for the Integrated Use and Protection of Water Resources, Vladivostok, Russia;

² FGAOU VO "Far Eastern Federal University", Vladivostok, Russia

ABSTRACT

Relevance. In recent years, significant concern has been caused by the progressive pollution of the waters of coastal marine areas, which, superimposed on global warming, has a negative impact on marine ecosystems. It is believed that the main sources of water pollution are local domestic, industrial wastewater and oil products. However, there are other, powerful external sources of pollution: this is an atmospheric and continental runoff, which is formed in the form of direct fallout of pollutants with precipitation in the water area and their catchment areas. **Methods.** We have used the materials of the international station of the EANET network "Primorskaya" on the input of pollutants with atmospheric precipitation and the materials of the observation points for atmospheric precipitation of Roshydromet located in the drainage area of Peter the Great Bay for 2008-2020. **Results.** It is shown that the content of the main ions in precipitation over the period under review increased by 40%, and only in some (2019 and 2020) years, due to the lockdown, as a result of transboundary transport from adjacent territories, there was a slight decrease in the dynamics of the input of sulfate content and total nitrogen.

Keywords: precipitation acidity, EANET network, pollutants, catchment areas, water area of Peter the Great Bay.

Financing: The work was carried out within the framework of the state task "Development of scientifically based indicators of permissible impacts on water bodies of coastal marine areas of the Peter the Great Bay (Primorsky Territory) and recommendations for reducing the negative anthropogenic impact" under the section "Scientific and analytical support for the activities of the territorial bodies of the Federal Water Resources Agency".

For citation: Bortin N.N., Vasilevsky D.N., Vasilevskaya L.N., Lisina I.A. Evaluation of pollutants with atmospheric precipitation in water areas and catchment areas of Peter the Great Bay. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2023. No. 3. P. 17-35. DOI: 10.35567/19994508_2023_3_2.

Received 18.04.2023.

ВВЕДЕНИЕ

Интенсивное развитие промышленности, грузоперевозок и увеличение количества автотранспорта приводят к усилению эмиссий химических компонентов в атмосферу. В загрязнение атмосферного воздуха вносит свой вклад и трансграничный перенос загрязнителей. В свою очередь, загрязнение воздушного бассейна угрожает экосистемам водосборных территорий и акваторий, а также окружающим их природным комплексам [1–3].

Целью настоящего исследования является оценка динамики загрязнения химическими соединениями, выпадающими с атмосферными осадками, водосборных территорий и морских акваторий залива Петра Великого (северо-западная часть Японского моря).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В связи с поставленной выше целью, в рамках проведенной работы решались следующие задачи: создание базы данных средневзвешенных за год концентраций ионов в осадках и сумм атмосферных осадков на юге Приморского края; расчет выпадений растворенных химических соединений с атмосферными осадками на территорию водосборной площади и морские акватории залива Петра Великого.

Исходными данными являются годовые суммы атмосферных осадков на метеостанциях «Владивосток», «Посьет», «Тимирязевский», «Партизанск», «Преображение» и средневзвешенные за год концентрации ионов в осадках на станции фонового мониторинга Приморской (EANET) за 2008–2020 гг., представленные в ежегодных «Обзорах состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации» Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды^{1,2}.

В атмосферных осадках преобладают те же ионы, что и в поверхностных водах: HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ . Они поступают в осадки за счет растворения газов воздуха, приноса ветром солей с моря, растворения солей и пыли континентального происхождения, вулканических эффузий и других источников [4].

Станция «Приморская», на которой проводится определение химического состава суточных проб атмосферных осадков по международной программе кислотных выпадений EANET (Acid Deposition Network in East Asia), расположена в южной части Приморского края, в с. Каменушка Уссурийского района. С 2001 г. на станции проводятся наблюдения за загрязнением окружающей среды в рамках международной программы, предусматривающей создание сети мониторинга кислотных выпадений в Восточной Азии. Основная задача работы сети заключается в сборе и анализе химического состава атмосферных осадков и так называемых сухих выпадений (пыли, аэрозолей). Международная сеть EANET представлена 52 станциями в 13 странах Восточной Азии. Данные сети ежегодно публикуются в отчетах (<http://www.eanet.cc/product.html>). Результаты анализов систематически тестируются как в лаборатории, так и в центре EANET. Сводные результаты тестирования данных сети EANET публикуются в Report of the Inter-Laboratory. Зарубежные инспекции практически ежегодно посещают станцию «Приморская», высоко оценивая ее работу³.

Залив Петра Великого – самый большой залив Японского моря, его берега протянулись от устья р. Туманной на западе до мыса Поворотный – на востоке (рис. 1). Протяженность береговой линии залива, включая острова, около 1700 км, его ширина почти 200 км, площадь 55 600 км². Самый крупный полу-

¹ Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. <http://www.meteo.ru>.

² Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2008–2020 гг. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). М. 2009, 2010... 2021. Режим доступа: <https://www.meteorf.gov.ru/product/infomaterials/90/?ysclid=lhizliwkn3676851042>.

³ Гидрологическая станция 1 разряда «Приморская» (Примгидромет, 2019). Режим доступа: www.primgidromet.ru.



Рис. 1. Залив Петра Великого, его водосборный бассейн с гидрографической сетью и пунктами наблюдений за атмосферными осадками.

Fig. 1. The Peter the Great Bay, its catchment with the hydrographic network and atmospheric precipitation observation points.

остров – Муравьева-Амурского – делит акваторию залива Петра Великого на две большие части – Амурский и Уссурийский заливы. Водосборный бассейн залива включает бассейны крупных рек Партизанская, Раздольная, Артемовка и ряда более мелких рек, протекающих по территории административных зон юга Приморского края (Хасанский и Шкотовский районы, Артемовский и Владивостокский городские округа). Устьевые части многих рек в недавнем геологическом прошлом были затоплены морем, в результате чего здесь образовалось несколько заливов второго порядка – Амурский, Уссурийский, Восток, Находка и залив Посыета [5]. На водосборной территории залива Петра Великого проживает большая часть населения Приморского края, здесь расположены города Владивосток, Уссурийск, Артём, Большой Камень, Фокино, Находка, источниками водоснабжения которых (кроме г. Находки) являются шесть водохранилищ многолетнего регулирования и два открытых русловых водозабора (рис. 1).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Загрязнение водосборного бассейна и акватории залива Петра Великого, вызванное загрязнителями в атмосферных осадках, в данной статье рассматривается в масштабе годового разрешения, т. е. привлекаются годовые суммы

осадков и среднегодовые концентрации загрязняющих веществ. Следует отметить, что осадки, выпадающие на юге Приморского края, в подавляющем большинстве имеют адвективный характер, связаны с циклонической деятельностью, определяемой циркуляцией атмосферы и сложным рельефом исследуемой территории [6, 7].

Приморье относится к зоне достаточного увлажнения: в среднем за год в большинстве районов края выпадает 650–750 мм осадков, в западных районах – 550–600 мм, в горной северной части (Пожарский район) и местами на побережье, включая Владивосток, до 800–900 мм [8]. По данным Гидрометцентра России, за последний базовый период (1991–2020 гг.) на исследуемой территории в среднем выпадало около 800–850 мм за год⁴.

Атмосферное загрязнение. Загрязняющие вещества, попадающие в результате трансграничного переноса из сопредельных территорий, накладываясь на локальные выбросы, во многом определяют химический состав атмосферных осадков. Химический состав атмосферных осадков является интегральной характеристикой содержания загрязняющих веществ в облачном и подоблачном слое атмосферы [9]. Приморский край на западе и юго-западе граничит с КНР, стремительное экономическое развитие Китая крайне неблагоприятно отразилось на экологии промышленно развитых районов этой страны и сопредельных государств. Эмиссия загрязняющих веществ отражает плотность распределения населения и промышленных предприятий. Государствами с экономикой постиндустриального типа также являются Япония и Южная Корея, которые, хоть и в меньшей степени, также являются центрами эмиссии загрязняющих веществ [1]. Эмиссия загрязняющих веществ с территории Дальнего Востока не идет ни в какое сравнение с выбросами в атмосферу в сопредельных странах.

Локальными источниками загрязнения атмосферы на юге Приморского края, наряду с небольшими промышленными предприятиями топливно-энергетического комплекса, угольными и нефтеналивными терминалами, являются выбросы огромного количества автомобильного и морского транспорта. Так, крупная городская агломерация Владивосток входит в число самых автомобильно-мобилизованных городов России⁵.

Поскольку большая часть загрязняющих веществ может находиться в атмосфере несколько суток, выпадающие с фронтальными осадками на исследуемую территорию поллютанты привносятся воздушными массами из сопредельной индустриальной территории в зависимости от синоптической ситуации. Облачность же, относящаяся к местной, практически не формируется над водосборным бассейном залива Петра Великого. Подтверждением этого являются результаты анализа 739 циклонов (за 1997–2009 гг.), вызвавших осадки над Приморским краем [6].

⁴ Сайт ГМЦ РФ: <https://meteoinfo.ru/climatcities> (дата обращения 20.04.2022).

⁵ Росприроднадзор: самый грязный воздух – в Приморье. Аргументы и факты. URL: https://vl.aif.ru/society/rosprirodnadzor_samyu_gryaznyu_vozduh_v_primore? (дата обращения 20.02.2022).

Основными по объему выбросов загрязняющих веществ являются окислы серы и азота, которые в результате фотохимических реакций преобразуются в сульфаты и нитраты (одна из причин выпадения кислотных осадков)⁶. Повышение кислотности осадков происходит как в результате увеличения объемов выбросов окислов серы и азота, так и вследствие роста интенсивности переноса воздушных масс из районов с высокими уровнями эмиссии [10]. Исследованиями дальневосточных ученых установлена тенденция значительного уменьшения числа циклонов, приходящих с северо-западных направлений, и усиление переноса – с юго-западных. Формирование этих циклонов происходит в зонах с высокими уровнями эмиссии окислов серы и азота, поэтому усиление активности циклогенеза юго-западных направлений вызвало увеличение концентраций сульфатов и нитратов в атмосферных осадках [6].

Оценка химического состава атмосферных осадков. На азиатской территории России в рамках международной сети EANET с 2000 г. постоянно работают четыре станции мониторинга: три в регионе оз. Байкал – Иркутск (городская), Листвянка (региональная) и Монды (фоновая); одна в Приморском крае – Приморская (региональная). В настоящее время только станции EANET предоставляют результаты регулярного мониторинга содержания загрязняющих веществ в атмосфере вне городов на азиатской территории России. Уникальность данных, полученных на станциях EANET, состоит в том, что значение pH и химический состав атмосферных осадков определяются за каждые сутки в отличие от национальной сети мониторинга, которая не позволяет проследить кислотно-щелочной показатель ежесуточных осадков, т. к. согласно принятой в гидрометеослужбе методике анализируются осадки за месяц⁷.

Средневзвешенные за год концентрации ионов в осадках на станции регионального мониторинга «Приморская» определены по общепринятой и используемой при обработке данных EANET методике. В табл. 1 представлены эти концентрации за 2008–2020 гг., взятые из ежегодных обзоров состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации, составленных Росгидрометом.

Из данных табл. 1 следует, что на юге Приморья сульфаты (соли серной кислоты) преобладают над нитратами (соли азотной кислоты). Это превышение в среднем составляет 2,5. Однако в отдельные периоды (2008 и 2014 гг.) оно составляло 5 и 6 единиц соответственно, и лишь в 2011 г. нитратов в осадках содержалось в 1,5 раза больше, чем сульфатов. В межгодовом ходе концентрации ионов в атмосферных осадках обнаруживается положительная динамика: сульфаты увеличились с 3 до 3,75 мг/л (на 25 %), нитраты – с 1,3 до 2 мг/л (на 54 %).

⁶ Состояние загрязнения атмосферы в городах на территории России в 2005 г. Ежегодник. СПб: Гидрометеиздат, 2006. 180 с.

⁷ Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2008–2020 гг. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). М. 2009, 2010... 2021 г. Режим доступа: <https://www.meteorf.gov.ru/product/infomaterials/90/?ysclid=lhiz1iwkn3676851042>.

Таблица 1. Средневзвешенная годовая концентрация ионов в атмосферных осадках на станции «Приморская» за 2008–2020 гг., мг/л
 Table 1. Annually average weighted ion concentrations in atmospheric precipitations at “Primorskaya” station over 2008–2020, mg/l

Год	Химический элемент										pH
	SO ₄	Cl	NO ₃	HCO ₃	NH ₄	Na	K	Ca	Mg	M	
	мг/л										
2008	3,4	0,78	0,69	0,12	0,9	0,42	0,12	0,28	0,06	4,56	5,2
2009	3,2	1	1	0,6	0,8	0,6	0,2	0,5	0,1	6,8	5,2
2010	4,8	1,4	2	0,7	1,1	0,8	0,3	1,1	0,2	12,5	5,5
2011	2,42	3,38	3,51	0,47	1,32	0,57	0,5	1,07	0,23	13,53	5,4
2012	3,32	1,47	2,54	0,61	0,77	0,82	0,34	0,92	0,21	11	5,3
2013	3,4	2,1	1,6	0,6	1	0,8	0,4	1,2	0,3	7,8	5,5
2014	4,1	1,3	0,7	1,5	0,8	0,5	0,3	1,2	0,2	10,7	5,7
2015	3	1	1,7	0,8	0,7	0,8	0,4	0,8	0,2	9,4	5,6
2016	3,7	1,6	2,1	1,4	0,7	1	0,8	1,1	0,2	12,8	5,9
2017	4,2	1,7	2,4	1,4	1,2	0,9	0,6	1,2	0,4	14	6,0
2018	3,88	0,92	1,77	1,49	0,98	0,7	0,5	0,83	0,29	11,38	6,2
2019	1,95	1,34	1,53	0,81	0,64	0,54	0,39	0,6	0,23	8,02	6,2
2020	3,03	1,17	1,19	0,96	0,46	0,86	0,39	0,83	0,24	9,1	5,9

Содержание хлоридов в осадках за период 2008–2020 гг. варьировало в пределах 0,78–2,1 мг/л, исключением стал 2011 г., когда концентрация хлоридов была экстремально высокой – 3,38 мг/л⁸. Минерализация осадков (M) варьировала от 4 до 14 мг/л (рис. 2). Самыми загрязненными были атмосферные осадки в 2011 и 2017 гг.

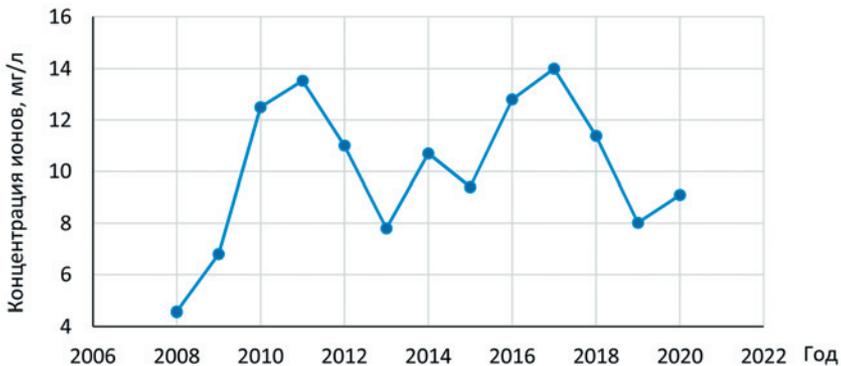


Рис. 2. Динамика минерализации атмосферных осадков за 2008–2020 гг.
 Fig. 2. Dynamics of the atmospheric precipitation mineralization over 2008–2020.

⁸ Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2008, 2009–2020 г. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет) М. 2009, 2010...2021 г. Режим доступа: <https://www.meteorf.gov.ru/product/infomaterials/90/?ysclid=lhizliwkn3676851042>.

Катионная часть осадков составляла около 40 %. В их химическом составе преобладали кальций, далее в порядке снижения концентрации следовали натрий, калий и магний (рис. 3). Содержание солей аммония (NH_4) в осадках редко достигало 1,0 и более мг/л и в среднем составляло 0,93 мг/л (табл. 1). Концентрация катионов в атмосферных осадках за 2008–2020 гг. неуклонно возрастала, особенно это касается калия и магния – их содержание выросло более чем в три раза, а натрия и кальция – в полтора раза.

При использовании традиционного анализа степени закисления атмосферных осадков по величине рН, показателю концентрации свободных ионов водорода, необходимо учитывать, что он также характеризует соотношение анионов закисляющих соединений и щелочных нейтрализующих катионов, образующихся и абсорбируемых в облачных слоях в ходе переноса. На это соотношение влияют как природные, так и антропогенные факторы. Для различных районов земного шара и в разные сезоны рН атмосферных осадков варьирует в весьма широких пределах, внутри которых осадки условно делят на кислые (при $\text{pH} < 4$), слабокислые ($4 < \text{pH} < 5$), природно-нейтральные ($5 < \text{pH} < 7$) и слабощелочные ($\text{pH} > 7$)⁸.

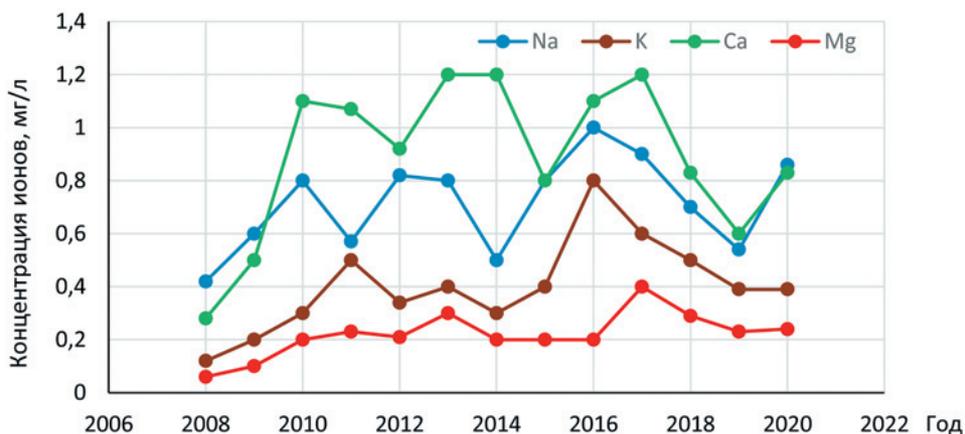


Рис. 3. Динамика средневзвешенных за год концентраций ионов металлов (катионов) на станции «Приморская», 2008–2020 гг.

Fig. 3. Dynamics of annual average weighted metal ions (cations) concentration at "Primorskaya" station, 2008-2020.

Общая картина распределения средних годовых значений рН – показателя кислотности атмосферных осадков – в 2008–2020 гг. на станции «Приморская» указывает на отсутствие процессов закисления. Все значения рН осадков находятся в интервале от 5,2 до 6,2 ед. рН, т. е. относятся к природно-нейтральным ($5 < \text{pH} < 7$). Это связано, скорее всего, с «подщелачивающим» свойством гидрокарбонатов (HCO_3)⁷. Действительно, концентрация гидрокарбонатов обнаруживает явное стабильное увеличение на юге Приморья (рис. 4), их среднее годовое содержание за исследуемый период увеличилось в семь раз (с 0,2 до 1,4 мг/л). Среднегодовое осреднение загрязняющих веществ

в атмосферных осадках, которое анализируется в статье, не позволяет выделить отдельные эпизоды кислотных осадков. Исходя из данных публикаций дальневосточных экологов, рН осадков, особенно в холодный период, зачастую достигает диапазона кислых (рН от 3,5 до 4,5) [2, 6]. К примеру, в осадках на станции «Приморская» по данным суточных измерений за 2016–2020 гг. минимальное значение рН составило 4,95. В общем составе взвешенных частиц наибольшие концентрации характерны для сульфатов – от 30 до 50 % состава атмосферных аэрозолей по массе. Однако содержание сульфатов за последнее десятилетие снижается в среднем от 39 до 30 %⁸. Для сравнения, в зоне российского Заполярья в химическом составе атмосферных осадков преобладают сульфат-ионы, их содержание составляет 26, 42 и 35 % соответственно в Атлантическом, Сибирском и Тихоокеанском секторе [11].

В то же время содержание практически всех основных ионов в аэрозолях воздуха на юге Приморского края за 13 лет наблюдений увеличилось на 40 %, однако в 2019 и 2020 гг. произошло некоторое снижение, что, вероятно, связано с уменьшением антропогенной деятельности по причине локдауна [3].

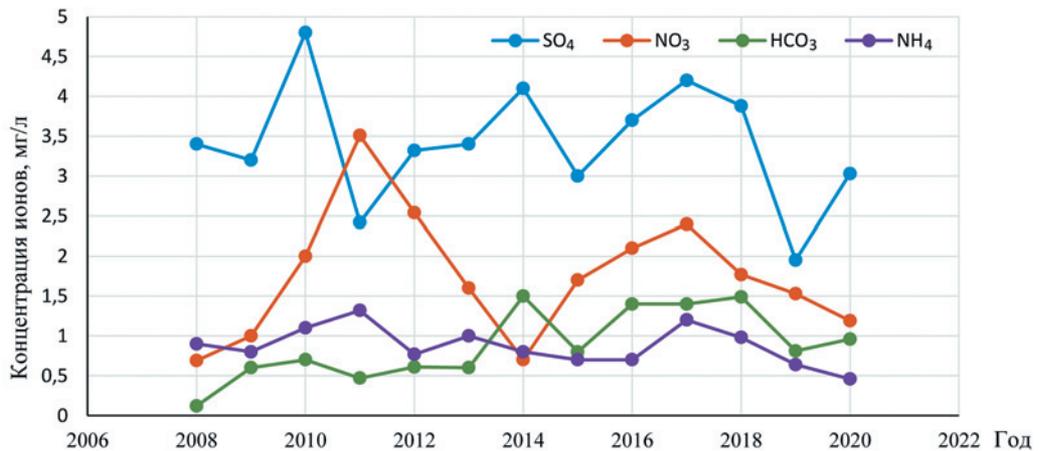


Рис. 4. Динамика средневзвешенных за год концентраций гидрокарбонатов (HCO_3^-), сульфатов (SO_4), нитратов (NO_3^-) и солей аммония (NH_4^+) на станции «Приморская».

Fig. 4. Dynamics of annual average weighted hydrogen carbonate (HCO_3^-), sulphates (SO_4), nitrates (NO_3^-), and ammonia salts (NH_4^+) concentrations at “Primorskaya” station

Поступление загрязняющих веществ с атмосферными осадками на водосборную площадь и прибрежные морские акватории залива Петра Великого

Для определения уровня загрязнения химическими соединениями, выпадающими с атмосферными осадками на водосборную площадь и морские акватории залива Петра Великого, произведена оценка динамики атмосферных осадков (рис. 5). Для расчетов использованы данные наблюдений за атмосферными осадками на пяти метеорологических станциях, расположенных в непосредственной близости от исследуемых водных объектов либо их водо-

сборной площади: станция «Владивосток» (для Амурского и Уссурийского заливов, Бухты Золотой Рог и водосборной площади рек Шкотовского, Артемовского, Владивостокского районов); станция «Преображение» (для залива Находка); станция «Посьет» (для залива Посьета, водосборной площади рек Хасанского района); станция «Партизанск» (водосборная площадь р. Партизанской); станция «Тимирязевский» (для водосбора р. Раздольной).

В течение 2008–2020 гг. среднее количество годовых осадков на прибрежных станциях составило около 900 мм, а в континентальной части – около 700 мм (ст. «Тимирязевский»). Динамика выпадения осадков характеризуется значительной межгодовой изменчивостью: минимальное количество отмечено в 2011, 2014 и 2017 гг. на всех станциях; максимальное – в 2012 и 2016 гг.

Масса выпавших с атмосферными осадками растворенных соединений на 1 км² территории в год (M , т/км²), определялась по формуле:

$$M = 10^{-3} \cdot K \cdot R, \quad (1)$$

где K – средневзвешенные за год концентрации ионов, мг/л;

R – годовая сумма осадков, мм.

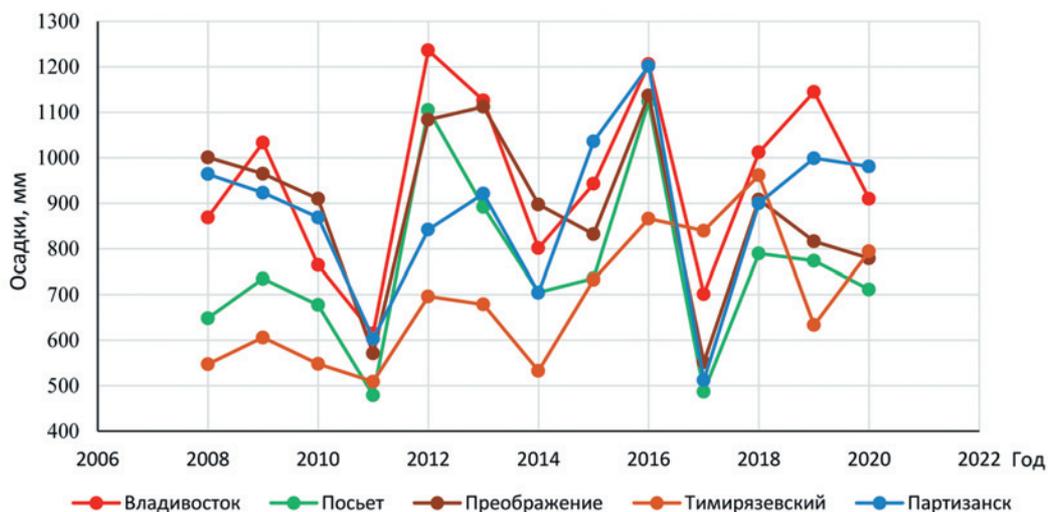


Рис. 5. Динамика годовых сумм осадков на станциях исследуемой территории.
Fig. 5. Dynamics of the annual total precipitations at the stations of the territory under study.

Поскольку сульфаты составляют большую часть состава атмосферных аэрозолей по массе, рассмотрен совместный ход интенсивности выпадения сульфатов с осадками на отдельные акватории залива Петра Великого (рис. 6). Более всего в период 2008–2020 гг. загрязнялись сульфатами воды Уссурийского, Амурского заливов и бухты Золотой Рог, меньше – воды залива Посьета. Исключением стали 2010 и 2014 гг., когда на 1 км² акватории залива Находка поступило больше сульфатов. Аналогичным образом для этих водных объектов рассчитаны массы и по остальным растворенным соединениям.

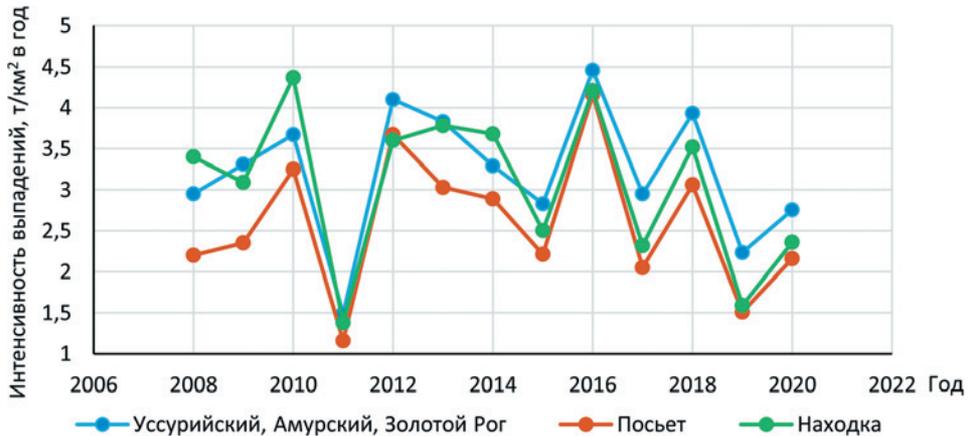


Рис. 6. Межгодовой ход интенсивности выпадения сульфатов в различных частях залива Петра Великого на 1 км² площади, т.
Fig. 6. Inter/annual run of the sulphates precipitation in different parts of Peter the Great Bay per 1 km², t.

С учетом площади отдельных акваторий залива Петра Великого (заливов Амурского – 997 км², Уссурийского – 1889 км², Находка – 140 км², Посыета – 445 км², бухты Золотой Рог – 4,44 км²) рассчитана ежегодная масса поступления с атмосферными осадками растворенных веществ. Так, количество выпавших за исследуемый период растворенных веществ, представленных в табл. 1, на акваторию Амурского залива, составило в среднем: 3205 т (от 1485 до 4448 т) сульфатов, 1653 т нитратов (598 – 3131 т), 1356 т хлоридов (676 – 2358 т), 854 т гидрокарбонатов (104 – 1683 т), 811 т аммонийного азота (525 – 1123 т), 852 т кальция (243 – 1347 т), 703 т натрия (364 – 1202 т), 393 т калия (104 – 962 т) и 211 т магния (52 – 337 т). Столь значительная межгодовая изменчивость растворенных веществ обусловлена определенной их концентрацией (табл. 1) и количеством выпавших осадков (рис. 5). Количество поллютантов, выпавших на акваторию бухты Золотой Рог составило 0,4 % от общего количества выпадений на Амурский залив, на залив Посыета – 45 %, на залив Находка – 14 %. В целом, на акваторию Уссурийского залива выпало в 1,9 раз больше растворенных веществ, чем на Амурский залив.

Поток аэральных выпадений серы (M_s), нитратного $M_{N(NO_3)}$ и аммонийного $M_{N(NH_4)}$ азота (M_N) на морские акватории определяется их содержанием в осадках и количеством последних. Для оценки массы этих веществ (сера и азот), поступающих на 1 км² акватории в год, получены следующие зависимости:

$$M_s = 3,33 \cdot 10^{-7} \cdot K \cdot R, \quad (2)$$

$$M_{N(NO_3)} = 2,266 \cdot 10^{-7} \cdot K \cdot R, \quad (3)$$

$$M_{N(NH_4)} = 7,76 \cdot 10^{-7} \cdot K \cdot R, \quad (4)$$

где K – средневзвешенные за год концентрации ионов, мг/л;

R – годовая сумма осадков, мм;

M – масса растворенного вещества, выпавшего с атмосферными осадками, т/км² в год.

На рис. 7 и рис. 8 представлены графики динамики выпадения серы и суммарного азота на 1 км² рассматриваемых акваторий. В 2008–2020 гг. интенсивность потоков серы с атмосферными осадками на юге Приморья находилась в пределах 0,38–1,47 т/км² в год, в среднем она составляла около 1 т/км² в год. Для сравнения, концентрация серы в осадках в арктических районах России в 2005–2013 гг. составляла от 0,06 до 0,19 т/км² в год, достигая в районе промышленных центров (Мурманск, Норильск, Хатанга) в отдельные годы 1,22 – 2,16 т/км² в год [12]. Рост интенсивности выпадения серы в 2008–2018 гг. до 20 % связан с ростом концентрации сульфатов (рис. 7). За последние два года уменьшение выпадения серы обусловлено снижением антропогенной нагрузки и некоторым сокращением годовых сумм осадков (рис. 5) [3].

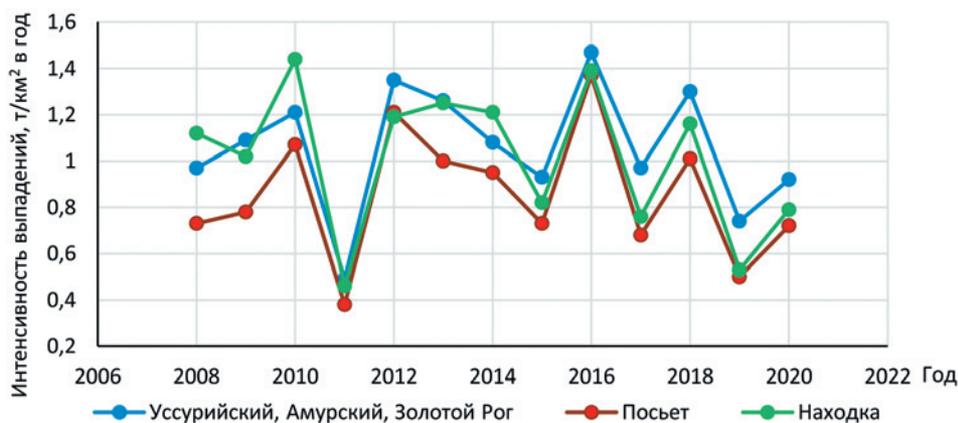


Рис. 7. Межгодовые изменения средней интенсивности потоков серы с атмосферными осадками за 2008–2020 гг., т/км².

Fig. 7. Inter-annual changes of the average intensity of sulphur streams with atmospheric precipitations over 2008–2020, t/km².

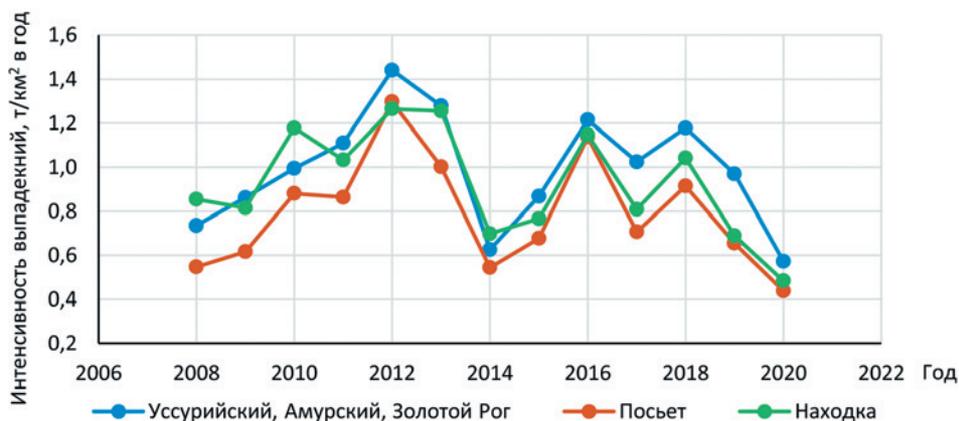


Рис. 8. Межгодовые изменения средней интенсивности потоков суммарного азота с атмосферными осадками за 2008–2020 гг., т/км².

Fig. 8. Inter-annual changes of the average intensity of total nitrogen streams with atmospheric precipitations over 2008–2020, t/km².

Средняя интенсивность потоков суммарного азота на морские акватории составляет около 0,83 т/км² в год, изменяясь от 0,39 до 1,3 т/км². В период 2008–2018 гг. наблюдалось увеличение интенсивности атмосферных выпадений суммарного азота на 25 %, а в течение 2019–2020 гг. произошло значительное снижение (по причине локдауна). В арктической зоне средние значения интенсивности выпадения азота составляли в среднем 0,1–0,24, в эпизодах достигая 0,5–0,7 т/км² в год [12].

По результатам обработки годовых массивов атмосферных осадков и концентрации в них ионов серы (S(SO₄)) и азота (ΣN) оценена масса поступлений этих поллютантов с атмосферными осадками на морские акватории залива Петра Великого.

Ежегодная масса потоков серы и суммарного азота с атмосферными осадками была рассчитана для отдельных частей залива Петра Великого – в качестве примера в табл. 2 представлены Амурский и Уссурийский заливы. Анализ таблицы показывает, что в среднем атмосферное количество серы, которая выпадает на акватории заливов, превышает атмосферный азот в 1,3 раза. Однако этот показатель обладает значительной межгодовой изменчивостью: так, в 2014 и 2020 гг. он составлял 2 ед., тогда как в 2011 г, наоборот, потоки серы были в два раза ниже азота.

Таблица 2. Выпадение с атмосферными осадками серы, азота на акваторию Уссурийского и Амурского заливов за 2008–2020 гг., т/год
Table 2. Fall-out of sulphur and nitrogen with atmospheric precipitation on water area of the Ussury and Amur bays over 2008–2020, t/year

Год	Уссурийский залив				Амурский залив				S/ΣN
	Химический элемент				Химический элемент				
	S(SO ₄)	N(NO ₃)	N(NH ₄)	ΣN	S(SO ₄)	N(NO ₃)	N(NH ₄)	ΣN	
2008	1842	257	1136	1393	972	136	599	735	1,6
2009	2061	442	1200	1642	1088	233	634	867	1,5
2010	2288	655	1221	1876	1207	345	645	990	1,4
2011	928	925	1180	2105	490	488	623	1111	0,5
2012	2558	1344	1382	2726	1350	709	730	1439	0,9
2013	2387	771	1635	2406	1260	407	863	1270	1,1
2014	2049	240	931	1171	1082	127	492	619	2,1
2015	1763	686	958	1644	931	362	506	868	1,2
2016	2781	1084	1226	2310	1468	572	647	1219	1,3
2017	1836	721	1222	1943	969	380	645	1025	1,1
2018	2448	767	1441	2208	1292	405	760	1165	1,3
2019	1398	756	1078	1834	738	399	569	968	0,9
2020	1738	472	609	1081	917	249	321	570	1,8

В самый большой по площади Уссурийский залив поступает от 930 до 2500 т серы в год, в Амурский – от 500 до 1500 т, в залив Посьета – от 170 до 610, в залив Находка – от 64 до 194 т, на акваторию бухты Золотой Рог – от 2 до 6,5 т. Масса суммарного азота, судя по отношению S/ΣN, как правило, ниже по

сравнению с S. Исключением являются 2011 и 2012 гг., когда выпадения азота превысили выпадения серы и составили в Уссурийском заливе 2105 и 2726 т, в Амурском – 1111 и 1439 т соответственно.

Помимо непосредственного выпадения на акваторию поллютанты попадают в залив Петра Великого с водосборных бассейнов впадающих в него рек. Для расчетов выпадения загрязняющих веществ на водосборные бассейны рек использованы данные четырех метеорологических станций, отражающие режим атмосферных осадков на этих водосборных территориях. Анализ совместного хода интенсивности выпадения сульфатов в отдельных водосборных бассейнах залива Петра Великого показывает, что более всего загрязняются атмосферными выпадениями поллютантов бассейны р. Партизанской и рек Шкотовского и прилегающих муниципальных районов, менее всего – бассейн р. Раздольной (рис. 9). Результаты сравнительного анализа для сульфатов распространяются на все остальные виды растворенных соединений. Особенно это касается хлора, т. к. близость океана сказывается на ионном составе атмосферных осадков и проявляется, преимущественно, в повышении концентраций ионов хлора на станциях, расположенных на побережье [13]. Это подтверждается проведенными расчетами по водосборному бассейну р. Раздольной: количество хлора, поступающего с атмосферными осадками, здесь в 1,5 раза ниже, чем в прибрежных водосборных бассейнах.



Рис. 9. Межгодовой ход интенсивности выпадения сульфатов в бассейнах рек, впадающих в залив Петра Великого, т/км².

Fig. 9. Inter/annual run of the sulphates precipitation in basin of the rivers running to Peter the Great Bay per 1 km², t.

С учетом площадей отдельных водосборных бассейнов залива Петра Великого (р. Раздольная – 6820 км², р. Партизанская – 4140 км², реки Хасанского района – 4130 км², реки Шкотовского и других муниципальных районов – 4110 км²), концентрации поллютантов (табл. 1) и суммы осадков на репрезентативных метеостанциях (рис. 5) рассчитана ежегодная масса растворенных соединений, поступивших с атмосферными осадками на эти территории.

Ежегодные потоки серы и суммарного азота, поступающие с осадками на основные водосборные бассейны рек залива Петра Великого (реки Раздольная и Партизанская) представлены в табл. 3. Атмосферное количество серы на водосборные территории в среднем превышает суммарный азот в 1,1 раза: это превышение немного ниже, чем на морские акватории залива (1,3). В 2014 и 2020 гг. превышение увеличилось и составило 1,7 и 1,5 раза соответственно. Однако в 2011 и 2019 гг. азота выпало, соответственно, в 2,5 и 1,5 раза больше, чем серы.

Таблица 3. Масса серы и азота, выпавших с атмосферными осадками на водосборные площади рек Раздольная и Партизанская за 2008–2020 гг., т/год
Table 3. Mass of sulphur and nitrogen delivered with atmospheric precipitation on the Razdolnaya and Partizanskaya rivers catchment over 2008–2020, t/year

Год	р. Раздольная				р. Партизанская				S/ΣN
	Химический элемент				Химический элемент				
	S(SO ₄)	N(NO ₃)	N(NH ₄)	ΣN	S(SO ₄)	N(NO ₃)	N(NH ₄)	ΣN	
2008	4228	685	2608	3294	4519	733	2787	3520	1,3
2009	4404	1099	2566	3665	4072	1016	2372	3389	1,2
2010	5973	1988	3190	5178	5750	1914	3071	4985	1,2
2011	2798	3242	3557	6798	2012	2331	2557	4888	0,4
2012	5247	3207	2836	6042	3854	2355	2083	4438	0,9
2013	5241	1970	3592	5562	4317	1623	2959	4582	0,9
2014	4962	677	2256	2933	3979	543	1809	2352	1,7
2015	4993	2260	2715	4975	4285	1940	2330	4269	1,0
2016	7276	3299	3208	6507	6131	2780	2703	5483	1,1
2017	8009	3656	5333	8989	2965	1353	1974	3327	0,9
2018	8472	3087	4987	8074	4814	1754	2834	4588	1,0
2019	2805	1758	2146	3904	2686	1683	2054	3737	0,7
2020	5465	1715	1933	3648	4098	1286	1450	2735	1,5

Примечательно, что за исключением бассейна р. Раздольной каких-либо тенденций в 13-летнем ходе S не прослеживается. В бассейне р. Раздольной выявлена тенденция увеличения потоков серы – в среднем с 4400 т до 6300 т, т. е. на 43 %. Этот бассейн более подвержен влиянию западных циклонов, смещающихся с промышленных районов Китая. Средняя интенсивность потоков суммарного (минеральная форма) азота на водосборные бассейны составляет около 0,83 т/км² в год, изменяясь от 0,46 до 1,3 т/км² в год. В исследуемом периоде отмечено увеличение интенсивности выпадения суммарного азота на 25 %. Доля нитратного азота по отношению к суммарному в среднем составляет 40 %, изменяясь от 21 до 53 % в течение 2008–2020 гг. Отмечается увеличение вклада нитратного азота – от 32 до 47 %. При этом в среднем за год содержание аммонийного азота превышает нитратный.

ВЫВОДЫ

На основе анализа содержания средневзвешенных годовых концентраций основных ионов в атмосферных осадках на станции EANET «Приморская» и годовых количествах осадков на станциях «Владивосток», «Посъет», «Партизанск», «Преображение» и «Тимирязевский» за 2008–2020 гг. рассчитана ежегодная масса поступления растворенных веществ на акватории и водосборные бассейны рек залива Петра Великого. Получены следующие результаты:

- содержание основных ионов в атмосферных осадках, выпадающих на акваторию залива Петра Великого и его водосборную площадь, за 11 лет наблюдений (2008–2018 гг.) увеличилось на 40 %, однако в последующие два года (2019 и 2020 гг.) произошло некоторое их снижение, связанное с уменьшением антропогенного влияния с сопредельных территорий по причине локдауна;

- концентрация катионов в атмосферных осадках значительно возросла, особенно это касается калия и магния, содержание которых выросло более чем в три раза, а натрия и кальция в полтора раза. Все значения показателя кислотности осадков в годовом разрезе составляют от 5,2 до 6,2 ед. рН;

- на акватории и водосборной площади залива Петра Великого сульфаты преобладают над нитратами в 2,5 раза;

- минерализация осадков увеличилась с 8 до 13 мг/л, что указывает на возрастание их загрязнения (самыми загрязненными были осадки в 2011 и 2017 гг.);

- концентрация гидрокарбонатов обнаруживает явное и стабильное их увеличение: средняя концентрация увеличилась в семь раз (с 0,2 до 1,4 мг/л);

- в общем составе взвешенных частиц наибольшие концентрации характерны для сульфатов – от 30 до 50 %, однако вклад сульфатов за последнее десятилетие варьирует от 39 до 30 %;

- более всего загрязняются атмосферными осадками акватории Уссурийского и Амурского заливов, а также бассейны р. Партизанской, рек Шкотовского и других прилегающих муниципальных районов;

- интенсивность потоков серы с атмосферными осадками за рассматриваемый период варьировала в пределах 0,38–1,47 т/км² в год и составляла в среднем около 1 т/км² в год;

- прирост выпадения серы в 2008–2018 гг. до 20 % связан с увеличением концентрации сульфатов, а уменьшение выпадения серы за 2019–2020 гг. обусловлено локдауном и снижением антропогенной нагрузки на сопредельных территориях;

- средняя интенсивность потоков суммарного азота составляет около 0,83 т/км² в год, изменяясь от 0,46 до 1,3 т/км². В период 2008–2018 гг. наблюдалось увеличение интенсивности выпадения суммарного азота на 25 %, однако в 2019 и 2020 гг. произошло его значительное снижение.

Территория Приморского края относится к районам достаточного увлажнения, поэтому атмосферные осадки здесь вносят весомый вклад в изменение химического состава пресноводных и морских вод, а также почв водосборных территорий. Особенностью спектра загрязняющих веществ атмосферных осадков является преобладание сульфатов, которые постепенно накапливаются в

верхних горизонтах почв водосборных территорий, а также и в водных объектах, что приводит к повышению кислотности почв, изменению состава биоценоза, мобилизации тяжелых металлов и других ядовитых веществ. Присутствие большого количества сульфатов в питьевой воде вызывает у человека раздражение ЖКТ, провоцируют аллергии и другие заболевания. Нитраты, постепенно накапливаясь в воде, обладают высокой токсичностью для человека и животных. Аммонийный азот опасен тем, что его ион и восстановленная форма (аммиак NH_3) способны вступать в реакцию с белками, вызывая их денатурацию.

В конечном итоге выпадение поллютантов с атмосферными осадками оказывает сильное негативное влияние на биотические процессы, являясь одним из слагаемых общего загрязнения акваторий и водосборных территорий, в т. ч. водохранилищ питьевого назначения, расположенных на водосборной территории залива Петра Великого.

Полученные в работе выводы указывают на необходимость организации непрерывного мониторинга содержания загрязняющих веществ в прибрежных водах и на водосборных территориях юга Приморского края.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кондратьев И. И., Кубай Б. В., Семькина Г. И., Качур А.Н. Влияние трансграничного и природного факторов на химический состав осадков в Дальневосточном регионе России // Метеорология и гидрология. № 10. 2013. С. 45–54.
2. Кондратьев И.И. Межгодовая и сезонная изменчивость трансграничного потока техногенных загрязняющих веществ в Дальневосточном регионе // Вестник ДВО РАН. 2018. № 2. С. 110–118.
3. Василевский Д.Н., Василевская Л.Н., Лисина И.А., Мушта Б.Б. Анализ загрязнения атмосферы в Приморском крае в 2019–2020 гг. по данным спутникового мониторинга GMAO/NASA // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2021. № 4 (382). С. 148–161.
4. Аблеева В.А., Лихтенс Е.С. Кислотные дожди в Центральной России // Природа. 1995. № 3. С. 94–95.
5. Ростов И.Д., Юрасов Г.И., Рудых Н.И., Мороз В.В., Дмитриева Е.В. Атлас по океанографии Берингова, Охотского и Японского морей. Владивосток: Тихоокеанский океанологический институт ДВО РАН, 2003. 180 с.
6. Муха Д.Э., Кондратьев И.И., Мезенцева Л.И. Трансграничный перенос кислотных осадков циклонами Восточной Азии на юг Дальнего Востока // Вестник Российской академии наук. 2011. Т. 81. № 2. С. 111–119.
7. Мезенцева Л.И., Гришина М.А., Кондратьев И.И. Траектории и глубина циклонов, выходящих на территорию Приморского края // Вестник ДВО РАН. 2019. № 4. С. 29–38.
8. Кубай Б.В., Мендельсон Э.А., Цурикова Т.В. Изменяется ли климат Приморского края? Владивосток: ПУГМС, 2012. 130 с.
9. Израэль Ю.А., Назаров И.М., Прессман А.Я., Ровинский Ф.Я., Рябошапка А.Г., Филиппова Л.М. Кислотные дожди. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 206 с.
10. Aardenne van J. A., Carmichael G. R., Levy II. H. et al. Anthropogenic NOx emissions in Asia in the period 1990– 2020 // Atmospheric Environment. 1999. Vol. 33. P. 633–646.
11. Семенец Е.С., Свистов П.Ф., Талаш А.С. Химический состав атмосферных осадков Российского Заполярья // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328. № 3. 27–36.
12. Ветров В.А., Кузовкин В.В., Манзон Д.А. Кислотность атмосферных осадков и атмосферные выпадения серы и азота в Арктической зоне Российской Федерации по данным мониторинга химического состава снежного покрова // Арктика: экология и экономика. № 3 (15). 2014. С. 46–51.
13. Кондратьев И.И. Трансграничный фактор в изменчивости химического состава осадков на юге Дальнего Востока // География и природные ресурсы. 2009. № 3. С. 31–37.

REFERENCES

1. Kondratyev I.I., Kubay B.V., Semykina G.I., Kachur A.N. Impact of transboundary and nature factor upon chemical composition of precipitations in the Far Eastern Region of Russia. *Meteorologia i gidrologia [Meteorology and hydrology]*. No. 10. 2013. P. 45–54 (In Russ.).
2. Kondratyev I.I. Inter/annual and seasonal variability of the technogenous pollutants transboundary stream in the Far Eastern Region. *Vestnik DVO RAN [Bulletin of RAS FEB]*. 2018. No. 2. P. 110–118 (In Russ.).
3. Vasilevskiy D.N., Vasilevskaya L.N., Lisina I.A., Mushta B.B. Analysis of the atmosphere pollution in the Maritime Kray in 2019–2020 according to the GMAO/NASA satellite monitoring data. *Gidrometeorologicheskiye issledovaniya i prognozy [Hydro/meteorological studies and forecasts]*. 2021. No. 4 (382). P. 148–161 (In Russ.).
4. Ableyeva V.A., Likhtens E.S. Acid rains in Central Russia. *Priroda [Nature]*. 1995. No. 3. P. 94–95 (In Russ.).
5. Rostov I.D., Yurasov G.I., Rudykh N.I., Moroz V.V., Dmitrieva E.V. Atlas of the oceanography of the Bering, Okhotsk, and Japan seas. Vladivostok: Pacific Oceanological Institute of RAS FEB, 2003. 180 p. (In Russ.).
6. Mukha D.E., Kondratyev I.I., Mezentseva L.I. Transboundary transfer of acid precipitations by the Eastern Asia cyclones to the south of the Far East. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk [Bulletin of the Russian Academy of Sciences]*. 2011. Vol. 81. No. 2. P. 111–119 (In Russ.).
7. Mezentseva L.I., Grishina M.A., Kondratyev I.I. Trajectories and depth of the cyclones entering the territory of the Maritime Kray. *Vestnik DVO RAN [Bulletin of RAS FEB]*. 2019. No. 4. P. 29–38 (In Russ.).
8. Kubay B.V., Mendelson E.A., Tsurikova T.V. Is the Maritime Kray climate changing? Vladivostok: PUGMS, 2012. 130 p. (In Russ.).
9. Izrael Y.A., Nazarov I.M., Pressman A.Y., Rovinskiy F.Y., Ryaboshapko A.G., Filippova L.M. Acid rains. L.: Gidrometeoizdat, 1983. 206 p. (In Russ.).
10. Aardenne van J. A., Carmichael G. R., Levy II. H. et al. Anthropogenic NO_x emissions in Asia in the period 1990–2020. *Atmospheric Environment*. 1999. Vol. 33. P. 633–646.
11. Semenets E.S., Svistov P.F., Talash A.S. Chemical composition of the atmospheric precipitation of the Russian Trans-polar Region. *Izvestia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov [Proceedings of the Tomsk Polytechnical University. Engineering of geo/resources]*. 2017. Vol. 328. No. 3. P. 27–36 (In Russ.).
12. Vetrov V.A., Kuzovkin V.V., Manzon D.A. The atmospheric precipitations acidity and atmospheric fall-out of sulphur and nitrogen in the Arctic zone of the Russian Federation according to the data of snow cover chemical composition monitoring. *Arktika: ekologiya i ekonomika [Arctic: ecology and economics]*. No. 3 (15). 2014. P. 46–51 (In Russ.).
13. Kondratyev I.I. Transboundary factor in variability of the precipitation chemical composition in the south of the Far East. *Geografya i prirodniye resursy [Geography and natural resources]*. 2009. No. 3. P. 31–37 (In Russ.).

Сведения об авторах:

Бортин Николай Николаевич, доктор географических наук, руководитель, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Дальневосточный филиал, Россия, 600002, Владивосток, а/я 124, Некрасовская 53Б; e-mail: nbortin@mail.ru

Василевский Денис Николаевич, ведущий инженер, отдел водно-экологических исследований, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Дальневосточный филиал, Россия, 600002, Владивосток, а/я 124, Некрасовская 53Б; e-mail: dwassil@mail.ru

Василевская Любовь Николаевна, канд. геогр. наук, доцент, ФГАУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Россия, 690922, г. Владивосток, 22, о. Русский, п. Аякс, 10; ORCID: 0000-0003-3241-7444; e-mail: vasilevskaya.ln@dvfu.ru

Лисина Ирина Альбертовна, канд. геогр. наук, доцент, ФГАУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Россия, 690922, г. Владивосток, 22, о. Русский, п. Аякс, 10; ORCID: 0000-0001-6903-9411; e-mail: lisina.ia@dvu.ru

About the authors:

Nikolay N. Bortin, Doctor of Geographic Sciences, Head, Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection Far Eastern Branch, ul. Nekrasovskaya, 53B, P.O. Box 124, Vladivostok, 600002, Russia; e-mail: nbortin@mail.ru

Denis N. Vasilevskiy, Leading Engineer, Department of Water/ecological Studies, Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection Far Eastern Branch, ul. Nekrasovskaya, 53B, P.O. Box 124, Vladivostok, 600002, Russia; e-mail: dwassil@mail.ru

Lyubov N. Vasilevskaya, Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Far Eastern Federal University, o. Russkiy, 22, Ayaks, 10, 690922, Vladivostok, Russia; ORCID: 0000-0003-3241-7444; e-mail: vasilevskaya.ln@dvfu.ru

Irina A. Lisina, Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Far Eastern Federal University, o. Russkiy, 22, Ayaks, 10, 690922, Vladivostok, Russia; ORCID: 0000-0001-6903-9411; e-mail: lisina.ia@dvu.ru

Многолетние изменения основных составляющих приходной части водного баланса крупнейших водохранилищ азиатской территории России

А.В. Измайлова  , Т.В. Фуксова, К.А. Дубровская

 ianna64@mail.ru

ФГБУ «Государственный гидрологический институт», Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Необходимость оценки водного баланса крупнейших водохранилищ России и его многолетней изменчивости определяется ключевой ролью, которую эти водные объекты играют в социально-экономическом развитии страны. Выполнена оценка многолетних изменений составляющих приходной части водного баланса восьми крупнейших водохранилищ азиатской территории России на основе анализа многолетних рядов их годовых и месячных значений за период с момента заполнения до 2020 г. **Методы.** Исследование основывается на анализе режимных данных (годовых и месячных) о водных балансах, подготовленных управлениями Росгидромета и опубликованных в изданиях государственного водного кадастра. Несмотря на наличие невязок водного баланса, превышающих в отдельные периоды допустимую погрешность расчета водного баланса, ряды основных приходных составляющих баланса характеризуются допустимой точностью для анализа динамики их годовых и месячных значений. **Результаты.** Выявлено связанное с климатическим фактором изменение внутригодового распределения объемов естественных составляющих водного баланса, наиболее выраженное в последние десятилетия. В холодный период года наблюдается приращение доли бокового притока ко всем рассмотренным водохранилищам, для большинства из них фиксируется прохождение половодья в более ранние сроки.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: водохранилище, водный баланс, многолетние и внутригодовые изменения притока и осадков.

Финансирование: Работа выполнена в рамках НИТР Росгидромета по теме 2.2.2 «Разработка методов оценки и прогнозирования состояния водных объектов по количественным характеристикам, подготовка новых видов гидрологической информационной продукции».

Для цитирования: Измайлова А.В., Фуксова Т.В., Дубровская К.А. Многолетние изменения основных составляющих приходной части водного баланса крупнейших водохранилищ азиатской территории России // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2023. № 3. С. 36-48. DOI: 10.35567/19994508_2023_3_3.

Дата поступления 15.03.2023.

LONG-TERM CHANGES IN THE MAIN COMPONENTS OF THE INCOMING PART OF THE WATER BALANCE OF THE LARGEST RESERVOIRS IN THE ASIAN TERRITORY OF RUSSIA

Anna V. Izmailova  , Tatiana V. Fuksova, Kristina A. Dubrovskaya

 ianna64@mail.ru

State Hydrological Institute, St.-Petersburg, Russia

© Измайлова А.В., Фуксова Т.В., Дубровская К.А., 2023

ABSTRACT

Relevance. The long-term variability of the incoming part of the components of the water balance of the 8 largest reservoirs in the Asian territory of Russia on the basis of regime data (annual and monthly) published from the moment they were filled to the 2020 has been assessed. **Methods.** The work is based on analysis of the regime data (annual and monthly) provided by Rosgidromet and published in editions of the State Water Cadaster. In spite of some discrepancies in water balance, sometimes exceeding permissible error in the water balance calculations, the series of the main input components of the balance possess the necessary precision to analyze their annual and monthly values' dynamics. **Results.** A climate-related change in the intra-annual distribution of the volumes of natural components of the water balance, the most pronounced in recent decades, has been revealed. In the cold period of the year, an increase in the share of lateral inflow to all the considered reservoirs is observed, for most of them the passage of floods is recorded at an earlier date.

Keywords: reservoirs, water balance, long-term and intra-annual changes in runoff and precipitation values.

Financing: The work has been carried out within the Rosgidromet NITR according theme 2.2.2 "Development of methods for assessment and forecasting of water bodies state in terms of their quantitative characteristics, as well as preparation of new types of hydro/ecological information output".

For citation: Izmailova A.V., Fuksova T.V., Dubrovskaya K.A. Long-term changes in the main components of the incoming part of the water balance of the largest reservoirs in the Asian territory of Russia. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2023. No. 3. P. 36-48. DOI: 10.35567/19994508_2023_3_3.

Received 15.03.2023.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность оценок водного баланса крупнейших водохранилищ России и многолетней изменчивости его отдельных элементов определяется той ключевой ролью, которую данные водные объекты играют в водохозяйственном и энергетическом комплексе страны. Накопленные к настоящему времени материалы по режимным (годовым и месячным) водным балансам позволяют провести анализ изменений их естественных составляющих.

В настоящее время в России насчитывается 328 водохранилищ объемом свыше 10 млн м³, из которых 49 расположено в азиатской части страны¹. С начала эксплуатации наиболее значимых водохранилищ территориальными управлениями Росгидромета составляются и публикуются годовые и месячные (режимные) водные балансы. Однако последнее масштабное обобщение данных по водным ресурсам водохранилищ и их многолетней изменчивости было проведено В.С. Вуглинским в монографии «Водные ресурсы и водный баланс крупных водохранилищ СССР», подготовленной на материалах наблюдений до 1980 г. [1]. Накопленные за прошедший с тех пор сорокалетний период данные позволяют не только проанализировать точность оценок основных составляющих водного баланса крупнейших водохранилищ, но и провести ретроспективную оценку их многолетней динамики с анализом флуктуаций, происходящих на фоне изменений климата.

¹ Справочник водохранилищ СССР. Ч. 1. Водоохранилища объемом 10 млн. м³ и более. М.: Союзводпроект, 1988. 316 с.

В рамках исследования, результаты которого представлены в статье, были проанализированы водные балансы восьми крупнейших водохранилищ азиатской территории России за период с момента их заполнения до 2020 г., т. е. за временной период, характеризующийся разной степенью климатических изменений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование проведено на основе анализа режимных данных (годовых и месячных) о водных балансах, подготовленных и опубликованных управлениями Росгидромета в изданиях государственного водного кадастра^{2,3}. Рассмотрены водные балансы восьми крупнейших водохранилищ азиатской территории России, в т. ч. пяти водохранилищ Ангаро-Енисейского каскада (Иркутское, Братское, Усть-Илимское, Саяно-Шушенское и Красноярское), характеризующихся рядами наблюдений длительностью от 40 до 65 лет, а также Новосибирского водохранилища на р. Оби (наблюдения ведутся более 60 лет), Зейского и Вилюйского водохранилищ (с рядами, превышающими 40-летний период).

Иркутское водохранилище создано плотиной Иркутской ГЭС, возведение которой было начато в 1950-е годы, и включает речную часть на р. Ангаре и озеро Байкал, уровень которого в результате строительства плотины был поднят на 1,4 м. Полезный объем речной и озерной частей – 0,07 км³ и 23 615,4 км³ соответственно (табл. 1). Начало составления водного баланса – 1956 г. Следующее в каскаде – Братское водохранилище – является самым крупным по объему воды в России и вторым в мире. Плотина Братской ГЭС построена в 1961 г., заполнение водохранилища закончилось в 1967 г., водный баланс составляется с 1968 г. Расположенное ниже Усть-Илимское водохранилище заполнялось с 1974 по 1977 гг., данные по водному балансу публикуются с 1975 г. В каскаде Енисейских водохранилищ верхним является Саяно-Шушенское, образованное в 1980–1987 гг., начало публикации данных по его водному балансу – 1981 г. Расположенное ниже Красноярское водохранилище создано раньше – в 1967–1970 гг., начало публикации данных по водному балансу – 1972 г.

Самым крупным водохранилищем Западной Сибири является Новосибирское, созданное на р. Оби в 1957–1959 гг., начало публикации данных по водному балансу – 1959 г. Зейское водохранилище образовано на р. Зее в Амурской обл. в 1974–1977 гг., водный баланс ведется с 1978 г. Вилюйское водохранили-

² Государственный водный кадастр. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Т.1. Вып.10. Ч. 2. Новосибирск: Западно-Сибирское УГМС, 1978–2020; Государственный водный кадастр. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Т.1. Вып.12. Ч. 2. Красноярск: Средне-Сибирское УГМС, 1978–2020; Государственный водный кадастр. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Т.1. Вып.13. Ч. 2. Иркутск: Иркутское УГМС, 1978–2020; Государственный водный кадастр. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Т.1. Вып.16. Ч. 2. Якутск: Якутское УГМС, 1978–2020; Государственный водный кадастр. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Т.1. Вып.19. Ч. 2. Хабаровск: Дальневосточное УГМС, 1978–2020.

³ Материалы наблюдений на озерах и водохранилищах. Т. 6, Вып. 0-3. Новосибирск: Западно-Сибирское УГМС, 1960–1977; Материалы наблюдений на озерах и водохранилищах. Т. 7. Вып. 0-1, 2-4, 5-8. Иркутск: Иркутское УГМС, 1962–1977; Материалы наблюдений на озерах и водохранилищах. Т. 8. Вып. 0-7. Якутск: Якутское УГМС, 1974–1977.

ще создавалось в 1965–1972 гг. на р. Вилюй на территории Якутии, на границе с Иркутской обл., данные по водному балансу публикуются с 1974 г.

Таблица 1. Основные морфометрические характеристики водохранилищ
Table 1. Main morphometric characteristics of the reservoirs

Водохранилище	НПУ, м БС	УМО, м БС	Полный объем при НПУ, км ³
Иркутское	456	455	23 615
Братское	402	392	169,3
Усть-Илимское	296	294,5	58,9
Саяно-Шушенское	540	500	31,34
Красноярское	243	225	63
Новосибирское	113,5	108,5	8,8
Зейское	315	299	68,42
Вилюйское	244	234	35,88

Публикуемые месячные и годовые водные балансы водохранилищ характеризуются значительными невязками за отдельные периоды, поэтому была проведена предварительная проверка рядов составляющих баланса, согласно которой для дальнейшего анализа наиболее корректными признаны данные по притоку и осадкам на поверхность водохранилищ. Установлено, что даже при наличии невязок водного баланса, превышающих за отдельные периоды допустимую погрешность расчета водного баланса, они обладают достаточной точностью для анализа динамики годовых и месячных значений. Наименее достоверными и требующими дополнительной проверки (в т. ч. сравнения с данными испарительной сети) являются ряды испарения с водной поверхности, которые для большинства перечисленных водохранилищ характеризуются нестационарностью и наличием значительных выбросов отдельных значений как на месячном, так и на годовом уровне. В связи с этим в рамках данной статьи рассматривается многолетняя динамика основных составляющих лишь приходной части водного баланса – бокового и основного притоков, а также осадков на водное зеркало.

Принято считать, что глобальные изменения климата отражаются на естественных составляющих водного баланса уже с начала 1980-х годов⁴ [2–4]. Однако многие крупнейшие азиатские водохранилища были построены в 1970-е годы. В связи с этим для выявления изменений, произошедших с элементами водного баланса водохранилищ, сопоставление их характеристик проведено как с учетом осреднения их значений по десятилетним интервалам, так и за два сопоставимых подпериода, разделенные 1990 г. При этом предполагалось, что для азиатской части России в 1980-е годы выраженность изменений раз-

⁴ Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Т. 1. М.: Росгидромет, 2008. 207 с.; Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. М.: Росгидромет, 2014. 30 с.; Третий оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. СПб.: «Наукоемкие технологии», 2022. 124 с.

личных составляющих водного баланса, связанных с глобальными изменениями климата, могла быть еще достаточно слабой.

В рамках исследования для восьми рассмотренных водохранилищ проведены:

- определение доли различных составляющих в приходной части водного баланса;
- проверка на однородность многолетних рядов составляющих водного баланса;
- анализ межгодовой и сезонной изменчивости притока и осадков.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Водный баланс рассмотренных азиатских водохранилищ характеризуется доминантной долей притока и оттока (96–99 %), отличающихся высокой межгодовой и сезонной изменчивостью. Лишь в водном балансе Иркутского водохранилища, включающего акваторию оз. Байкал, доля осадков составляет 15,8 % от приходной, а испарения – 20 % от расходной части баланса. Коэффициенты вариации годовых объемов основного (0,14–0,17) и бокового (0,14–0,25) притоков к водохранилищам Ангаро-Енисейского каскада и Оби (табл. 2) сопоставимы с коэффициентами вариации годовых значений осадков на их поверхность (0,15–0,24). При этом меньшей вариативностью (0,15–0,18 %) отличаются осадки, выпадающие на поверхность водохранилищ Ангарского каскада. Коэффициенты вариации годовых объемов притока к Вилюйскому и Зейскому водохранилищам (основного – 0,24, 0,50; бокового – 0,31, 0,34 соответственно) превышают коэффициенты вариации осадков на их поверхность (0,23 и 0,28).

Таблица 2. Средние за рассматриваемый период (числитель) годовые значения (млн м³) и коэффициенты вариации (знаменатель) основных составляющих приходной части водного баланса водохранилищ
Table 2. Average for the period under review (numerator) annual values (million m³) and coefficients of variation (denominator) of the main components of the input part of the water balance of reservoirs

Элемент водного баланса	Иркутское	Братское	Усть-Илимское	Саяно-Шушенское	Красноярское	Новосибирское	Зейское	Вилюйское
Приток по основной реке		<u>56737</u> 0,17	<u>89968</u> 0,13	<u>32563</u> 0,16	<u>46077</u> 0,15	<u>52217</u> 0,17	<u>5060</u> 0,5	<u>14838</u> 0,24
Боковой приток	<u>61936</u> 0,17	<u>33164</u> 0,17	<u>7001</u> 0,23	<u>15390</u> 0,14	<u>47033</u> 0,15	<u>1985</u> 0,25	<u>20046</u> 0,34	<u>7659</u> 0,31
Осадки	<u>11482</u> 0,18	<u>1622</u> 0,17	<u>742</u> 0,15	<u>153</u> 0,24	<u>684</u> 0,22	<u>377</u> 0,22	<u>1110</u> 0,28	<u>704</u> 0,23

Наибольшей вариативностью годовых значений характеризуются элементы водного баланса Зейского и Вилюйского водохранилищ, наименьшей – ангарских.

Годовые величины притока к большинству азиатских водохранилищ за анализируемый период не претерпели сильных изменений. Анализ рядов суммарного годового притока показал их однородность для большинства водохранилищ, за исключением Красноярского (выявлена неоднородность по критерию Стьюдента) и Зейского (по критерию Фишера). Обнаружены значимые тренды для годового притока к Красноярскому (восходящий) и Усть-Илимскому (нисходящий) водохранилищам.

На основной приток к Братскому водохранилищу приходится 61 % от приходной части водного баланса, а к Усть-Илимскому – 92 % (рис. 1). Приток к Иркутскому водохранилищу рассматривается как суммарный приток непосредственно в его ангарскую часть (менее 1 %), а также в оз. Байкал, входящее в Иркутское водохранилище. Анализ многолетней изменчивости бокового и основного притоков к водохранилищам свидетельствует, что в рассматриваемый период в бассейне Ангары маловодье наблюдалось с 1974 по 1980 и с 2010 по 2017 гг., многоводье – в 1980-е годы и в первой половине 1990-х годов, переход к многоводной фазе наметился с 2018 г. Коэффициенты корреляции годовых значений суммарного притока к Иркутскому и Братскому, а также Братскому и Усть-Илимскому водохранилищам высокие (0,74 и 0,72 соответственно). При этом коэффициенты корреляции годовых значений бокового притока к Братскому и Усть-Илимскому водохранилищам низкие и составляют 0,33.

На основной приток к Саяно-Шушенскому водохранилищу приходится 68 % от приходной части водного баланса, а к Красноярскому – 50 %. Анализ многолетней изменчивости бокового и основного притоков к водохранилищам свидетельствует, что за рассматриваемый период в бассейне Енисея смена лет низкой и высокой водности происходила достаточно быстро. Коэффициент корреляции рядов суммарного годового притока к двум енисейским водохранилищам очень высокий и составляет 0,9, бокового – 0,55.

В приходной части водного баланса Новосибирского водохранилища основную долю составляет приток по р. Оби (в среднем – 96 %), доля бокового притока – 3,6 %. В приходной части Вилюйского водохранилища приток по р. Вилюй почти в два раза превышает боковой (~33 %). Боковой приток к Зейскому водохранилищу, напротив, почти в четыре раза превосходит приток по р. Зее (~20 %). Анализ многолетней изменчивости бокового и основного притоков к Новосибирскому, Вилюйскому и Зейскому водохранилищам показывает, что для них характерна относительно быстрая смена фаз высокой и низкой водности. Выявлена четкая тенденция к снижению притока по основной реке к Зейскому водохранилищу, компенсируемая ростом бокового притока.

Анализ годовых сумм осадков на водное зеркало выявил их однородность для всех водохранилищ. В то же время установлены значимые восходящие тренды годовых осадков на поверхность Саяно-Шушенского, Красноярского, Зейского и Вилюйского водохранилищ.

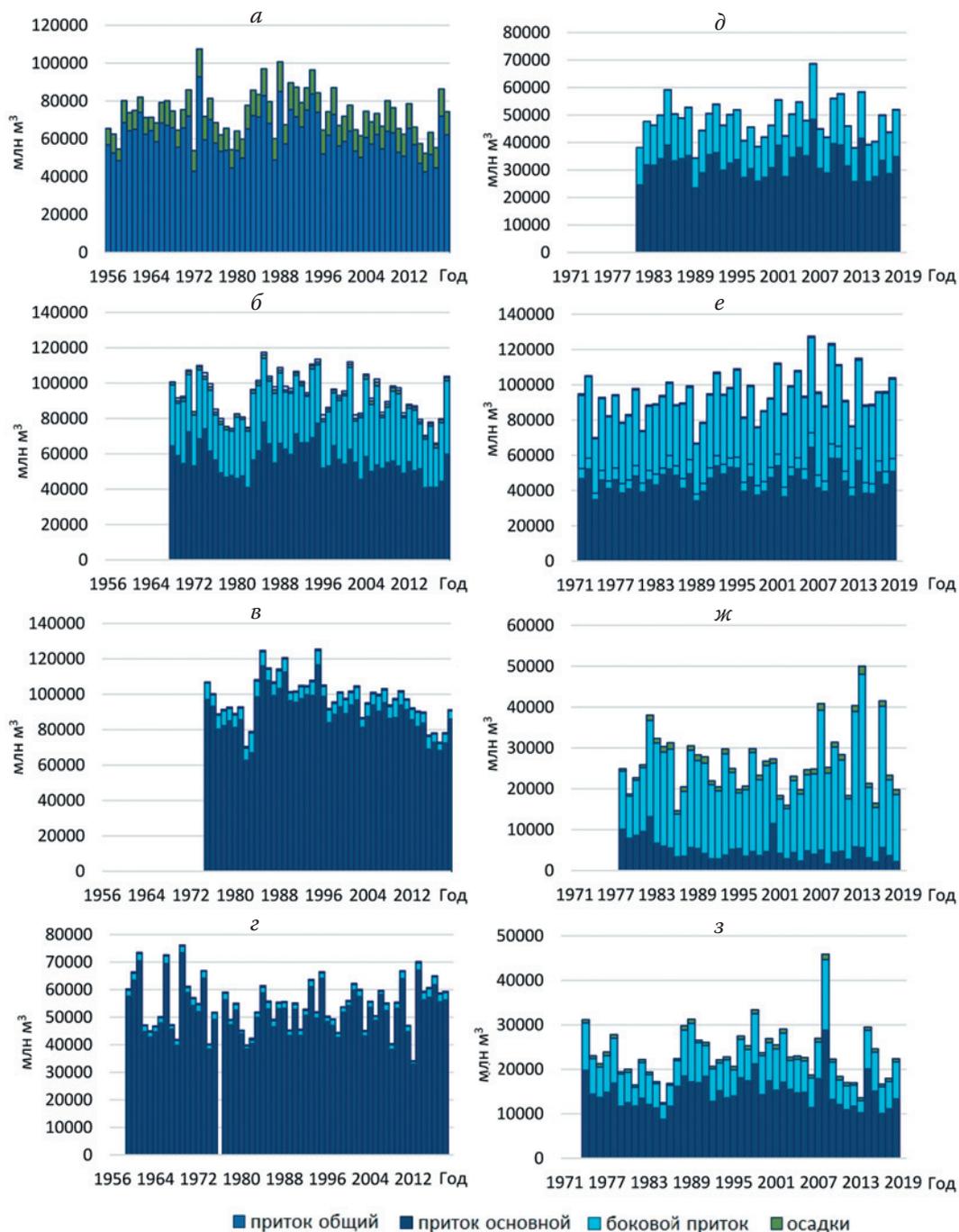


Рис. 1. Составляющие приходной части водного баланса (млн м³/год) Иркутского (*а*), Братского (*б*), Усть-Илимского (*в*), Новосибирского (*г*), Саяно-Шушенского (*д*), Красноярского (*е*), Зейского (*ж*) и Вилюйского (*з*) водохранилищ.
 Fig. 1. Components of the incoming part of the water balance (million m³/year) of Irkutsk (*a*), Bratsk (*b*), Ust-Ilimsk (*v*), Novosibirsk (*g*), Sayano-Shushensk (*d*), Krasnoyarsk (*e*), Zeya (*zh*) and Vilyuisky (*z*) reservoirs.

За прошедший с начала эксплуатации водохранилищ период на фоне небольших изменений годовых значений основных приходных составляющих водного баланса произошло их значимое внутригодовое перераспределение. Отметим, что изменения во внутригодовом перераспределении объемов речного стока и, как следствие, объемов притока в водохранилища характерны для всех регионов России [5, 6]. Для водохранилищ азиатской территории в холодный период года выявлено приращение доли бокового притока. К ангарским водохранилищам доля бокового притока в период с ноября по март выросла в среднем на 1,5 %: в 1960–1980-е годы суммарный приток к Иркутскому и Братскому водохранилищам составлял в эти месяцы чуть более 9 % годового, после 1990 г. его доля приблизилась к 11 %, а в Иркутском водохранилище это значение было превышено (рис. 2-1).

На внутригодовое перераспределение стока воды из оз. Байкал указывается и в работах [7–10]. Причинами происходящего внутригодового перераспределения определены происходящие климатические аномалии в Арктическом и Азиатско-Тихоокеанском регионах [11, 12]. Выявлены значимые восходящие тренды месячных значений притока к Иркутскому водохранилищу за все месяцы холодного периода. В то же время абсолютные значения месячного притока к Усть-Илимскому водохранилищу снизились на фоне общего снижения годового притока, приращение касается лишь доли зимнего притока в процентах от годового.

Вырос зимний приток к енисейским водохранилищам, но в абсолютных значениях изменения менее выражены, чем в относительных (рис. 2-2). Восходящий тренд объемов суммарного притока к Красноярскому водохранилищу также выявлен для всех месяцев холодного периода. Произошел рост как абсолютных значений, так и доли в годовом объеме (на 3 %) суммарного притока за ноябрь–март к Новосибирскому водохранилищу. Значимый восходящий тренд отмечен за все указанные месяцы. Установлено повышение абсолютных значений и доли притока в холодные месяцы по р. Зее к Зейскому водохранилищу с 1 до 2 %. Произошел небольшой рост доли притока в холодную часть года к Вилюйскому водохранилищу, прежде всего, в начале зимы.

Для большинства азиатских водохранилищ отмечается прохождение половодья в более ранние сроки. Доля притока в апреле к Иркутскому водохранилищу увеличилась на 1 %, бокового притока к Братскому – на 0,5 %, к Усть-Илимскому – на 4 % (особенно заметно в последнее десятилетие), при этом к Усть-Илимскому водохранилищу (рис. 3) существенно снизился приток в мае (около 5 %). В апреле отмечается повышение бокового притока к Красноярскому водохранилищу (приблизительно на 3 %). Выявлен восходящий тренд месячных значений суммарного притока к Красноярскому водохранилищу за апрель и нисходящий тренд в июне и июле. По Новосибирскому водохранилищу установлен рост основного притока в апреле, тенденция к снижению доли бокового притока весной (в мае) и к повышению летом. В Вилюйском водохранилище наблюдается значимый восходящий тренд притока за май, а половодье стало чаще начинаться в апреле.

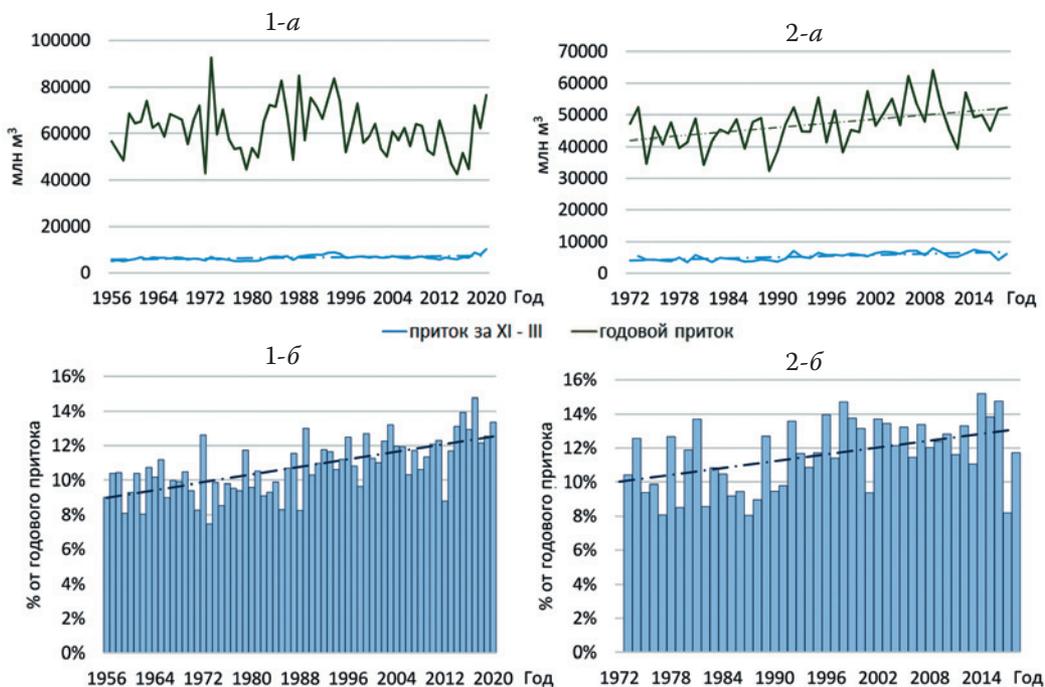


Рис. 2. Изменения бокового притока к Иркутскому (1) и Красноярскому (2) водохранилищам в течение года и с ноября по март (а); доля зимнего притока в % (б).
 Fig. 2. Changes in lateral inflow to the Irkutsk (1) and Krasnoyarsk (2) reservoirs during the year and from November to March (a); share of winter inflow in % (b).

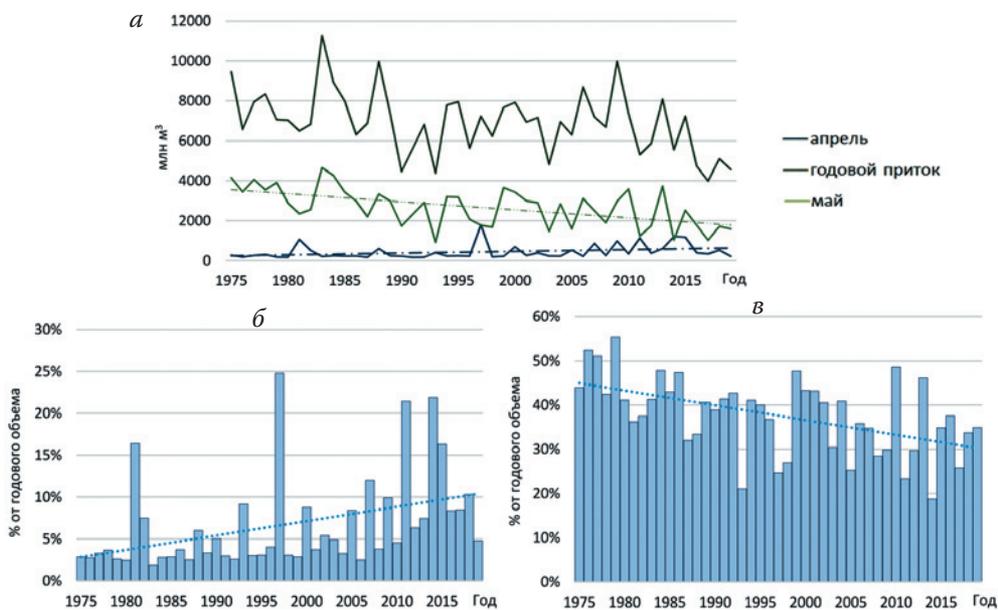


Рис. 3. Изменения бокового притока к Усть-Илимскому водохранилищу в апреле и мае (а) и их доля в процентах от годового объема (б – апрель, в – май).
 Fig. 3. Changes in the lateral inflow to the Ust-Ilimsk reservoir in April and May (a) and their share as a percentage of the annual (б – April, в – May).

В отличие от внутригодового перераспределения притока, перераспределение внутри года осадков, выпадающих на поверхность рассмотренных водохранилищ, носит различный характер. Для водохранилищ Ангарского каскада отмечается тенденция роста осадков в холодное время года (доля осадков с ноября по март выросла на 2–3 %) и снижения в середине лета (рис. 4), т. е. происходящие изменения приводят к большей равномерности выпадения осадков на поверхность ангарских водохранилищ в течение года. Коэффициент вариации месячных значений осадков на зеркало Иркутского водохранилища за две части рассматриваемого периода (разделенные 1990 г.) в среднем снизился с 0,87 до 0,80, Братского – с 0,87 до 0,84, Усть-Илимского с 1,38 до 1,11.

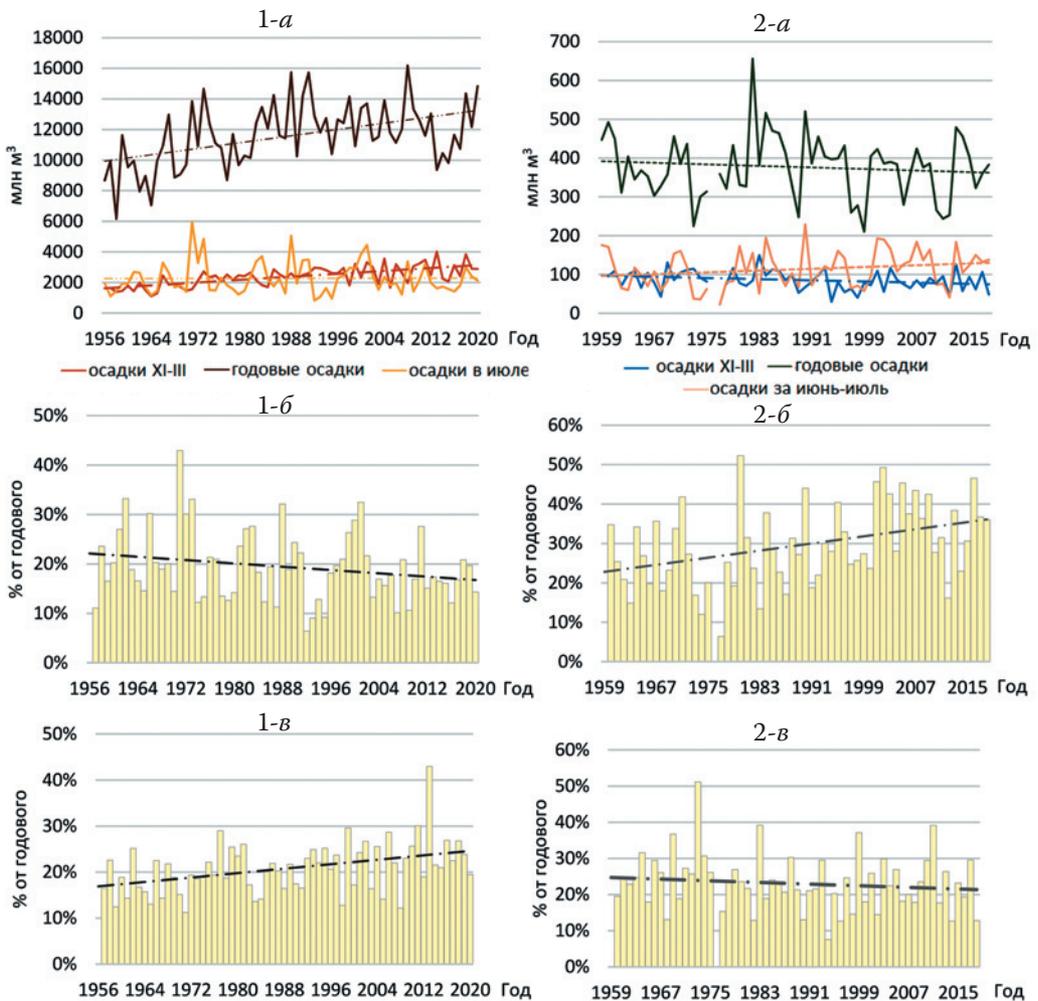


Рис. 4. Изменение осадков, выпадающих на зеркало Иркутского (1) и Новосибирского (2) водохранилищ в холодные и теплые месяцы (а); доля осадков в % от годового за июль (1-б), июнь-июль (2-б) и ноябрь-март (в).
Fig. 4. Changes in precipitation falling on the mirror of the Irkutsk (1) and Novosibirsk (2) reservoirs in cold and warm months (a); share of precipitation in % of annual for July (1-б), June-July (2-б) and November-March (v) months.

Для енисейских водохранилищ на фоне общего повышения осадков отмечен их наиболее выраженный рост в осенний период. Схожая картина отмечается на Вилюйском водохранилище. Выявлен значимый нисходящий тренд месячных сумм осадков за январь и август, выпадающих на поверхность Новосибирского водохранилища, при этом в начале лета отмечен их рост.

Наблюдается рост осадков на зеркало Зейского водохранилища, отмечающийся практически во все месяцы (исключение – апрель), который совпадает с трендом увеличения бокового притока. Наиболее выражен рост летних и осенних сумм осадков (рис. 5). Значимый восходящий тренд выявлен для годовых сумм осадков, а также осадков за май и октябрь.

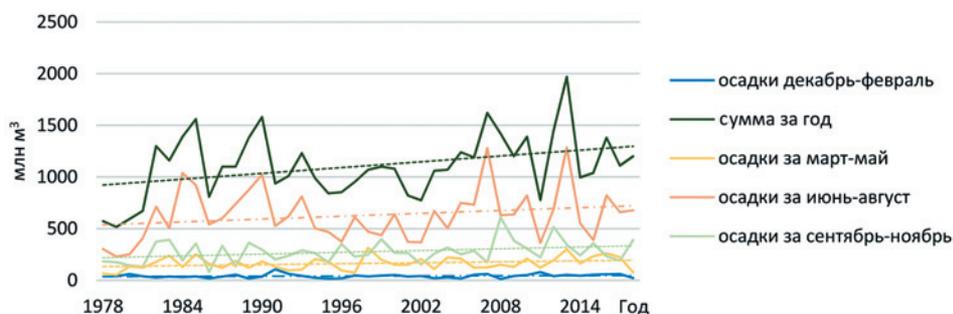


Рис. 5. Изменение осадков, выпадающих на зеркало Зейского водохранилища в разное время года.

Fig. 5. Changes in precipitation falling on the surface of the Zeya reservoir at different times of the year

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ режимных водных балансов восьми крупнейших азиатских водохранилищ России свидетельствует, что среди составляющих приходной части водного баланса наибольшие изменения отмечаются для характеристик притока, которые, прежде всего, выражаются в перераспределении его объемов внутри года.

В холодный период выявлено приращение доли бокового притока ко всем водохранилищам. Доля притока к ангарским и енисейским водохранилищам за ноябрь–март выросла на 1,5–2 %: в 1960–1980-е годы суммарный приток в водохранилища составлял в эти месяцы чуть более 9 % от годового, а после 1990 г. приблизился к 11 %. Доля зимнего притока к Новосибирскому водохранилищу выросла с 10 до 13 %, к Зейскому – с 1 до 2 %.

Для большинства азиатских водохранилищ фиксируется прохождение половодья в более ранние сроки. Увеличилась доля притока в апреле к Иркутскому и бокового притока к Братскому и Усть-Илимскому водохранилищам (на 1 %, 0,5 %, 4 %), при этом к Усть-Илимскому водохранилищу существенно снизился приток в мае. В апреле отмечено значимое повышение бокового притока к Красноярскому водохранилищу и его небольшое снижение в летние месяцы.

Анализ режимных водных балансов крупнейших водохранилищ азиатской территории России свидетельствует также о наличии существенных ошибок в определении его составляющих в отдельные периоды. Наибольшие невязки

выявлены при составлении водных балансов Новосибирского и Красноярского водохранилищ, что требует уточнения методик расчета на основе проведения комплекса гидрометрических и метеорологических работ на основных притоках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вуглинский В.С. Водные ресурсы и водный баланс крупных водохранилищ СССР. Л.: Гидрометиздат, 1991. 224 с.
2. Kjellström E., Nikulin G., Hansson U., Strandberg G., Ullerstig A. 21st century changes in the European climate: uncertainties derived from an ensemble of regional climate model simulations. *Tellus* 63 (1). 2011. P. 24–40.
3. *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Ed. by C. B. Field, V. R. Barros, C. Field, V. Barros, M. Mastrandrea, K. Mach, Abdrabo, W. Adger, Y. A. Anokhin, O. Anisimov, D. Arent, J. Barnett, V. Burkett, R. Cai, M. Chatterjee, S. J. Cohen, W. Cramer, P. Dasgupta, D. Davidson, F. Denton, P. Doll, K. Dow, Y. Hijioka, and O. Hoegh-Guldberg. Cambridge Univ. Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2014. 1130 p.
4. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change 2021*, Ed. by V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Pean, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekci, R. Yu, and B. Zhou. Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK. 2021, 2390 p.
5. Многолетние колебания и изменчивость водных ресурсов и основных характеристик стока рек Российской Федерации: Научно-прикладной справочник / под ред. Георгиевского В.Ю. СПб.: РИАН, 2021. 190 с.
6. Многолетние характеристики притока воды в крупнейшие водохранилища РФ: Научно-прикладной справочник / под ред. Георгиевского В.Ю. М.: РПЦ Офорт, 2017. 132 с.
7. Синокович В.Н., Чернышов М.С. Гидрометеорологический мониторинг и достоверность расчетов элементов водного баланса оз. Байкал // Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России: мат-лы Всеросс. научно-практ. конф. Иркутск, 21–23 марта 2018 г. Иркутск: Иркутский государственный университет, 2018. С. 329–334.
8. Чернявская И.А., Синокович В.Н., Чернышов М.С. Водный режим оз. Байкал в XXI столетии // Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России: мат-лы II Всеросс. научно-практической конф., приуроченной к 55-летию кафедры гидрологии и природопользования ИГУ / Иркутск, 5–7 июля 2019 г. Иркутск: Иркутский государственный университет, 2019. С. 286–292.
9. Никитин В.М., Абасов Н.В., Бережных Т.В., Осипчук Е.Н. Ангаро-Енисейский каскад ГЭС в условиях изменяющегося климата // Энергетика и климат. 2017. Вып. 62 (4). С. 62–70.
10. Никитин В.М., Абасов Н.В., Осипчук Е.Н., Бережных Т.В., Георгиевский В.Ю., Измайлова А.В., Молчанова Т.Г., Фуксова Т.В. Уровненный режим озера Байкал // География и природные ресурсы. 2022. № 5. С. 36–44.
11. Shkorba S., Ponomarev P., Dmitrieva E. Linkages of climatic anomalies in Arctic, Asian Pacific and Indo-Pacific regions // *Proceedings of Joint Science and Education Conference: Arctic Dialogue in the Global World*. Ulan-Ude: Buryat State University Published Department, 2015 P. 122–125.
12. Бережных Т.В., Марченко О.Ю., Абасов Н.В., Мордвинов В.И. Изменение летней циркуляции атмосферы над Восточной Азией и формирование длительных маловодных периодов в бассейне реки Селенги // География и природные ресурсы. 2012. № 3. С. 61–68.

REFERENCES

1. Vuglinsky V.S. Water resources and water balance of large reservoirs of the USSR. Leningrad: *Gidrometeoizdat*. 1991. 224 p. (In Russ.).
2. Kjellström E., Nikulin G., Hansson U., Strandberg G., Ullerstig A. (2011). 21st century changes in the European climate: uncertainties derived from an ensemble of regional climate model simulations. *Tellus* 63 (1). 2011. P. 24–40.
3. *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on*

- Climate Change, Ed. by C. B. Field, V. R. Barros, C. Field, V. Barros, M. Mastrandrea, K. Mach, Abdrabo, W. Adger, Y. A. Anokhin, O. Anisimov, D. Arent, J. Barnett, V. Burkett, R. Cai, M. Chatterjee, S. J. Cohen, W. Cramer, P. Dasgupta, D. Davidson, F. Denton, P. Doll, K. Dow, Y. Hijioka, and O. Hoegh-Guldberg. Cambridge Univ. Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2014. 1130 p.
4. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change 2021, Ed. by V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Pean, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekci, R. Yu, and B. Zhou. Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK, 2021. 2390 p.
 5. Long-term fluctuations and variability of water resources and the main characteristics of the flow of rivers in the Russian Federation: Scientific and Applied Handbook. Ed. Georgievsky V. Yu. St. Petersburg: LLC RIAL, 2021. 190 p. (In Russ.).
 6. Long-term characteristics of water inflow into the largest reservoirs of the Russian Federation Scientific and Applied Handbook. Ed. Georgievsky V.Y. Moscow: LLC "ROC Etching", 2017. 132 p. (In Russ.).
 7. Sinyukovich V.N., Chernyshov M.S. Hydro/meteorological monitoring and reliability of calculations of the elements of the water balance of the Lake Baikal. *Modern trends and prospects for the development of hydrometeorology in Russia: mat-ly Vseross. nauchno.-prakt. konf. [Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference. Irkutsk, March 21–23, 2018]*. Irkutsk: Irkutsk State University, 2018. P. 329–334 (In Russ.).
 8. Chernyavskaya I.A., Sinyukovich V.N., Chernyshov M.S. The water regime of the lake. Baikal in the 21st century. *Modern trends and prospects for the development of hydrometeorology in Russia: materialy II Vseross. nauchno.-prakticheskoy konferentsiyi, priurochennoy k 55letiyu kafedry gidrologiyi i prirodopolzovaniya IGU [Proceedings of the II All-Russian scientific and practical conference dedicated to the 55th anniversary of the Department of Hydrology and Environmental Management of ISU]*, Irkutsk, July 05–07, 2019. Irkutsk: Irkutsk State University, 2019. P. 286–292 (In Russ.).
 9. Nikitin V.M., Abasov N.V., Bereznyh T.V., Osipchuk E.N. Angara-Yenisei cascade of HPPs in a changing climate. *Energia i klimat [Energy and climate]*. 62 (4). 2017. (In Russ.).
 10. Nikitin V.M., Abasov N.V., Osipchuk E.N. Bereznyh T.V., Georgievskij V.Yu., Izmailva A.V., Molchanova T.G., Fuksova T.V. Level regime of Lake Baikal. *Geografia i prirodnie resursy [Geography and natural resources]*. 2022. No 5. P. 36–44 (In Russ.).
 11. Shkorba S., Ponomarev P., Dmitrieva E. Linkages of climatic anomalies in Arctic, Asian Pacific and Indo-Pacific regions. *Proceedings of Joint Science and Education Conference: Arctic Dialogue in the Global World*. Ulan-Ude: Buryat State University Published Department, 2015. P. 122–125.
 12. Bereznyh T.V., Marchenko O.Yu., Abasov N.V., Mordvinov V.I. Changes in the summer circulation of the atmosphere over East Asia and the formation of long dry periods in the Selenga river basin. *Geografia i prirodnie resursy [Geography and natural resources]*. 2012. No 3. P. 61–68 (In Russ.).

Сведения об авторах:

Измайлова Анна Владиленовна, д-р геогр. наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией озер и водохранилищ, ФГБУ «Государственный гидрологический институт», Россия, 199004, Санкт-Петербург, 2-я линия В.О., 23. ORCID: 0000-0003-1705-6863; e-mail: ianna64@mail.ru

Фуксова Татьяна Викторовна, старший научный сотрудник, ФГБУ «Государственный гидрологический институт», Россия, 199004, Санкт-Петербург, 2-я линия В.О., 23; e-mail: fuksova.spb@mail.ru

Дубровская Кристина Анатольевна, младший научный сотрудник, ФГБУ «Государственный гидрологический институт», Россия, 199004, Санкт-Петербург, 2-я линия В.О., 23; e-mail: krisya_dubok@mail.ru

About the author:

Anna V. Izmailova, Dr., Head of the Laboratory, Leading Researcher, State Hydrological Institute, Russia, 199004, St.-Petersburg, 2nd lin. V. O., 23. ORCID: 0000-0003-1705-6863; e-mail: ianna64@mail.ru

Tatiana V. Fuksova, Senior Researcher, State Hydrological Institute, Russia, 199004, St.-Petersburg, 2nd lin. V. O., 23. e-mail: fuksova.spb@mail.ru

Kristina A. Dubrovskaya, Junior Researcher, State Hydrological Institute, Russia, 199004, St.-Petersburg, 2nd lin. V. O., 23. e-mail: krisya_dubok@mail.ru

Повышение температуры воды Куйбышевского водохранилища и риски водопользования

К.В. Селезнева^{1,2}  , А.В. Селезнева¹ , В.А. Селезнев¹ 

 seleznev53@mail.ru

¹ *Институт экологии Волжского бассейна РАН – филиал Самарского федерального исследовательского центра РАН, г. Тольятти, Россия*

² *Тольяттинский государственный университет, г. Тольятти, Россия*

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Изменение термического режима Куйбышевского водохранилища влияет на функционирование водной экосистемы и формирование качества воды, а его оценка в условиях глобальных климатических изменений крайне важна, т. к. водоем используется для ведения рыбного хозяйства, хозяйственно-питьевого водоснабжения и рекреации. Представлена количественная оценка изменений поверхностной температуры воды Куйбышевского водохранилища и смещений дат перехода температуры воды при прогреве весной и охлаждении осенью в условиях глобального потепления климата. **Методы.** Для исследования использованы архивные и современные данные синхронных наблюдений за приземной температурой воздуха и поверхностной температурой воды Куйбышевского водохранилища. Для оценки изменения температуры выбраны два периода: современный (2015–2021 гг.) и исторический (1957–1980 гг.) **Результаты.** Установлено, что изменение термического режима Куйбышевского водохранилища обусловлено глобальным потеплением климата. За последние семь лет наметилась устойчивая тенденция повышения температуры поверхностного слоя воды в прибрежной зоне, средняя температура воды в апреле–ноябре увеличилась на 1,6 °С по сравнению с историческим периодом. Установлено, что водохранилище быстрее нагревается и медленнее охлаждается. В современный период наблюдается повышение температуры воды Куйбышевского водохранилища и смещение дат перехода температуры воды через контрольные значения (0,2; 4,0; 10,0 °С), что обусловлено повышением температуры воздуха из-за глобального потепления климата.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Волга, водохранилище, глобальное потепление, температура воздуха, температура воды, трансформация сезонов, риски водопользования.

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания (регистрационный номер 1021060107175-5-1.6.19).

Для цитирования: Селезнева К.В., Селезнева А.В., Селезнев В.А. Повышение температуры воды Куйбышевского водохранилища и риски водопользования // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2023. № 3. С. 49–62. DOI: 10.35567/19994508_2023_3_4.

Дата поступления 17.04.2023.

AN INCREASE IN THE KUIBYSHEV RESERVOIR WATER TEMPERATURE AND THE RISKS OF WATER USE

Ksenia V. Selezneva^{1,2}  , Aleksandra V. Selezneva¹ , Vladimir. A. Seleznev¹ 

 seleznev53@mail.ru

¹ *Institute of Ecology of the Volga Basin RAS – branch of the Samara Federal Research Center RAS, Russian Federation*

© К.В. Селезнева, А.В. Селезнева, В.А. Селезнев, 2023

² Togliatti State University, Russian Federation

ABSTRACT

Relevance. The change in the thermal regime of the Kuibyshev reservoir affects the functioning of the aquatic ecosystem and the formation of water quality, and its assessment in the context of global climate change is extremely important, since the reservoir is used for fisheries, drinking water supply and recreation. The article presents quantitative estimation of the Kuibyshev Reservoir surface water temperature and shifts in the dates of transition of water temperature during warming in spring and cooling in autumn in the context of global warming. **Methods.** For the study, archival and current data of synchronous observations of surface air temperature and surface water temperature of the Kuibyshev Reservoir have been used. Two periods: current (2015–2021) and historical (1957–1980) ones have been chosen to assess the temperature change. **Results.** It has been established that the change in the thermal regime of the Kuibyshev Reservoir is due to global climate warming. In the modern period, over the past 7 years, there has been a steady trend of increasing the temperature of the surface layer of water in the coastal zone of the reservoir, the average water temperature for the ice-free period (April–November) increased by 1.6 °C compared to the historical period. It has been stated that the reservoir heated up faster and cooled more slowly. In the modern period, there is an increase in the water temperature of the Kuibyshev Reservoir and a shift in the control dates for the transition of the water temperature through the control values (0.2; 4.0; 10.0 °C), which is due to an increase in air temperature due to global warming.

Keywords: Volga, reservoir, global warming, air temperature, water temperature, transformation of seasons, water use risks.

Financing: The work was carried out within the framework of the state task (registration number 1021060107175-5-1.6.19).

For citation: Selezneva K.V., Selezneva A.V., Seleznev V.A. The increase in the Kuibyshev Reservoir water temperature and the risks of water use. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2023. No. 3. P. 49–62. DOI: 10.35567/19994508_2023_3_4.

Received 17.04.2023.

ВВЕДЕНИЕ

Термический режим оказывает существенное влияние на функционирование водных экосистем и формирование качества воды крупных водохранилищ Волги, используемых для нужд рыбного хозяйства, питьевого водоснабжения и рекреации [1–7]. Оценка трансформации термического режима водных экосистем в условиях глобального потепления климата [8, 9] имеет важное научное и практическое значение.

Один из важнейших показателей глобального потепления климата – тренд на повышение температуры приземного слоя атмосферы. По данным Росгидромета за последние 100 лет общее повышение температуры воздуха для территории России составило 1,0 °C, что на 0,4 °C выше, чем в среднем для земного шара. Начиная с 1970-х годов каждое последующее десятилетие было теплее предыдущего¹. Особого внимания заслуживает семилетний период (2015–2021 гг.). По данным Всемирной метеорологической организации, 2021 г. стал седьмым годом подряд, начиная с 2015 г., когда глобальная температура воздуха была выше на 1 °C до индустриального уровня (1850–1900 гг.).

¹ Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2007. М.: Росгидромет. 2008. 164 с.

Наблюдаемое на территории России повышение температуры воздуха приводит к изменению состояния рек, озер и водохранилищ [10–12]. Установлены последствия влияния потепления климата на изменение водных ресурсов в крупнейших речных бассейнах² [13–16]. В Волжском бассейне с 1970–1980-х годов наблюдается повышение водности рек на 10–15 % за счет увеличения стока в зимнюю и летне-осеннюю межень³ [16]. Наряду с этим, недостаточно внимания уделяется изучению влияния глобального потепления климата на трансформацию термического режима и, как следствие, на экологическое состояние крупных равнинных водохранилищ с замедленным водным обменом. Существует ограниченное количество исследований по этому направлению.

На Верхней Волге на Рыбинском водохранилище проведены исследования изменений температуры поверхностного слоя воды. Выявлены и оценены линейные тренды. За период 1976–2008 гг. установлена тенденция повышения средней температуры поверхностного слоя воды во все месяцы при максимальной скорости повышения в июле – 0,89 °C/10 лет [17]. На водохранилищах Средней и Нижней Волги установлено, что в жаркие и маловодные годы при повышении температуры воды в период летней межени наблюдается ухудшение кислородного режима, увеличение биологической продуктивности цианобактерий, рост органического загрязнения, что негативно влияет на функционирование водных экосистем и формирование качества воды [5, 6, 15].

Существует и противоположная точка зрения о влиянии климатических изменений на экологическое состояние водных объектов. В частности, отмечается, что повышенная увлажненность в последние десятилетия и потепление климата, сопровождающееся увеличением годовой температуры воды на 0,2–0,3 °C, способствовали лучшему самоочищению рек и водоемов [12].

Для водных экологических исследований в бассейне Волжско-Камских водохранилищ крайне важно оценить влияние повышения температуры приземного слоя атмосферы на формирование термического режима водоемов. Необходимо продолжить исследования по оценке влияния климатических изменений на состояние водохранилищ. В качестве объекта исследований выбрано самое крупное в Волжско-Камском каскаде – Куйбышевское водохранилище. Основная цель проведенной работы – дать количественную оценку современных изменений поверхностной температуры воды водохранилища и определить смещение дат перехода температуры воды при прогреве весной и охлаждении осенью через контрольные значения (0,2; 4,0; 10,0 °C) в условиях глобального потепления климата.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Куйбышевское водохранилище расположено в центре Волжского бассейна (рис. 1). Оно создано в 1957 г. в результате перекрытия Волги Жигулевской плотиной (замыкающий створ). Входными створами являются: на волжской ветке – Чебоксарская плотина; на камской ветке – Нижнекамская плотина.

² Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2009 год. М.: Росгидромет. 2010. 57 с.

³ Основные гидрологические характеристики при нестационарности временных рядов, обусловленные влиянием климатических факторов. Рекомендации по расчету. СПб.: ФГБУ ГГИ. 2017. 42 с.

Общая длина водохранилища с учетом волжской и камской веток составляет 750 км, площадь акватории при нормальном подпорном уровне – 6450 км² [18], средняя глубина – 9 м [19], а максимальная – 50 м (по результатам экспедиционных исследований в октябре 2022 г.).

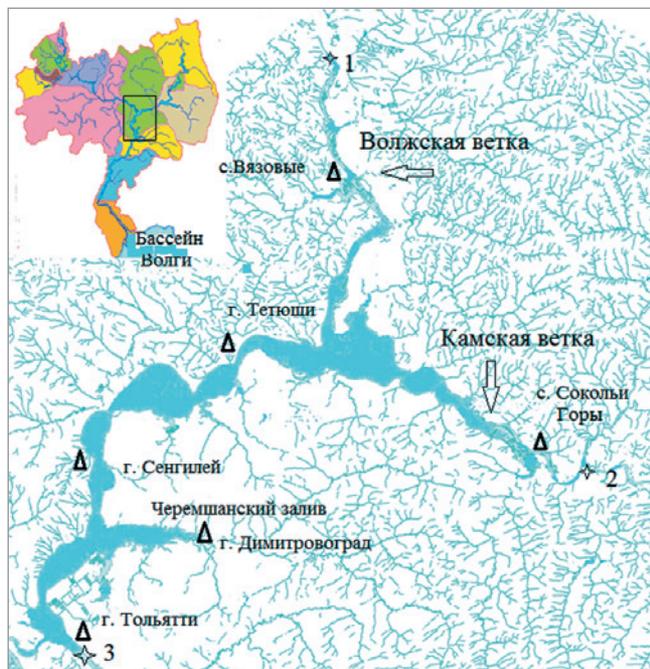


Рис. 1. Расположение гидроузлов и гидрологических пунктов наблюдений (Δ); гидроузлы: 1 – Чебоксарский, 2 – Нижнекамский, 3 – Жигулевский.
 Fig. 1. Location of hydroelectric facilities and hydrological observation points (Δ) (hydraulic units: 1 – Cheboksary, 2 – Nizhnekamsk, 3 – Zhigulevsky).

Изучение пространственной неоднородности и временной изменчивости температуры воды на водохранилище проводится с момента его создания⁴. Поверхностная температура воды на гидрологических постах, равномерно расположенных по длине водоема (рис. 1), систематически измеряется в прибрежной зоне водохранилища два раза в сутки (в 8 и 20 ч). Измерения осуществляются поверхностным (родниковым) термометром в оправе Шпиндлера на глубине не менее 1 м. Цена деления термометра 0,2 °С, что позволяет определять температуру воды с точностью до 0,1 °С.

Анализ архивных материалов Росгидромета показывает, что, несмотря на значительную протяженность Куйбышевского водохранилища, температура воды меняется незначительно. Средняя температура (t_{cp}) за теплый период (апрель–ноябрь) на разных участках водохранилища составляет 11,0–12,1 °С (табл. 1). Наибольший прогрев воды наблюдается в мелководном Черемшанском заливе (г. Дмитровград), где средняя температура воды – 12,7 °С.

⁴ Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Т. 1. РСФСР. Вып. 24. Бассейны рек Волги (среднее и нижнее течение) и Урала. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 520 с.

Таблица 1. Температура воды на гидрологических постах Куйбышевского водохранилища, °С
Table 1. Water temperature at the Kuybyshev Reservoir hydrological posts, °С

Гидрологический пост	Месяц								t _{ср}
	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	
Основная акватория водохранилища									
с. Вязовые	2,2	12,0	17,0	21,0	19,7	14,4	6,5	0,9	11,7
с. Соколы Горы	0,4	10,8	16,6	20,8	19,2	13,7	5,6	0,6	11,0
г. Тетюши	1,2	11,0	17,4	21,1	19,9	14,8	6,9	1,0	11,7
г. Сенгилей	1,3	10,1	17,3	20,6	20,2	15,9	8,8	2,1	12,0
г. Тольятти	0,8	7,9	16,6	20,5	20,3	16,8	10,2	3,5	12,1
Черемшанский залив									
г. Димитровград	3,9	14,6	19,8	22,4	20,3	14,2	5,8	0,7	12,7

По длине водохранилища температура воды с севера на юг повышается на 1,1 °С. В северной части по волжской ветке (с. Вязовые) она составляет 11,7 °С, а по камской ветке (с. Соколы Горы) – 11,0 °С (табл. 1). Температура камской воды на 0,7 °С ниже температуры волжской. В южной части водохранилища (г. Тольятти) температура воды выше, чем в северной и составляет 12,1 °С, что превышает температуру камской воды (с. Соколы Горы) на 1,1 °С и температуру волжской воды (с. Вязовые) на 0,4 °С.

В сезонном разрезе значительные изменения температуры воды по длине водохранилища отмечены весной и осенью, наименьшие – летом (табл. 1). В мае разница температур между северной и южной частями водохранилища составляет 4,1 °С, в октябре – 4,6 °С. Летом разница температур сокращается: в июне она составляет 0,8 °С; в июле – 0,6 °С и в августе – 1,1 °С. Наибольший прогрев воды наблюдается в июле (средняя месячная температура 20,5–21,1 °С).

Для количественной оценки влияния климатических изменений на термический режим Куйбышевского водохранилища выбран стационарный пункт наблюдений (г. Тольятти), который бесперебойно функционирует 65 лет. На протяжении всего периода наблюдения осуществляются по единой методике, что позволяет получать достоверные оценки многолетних изменений температуры воды водохранилища за теплый период (апрель–ноябрь).

Для сравнительного анализа временных рядов выбран эмпирический метод, основанный на обработке имеющихся данных гидрометеорологических наблюдений. Сравнивали два периода: исторический и современный. Исторический период простирается от 1950-х до конца 1970-х годов. Для бассейна Волги рубеж 1970–1980-х годов характеризует начало климатических изменений гидрологических характеристик³. Наиболее существенные климатические изменения, в частности глобальное повышение температуры воздуха, зафиксированы в современный период с 2015 по 2021 гг. Для сравнения двух периодов использованы данные о средних месячных, наибольших и наименьших значениях температуры воды и датах перехода через контрольные значения температуры воды – 0,2; 4,0; 10,0 °С.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнительный анализ данных многолетних наблюдений показывает, что за последние семь лет температура воздуха на метеостанции Тольятти увеличилась (рис. 2). В современный период (2015–2021 гг.) средняя температура воздуха ($T_{\text{ср}}$) за апрель–ноябрь составила 13,6 °С, что на 2,1 °С выше соответствующей температуры исторического периода (1952–1979 гг.). Основной вклад в увеличение средней годовой температуры привносит летний период (рис. 2). Наибольшая температура воздуха ($T_{\text{наиб}}$) не изменилась, а наименьшая ($T_{\text{наим}}$) существенно увеличилась с 7,5 °С до 11,8 °С.

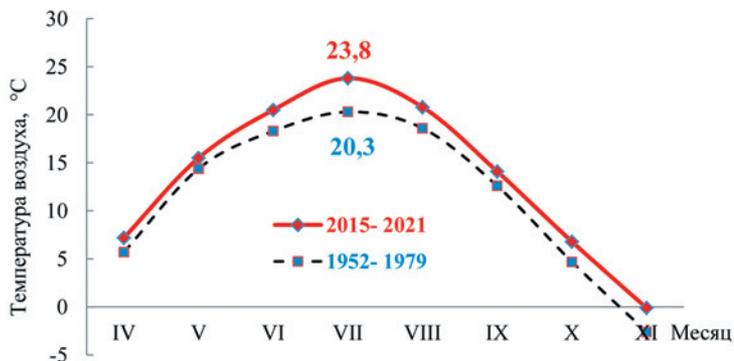


Рис. 2. Температура воздуха в современный и исторический периоды.
Fig. 2. Air temperature in the current and historical periods.

В современный период самым жарким оказался 2021 г., когда средняя температура воздуха с апреля по ноябрь достигла отметки 15,0 °С и превысила значение $T_{\text{ср}}$ исторического периода на 3,5 °С (табл. 2).

В июле наблюдалась самая высокая $T_{\text{ср}}$, которая составила 24,6 °С и превысила июльское значение исторического периода на 4,3 °С. В течение всего июля средняя суточная температура воздуха 15 раз (половина месяца) превышала значение 25 °С, а максимальные значения в суточном режиме превышали 30 °С и составляли 32–39 °С. Повышение температуры воздуха в современный период привело к увеличению поверхностной температуры воды Куйбышевского водохранилища. Анализ данных многолетних наблюдений на гидрологическом посту г. Тольятти показал, что средняя температура воды ($t_{\text{ср}}$) за современный период составила 13,7 °С и увеличилась на 1,6 °С по отношению к историческому периоду (табл. 3).

В современный период наибольшая температура воды ($t_{\text{наиб}}$) составила 15,5 °С и незначительно отличалась от значения $t_{\text{наиб}}$ в исторический период (15,3 °С). А вот наименьшая температура воды ($t_{\text{наим}}$) существенно увеличилась – с 9,5 °С до 11,8 °С. Следовательно, увеличение средней температуры воды ($t_{\text{ср}}$) в современный период произошло за счет повышения наименьших температур воды ($t_{\text{наим}}$).

В сезонном разрезе максимальное увеличение температуры воды ($t_{\text{ср}}$) в современный период отмечено в июле (рис. 3), когда температура воды составляла 22,5 °С и на 2,0 °С превышала подобное значение для исторического периода. Минимальное увеличение температуры воды наблюдалось в апреле – 0,7 °С.

Таблица 2. Температура воздуха за современный и исторический период, °С
Table 2. Air temperature for current and historical periods, °С

Температура воздуха	Месяц								Среднее значение
	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	
Современный период									
T_{2015}	6,9	13,2	20,2	23,8	15,2	14,2	2,5	-0,2	12,0
T_{2016}	8,3	14,9	20,3	23,6	24,1	14,3	5,4	-2,1	13,6
T_{2017}	6,8	13,1	18,5	22,2	22,6	14,2	6,4	2,8	13,3
T_{2018}	6,2	15,8	20,3	24,2	21,7	16,3	8,6	-1,5	14,0
T_{2019}	7,0	17,0	22,4	23,2	18,3	12,7	9,6	-0,4	13,7
T_{2020}	7,5	15,4	18,9	25,3	19,5	14,4	8,1	-0,7	13,6
T_{2021}	7,8	19,1	22,9	24,6	24,0	12,8	7,0	1,6	15,0
$T_{\text{ср}}$	7,2	15,5	20,5	23,8	20,8	14,1	6,8	-0,1	13,6
$T_{\text{наиб}}$	8,3	19,1	22,4	25,3	24,1	16,3	9,6	2,8	16,1
$T_{\text{наим}}$	6,2	13,1	18,5	22,2	18,3	12,7	5,4	-2,1	11,8
Исторический период									
$T_{\text{ср}}$	5,7	14,4	18,3	20,3	18,6	12,6	4,7	-2,6	11,5
$T_{\text{наиб}}$	12,4	19,8	21,1	23,8	23,3	17,5	9,6	1,4	16,1
$T_{\text{наим}}$	1,5	9,9	15,6	17,2	16,6	8,6	-2,1	-7,1	7,5

Таблица 3. Температура воды по данным гидрологического поста Тольятти, °С
Table 3. Water temperature according to the hydrological post of Togliatti, °С

Температура воды	Месяц								Средне значение
	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	
Современный период									
t_{2015}	1,0	8,3	19,0	22,5	20,1	18,4	11,0	4,7	13,0
t_{2016}	2,3	11,5	19,5	22,6	24,1	18,2	12,2	3,7	14,3
t_{2017}	1,1	8,6	15,2	20,0	22,3	19,2	11,7	5,7	13,0
t_{2018}	0,1	7,8	16,2	23,4	22,8	19,7	13,0	5,3	13,5
t_{2019}	1,7	10,1	20,3	21,6	19,7	16,7	12,9	7,2	13,8
t_{2020}	3,1	10,4	17,9	23,0	21,2	17,9	12,8	5,9	14,0
t_{2021}	1,1	9,8	20,7	24,3	24,2	18,2	11,7	5,0	14,4
$t_{\text{ср}}$	1,5	9,5	18,4	22,5	22,1	18,3	12,2	5,4	13,7
$t_{\text{наиб}}$	3,1	11,5	20,7	24,3	24,2	19,7	13,0	7,2	15,5
$t_{\text{наим}}$	0,1	7,8	15,2	20,0	19,7	16,7	11,0	3,7	11,8
Исторический период									
$t_{\text{ср}}$	0,8	7,9	16,6	20,5	20,3	16,8	10,2	3,5	12,1
$t_{\text{наиб}}$	2,3	12,5	19,3	24,4	22,6	19,8	14,2	7,1	15,3
$t_{\text{наим}}$	0,1	3,5	13,6	17,5	18,5	14,2	7,7	0,8	9,5

За современный период наиболее существенно температура воды повысилась в 2021 г. Средняя температура воды ($t_{\text{ср}}$) за безледоставный период составила 14,4 °С и превысила показатель исторического периода на 2,3 °С. В июле она достигла 24,3 °С, что на 3,8 °С превысило подобное значение исто-

рического периода. В течение июля 2021 г. средняя суточная температура воздуха превышала 22 °С и изменялась в пределах 22,1–26,5 °С. В период с 18 по 22 июля вода прогрелась до 25,3–26,5 °С, превысив предыдущие рекордные показатели на 0,1–1,3 °С.

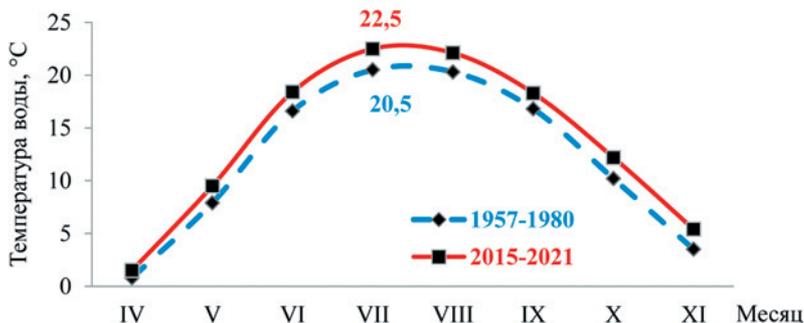


Рис. 3. Температура воды в современный и исторический периоды.
Fig. 3. Water temperature in the current and historical periods.

Совместный анализ сезонного хода температуры воздуха и воды в самом жарком 2021 г. показывает, что выделяются три периода (рис. 4):

– I период (апрель–май) весеннего нагревания воды, когда температура воздуха выше температуры воды и при отсутствии ветра создаются благоприятные условия для формирования термоклина, в котором температура воды понижается с глубиной более резко, чем в нижележащих слоях;

– II период (июнь–август) летней квазистационарности, когда температура воды практически не меняется и хорошо согласуется с температурой воздуха, это период наибольших температур воды и благоприятных условий для развития цианобактерий;

– III период (сентябрь–ноябрь) осеннего охлаждения, когда температура воздуха ниже температуры воды и создаются условия для конвективного перемешивания водных масс.

Летний период II является самым неблагоприятным для формирования кислородного режима воды из-за высоких температур и массового развития цианобактерий. Летом 2021 г. средняя месячная температура воздуха в июле и августе составила 24,6 °С и 24,0 °С, температура воды – 24,3 °С и 24,2 °С соответственно. Довольно часто средняя суточная температура воздуха превышала 30 °С, а температура воды – 27 °С (рис. 4). При такой высокой температуре воды даже равновесная концентрация растворенного кислорода составляет всего 7,7–7,9 мгО/дм³.

Дальнейшее летнее понижение содержания растворенного кислорода в воде водохранилища связано с активизацией массового развития цианобактерий при высоких температурах воды. В безветренную погоду на поверхности воды из-за фотосинтезирующей аэрации образуется тонкая перенасыщенная кислородом пленка, препятствующая абсорбции кислорода из атмосферы. В отсутствие турбулентного перемешивания снижается поступление растворенного кислорода с поверхности водоема в нижележащие слои воды. Из-за интенсивного потребления кислорода на минерализацию органиче-

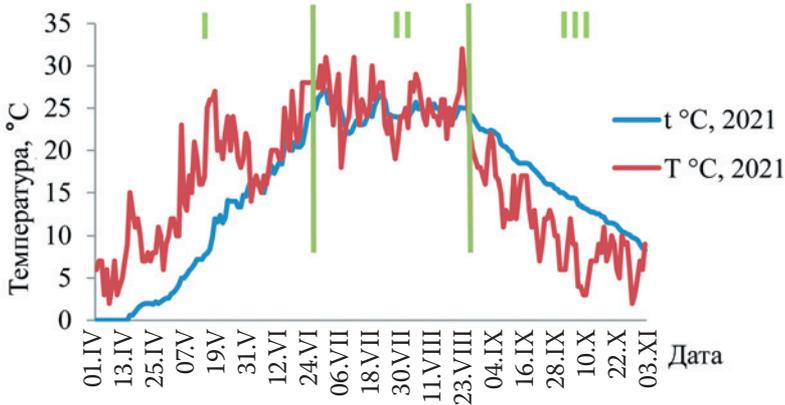


Рис. 4. Три периода (I, II, III) в сезонном ходе температуры воздуха и воды.
Fig. 4. Three periods (I, II, III) in the seasonal course of air and water temperature.

ских веществ содержание фактического кислорода меньше равновесного на 2,0–2,5 мгО/дм³ [6]. Следовательно, содержание фактического растворенного кислорода в воде Куйбышевского водохранилища меньше допустимой нормы, которая составляет 6,0 мгО/дм³. Дефицит растворенного кислорода замедляет процессы самоочищения и создает условия для замора рыбы.

В современный период, наряду с ростом температуры воды, наблюдалось смещение дат устойчивого перехода температуры воды весной и осенью через контрольные значения (табл. 4). По сравнению с историческим периодом увеличилась продолжительность теплого сезона. Количество дней, для которых температура воды (t_{cp}) превышала 0,2 °С, возросло с 231 до 245; с 192 до 207 с превышением t_{cp} более 4,0 °С; с 163 до 169 дней, для которых t_{cp} превышала 10,0 °С.

Средние даты весеннего перехода температуры воды через контрольные значения в современный период сдвинулась по отношению к историческому на более ранние сроки (табл. 4). В весенний период даты перехода температуры воды через контрольные значения стали наступать раньше: для значения 0,2 °С – на 11 дней; для 4,0 °С – на 2 дня; для 10,0 °С – на 5 дней. В осенний период, напротив, даты перехода наступают позднее: для значения 10,0 °С – на 10 дней; для 4,0 °С – на 10 дней; для 0,2 °С – на 6 дней.

Наблюдаемое в 2016–2021 гг. увеличение температуры воды на 1,5–2,0 °С активизировало процесс массового развития цианобактерий на Куйбышевском водохранилище. Это видимая невооруженным глазом составная часть более глобального процесса – антропогенного эвтрофирования водоема. Особенно ярко как на акватории, так и в прибрежной части водохранилища он проявляется в жаркие и маловодные периоды, когда видовое разнообразие планктона сокращается, доминируют цианобактерии. При этом численность и биомасса цианобактерий увеличивается, а зоопланктона – уменьшается.

Как известно, цианобактерии или синезеленые водоросли – это значительная группа крупных бактерий, способных к фотосинтезу, сопровождающемуся выделением кислорода. При оптимальных условиях (температура воды более 22 °С, наличие биогенных веществ и отсутствие турбулентного перемешивания) взросление одноклеточных цианобактерий длится 12 ч. Как следствие,

Таблица 4. Даты устойчивого перехода температуры воды на посту г. Тольятти
 Table 4. Dates of stable transition of water temperature at the post in Togliatti

Температура воды	Дата перехода t весной			Дата перехода t осенью		
	0,2 °C	4,0 °C	10,0 °C	10,0 °C	4,0 °C	0,2 °C
Современный период						
t ₂₀₁₅	04.04	29.04	23.05	20.10	19.11	19.12
t ₂₀₁₆	02.04	25.04	10.05	26.10	17.11	04.12
t ₂₀₁₇	02.04	01.05	26.05	25.10	01.12	18.12
t ₂₀₁₈	21.04	07.05	18.05	31.10	22.11	28.11
t ₂₀₁₉	11.04	24.05	14.05	03.11	27.11	14.12
t ₂₀₂₀	19.03	23.04	18.05	29.10	21.11	03.12
t ₂₀₂₁	14.04	03.05	17.05	26.10	21.11	15.12
t _{ср}	06.04	04.05	18.05	27.10	23.11	10.12
t _{ранняя}	19.03.20	23.04.20	10.05.16	25.10.17	17.11.16	28.11.18
t _{позняя}	21.04.18	07.05.18	26.05.17	03.11.19	01.12.17	18.12.17
Исторический период						
t _{ср}	17.04	06.05	23.05	17.10	13.11	04.12
t _{ранняя}	03.04.66	25.04.75	11.05.75	04.10.58	29.10.76	18.11.76
t _{позняя}	12.05.69	17.05.69	05.06.69	06.11.74	29.11.74	16.12.71,74

за вегетационный период происходит их лавинообразное размножение и резко повышается экспорт метаболитов в окружающую среду.

Отдельные представители цианобактерий способны продуцировать токсины, некоторые из цианотоксинов сопоставимы по уровню токсичности с тетродотоксином, ядами кобры и гремучей змеи. Наиболее известный – микроцистин-LR. Всемирная организация здравоохранения установила ориентировочную допустимую концентрацию микроцистина-LR в питьевой воде не более 1 мкг/дм³.

Массовое развитие цианобактерий оказывает негативное влияние на формирование гидрохимического режима и вызывает риски в сфере хозяйственно-питьевого водоснабжения, культурно-бытового водопользования, ведения рыбного хозяйства и рекреации.

Риски хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования. В период массового развития цианобактерий в источнике водоснабжения – Куйбышевском водохранилище – качество воды резко ухудшается. Вода приобретает неприятный запах и специфический вкус, увеличиваются цветность и рН. По интегральным показателям органического загрязнения (ХПК, ПО, БПК) вода не соответствует санитарно-гигиеническим требованиям. В результате возникают серьезные проблемы обеспечения населения качественной питьевой водой. Для решения данной водохозяйственной проблемы потребуется модернизация технологических схем и процессов доочистки воды на городских станциях водоподготовки до нормативного уровня.

Риск рыбохозяйственного водопользования. Важнейшим аспектом негативного воздействия процесса массового развития цианобактерий на газовый режим водохранилища является трансформация сезонного хода содержания растворенного кислорода в водной массе. В летний период наблюдается де-

фицит кислорода, в придонных горизонтах его содержание опускается ниже критического уровня (менее 2 мг/дм³). В глубоководной пойме образуются гипоксидные зоны и ухудшаются условия обитания гидробионтов. В результате наносится ущерб водным биологическим ресурсам, снижается вылов промысловых видов рыб (лещ, судак, берш, окунь, чехонь, сом).

Для прогноза экологического состояния Куйбышевского водохранилища необходимо исследовать механизмы формирования кислородного режима в условиях массового развития цианобактерий. Выдвигается рабочая гипотеза, согласно которой на поверхности водоема во время «цветения» воды образуется очень тонкий слой (1–3 см) воды, в котором насыщение кислородом достигает 150–200 %. Перенасыщение образуется из-за фотосинтезирующей аэрации цианобактериями. При отсутствии перемешивания водных масс этот слой частично или полностью препятствует поступлению кислорода из атмосферы в водоем. Дефициту кислорода способствует и биохимическое потребление кислорода на окисление органических веществ, о чем свидетельствуют высокие значения БПК, превышающие допустимые нормативы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнительный анализ данных многолетних наблюдений показал, что глобальное потепление климата трансформирует термический режим Куйбышевского водохранилища. В современный период средняя температура воздуха за теплый период (апрель–ноябрь) по данным метеостанции Тольятти увеличилась на 2,1 °С по сравнению с историческим периодом. Повышение температуры воздуха обусловило рост поверхностной температуры воды Куйбышевского водохранилища в теплый период на 1,6 °С, с 12,1 до 13,7 °С. Наиболее значительно температура воды повысилась в 2021 г., когда в июле она достигла 24,3 °С и превысила подобное значение исторического периода на 3,8 °С.

Продолжительность теплого периода увеличилась по сравнению с историческим периодом. Количество дней между весенними и осенними переходами температуры воды через контрольные значения (0,2; 4,0; 10,0 °С) возросло на 17 дней для значения 0,2 °С, на 12 – для значения 4 °С, на 15 дней для значения 10 °С. Водохранилище быстрее нагревается и медленнее охлаждается. Весенний переход температуры воды через значения 0,2; 4,0; 10,0 °С наступает раньше на 11, 2 и 5 дней соответственно, а обратный осенний переход осуществляется позднее на 10, 10 и 6 дней.

Наблюдаемые в 2015–2021 гг. повышение поверхностной температуры воды и увеличение продолжительности теплого периода активизируют процессы массового развития цианобактерий в воде Куйбышевского водохранилища. Увеличение интенсивности и продолжительности этого процесса оказывает негативное влияние на трансформацию гидрохимического режима и вызывает дополнительные риски в сфере хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования, ведения рыбного хозяйства и обеспечения рекреации.

Для снижения рисков водопользования в условиях глобального потепления климата потребуется:

– организация научных исследований, направленных на регулирование процессов массового развития цианобактерий для минимизации негативных последствий на качество воды в водохранилищах Волги;

– разработка научно обоснованных превентивных мероприятий по снижению биогенной нагрузки на водные объекты Волжского бассейна от точечных и диффузных источников загрязнения, а также методов прямого воздействия на цианобактерии для снижения их численности и биомассы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Даденко Ю.С., Эдельштейн К.К., 2021. Влияние температуры воды на развитие фитопланктона в водохранилищах // Сборник тезисов докладов Всероссийской конференции, посвященной 65-летию ИБВВ имени И. Д. Папанина РАН. Биология водных экосистем в XXI веке: факты, гипотезы, тенденции. Ярославль: Филигрань, 2021. С. 57.
2. Калинин Н.М., Филатов Н.Н., Теканова Е.В., Балаганский А.Ф. Многолетняя динамика стока железа и фосфора в Онежское озеро с водами р. Шуя в условиях климатических изменений // Региональная экология. 2018. № 2. С. 65–73.
3. Копылов А.И., Масленникова Т.С., Косолапов Д. Б. Сезонные и межгодовые колебания первичной продукции фитопланктона в Рыбинском водохранилище: влияние погодных и климатических изменений // Водные ресурсы. 2019. № 46(3). С. 270–277.
4. Корнева Л. Г., Соловьева В. В., Митропольская И. В. и др. Многолетняя динамика и распределение фитопланктона крупных равнинных водохранилищ Европейской части РФ // Сборник тезисов докладов Всероссийской конференции, посвященной 65-летию ИБВВ имени И. Д. Папанина РАН. Биология водных экосистем в XXI веке: факты, гипотезы, тенденции. Ярославль: Филигрань, 2021. С. 102.
5. Селезнев В. А., Селезнева А. В., Беспалова К. В. Антропогенное эвтрофирование крупных водохранилищ Нижней и Средней Волги в условиях глобального потепления климата (проблема и пути решения) // Мат-лы междунар. научно-практ. конф. «Глобальное распространение процессов антропогенного эвтрофирования водных объектов: проблемы и пути решения», 2017. С. 151–156.
6. Селезнева К.В., Селезнева А.В., Селезнев В.А. Содержание растворенного кислорода в воде Куйбышевского водохранилища в условиях массового развития водорослей // Вестник ВГУ. Сер. География. Геоэкология. 2022. № 3. С. 97–108. DOI: 10.17308/geo/1609-0683/2022/3/97-108.
7. Слынько Ю.В., Терещенко В.Г. Рыбы пресных вод Понто-Каспийского бассейна (Разнообразие, фауногенез, динамика популяций, механизмы адаптаций). М.: Полиграф-плюс, 2014. 328 с.
8. Бутько М. И., Ефимова Н. А., Лугина К. М. Современное потепление // Метеорология и гидрология. 1993. № 7. С. 29–34.
9. IPCC: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y.Xia, V.Bex and P.M. Midgley (eds)]. 2013. Cambridge University Press. Cambridge. United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 p.
10. Дмитриева В.А., Нефедова Е. Г. Гидрологическая реакция на меняющиеся климатические условия и антропогенную деятельность в бассейне Верхнего Дона // Вопросы географии. 2018. № 145. С. 285–297.
11. Селезнева А.В. Оценка диффузного загрязнения Саратовского водохранилища // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2018. Т. 20. № 5-2 (85). С. 196–203.
12. Антропогенные воздействия на водные ресурсы России и сопредельных государствах в конце XX столетия / отв. ред. Н. И. Коронкевич, И. С. Зайцева. Москва: Наука. 2003. 367 с.
13. Бэйтс Б.К., Кундцевич З.В., С. У, Ж. П. Палютикоф (ред.). Изменение климата и водные ресурсы. Технический документ Межправительственной группы экспертов по изменению климата, Секретариат МГЭИК. 2008. Женева. 228 с.
14. Селезнева А.В., Беспалова К.В., Селезнев В.А. Изменение водности реки Волги в районе заповедного острова // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2020. № 1. С. 31–49. DOI: 10.35567/19994508_2022_4_3.
15. Селезнева А.В., Селезнев В.А., Беспалова К.В. Массовое развитие водорослей на водохранилищах р. Волги в условиях маловодья // Поволжский экологический журнал. 2014. № 1. С. 88–96.
16. Водные ресурсы России и их использование / под ред. И. А. Шикломанова. СПб.: Государственный гидрологический институт. 2008. 600 с.

17. Литвинов А.С., Законнова А.В. Термический режим Рыбинского водохранилища при глобальном потеплении // Метеорология и гидрология. 2012. № 9. С. 91–96.
18. Вуглинский В. С. Водные ресурсы и водный баланс крупных водохранилищ СССР. Ленинград: Гидрометеоиздат. 1991. 223 с.
19. Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР: Куйбышевское и Саратовское водохранилища / под ред. В. А. Знаменского, В. М. Гейтенко. Ленинград: Гидрометеоиздат. 1978. 269 с.

REFERENCES

1. Datsenko Y.S., Eidelstein K.K., 2021. Water temperature impact upon phytoplankton development in reservoirs. *Sbornik tezisov dokladov Vserossiyskoy konferentsiyi, posvyashchenoy 65-letiyu IBVV imeni I.D. Papanina RAN. Biologiya vodnykh ekosistem v XXI veke: fakty, gipotezy, tendentsiyi* [Collection of the report abstracts of the All-Russian Conference on the occasion of the 65th anniversary of I.D. Papanin IBVV of the RAS. The aquatic ecosystems biology in XXI century: facts, hypothesis, trends]. Yaroslavl: Filigran, 2021. P. 57 (In Russ.).
2. Kalinkina N.M., Filatov N.N., Tekanova E.V., Balaganskiy A.F. Many-year dynamics of the iron and phosphorous discharge into the Lake Onega with the Shuya River waters in the conditions of the climate change. *Regionalnaya ekologiya* [Regional ecology]. 2018. No. 2. P. 65–73 (In Russ.).
3. Kopylov A.I., Maslennikova T.S., Kosolapov D.B. Seasonal and inter-year fluctuations of the phytoplankton primary production in the Rybinsk Reservoir: weather and climate changes' impact. *Vodniye resursy* [Water resources]. 2019. No. 46(3). P. 270–277 (In Russ.).
4. Korneva L.G., Solovyeva V.V., Mitropolskaya I.V., et al. Many-year dynamics and distribution of phytoplankton of the European part of the Russian Federation major plain reservoirs. *Sbornik tezisov dokladov Vserossiyskoy konferentsiyi, posvyashchenoy 65-letiyu IBVV imeni I.D. Papanina RAN. Biologiya vodnykh ekosistem v XXI veke: fakty, gipotezy, tendentsiyi* [Collection of the report abstracts of the All-Russian Conference on the occasion of the 65th anniversary of I.D. Papanin IBVV of the RAS. The aquatic ecosystems biology in XXI century: facts, hypothesis, trends]. Yaroslavl: Filigran, 2021. P. 102 (In Russ.).
5. Seleznev V.A., Selezneva A.V., Bepalova K.V. Anthropogenic eutrophication in the Lower and Middle Volga River major reservoirs in the situation of the global climate warming (the problem and the ways of its solution). *Materialy mezhdunar. nauchno-prakt. konf. "Globalnoye rasprostraneniye protsessov antropogennogo evtrofirovaniya vodnykh obyektov: problemy i puti resheniya"* [Proceedings of International scientific/practical conference "Global spreading of the water bodies' anthropogenic eutrophication processes: problems and ways of their solution"]. 2017. P. 151–156 (In Russ.).
6. Selezneva K.V., Selezneva A.V., Seleznev V.A. The dissolve oxygen content in the Kuibyshev Reservoir water in the situation of the algae mass development. *Vestnik VGU. Ser. Geografiya. Geokologiya* [VGY newsletter. Series: Geography. Geo/ecology]. 2022. No. 3. P. 97–108. DOI: 10.17308/geo/1609-0683/2022/3/97-108 (In Russ.).
7. Slinko Y.V., Tereshchenko V.G. Fishes of the Ponto-Caspian basin fresh waters (Diversity, fauna-genesis, population dynamics, and mechanisms of adaptation). M.: Poligraf-plyus, 2014. 328 p. (In Russ.).
8. Budyko M.I., Yefimova N.A., Lugina K.M. Current worming. *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and hydrology]. 1993. No. 7. P. 29–34 (In Russ.).
9. IPCC: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y.Xia, V.Bex and P.M. Midgley (eds.)]. 2013. Cambridge University Press. Cambridge. United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 p.
10. Dmitriyeva V.A., Nefedova E.G. Hydrological response to the changing climatic conditions and anthropogenic activities in the Upper Don River basin. *Voprosy geografii* [Issues of geography]. 2018. No. 145. P. 285–297 (In Russ.).
11. Selezneva A.V. Assessment of the Saratov Reservoir diffuse pollution. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences Samara Scientific Center]. 2018. V. 20. No. 5-2 (85). P. 196–203 (In Russ.).
12. Anthropogenic impacts upon the water resources of Russia and neighboring states in the late XX century. Responsible Editors: N.I. Koronkevich, I.S. Zaytseva. Moscow: Nauka [Science]. 2003. 367 p. (In Russ.).

13. Baits B.K., Kundtsevich Z.V., S. U, Z. P. Palyutikoff (editor). Climate change and water resources. Technical document of the Intergovernmental Expert group on Climate change. MGEIC Secretariat. 2008. Geneva. 228 p. (In Russ.).
14. Selezneva A.V., Bepalova K.V., Seleznev V.A. The Volga River water content change in the area of the nature reserve island. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2020. No. 1. P. 31–49. DOI: 10.35567/19994508_2022_4_3 (In Russ.).
15. Selezneva A.V., Seleznev V.A., Bepalova K.V. Mass development of algae in the Volga River reservoirs under the low-water conditions. *Povolzhskiy ekologicheskiy zhurnal [Volga ecological journal]*. 2014. No. 1. P. 88–96 (In Russ.).
16. Water resources of Russia and their use. Edited by I.A. Shiklomanov. SPb.: *Gosudarstvenniy gidrologicheskiy institut [State Hydrological Institute]*. 2008. 600 p. (In Russ.).
17. Litvinov A.S., Zakonnova A.V. Thermal regime of the Rybinsk Reservoir during the global warming. *Meteorologiya i gidrologiya [Meteorology and hydrology]*. 2012. No. 9. P. 91–96 (In Russ.).
18. Vuglinskiy V.S. Water resources and water balance of the major reservoirs of the USSR. Leningrad: Gidrometeoizdat. 1991. 223 p. (In Russ.).
19. Hydro/meteorological regime of the lakes and the reservoirs of the USSR: Kuibyshev and Saratov reservoirs/ edited by V.A. Znamenskiy, V.M. Geytenko. Leningrad: Gidrometeoizdat. 1978. 269 p.

Сведения об авторах:

Селезнева Ксения Владимировна, канд. хим. наук, научный сотрудник, лаборатория мониторинга водных объектов, Институт экологии Волжского бассейна Российской академии наук – филиал Самарского федерального исследовательского центра РАН, заместитель директора по научной и методической работе, Институт химии и энергетики Тольяттинского государственного университета, Россия, 445003, Самарская обл., г. Тольятти, Российская Федерация, ORCID: 0000-0002-9212-7708, e-mail: kvbepalova@yandex.ru

Селезнева Александра Васильевна, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, лаборатория мониторинга водных объектов, Институт экологии Волжского бассейна Российской академии наук – филиал Самарского федерального исследовательского центра РАН, Россия, 445003, Самарская обл., г. Тольятти, ORCID: 0000-0002-9386-999X, e-mail: alek.selezneva@mail.ru

Селезнев Владимир Анатольевич, профессор, д-р техн. наук, канд. геогр. наук, заместитель директора по науке, Институт экологии Волжского бассейна Российской академии наук – филиала Самарского федерального исследовательского центра РАН, Россия, 445003, Самарская обл., г. Тольятти, ORCID: 0000-0002-0321-7614, e-mail: seleznev53@mail.ru

About the authors:

Ksenia V. Selezneva, Candidate of Chemical Sciences, Researcher at the Laboratory for Monitoring Water Bodies of the Institute of Ecology of the Volga Basin of the Russian Academy of Sciences – a branch of the Samara Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Deputy Director for Scientific and Methodological Work of the Institute of Chemistry and Energy, Togliatti State University, Togliatti, Samara Oblast, 445003, Russia; ORCID: 0000-0002-9212-7708, e-mail: kvbepalova@yandex.ru

Aleksandra V. Selezneva, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher of the Laboratory for Monitoring Water Bodies of the Institute of Ecology of the Volga Basin of the Russian Academy of Sciences – a branch of the Samara Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Togliatti, Samara Oblast, 445003, Russia; ORCID: 0000-0002-9386-999X, e-mail: alek.selezneva@mail.ru

Vladimir A. Seleznev, Professor, Doctor of Technical Sciences, Candidate of Geographical Sciences, Deputy Director for Science of the Institute of Ecology of the Volga Basin of the Russian Academy of Sciences – a branch of the Samara Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Togliatti, Samara Oblast, 445003, Russia; ORCID: 0000-0002-0321-7614, e-mail: seleznev53@mail.ru

Влияние метеофакторов, свойств снега и климатических изменений на испарение с поверхности снежного покрова

С.А. Лавров  

 sergey_lavrov_50@mail.ru

ФГБУ «Государственный гидрологический институт», Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Вклад испарения с поверхности снежного покрова в водный баланс поверхности суши является малоизученной областью гидрологии. Актуальность данных исследований возрастает в условиях потепления климата и более интенсивного вовлечения территорий, покрытых снегом и ледниками, в глобальные водные процессы. **Методы.** Для раскрытия закономерностей формирования процесса испарения использована физически обоснованная математическая модель вертикального тепло-влажнопереноса в снежном покрове и турбулентного теплообмена в атмосфере. Проведены численные эксперименты по оценке влияния основных метеофакторов и физических свойств снега на испарение. **Результаты.** Получены сопоставления измеренных и рассчитанных по модели величин испарения со снега. На основе результатов математического моделирования проведены численные оценки влияния метеофакторов и свойств снега на испарение. Расчеты показали, что в результате климатических изменений в период 1979–2020 гг., по сравнению с периодом 1952–1978 гг., испарение со снежного покрова за зимний период уменьшилось.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: снежный покров, испарение, математическое моделирование, метеофакторы, физические свойства, климатические изменения.

Для цитирования: Лавров С.А. Влияние метеофакторов, свойств снега и климатических изменений на испарение с поверхности снежного покрова // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2023. № 3. С. 63-88. DOI: 10.35567/19994508_2023_3_5.

Дата поступления 26.01.2023.

INFLUENCE OF METEOROLOGICAL FACTORS, SNOW PROPERTIES AND CLIMATIC CHANGES ON EVAPORATION FROM THE SNOW COVER SURFACE

Sergey A. Lavrov  

 sergey_lavrov_50@mail.ru

State Hydrological Institute, St.-Petersburg, Russia

ABSTRACT

Relevance. The contribution of evaporation from the surface of the snow cover to the water balance of the land surface is a little-studied area of hydrology. The growing relevance of these studies increases with climate warming and more active involvement of the snow-covered territories and glaciers in global water processes. **Methods.** To reveal the regularities of the formation of the evaporation process, we used a physically based mathematical model of vertical heat and moisture transfer in the snow cover and turbulent heat exchange in the atmosphere.

© Лавров С.А., 2023

We have carried out numerical experiments to assess the influence of the main meteorological factors and physical properties of snow on evaporation from snow. **Results.** The paper presents the results of comparing the values of evaporation from snow measured and calculated by the model. Based on the results of mathematical modeling, numerical estimates of the influence of meteorological factors and snow properties on evaporation are made. Calculations have shown that as a result of climate changes, evaporation from the snow cover has decreased over the winter period since the early 1980s.

Keywords: snow cover, evaporation, mathematical modeling, meteorological factors, physical properties, climatic changes.

For citation: Lavrov S.A. Influence of meteorological factors, snow properties and climatic changes on evaporation from the snow cover surface. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2023. No. 3. P. 63-88. DOI: 10.35567/19994508_2023_3_5.

Received 26.01.2023.

ВВЕДЕНИЕ

Информация о роли испарения (сублимации) снежного покрова в формировании водного баланса поверхности суши весьма противоречива. Еще в 1950–1960-е годы в отдельных отечественных работах указывалось на заметный вклад этой составляющей в формирование снегозапасов [1, 2]. Так, П.П. Кузьмин [2] отмечает, что в горах штата Юта (США) испарение за зимний сезон составило 76 мм или 14 % от запасов воды в снежном покрове. В других работах, ссылаясь на опытные данные, доказывалось, что абсолютные величины испарения невелики [3, 4]. Довольно подробный обзор мнений на данную тему дан в работе В.И. Кузнецова, выполненной в 1964 г. [5]. На основе обобщения результатов наблюдений и расчетного метода А.Р. Константинова [6] автором была составлена карта испарения со снежного покрова для территории СССР. Подобная карта годом ранее была составлена и А.М. Алпатъевым также по методике Константинова. Однако величины испарения для одних и тех же регионов отличаются на этих картах более, чем в два раза: на карте Кузнецова испарение со снега в центральных районах Европейской территории России составляет 5–15 мм, а на карте Алпатъева 30–50 мм.

С точки зрения гидрологов-практиков, величины испарения со снега, как элемента водного баланса, считаются относительно малыми. В связи с этим научная составляющая изучения процесса испарения со снежного покрова в последние годы в России относительно невелика.

Однако в мировой гидрологической практике в последние десятилетия стали более детально относиться к изучению составляющей водного баланса, связанной с сублимацией снежного покрова. Это, прежде всего, связано с потеплением климата и более интенсивным вовлечением покрытых снегом и ледниками территорий в глобальные водные процессы. Довольно широка география исследований, которые проводятся во многих странах и регионах в последние десятилетия: США [7], Канада [8], Китай [9], Индия [10], Монголия [11], Испания [12], Германия [13], Марокко [14], Антарктика [15], Сибирь [16] и др. Исследования показали важность сублимации для водного баланса в Арктике, Антарктике, на Гималайских ледниках, в альпийских районах и других территориях нашей планеты. Потери массы снега из-за испарения по оценкам варьируют от 1 до 90 %

от общего количества выпавшего снега [8, 13, 17, 18] в зависимости от методов измерения или расчета, а также от местоположения и периода наблюдения.

Остается неопределенным вклад в сублимацию снега, переносимого метелями и задержанного растительностью. Исследования показали, что поверхностная сублимация в горных районах эквивалентна 10–20 % зимних осадков на открытых территориях и менее 10 % зимних осадков в защищенных областях [7, 19, 20]. Сообщалось, что сублимация полого в различных типах хвойных лесов составляет порядка 30–40 % ежегодных снегопадов [21]. Оценки сублимации снега при метелевом переносе, составляющие от 10 до 50 % от сезонных снегопадов, сильно различаются, но могут представлять значительные потери в балансе снежной массы [22]. Трудности, связанные с изучением сублимации метелевого снега и снега, задержанного растительностью, стимулируют разработку математических моделей данных процессов [23, 24, 25, 26], которые становятся современными инструментами исследований и научных обобщений.

Методы математического моделирования в настоящее время являются ведущими для количественной оценки сублимации, иллюстрируя ее высокую пространственную и временную изменчивость. Основной экспериментальной составляющей данных исследований являются наблюдения за метеорологическими переменными с помощью метеостанций различных модификаций, которые регистрируют наблюдения с разной временной дискретностью.

Усиление теоретической составляющей обусловлено тем, что проведение прямых детальных экспериментальных исследований с помощью испарителей является довольно трудоемким и длительным процессом. В России (СССР) такой подход широко применялся специалистами Валдайской научно-исследовательской лаборатории (ВНИГЛ), где в определенное время имелись все ресурсы для проведения экспериментов. К сожалению, сейчас их нет.

Что касается теоретических исследований, известно, что испарение со снежного покрова носит сложный комплексный характер. В него вовлечены процессы турбулентного переноса тепла и влаги в приземном слое атмосферы, поглощения и отражения солнечной и тепловой радиации, переноса пара в снежной толще. На испарение заметное влияние оказывают физические свойства снежного покрова и их динамика в процессе его формирования и таяния. Предлагаемые методы расчета испарения учитывают лишь отдельные стороны данного явления, считая другие компоненты несущественными.

На наш взгляд, совершенствование методов расчета испарения со снежного покрова связано с созданием физико-математической модели формирования и таяния снежного покрова, основанной на максимально подробном описании механизмов переноса тепла и влаги в системе снежный покров–атмосфера. Проведение численных экспериментов с помощью подобных моделей поможет понять взаимосвязи и зависимости между метеопараметрами и характеристиками снежного покрова в процессе формирования испарения. К тому же, данная модель позволяет оценить степень климатической обусловленности этого процесса и его тенденции в современных изменчивых климатических условиях. Подобные исследования в настоящее время становятся все более актуальными.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Можно выделить два основных прямых метода наблюдений за сублимацией. Первый – это весовой метод (в зарубежной литературе – gravimetric (Gr)), при котором вес снежного покрова непрерывно контролируется с помощью испарителей (лизиметров) различных модификаций. Для условий без таяния снега уменьшение веса приписывается сублимации. Однако вызванная ветром эрозия снежного покрова приводит к большим неточностям в измерениях. В России наибольший вклад в развитие данного метода внес П.П. Кузьмин. Именно по его инициативе были организованы специальные опыты по оценке влияния конструктивных особенностей различных испарителей на измеряемую величину. В работе [5] приведен анализ этих исследований. Данный метод являлся основным в первой половине XX в., но также широко применяется и сегодня [2, 12].

Второй метод экспериментальных исследований – метод ковариации вихрей (eddy covariance, EC) [7, 27–30]. Считается, что он обеспечивает «прямые» наблюдения турбулентных потоков на основе статистического анализа высокочастотных данных о вертикальной составляющей ветра, температуры воздуха и содержания водяного пара. Метод вихревой ковариации – это проверенная методология количественной оценки сублимации снега. Однако эти данные нуждаются в дополнительной обработке для получения надежных турбулентных потоков [7]. Метод основан на допущении как стационарности, так и однородности потока, которые нарушаются при наличии сложного рельефа и при условиях нейтральной атмосферы, не часто встречающихся на заснеженных территориях. Тем не менее, измерения вихревой ковариации были успешно использованы для количественной оценки сублимации снега над заснеженными поверхностями в сложных условиях [7, 28], благодаря тщательной последующей обработке данных. Измерения сублимации дают оценку в масштабе точки, в то время как было обнаружено, что она значительно варьирует и в пространстве [13]. Однако параметризации для количественной оценки сублимации, разработанные в точечном масштабе, могут быть использованы для моделирования и количественной оценки пространственно-распределенной сублимации в региональном масштабе и масштабе водосбора, когда доступны глобальные метеорологические данные.

В работе [31] представлены результаты сравнения суточных величин сублимации, измеренных представленными выше двумя прямыми методами. Исследования проведены в Скалистых горах Альберты, в Канаде. Коэффициент корреляции между результатами измерений равен $R=0.91$, а средние суточные величины сублимации для весового метода и метода вихревой ковариации составили 0,27 и 0,25 мм/сут соответственно. Различия в показаниях методов находятся в пределах их инструментальных погрешностей.

В 1950-е годы П.П. Кузьмин, опираясь на закон Дальтона и используя теорию турбулентной диффузии, предложил эмпирический метод расчета испарения (E_s , мм/сут) по данным измерения давления водяного пара (e_A , мб) и скорости ветра (u , м/с) на метеостанциях (обычно на высоте 2 м), а также

температуры поверхности снега (T_s , °C), по которой рассчитывается упругость водяного пара e_s (мб) [2].

$$E_s = (0,18 + 0,1u) \cdot (e_A - e_s) \quad (1)$$

Данное уравнение широко используется как в России, так и за рубежом. Однако в последние десятилетия в иностранной литературе отмечается, что этот метод разработан Гельфаном и Кучментом. Путаница возникла из-за того, что формула Кузьмина представлена в работах вышеназванных российских ученых [32, 33], где ссылка дана на оригинальный источник. Но трудности перевода с русского внесли свои коррективы.

Однако эмпирические соотношения часто зависят от района исследований, поэтому при переходе в другой географический регион необходимо корректировать коэффициенты формулы (1). Подобная процедура представлена в работе [34] для территории России. Еще одним существенным недостатком метода Кузьмина и аналогичных эмпирических методов является необходимость задания температуры поверхности снега и неточности, возникающие при измерении данной характеристики,

Уравнение Пенмана–Монтейна обычно используется для расчета испарения с почвы, но в нескольких исследованиях оно также применялось для оценки сублимации [27, 35]. Более сложный подход Пенмана–Монтейна, чем Кузьмина сочетает в себе уравнения теплового баланса и массопереноса.

Другие популярные методы оценки сублимации, основанные на теории турбулентности, включают объемно-аэродинамический метод (bulk aerodynamic, BA) и метод аэродинамического профиля (aerodynamic profile, AP) [17]. Объемно-аэродинамический метод нуждается в информации о метеорологических переменных на одном уровне измерения и параметрах снежной поверхности, тогда как метод аэродинамического профиля требует измерений метеорологических переменных на нескольких уровнях.

Объемно-аэродинамический метод обычно используется в моделях энергетического баланса для расчета турбулентных потоков между поверхностью и атмосферой. Для определения коэффициентов тепло- и массообмена между снежным покровом и атмосферой зачастую используется теория подобия Монина–Обухова. Данный метод включает ряд неопределенностей, связанных с предположением о логарифмическом вертикальном профиле ветра. Это предположение часто нарушается над заснеженной поверхностью, для учета данного обстоятельства применяются поправки на условия стабильности атмосферы [29]. Отметим, что разработка многочисленных поправок затрудняет применение объемно-аэродинамического метода на поверхностях со сложным рельефом.

В 1960-е годы А.Р. Константиновым [6] был также предложен метод расчета испарения со снежного покрова, основанный на данных измерения температуры, влажности воздуха и скорости ветра на метеостанциях (на высоте 2 м). Это своего рода вариант объемно-аэродинамического метода. Проблемы его применения также вызваны отклонением наблюдаемых профилей от логарифмического закона и неопределенностями, связанными с аппроксимацией зависимо-

сти между температурой воздуха на высоте 2 м и на высоте слоя шероховатости. Уточнением метода Константинова еще в 1964 году занимался В.И. Кузнецов [5]. Однако в практике этот метод успешно используется до сих пор.

В исследовании [27] сравнивались измеренные величины сублимации методом вихревой ковариации с расчетными: по формуле Кузьмина, Пенмана–Монтейна и объемно-аэродинамическим методом. Коэффициент корреляции связи измеренных и рассчитанных значений составил 0,89, 0,37 и 0,88 соответственно. Однако, несмотря на высокую корреляционную связь, метод Кузьмина значительно занижал величину испарения. Это связано, прежде всего, с отсутствием региональной коррекции коэффициентов, используемых в формуле (1). В работе [28] также выполнено сравнение различных методов определения сублимации. Были рассчитаны коэффициенты корреляции между часовыми значениями потока пара, измеренного методом ковариации вихря, с расчетными по методике аэродинамического профиля и объемного аэродинамического потока. Значения R составили 0,81 и 0,83 соответственно.

Еще один оригинальный метод, основанный на данных о химическом составе ионов и изотопов воды, может быть использован для количественной оценки сублимации [36]. Измеряя регулярно концентрации растворенных веществ и изотопные соотношения в снегопадах и снежном покрове, можно оценить глубину и величину сублимации при условии отсутствия значительных потерь снега в результате таяния.

В табл. 1 приведены дополненные частичные обобщения исследований о сублимации с заснеженных территорий, представленные в работах [17, 37].

Общим недостатком представленных выше методов расчета испарения со снега является неполнота описания физических явлений, вовлеченных в данный процесс. Для совершенствования существующих методов расчета предлагается использовать физически обоснованную математическую модель формирования и таяния снежного покрова. Данная модель является составной частью общей модели гидрологического цикла в точке водосбора [48, 49].

В представленной работе для описания процессов происходящих в снежном покрове, использована следующая система дифференциальных уравнений [48]:

$$C_s \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_s \frac{\partial T}{\partial z} + R_s \right) - L_w \frac{\partial W_s}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial A_s}{\partial t} = \frac{P_N}{\eta_s} + \frac{\partial W_s}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_s \frac{\partial q_{SN}}{\partial z} \right), \quad (3)$$

$$\frac{\partial W_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_s \frac{\partial \Psi_C}{\partial z} - K_s \right), \quad (4)$$

$$c_s = \rho_L A_s c_L + \rho_W W_s c_W, \quad (5)$$

где ρ_L , ρ_W – соответственно плотности льда и воды;

A_s , W_s – объемное содержание твердой и жидкой фаз воды в снеге;

q_{SN} – концентрация насыщенного пара в снеге;

c_L, c_W – удельные теплоемкости льда и воды;
 L_W – теплота фазового превращения вода–лед;
 P_N – давление вышележащих слоев снега;
 Ψ_S – потенциал талой влаги в снеге;
 K_S – коэффициент влагопроводности снега;
 λ_S – эффективная теплопроводность снега;
 R_S – поглощенная снегом радиация;
 η_S – коэффициент вязкости снега;
 t – время;
 z – глубина снега.

Уравнение (2) является уравнением сохранения энергии в снежной толще, записанным в универсальном виде и пригодным для расчета потоков тепла в сухом, талом и слоистом снеге. Связь между сухим и влажным снегом осуществляется зависимостью содержания незамерзшей влаги в снеге от его температуры [48]. Уравнение (3) описывает изменения плотности твердой фазы воды в снеге в процессе замерзания – таяния, конденсации – испарения и в процессе оседания. Уравнение (4) данной системы служит для описания потока жидкой влаги в талом снеге при снеготаянии. Расчет испарения с поверхности снега осуществляется с помощью уравнения турбулентной диффузии в прилегающем к снегу слое воздуха и теплового баланса его поверхности.

$$E_S = \rho_A \frac{k^2 u (T_S - T_A)}{(\ln(z/z_0))} f(Ri), \quad (6)$$

$$H_S = \rho_A \frac{c_S k^2 u (q_S - q_A)}{(\ln(z/z_0))^2} f(Ri), \quad (7)$$

$$L_S E_S = R_S - H_S - Q_S, \quad (8)$$

$$f(Ri) = (1 - 5Ri)^2 \text{ при } Ri > 0; f(Ri) = (1 - 16Ri)^{0,75} \text{ при } Ri < 0.$$

где E_S, H_S – испарение с поверхности снега и турбулентный поток тепла соответственно;

T_A – температура атмосферы;

q_A – удельная влажность атмосферы;

H_S – удельная влажность насыщенного воздуха при температуре поверхности снега T_S ;

R_S – радиационный баланс поверхности снега;

ρ_A – плотность воздуха;

u – скорость ветра;

c_S – удельная теплоемкость воздуха;

k – постоянная Кармана;

L_S – удельная теплота сублимации пара из снега;

Q_S – поток тепла от поверхности снега вглубь;

z – высота измерения метеопараметров (в нашем случае 2 м);

z_0 – параметр шероховатости;

$f(Ri)$ – функция от числа Ричардсона определена, как в работе [10].

Таблица 1. Сравнение данных выполненной различными методами оценки величины испарения со снежного покрова

Table 1. Comparison of values of the evaporation from the snow cover assessment data obtained with different methods

Исследование	Методы исследований	Тип участка, место исследований	Показатели испарения
Martinelli, 1960 [38]	Gr	Альпы, Италия	0,67 мм /сут
West, 1962 [39]	Gr	Лес, США	50 мм (2,7 % снегопада) в год
Doty and Johnston, 1969 [40]	Gr	Открытый, США	0,15 (январь)– 1,56 (апрель) мм/сут
Kaitera and Terasvirta, 1972 [41]	BA	Бореальный лес, Финляндия	0,35 (под лесом)– 0,45 (открыто) мм /сут
Bernier and Swanson, 1993 [42]	BA, Gr	Лесной и открытый, Канада	0,25–1,07 мм/сут
Golding, 1978 [43]	BA	Субальпийский лес, Канада	1,2 мм/сут (1975), 2,0 мм/сут (1976)
Fassnacht, 2004 [44]	BA	Различные места США	0,23–0,67 мм /сут
Hood et al., 1999 [19]	AP	Альпийский, США	0,9–1,8 мм /сут (годовой максимум 15 % SWE)
Marks and Dozier, 1992 [20]	BA	Альпийский, США	среднее значение 2 мм/сут
Molotch et al., 2007 [30]		Субальпийский лес, США	0,41 (субканопия)– 0,71 (полог) мм/сут
Montesi et al., 2004 [21]	EC	Субальпийский лес	Полог, 20–30 % от зимнего снегопада
Pomeroy et al., 1998 [45]	BA	Бореальный лес, США	0,41–1,88 мм/сут
Померой et al., 1999 [22]	EC	Прерия, США	1,8 мм/сут (метель)
Schmidt et al., 1998 [46]	BA, Gr	Субальпийский лес, Канада	0,61 (на юге), 0,43 (на севере) мм/сут
Zhang et al., 2003 [9]	BA, Gr	Тайга, Сибирь	0,2–1,0 мм/сут
Zhang et al., 2004 [47]	BA, Gr	Тайга, лиственный лес, Восточная Сибирь	0,22–0,32 мм/сут С 13.03.2002 по 22.04.2002 сублимация составила 15,7 и 12,1 мм для открытого поля и лиственного леса
Reba et al., 2012 [7]	EC	Альпийский, США	0,37–0,53 мм/сут и 0,17– 0,28 мм/сут для открытого и защищенного участка
Sexstone et al., 2016, [28]	EC, BA, AP	Скалистые горы, Колорадо, США	0,33–0,36 мм/сут
Stigter et al., 2018 [27]	EC, PM, BA, K	Ледник Яла, Непальские Гималаи	21 % от общего зимнего снегопада
Mandal et al., 2022 [10]	BA	Гималаи, Индия	16–42 % от общего зимнего снегопада

Примечание: Методы исследований: AP – аэродинамический профиль; BA – объемная аэродинамика; EC – вихревая ковариация; Gr – весовой; K – Кузьмина.

Одновременно уравнения (6–8) служат в качестве верхних граничных условий при решении уравнений тепло-влажнопереноса в снежной толще (2–5). По существу, для описания граничных условий использован объемно-аэродинамический метод расчета испарения.

При численной реализации дифференциальных уравнений (2–4) применялся метод конечных разностей. Разностные уравнения решали методом прогонки. Так как в процессах формирования и таяния снежного покрова плотность твердой фазы снега постоянно изменяется, был разработан алгоритм с переменными шагами по координате [48]. В качестве исходной информации для математического моделирования использовались суточные значения метеозаписей (температура, осадки, влажность почвы, скорость ветра, влажность воздуха и облачность). Подробное определение всех параметров и характеристик уравнений (2–8) дано в работе [48].

ТЕСТИРОВАНИЕ МОДЕЛИ

На наш взгляд, тестирование физически обоснованной математической модели, какой является вышеописанная модель формирования снежного покрова, должно быть многоуровневое. Проверке на адекватность описания природных процессов должны подвергаться все ее блоки. При этом сопоставление расчетных и измеренных величин испарения проводится за различные интервалы времени. Известно, что некоторые физические факторы, ярко проявляющиеся и влияющие на величину испарения за короткие интервалы времени, могут нивелироваться при длительных природных процессах и усреднении входных характеристик.

Для испытания работоспособности блока модели, характеризующего формирование и таяние снежного покрова, проведено сопоставление динамики толщины снежного покрова, измеренного на метеостанции в Костроме, с расчетными показателями (рис. 1). Очевидно, что наблюдается хорошее совпадение динамики толщины снежного покрова в зимний и весенний периоды, рассчитанной по модели и измеренной на метеостанции. Некоторая погрешность в расчетах обусловлена процессом метелевого переноса снега, при котором изменение его толщины бывает не связано с выпадающими осадками.

Основой для тестирования модели испарением со снежного покрова стали результаты наблюдений на ВНИГЛ (ныне – Валдайский филиал ГГИ) и на водно-балансовых станциях (ВБС) Подмосковная и Нижнедевицкая. Исследования ВНИГЛ в 1950–1960-е годы, по сути, стали основой для совершенствования методов инструментального измерения испарения со снежного покрова [2, 5]. В результате критического анализа полученной экспериментальной информации могут быть сформированы ряды наблюдений, которые достоверно отражают количественные характеристики величины испарения со снега. Так, данные наблюдений на Валдае в 1950–1960-е годы [5] указывают на то, что в среднем за зиму только треть суточных измерений (около 30 сут) испарения могут быть использованы для дальнейших научных обобщений. Аналогичный результат получен и при анализе результатов наблюдений на Нижнедевицкой ВБС с 1995 по 2019 гг. Такая ситуация с измерением испарения означает, что

экспериментальные оценки этой характеристики за полный зимний период отсутствуют. Все оценки базируются на расчетах с использованием данных о среднесуточных величинах испарения за отдельные периоды. А зачастую и на среднечасовых значениях, т. к. период наблюдения иногда составляет менее суток. В связи с этим, объективное тестирование математической модели может проводиться только по данным о среднесуточных величинах испарения со снежного покрова. Отметим при этом, что длительность непрерывных наблюдений за испарением может составлять лишь несколько суток.

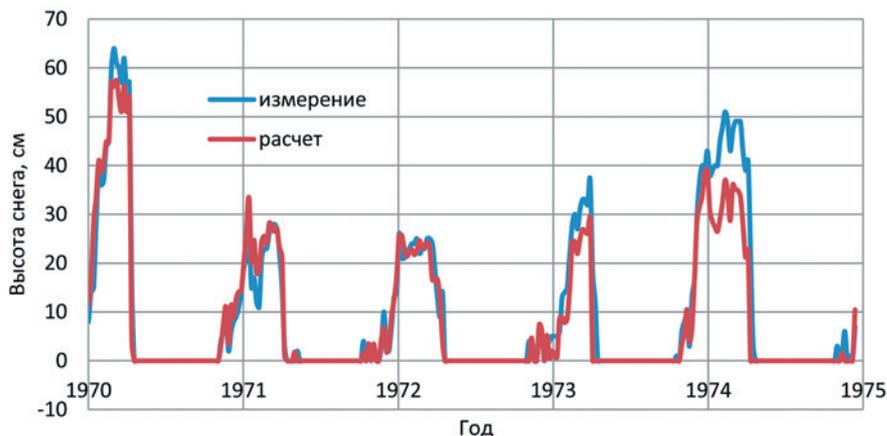


Рис. 1. Сопоставление расчетных и измеренных толщин снежного покрова по данным наблюдений на метеостанции Кострома.

Fig. 1. Comparison of the calculated and the measured values of the snow cover thickness according the observations at the Kostroma meteorological station.

Результаты обобщения экспериментальных данных о среднечасовых величинах испарении со снега на Новодевицкой ВБС за период с 1995 по 2019 гг. показали, что в соответствии с выводами [5], основной вклад в суточное испарение вносит дневная составляющая, а в годовом балансе решающую роль играет испарение в предвесенний и весенний периоды. Так, среднемноголетние часовые значения испарения за январь-февраль в ночное и дневное время составили 0,0003 и 0,007, а за март-апрель – 0,002 и 0,017 соответственно. Разница – существенная.

На рис. 2 представлены результаты сопоставления данных измерения и расчета по математической модели среднесуточных значений испарения, усредненные за многолетний период по месяцам зимне-весеннего сезона для наблюдений на Новодевицкой ВБС с 1995 по 2019 гг. Результаты сопоставления демонстрируют, что математическая модель достаточно точно воспроизводит численные величины и закономерности изменения среднемноголетнего испарения в течение зимне-весеннего периода. Однако для оценки работоспособности модели необходимо ее протестировать за короткие интервалы времени, на суточном и внутрисуточном уровне. Именно на этом временном отрезке происходят основные физические процессы формирования испарения со снега, которые могут нивелироваться в длительной перспективе.

Для оценки точности воспроизведения динамики суточных величин испарения использована экспериментальная информация о данной характеристике и метеоэлементах для условий Подмосковной ВБС в зимне-весенний период 1979–1980 гг. Следует также отметить, что из продолжительных наблюдений в течение 120 сут, только для 30 сут была получена полноценная экспериментальная информация об испарении со снега. Пропуски заполнены расчетными значениями по формуле Кузьмина (1). Для тестирования выбран период с 7 марта по 11 апреля, в котором было минимальное количество пропусков.

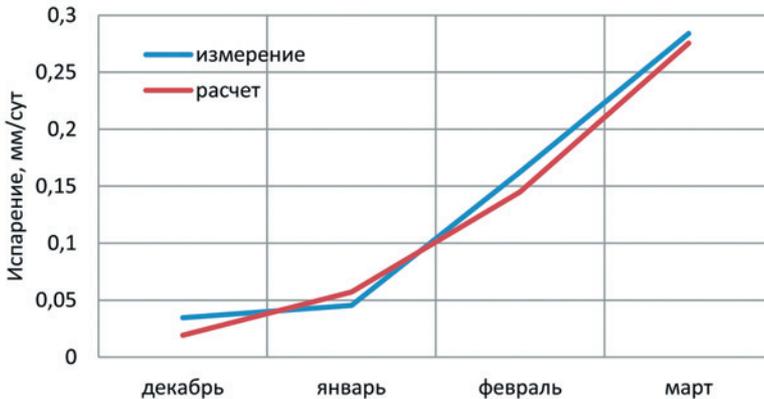


Рис. 2. Динамика среднесуточных многолетних значений испарения со снега в течение зимнего периода.

Fig. 2. Dynamics of the average daily many-year values of evaporation from snow cover during the winter period.

На рис. 3 приведены результаты тестирования. Коэффициент корреляции связи измеренных и расчетных величин равен 0,93, т. е. довольно высокий. Пиковые значения величин испарения, собственно определяющие его суммарную величину, воспроизводятся довольно точно.

Другой важнейшей характеристикой, определяющей величину испарения и используемой в традиционных методах расчета (1), является температура поверхности снега (T_s). Даже автор формулы [2] Кузьмин отмечал, что основным источником погрешностей расчета является неточность определения T_s . Кузьмин указывает [2], что для вычисления испарения с точностью $\pm 0,1$ мм/сут необходимо определять температуру в области нулевых температур с точностью $\pm 0,2$ °C, а в области температур ниже -15 °C с точностью ± 1 °C. Но из материалов наблюдений следует, что зачастую, особенно в весенний период, погрешности измерений температуры значительно превышают допустимую величину.

На рис. 3 приведены сопоставления результатов измерения и расчета температуры поверхности снега для условий Подмосковной ВБС. На первый взгляд, модель довольно точно воспроизводит данную характеристику ($R=0,99$) и может быть рекомендована для использования в расчетах в качестве альтернативы при отсутствии экспериментальной информации.

Для проверки работоспособности модели на внутрисуточном уровне были сопоставлены результаты расчета и данные экспериментов на большом гидравлическом испарителе (БГИ) [5]. Выбран период наблюдения с 26 февраля по

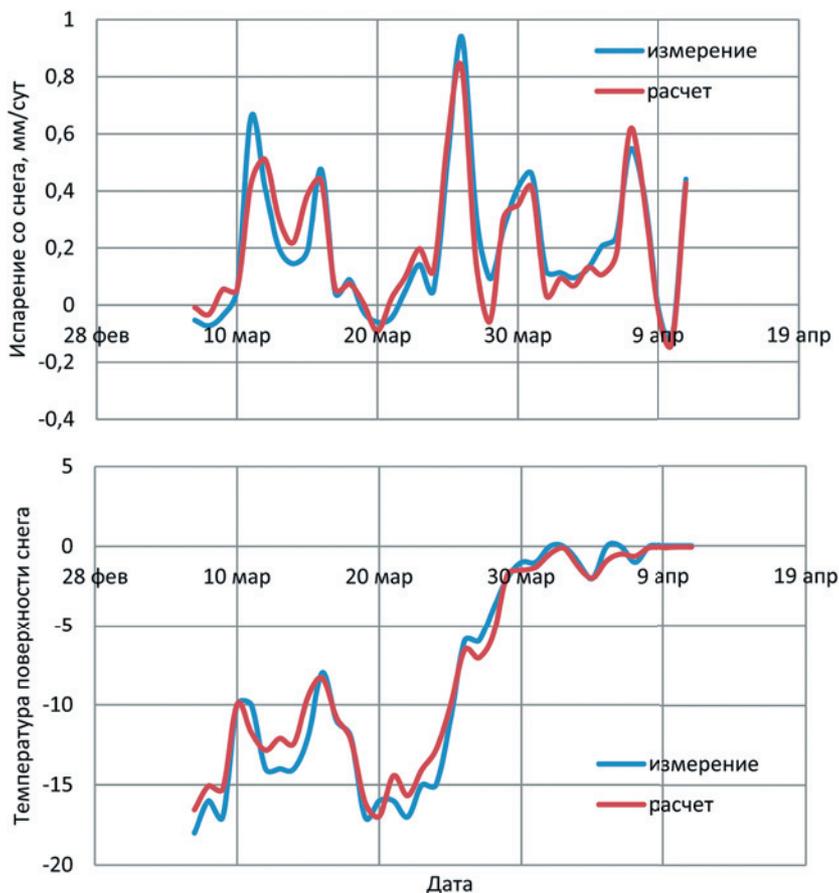


Рис. 3. Сопоставление расчетных и измеренных величин испарения со снега и температуры поверхности снега.

Fig. 3. Comparison of the calculated and measured values of the evaporation from snow and the snow surface temperature.

3 марта 1958 г. При моделировании использована сопутствующая среднесуточная метеоинформация. Потоки коротковолновой и длинноволновой радиации определяли расчетным путем [48]. На рис. 4 приведены результаты сопоставлений. Модель, в принципе, правильно описывает внутрисуточный ход испарения со снега. Кроме ошибок в расчетах, связанных с заданием численных значений метеорологических характеристик, могут возникнуть ошибки расчета испарения из-за осреднения данных за некоторый интервал времени. Для исследования этого вопроса при тестировании модели были проведены численные расчеты испарения без учета суточного хода и с учетом такового [5].

Результаты расчетов динамики испарения показывают, что неучет суточного хода температуры значительно изменяет внутрисуточную динамику испарения. Во всех случаях отсутствие данных суточного хода температуры воздуха приводит к занижению величины испарения до 20 %. Следовательно, использование при расчетах испарения гидрометеорологических характеристик, осредненных за большие интервалы времени, приводит к занижению величины ES.

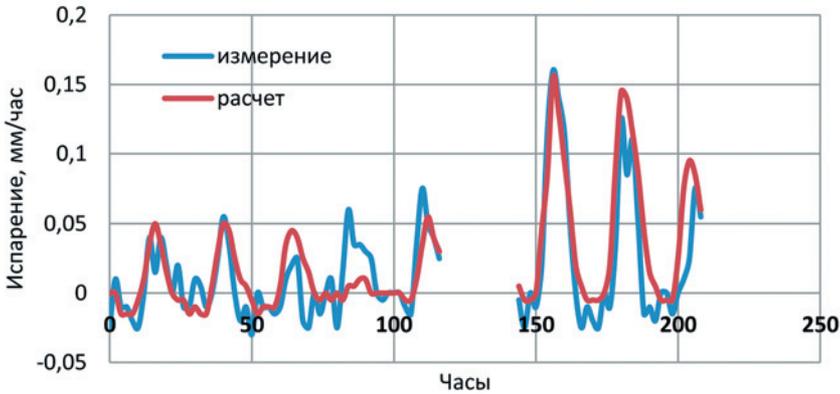


Рис. 4. Сопоставление расчетных и измеренных на БГИ величин испарения со снега с 26 февраля по 3 марта 1958 г.

Fig. 4. Comparison of calculated and measured at big hydraulic evaporator (BHE) values of evaporation from snow surface from February 26 to march 3, 1958.

Еще одной составляющей потерь водного эквивалента снега в зимний период является испарение из толщи снежного покрова под действием градиента концентрации пара в снегу, т. е. температуры (формула 3). В рамках данного исследования выполнены численные оценки диффузионной составляющей (E_{SN}) по сравнению с испарением с поверхности снега (E_S). Расчеты проведены для метеусловий Валдая (февраль, 1968 г.) (рис. 5). В количественном отношении величина E_{SN} составляет не более 10 % от испарения с поверхности снега. Интересна внутрисуточная динамика данной характеристики.

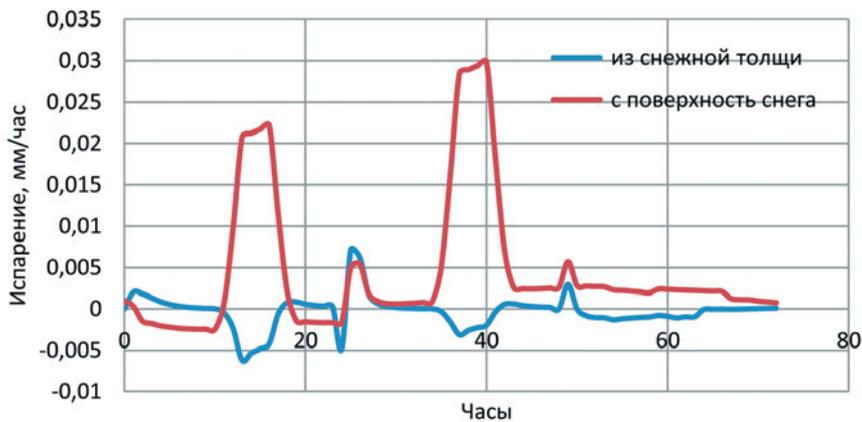


Рис. 5. Сопоставление расчетных значений потоков с поверхности снега и из снежной толщи.

Fig. 5. Comparison of the calculated values of flows from the snow cover and snow depth.

Как следует из рис. 5, зачастую изменения E_{SN} находятся в противофазе с динамикой E_S , т. е. когда идет процесс испарения с поверхности снега одновременно наблюдается противоток пара от поверхности в глубину снежной толщи. В дневное время температурный градиент иногда направлен в глубину снега, а ночью – наоборот.

Влияние метеофакторов и свойств снежного покрова

Временную и пространственную изменчивость испарения со снежно-го покрова (E_s) в основном определяют вариации таких метеорологических переменных, как влажность и температура воздуха, скорость ветра, потоки длинноволновой и коротковолновой радиации. В конечном итоге, именно их изменчивость и приводит к климатическим изменениям многих гидрологических характеристик, в т. ч. испарения со снега. Ввиду этого во многих исследованиях для лучшего понимания взаимосвязи между E_s и метеорологическими переменными были проведены масштабные корреляции между этими характеристиками. В табл. 2 обобщены результаты некоторых исследований на эту тему.

В исследовании [27], проведенном на леднике Яла в Непальских Гималаях, сублимация определялась методом вихревой ковариации с 2016 по 2017 гг. Тем же методом с 2004 по 2006 гг. проводились измерения в горном районе западной части США [7], а в 2014–2016 гг. – на двух лесных участках в Скалистых горах, штат Колорадо [28]. В работе [10] на территории Монголии в 2006–2007 гг. сублимация из тонкого снежного покрова была рассчитана с использованием метода аэродинамического профиля и проверена с помощью вихревых ковариационных наблюдений с использованием многоуровневых метеорологических данных с трех участков, представляющих различные географические и растительные условия.

Таблица 2. Результаты линейного регрессионного анализа (коэффициент корреляции R) связи сублимации снежного покрова с влажностью (q_A) и температурой воздуха (T_A), температурой поверхности снега (T_S), скоростью ветра (u), влажностью атмосферного воздуха у поверхности снега (q_S), дефицита влажности воздуха ($q_A - q_S$) и поглощенной радиации (R_S)

Table 2. Results of the linear regressive analysis (R is correlation index) of the snow cover connection with air humidity (q_A) and temperature (T_A), snow surface temperature (T_S), wind velocity (u), atmospheric air humidity near the snow surface (q_S), air humidity deficit ($q_A - q_S$), and absorbed radiation (R_S)

Переменная	Исследование, литературный источник					Наблюдения – ВБС Подмосковная
	Mandal et al., [10]	Stigter et al., [27]	Reba et al., [7]	Zhang et al., [9]	Sexstone et al., [28]	
T_A	0,06/0,44	0,14	0,42	0,36	0,50	0,46
T_S	0,69/0,62	0,39	–	–	–	0,45
u	0,37/0,32	0,74	0,40	0,39	0,45	0,37
q_A	-0,14/0,30	-0,28	–	–	-0,09	0,26
q_S	0,70/0,65	0,32	–	–	–	0,43
$q_S - q_A$	0,82/0,70	0,71	0,73	0,60	–	0,59
R_S	0,20/0,44	0,14	0,42	–	0,51	–

Примечание: в работе [10] в числителе – значения R при ясном небе, а в знаменателе – в условиях облачности.

Таким образом, влияние отдельных метеорологических переменных на величину испарения невелико (табл. 2). Коэффициенты корреляции не превышают 0,5. Исключение составляет связь испарения с разницей влажностей воздуха ($q_A - q_S$), для которой коэффициент корреляции лежит в пределах 0,59 – 0,82. Практически отсутствует связь между испарением и влажностью атмосферы. Коэффициент корреляции принимает как положительные, так и отрицательные значения. Это связано, прежде всего, с взаимной корреляцией влажности и температуры воздуха. При отсутствии этой связи коэффициент R – отрицательный, а при усилении становится положительным.

Анализ экспериментальных данных об испарении снега на Подмосковной ВБС (1979–1980 гг.), полученных с помощью стандартных испарителей весовым методом, показал, что коэффициенты корреляции с метеоданными и в этом случае незначительно отличаются от полученных в различных регионах мира.

В работе [10] проанализированы метеорологические данные с автоматической метеостанции на леднике Чхота Шигри (Гималаи) за 11 лет (2009–2020 гг.): всего 13 217 получасовых данных, из них 2708 и 2063 – для условий ясного неба и облачности. Оценки были статистически значимы. В результате множественного линейного регрессионного анализа скорости сублимации и комбинированных метеорологических переменных сделаны следующие выводы. Совместное использование в качестве предикторов скорости ветра (u) и дефицита давления пара ($q_S - q_A$) является лучшим показателем сублимации ($R=0,93$). Лишь сочетание скорости ветра, дефицита давления пара и разности температур атмосферы и поверхности снега ($T_S - T_A$) дает более высокий коэффициент корреляции ($R=0,96$).

В данной работе также исследовано влияние облачности на сублимацию снега. Испарение сильно коррелировано с ($T_S - T_A$). При ясном небе ($R=0,84$), а в условиях облачности ($R=0,50$), что позволяет предположить, что вертикальная разница температур значительно контролирует приповерхностный вертикальный градиент влажности (один из основных факторов E_S). Это объясняет значительно более высокий поток E_S при ясном небе, чем в условиях облачности. Корреляция E_S с ($q_S - q_A$) была выше при ясном небе ($R=0,82$), чем в условиях облачности ($R=0,70$). Это означает, что E_S увеличивается по мере роста вертикальной разницы во влажности воздуха. Из-за более высокого приповерхностного нагрева и конвекции приповерхностный градиент влажности при ясном небе более крутой, чем в пасмурных условиях.

Похожие результаты были получены и в исследовании [27] на леднике Яла в Непальских Гималаях. Использование в качестве предикторов скорости ветра и дефицита давления пара дает коэффициент корреляции ($R=0,88$), а привлечение дополнительного предиктора T_A повышает коэффициент корреляции ($R=0,90$). Использование же R_S вместо T_A не приводит к росту коэффициента корреляции ($R=0,88$).

Чтобы проверить чувствительность расчета сублимации к изменениям входных данных, в работе [10] задали возмущения T_A (± 1 °C), T_s (± 1 °C) и относительной влажности воздуха (± 10 %). Были выполнены вариации шерохо-

ватости снежного покрова z_0 (0,0005 м, 0,002 м, 0,003 м и 0,004 м, в основных расчетах $z_0=0,001$ м). Расчеты проводились с использованием объемно-аэродинамического метода. Результаты показали, что сублимация наиболее чувствительна к z_0 и T_s , поскольку они непосредственно влияют на E_s . При величине слоя шероховатости z_0 , равном 0,004 м, и при изменении T_s на +1 °С средняя кумулятивная сублимация увеличивается на 21 % (30 мм). Для z_0 гораздо более низкого порядка (0,0005 м) средняя кумулятивная сублимация уменьшается на 8 % (12 мм). Чувствительность к сублимации в этом исследовании аналогична той, о которой сообщалось в работе [50]. Возмущение скорости ветра на ± 10 % приводит к изменению сублимации на ± 8 %. Средняя кумулятивная сублимация примерно в три раза более чувствительна к ± 1 °С изменения T_s , чем к изменению относительной влажности воздуха и ветра на ± 10 %.

В рамках проведенного исследования также была выполнена оценка чувствительности представленной выше физико-математической модели к влиянию различных метеорологических факторов и физических свойств снежного покрова на испарение. При вариации значений метеоэлементов относительно наблюдаемых в процессе расчетов по математической модели получены оценки, отражающие численный вклад каждой метеорологической характеристики в изменчивость величины испарения с поверхности снежного покрова (табл. 3). Эти данные могут быть использованы как для оценки чувствительности величины испарения к климатическим изменениям, так и для выявления погрешностей расчета, связанных с неточностью задания метеоэлементов.

Таблица 3. Относительное изменение величины суточного испарения с поверхности снега, воды и почвы δ , % при росте численных значений метеоэлементов на 1 %

Table 3. Relative change of the daily value of evaporation from snow, water, and soil surfaces δ , % in case of the meteorological elements numerical elements 1% growth

Характеристика	u , м/с	e_A , мбар	T_A , °С	R_s , Вт/ (м ² Ч
δ , %	0,3	-2,8	1,3	0,64

Примечание: u – скорость ветра, e_A – давление пара, T_A – температура воздуха на высоте 2 м от поверхности снега, воды и почвы; R_s – радиационный баланс поверхности снега.

Как отражено в табл. 3, рост температуры, потока солнечной радиации, скорости ветра приводит к росту величины испарения со снежной поверхности, а увеличение давления пара в атмосфере – к его уменьшению. Закономерности те же, что и при описании испарения с поверхности воды [51]. Отметим также, что при вариации значений одного метеоэлемента, другие переменные оставались неизменными. В реальных условиях, как правило, происходят изменения всех метеорологических параметров, в т. ч. и взаимно скоррелированные.

Наряду с оценкой влияния изменчивости метеоэлементов на величину расчетной сублимации снега, исследовалось также влияние на испарение таких характеристик снежного покрова, как плотность, альбеда и экспозиция склона, на котором находится снег. Большой комплекс экспериментальных работ по изучению влияния плотности снега и его альбеда на процессы испарения

и снеготаяния был выполнен специалистами Валдайского филиала Государственного гидрологического института (ВФ ГГИ) и в Казахстане И.Л. Калужным, В.А. Шутовым и Д.А. Деляровым [52–54].

Нами проведены численные эксперименты по оценке влияния плотности и высоты снежного покрова на величину испарения со снежной поверхности. Изменяя начальную величину плотности снега в момент его выпадения (данная величина задается в модели), получали различные значения средней плотности снежного покрова на дату максимальных снегозапасов. Из результатов моделирования следует, что в диапазоне изменения плотности $0,19 - 0,29 \text{ г/см}^3$ увеличение плотности снега на 1 % приводит к росту испарения также примерно на 1 %. Рост испарения согласуется с выводами Кузьмина [2] и экспериментальными наблюдениями ВФ ГГИ [52–54]. Это объясняется увеличением теплопроводности снега с ростом плотности и, соответственно, увеличением температуры поверхности снежного покрова, что вызывает повышение давления водяного пара у поверхности снега.

Интересные результаты получены при численных экспериментах по оценке влияния альbedo поверхности снега на испарение. При высоких значениях альbedo $0,8-0,9$ влияние данного фактора на суммарное испарение за зимний период достаточно велико. При уменьшении альbedo на 1 % испарение возрастает тоже на 1 %. Однако при дальнейшем уменьшении альbedo, роль его падает из-за наличия процессов снеготаяния и сокращения периода залегания снежного покрова, особенно в весенний период. Соответственно, падает величина суммарного испарения. В холодный период, до начала процесса снеготаяния, процентное соотношение изменчивости альbedo и сублимации остается практически неизменным, независимо от величины альbedo.

Велика роль экспозиции склонов в испарении снежного покрова, на которых он залегает. По модельным оценкам, при угле наклона 45° испарение с южного склона превышает испарение с северного на 50 %.

Одним из основных методов при моделировании испарения является метод турбулентной диффузии: уравнения (6), (7). При этом величина шероховатости (z_0) играет ключевую роль в данном методе расчета. При проведении расчетов было принято условие, при котором все параметры шероховатости, определяющие потоки воздуха, тепла и пара, равны z_0 . С использованием в модельных расчетах различных значений z_0 (0,0005 м, 0,001 и 0,005 м) исследовано влияние данного параметра на величину сублимации снега. При возрастании величины z_0 с 0,0005 до 0,001 м испарение увеличивается на 12 %, т. е. данный параметр играет существенную роль в расчетах испарения, вопросам определения его величины посвящено множество исследований.

Следует отметить, что результаты проведенных исследований не противоречат, а зачастую полностью совпадают с выводами работ [10, 27, 50, 52–54].

Влияние климатических изменений

Влияние климатических изменений на сублимацию снега до сих пор является малоизученной областью [55, 56]. В исследованиях, проведенных в Монголии [55], планировалось использовать гидрологическую модель для оценки

пространственно распределенных текущих и будущих скоростей сублимации, вплоть до 2100 г., на основе интерполированных ежедневных данных об осадках, температуре воздуха, влажности и скорости ветра. Однако из-за отсутствия надежных прогностических данных о влажности воздуха и скорости ветра полноценных исследований провести не удалось. Смоделированные изменения, например, рассчитанное отношение сублимации к осадкам, также оказались неоднозначными из-за различия в осадках, полученных с помощью моделей глобальной циркуляции. Расчеты показали, что рост зимних осадков приводит к более длительному снежному покрову и, следовательно, к увеличению потерь на испарение. С другой стороны, увеличение температуры и скорости снеготаяния частично компенсируют рост сублимации.

Выполненное в горном районе Колорадо [56] исследование ставило задачу количественной оценки вклада моделируемых потоков сублимации с поверхности снега, растительности и метелевого снега в сезонную абляцию снежного покрова, а также оценки чувствительности сублимации к сценариям потепления климата. В этом исследовании были выбраны три 20-летних периода: исторический период (1980–1999 гг.), будущий период S1 (2016–2035 гг.) и будущий период S2 (2046–2065 гг.). Использовался следующий климатический сценарий: для периодов S1 и S2 были изменены значения метеоэлементов по сравнению с историческим периодом. В течение зимы (октябрь–май) среднемесячные значения температуры для S1 и S2 были увеличены на 0,68 °C и 1,78 °C, количество осадков увеличено на 1,5 % и 2,3 %, относительная влажность воздуха снижена на 0,3 % и 1,0 %, скорость ветра снижена на 0,1 м/с и 0,1 м/с соответственно.

В результате модельных расчетов получены следующие оценки: среднее значение сублимации за зиму в период 2011–2015 гг. с наземного снежного покрова составило 60 мм, со снега на растительности 113 мм, метелевого снега – 24 мм. Сублимация в сценариях S1 и S2 наземного снега снизилась на 2 % и 5 %, снега на растительности на 1 % и 6 %, метелевого на 4 % и 6 % соответственно. Продолжительность залегания снежного покрова уменьшилась в обоих сценариях в результате увеличения скорости снеготаяния. Следовательно, несмотря на потепление климата, общее снижение суммарных значений сублимации в сценариях S1 и S2 стало результатом уменьшения моделируемой продолжительности снежного покрова, градиентов давления пара и скорости ветра. Результаты моделирования чувствительности климата к потеплению подчеркивают, что по прогнозам в будущем общие потоки сублимации сократятся на 6 %.

В ходе данного исследования для оценки влияния климатических условий на испарение со снежного покрова анализировались результаты расчетов по разработанной нами математической модели формирования и таяния снежного покрова в период с 1952 по 2020 гг. Для моделирования привлечены данные наблюдений на метеостанциях Кострома, Ивдель, Москва (ВДНХ), Валдай, Тамбов, Воронеж, Ершов, Астрахань, а также наблюдения на Подмосковной и Нижнедевицкой водно-балансовых станциях. Все метеостанции, кроме Ивделя, территориально находятся в бассейне р. Волги. На рис. 6 при-

ведены типичные графики, отражающие многолетнюю динамику испарения снега для метеостанций Москва и Тамбов. Очевидно, что климатические изменения, произошедшие в конце 1970-х годов, привели к изменениям потока пара с поверхности снежного покрова. На всех объектах исследований отмечено падение испарения со снега в 1979–2020 гг. по сравнению с периодом 1952–1978 гг. Минимальное падение наблюдалось для Астрахани (7 %). Для всех остальных метеостанций уменьшение испарения получено в пределах 20–30 %, со средним значением 26 %. Динамика произошедших изменений в чем-то аналогична той, которая наблюдалась при исследовании испарения с водной поверхности [51].

Следует отметить, что между испарением со снега в Москве и Тамбове существует довольно высокая корреляционная связь ($R=0,73$). При этом коэффициент корреляции между расчетными данными для Подмосковной ВБС и Валдая равен 0,79, а для Подмосковной и Новодевицкой ВБС – всего 0,58.

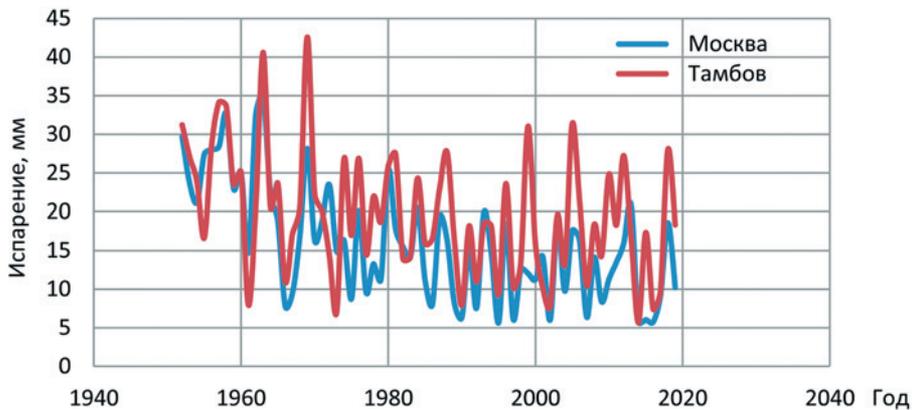


Рис. 6. Динамика расчетных значений испарения со снега для метеоусловий Валдайской, Новодевицкой и Подмосковной ВБС.

Fig. 6. Dynamics of calculation values of evaporation from snow for meteorological conditions of the Valdai, Novodevitsk and Podmoskovny water balance stations (WBS).

Для анализа изменений, произошедших с величиной испарения за расчетный период, необходимо изучить динамику основных метеоэлементов, определяющих испарение со снежного покрова. Начнем с температуры воздуха и давления водяного пара.

Как следует из вышеприведенных расчетов (табл. 2), рост температуры приводит к росту испарения, а рост давления пара – к его падению. Увеличение температуры воздуха вызывает увеличение температуры снега и, соответственно, приводит к повышению перепада давления пара между поверхностью снега и воздухом, что и увеличивает испарение. С другой стороны, повышение температуры укорачивает период залегания снежного покрова за счет более высокой скорости снеготаяния в весенний период, и это приводит к уменьшению суммарного испарения за зимне-весенний период.

Повышение давления пара в атмосферном воздухе, наоборот, уменьшает градиент давления пара у поверхности и вызывает падение величины ис-

парения. Анализ трендов температуры и давления пара на перечисленных выше метеостанциях, показывает, что наблюдается практически синхронный их рост, а это означает взаимную компенсацию их влияния на величину испарения [49, 51].

Еще одним фактором, оказывающим значительное влияние на величину испарения, является скорость ветра, от которой зависит величина турбулентных потоков пара в атмосферу. Поэтому рост скорости ветра приводит однозначно к росту величины испарения и наоборот. Скорость ветра за последние десятилетия имеет тенденцию к уменьшению для всех частей Волжского бассейна и во все сезоны года [49, 51].

Из анализа выпали потоки солнечной радиации, которые в период с 1952 по 2020 гг. остались практически неизменными.

Рассмотрим изменения метеорологических переменных в период 1979–2020 гг. по сравнению с 1952–1978 гг. на примере Москвы. Температура воздуха в зимний период выросла на 20 %, а давление пара на 14 %. При этом скорость ветра упала на 50 %. Рост температуры, в соответствии с табл. 3, приводит к увеличению испарения на 26 %, рост давления пара к его падению на 40 %, а падение скорости ветра к уменьшению испарения на 15 %. Расчетное испарение для условий Москвы упало на 30 %.

Дополнительное влияние на испарение оказали климатические изменения таких характеристик, как длительность залегания снежного покрова и его плотность. По модельным оценкам длительность залегания уменьшилась на 10 сут, что привело к падению испарения примерно на 10 %. Плотность снега при этом выросла на 5 % и, соответственно, на эту же величину выросло испарение.

Суммируя вышесказанное, отметим, что падение величины испарения со снежного покрова за зимне-весенний период в основном обусловлено ростом давления пара, уменьшением скорости ветра и длительностью залегания снежного покрова.

ВЫВОДЫ

В проведенном исследовании выполнен детальный обзор методов и результатов наблюдений за испарением со снежного покрова в различных странах и регионах мира. Наблюдения указывают на значительную пространственную и временную изменчивость и актуальность изучения данной характеристики в современных условиях потепления климата.

В статье представлена физико-математическая модель формирования и таяния снежного покрова, основанная на подробном описании механизмов переноса тепла и влаги в системе снежный покров–атмосфера. Сопоставление с результатами наблюдений показало высокую сходимость расчетных характеристик с экспериментальными данными как на внутрисуточном уровне, так и за многолетний период.

На основе математической модели проведены детальные численные эксперименты по оценке влияния основных метеофакторов и физических свойств снега на величину испарения. При этом исследовано влияние на величину испарения таких основных факторов ее формирования, как температура и влаж-

ность воздуха, скорость ветра, поток солнечной радиации, плотность и альбедо снега, экспозиция склона на котором залегает снежный покров. Расчеты позволили численно оценить влияние каждого отдельного фактора на испарение.

Выполнена оценка изменений испарения с поверхности снега за период 1979–2020 гг. по отношению к 1952–1978 гг. Из данных наблюдений следует, что на территории бассейна Волги отмечается уменьшение испарения примерно на 20–30 %. Анализ изменчивости испарения и метеофакторов ее формирования, а также результатов моделирования позволили сделать следующий вывод: уменьшение величины испарения с поверхности снега в основном вызвано ростом давления пара, падением скорости ветра и в некоторой степени уменьшением длительности залегания снежного покрова.

В период значительных климатических изменений возникает проблема долгосрочного прогноза состояния испарения с поверхности снега. Очевидно, что данный прогноз невозможен без надежных оценок изменения климатических характеристик. Современные климатические модели, по мнению климатологов, могут наиболее достоверно предсказать тренд изменения температуры воздуха. У других климатических характеристик точность гораздо ниже. Исходя из этого, мы можем с достаточной долей вероятности предположить, что прогноз испарения со снега затруднен, т. к. решающими факторами, повлиявшими на испарение в последние десятилетия, являются упругость водяного пара и скорость ветра. Но прогноз их величины имеет довольно низкую достоверность.

В представленной работе впервые на основе натуральных наблюдений и математического моделирования проведено комплексное исследование влияния факторов окружающей среды, определяющих климатические изменения испарения с поверхности снега. Получены общие закономерности, объясняющие тенденции изменения испарения, наблюдающиеся в последние десятилетия. В будущем необходимо уделить больше внимания региональным особенностям формирования испарения и пространственной изменчивости данной характеристики водного баланса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дюнин А.К. Испарение снега. Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1961. 119 с.
2. Кузьмин П.П. К методике исследования и расчета с поверхности снежного покрова // Труды ГГИ. 1953. Вып. 41(95). С. 34–52.
3. Идзон П.Ф. Испарение с поверхности снега по наблюдениям в Джаныбеке // Метеорология и гидрология. 1959. № 2. С. 47–56.
4. Иверонова М.И. К вопросу об испарении со снежного покрова на территории СССР / Сб. «Роль снежного покрова в природных процессах». М.: Изд-во АН СССР, 1961. С. 7–19.
5. Кузнецов В.И. Испарение со снежного покрова // Труды ГГИ. 1964. Вып. 109. С. 3–57.
6. Константинов А.Р. Методика расчета испарения с почвы, воды и снега по температуре и влажности воздуха, измеренным на метеорологических станциях // Труды ГГИ. 1960. Вып. 81. С. 3–57.
7. Reba M.L., Pomeroy J., Marks D. and Link T.E. Estimating surface sublimation losses from snowpacks in a mountain catchment using eddy covariance and turbulent transfer calculations // Hydrological Processes. 2012. No. 26. P. 3699–3711.
8. MacDonald M.K., Pomeroy J.W., Pietroniro A. On the importance of sublimation to an alpine snow mass balance in the Canadian Rocky Mountains // Hydrological and Earth System Sciences Discussion. 2010. No. 14. P. 1401–1415.

9. Zhang Y., Ohata T., Ersi K., and Tandong Y., Observation and estimation of evaporation from the ground surface of the cryosphere in eastern Asia // *Hydrological Processes*. 2003. Vol. 17. No. 6. P. 1135–1147.
10. Mandal Arindan, Angchuk Thupstan, Azam Mohd Farooq, Ramanathan Alagappan, Wagnon Patrick. An 11-year record of wintertime snow-surface energy balance and sublimation at 4863 m a.s.l. on the Chhota Shigri Glacier moraine (western Himalaya, India) Mohd Sohebl, and Chetan Singh // *The Cryosphere*. 2022. No. 16. P. 3775–3799.
11. Zhang Yinsheng, Ishikawa M., Ohata T. and Oyunbaatar D. Sublimation from thin snow cover at the edge of the Eurasian cryosphere in Mongolia // *Hydrological Processes*. 2008. Vol. 22. No. 18. P. 3564–3575.
12. Herrero Javier and Polo María. Evapostublimation from the snow in the Mediterranean mountains of Sierra Nevada (Spain) // *The Cryosphere*. 2016. No. 10. P. 2981–2998.
13. Strasser U., Bernhardt M., Weber M., Liston G.E. and Mauser W. Is snow sublimation important in the alpine water balance? // *The Cryosphere*. 2008. No. 2. P. 53–66.
14. Schulz O., C. de Jong. Snowmelt and sublimation: field experiments and modelling in the High Atlas Mountains of Morocco // *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*. 2004. Vol. 8. No. 6. P. 1076–1089.
15. Екайкин А.А., Заровчатский А.В. Липенков В.Я. Измерение скорости сублимации снега на станции Восток, Центральная Антарктида // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2015. № 4 (106). С. 20–25.
16. Zhang Y., Suzuki K., Kadota T. and Ohata T. Sublimation from snow surface in southern mountain taiga of eastern Siberia. *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres*. 2004. Vol. 109. P. 1–12.
17. Svoma Bohumil M. Difficulties in Determining Snowpack Sublimation in Complex Terrain at the Macroscale // *Advances in Meteorology*. 2016. Vol. 10. P. 1–10.
18. Palm Stephen P., Kayetha Vinay, Yang Yuekui and Pauly Rebecca. Blowing snow sublimation and transport over Antarctica from 11 years of CALIPSO observations // *The Cryosphere*. 2017. Vol. 11. P. 2555–2569.
19. Hood E., Williams M., and Cline D. Sublimation from a seasonal snowpack at a continental, mid-latitude alpine site // *Hydrological Processes*. 1999. Vol. 13. No. 12–13. P. 1781–1797.
20. Marks D. and Dozier J. Climate and energy exchange at the snow surface in the alpine region of the Sierra Nevada. 2. Snow cover energy balance // *Water Resources Research*. 1992. Vol. 28. No. 11. P. 3043–3054.
21. Montesi, J., Elder, K., Schmidt, R. A., & Davis, R. E. Sublimation of intercepted snow within a subalpine forest canopy at two elevations // *Journal of Hydrometeorology*. 2004. Vol. 5. P. 763–773.
22. Pomeroy, J. W., Essery, R. L. H. Turbulent fluxes during blowing snow: Field tests of model sublimation predictions // *Hydrological Processes*. 1999. Vol. 13. P. 2963–2975.
23. Bowling, LC, Pomeroy, JW and Lettenmaier DP. Parameterization of blowing-snow sublimation in a macroscale hydrology model // *Journal of Hydrometeorology*. 2004. Vol. 5. P. 745–762.
24. Sigmund Armin, Dujardin Jérôme, Comola Francesco, Sharma Varun, Huwald Hendrik, Melo Daniela Brito, Hirasawa Naohiko, Nishimura Kouichi, Lehning Michae. Evidence of Strong Flux Underestimation by Bulk Parametrizations During Drifting and Blowing. *Snow Boundary-Layer Meteorology*. 2022. Vol. 182. P. 119–146.
25. Gao Yuan, Shen Lidu, Rongrong Cai, Anzhi Wang, Fenghui Yuan, Jiabing Wu, Dexin Guan and Huaxia Yao Impact of Forest Canopy Closure on Snow Processes in the Changbai Mountains, Northeast China *Environ. Sci.* 2022. Vol. 10. P. 1–26.
26. Кучмент А.С., Гельфан А.Н. Физико-математическая модель формирования снежного покрова и снеготаяния в лесу // *Метеорология и гидрология*. 2004. № 4. С. 85–94.
27. Stigter, Emmy E. Litt, Maxime Steiner, Jakob F. Bonekamp, Pleun N. J. Shea, Joseph M. Bierkens, Marc F. P. Immerzeel, Walter W. The importance of snow sublimation on a Himalayan glacier // *Frontiers in Earth Science*. 2018. Vol. 6. P. 108–124.
28. Sextstone G.A., Clow D.W., Stannard, D.I. and Fassnacht, S.R. Comparison of methods for quantifying surface sublimation over seasonally snow-covered terrain // *Hydrological Processes*. 2016. Vol. 30. P. 3373–3389.
29. Radic Valentina, Menounos Brian, Shea Joseph, Fitzpatrick Noel, Tessema1 Mekdes A. and Déry Stephen J. Evaluation of different methods to model near-surface turbulent fluxes for a mountain glacier in the Cariboo Mountains, BC, Canada. *The Cryosphere*. 2017. Vol. 11. P. 2897–2918.

30. Molotch, N.P., Blanken, P.D., Williams, M.W., Turnipseed, A.A., Monson, R.K. & Margulis, S.A. Estimating sublimation of intercepted and sub-canopy snow using eddy covariance systems // *Hydrological Processes*. 2007. Vol. 21 (12). P. 1567–1575.
31. Helgason Warren D. and Pomeroy J.W. Uncertainties in Estimating Turbulent Fluxes to Melting Snow in a Mountain Clearing 62-th Eastern snow conference. Waterloo, Canada 2005. P.129–142.
32. Kuchment L.S. and Gelfan A.N. The determination of the snowmelt rate and the meltwater outflow from a snowpack for modelling river runoff generation // *Journal of Hydrology*. 1996. Vol. 179. P. 23–36.
33. Gelfan A.N., Pomeroy J.W. and Kuchment L.S. Modeling forest cover influences on snow accumulation, sublimation, and melt // *Journal of Hydrometeorology*. 2004. Vol. 5. No. 5. P. 785–803.
34. Постников А.Н. Испарение с поверхности снежного покрова за период его залегания на территории России // *Ученые записки РГГМУ*. 2016. № 42. С. 55–63.
35. Wimmer F., Schläffer S., der Beek T. and Menzel. Distributed modelling of climate change impacts on snow sublimation in Northern Mongolia // *Advances in Geosciences*. 2009. Vol. 21. P. 117–124.
36. Gustafson J.R., Brooks P.D., Molotch N.P. and Veatch W.C. Estimating snow sublimation using natural chemical and isotopic tracers across a gradient of solar radiation // *Water Resources Research*. 2010. Vol. 46. No. 12. P. 1–14.
37. Jackson S.I. and Prowse T.D. Spatial variation of snowmelt and sublimation in a high-elevation semi-desert basin of western Canada // *Hydrological Processes*. 2009. Vol. 23. No. 18. P. 2611–2627.
38. Martinelli M. Moisture exchange between the atmosphere and alpine snow surfaces under summer conditions (preliminary results) // *Journal of Meteorology*. 1960. Vol. 17. No. 2. P. 227–231.
39. West A.J. Snow evaporation from a forested watershed in the central Sierra Nevada // *Journal of Forestry*. 1962. Vol. 60. P. 481–484.
40. Doty R.D. and Johnston R.S. Comparison of gravimetric measurements and mass transfer computations of snow evaporation beneath selected vegetation canopies // *Proceedings of the 37-th Western Snow Conference*, 1969. Fort Collins, Colo, USA. P. 57–62.
41. Kaitera P. and Terasvirta H. Snow evaporation in South and North Finland 1969/79 and 1970/1971 // *Aqua Fennica*. 1972. Vol. 2. P. 11–19.
42. Bernier P.Y. and Swanson R.H. The influence of opening size on snow evaporation in the forests of the Alberta Foothills // *Canadian Journal of Forest Research*. 1993. Vol. 23. No. 2. P. 239–244.
43. Golding D.L., Calculated Snowpack Evaporation during Chinooks along the Eastern Slopes of the Rocky Mountains in Alberta // *Journal of Applied Meteorology*. 1978. Vol. 17. No. 11. P. 1647–1651.
44. Fassnacht S.R. Estimating alter-shielded gauge snowfall undercatch, snowpack sublimation, and blowing snow transport at six sites in the coterminous USA // *Hydrological Processes*. 2004. Vol. 18. No. 18. P. 3481–3492.
45. Pomeroy J.W., Parviainen J., Hedstrom N. and Gray D.M. Coupled modelling of forest snow interception and sublimation // *Hydrological Processes*. 1998. Vol. 12. No. 15. P. 2317–2337.
46. Schmidt R.A., Troendle C.A. and Meiman J.R. Sublimation of snowpacks in subalpine conifer forests // *Canadian Journal of Forest Research*. 1998. Vol. 28. No. 4. P. 501–513.
47. Zhang Y, Suzuki K., Kadota T. and Ohata T. Sublimation from snow surface in southern mountain taiga of eastern Siberia // *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres*. 2004. Vol. 109.
48. Каляжный И.А., Лавров С.А. Гидрофизические процессы на водосборе. СПб: Нестор-История, 2012. 615 с.
49. Лавров С.А. Влияние климатических изменений на вертикальный влагообмен в почвах (на примере бассейна реки Волги) // *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. 2021. № 4. С. 47–66. DOI: 10.35567/1999-4508-2021-4-3.
50. Steiner J.F., Litt M., Stigter E.E., Shea J., Bierkens M.F.P. and Immerzeel W.W.: The Importance of Turbulent Fluxes in the Surface Energy Balance of a Debris // *The Cryosphere*. 2022. Vol. 16. P. 3775–3799.
51. Лавров С.А. Закономерности формирования испарения с поверхности суши и воды под влиянием климатических изменений // *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. 2019. № 1. С. 4–23. DOI: 10.35567/1999-4508-2019-1-1.
52. Шутов В.А. Методика оценки гидрологической роли снежных мелиораций // *Водные ресурсы*. 1990. № 1. С. 44–53.

53. Деларов Д.А., Калюжный И.Л., Шутов В.А. Испарение со снега при снегозадержании на сельскохозяйственных полях // *Метеорология и гидрология*. № 9. 1985. С. 95–107.
54. Калюжный И.Л., Шутов В.А. Современное состояние и проблемы натуральных исследований снежного покрова // *Водные ресурсы*. 1998. Т. 25. № 1. С. 34–42.
55. Wimmer F., Schläfferl S., Beek T. and Menzel L. Distributed modelling of climate change impacts on snow sublimation in Northern Mongolia *Advances in Geosciences*. 2009. Vol. 21. P. 117–124.
56. Sexstone Graham, Clow David W., Fassnacht Steven R., Liston Glen E., Christopher A. Hiemstra, Knowles John F. and Penn Colin A.. Snow sublimation in mountain environments and its sensitivity to forest disturbance and climate warming // *Water Resources*. 2017. Vol. 54. No. 2. P. 1191–1211.

REFERENCES

1. Dyunin A.K. Evaporation of snow. Novosibirsk: Izd-vo SO AN SSSR [Publishing house of USSR AS SB], 1961. 119 p. (In Russ.).
2. Kuzmin P.P. On the method of research and calculation of evaporation from the snow cover surface. *Trudy GGI [Proceedings of SHI]*. 1953. Iss. 41(95). P. 34–52 (In Russ.).
3. Idzon P.F. Evaporation from the snow surface according to the observations at Dzhanybek. *Meteorologia i gidrologiya [Meteorology and hydrology]*. 1959. No. 2. P. 47–56 (In Russ.).
4. Iveronova M.I. On the issue of evaporation from the snow cover on the territory of the USSR. Sb. *“Rol snezhnogo pokrova v prirodnykh protsessakh” [“The snow cover role in nature processes” collection]*. M. Izd-vo AN SSSR [Publishing house of USSR AS], 1961. С. 7–19 (In Russ.).
5. Kuznetsov V. I. Evaporation from the snow cover. *Trudy GGI [Proceedings of SHI]*. 1964. Iss. 109. P. 3–57 (In Russ.).
6. Konstantinov A.R. A method of calculation of evaporation from soil, water, and snow in terms of temperature and humidity measured at meteorological stations. *Trudy GGI [Proceedings of SHI]*. 1960. Iss. 81. P. 3–57 (In Russ.).
7. Reba M.L., Pomeroy J., Marks D. and Link T.E. Estimating surface sublimation losses from snow-packs in a mountain catchment using eddy covariance and turbulent transfer calculations. *Hydrological Processes*. 2012. No. 26. P. 3699–3711 (In Russ.).
8. MacDonald M.K., Pomeroy J.W., Pietroniro A. On the importance of sublimation to an alpine snow mass balance in the Canadian Rocky Mountains. *Hydrology and Earth System Science Discussion*. 2010. No.14. P. 1401–1415.
9. Zhang Y., Ohata T., Ersi K., and Tandong Y., Observation and estimation of evaporation from the ground surface of the cryosphere in eastern Asia. *Hydrological Processes*. 2003. Vol. 17. No. 6. P. 1135–1147.
10. Mandal Arindan, Angchuk Thupstan, Azam Mohd Farooq, Ramanathan Alagappan, Wagnon Patrick. An 11-year record of wintertime snow-surface energy balance and sublimation at 4863 m a.s.l. on the Chhota Shigri Glacier moraine (western Himalaya, India) Mohd Soheb1, and Chetan Singh. *The Cryosphere*. 2022. No. 16. P. 3775–3799.
11. Zhang Yinsheng, Ishikawa M., Ohata T. and Oyunbaatar D. Sublimation from thin snow cover at the edge of the Eurasian cryosphere in Mongolia. *Hydrological Processes*. 2008. Vol. 22. No.18. P. 3564–3575.
12. Herrero Javier and Polo María. Evaporsublimation from the snow in the Mediterranean mountains of Sierra Nevada (Spain). *The Cryosphere*. 2016. No.10. P. 2981–2998.
13. Strasser U., Bernhardt M., Weber M., Liston G.E. and Mauser W. Is snow sublimation important in the alpine water balance? *The Cryosphere*. 2008. No. 2. P. 53–66.
14. Schulz O., C. de Jong. Snowmelt and sublimation: field experiments and modelling in the High Atlas Mountains of Morocco. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*. 2004. Vol. 8. No. 6. P. 1076–1089.
15. Ekaykin A.A., Zarovchatskiy A.V., Lipenkov V.Y. Measurement of the snow sublimation rate at the Vostok Station. The Central Antarctica. *Problemy Arktiki i Antarktiki [Problems of Arctic and Antarctic]*. 2015. No. 4 (106). P. 20–25.
16. Zhang Y., Suzuki K., Kadota T. and Ohata T. Sublimation from snow surface in southern mountain taiga of eastern Siberia. *Journal of Geophysical Research Discussion: Atmospheres*. 2004. Vol. 109. P. 1–2.

17. Svoma Bohumil M. Difficulties in Determining Snowpack Sublimation in Complex Terrain at the Macroscale. *Advances in Meteorology*. 2016. Vol. 10. P. 1–10.
18. Palm Stephen P., Kayetha Vinay, Yang Yuekui and Pauly Rebecca. Blowing snow sublimation and transport over Antarctica from 11 years of CALIPSO observations. *The Cryosphere*. 2017. Vol. 11. P. 2555–2569.
19. Hood E., Williams M., and Cline D. Sublimation from a seasonal snowpack at a continental, mid-latitude alpine site. *Hydrological Processes*. 1999. Vol. 13. No. 12–13. P. 1781–1797.
20. Marks D. and Dozier J. Climate and energy exchange at the snow surface in the alpine region of the Sierra Nevada. 2. Snow cover energy balance. *Water Resources Research*. 1992. Vol. 28. No. 11. P. 3043–3054.
21. Montesi, J., Elder, K., Schmidt, R. A., & Davis, R. E. Sublimation of intercepted snow within a subalpine forest canopy at two elevations. *Journal of Hydrometeorology*. 2004. Vol. 5. P. 763–773.
22. Pomeroy, J. W., Essery, R. L. H. Turbulent fluxes during blowing snow: Field tests of model sublimation predictions. *Hydrological Processes*. 1999. Vol. 13. P. 2963–2975.
23. Bowling, LC, Pomeroy, J.W and Lettenmaier DP. Parameterization of blowing-snow sublimation in a macroscale hydrology model. *Journal of Hydrometeorology*. 2004. Vol. 5. P. 745–762.
24. Sigmund Armin, Dujardin Jérôme, Comola Francesco, Sharma Varun, Huwald Hendrik, Melo Daniela Brito, Hirasawa Naohiko, Nishimura Kouichi, Lehning Michae. Evidence of Strong Flux Underestimation by Bulk Parametrizations During Drifting and Blowing. *Snow Boundary-Layer Meteorology*. 2022. Vol. 182. P. 119–146.
25. Gao Yuan, Shen Lidu, Rongrong Cai 1 , Anzhi Wang1 , Fenghui Yuan1,3 , Jiabing Wu1 , Dexin Guan1 and Huaxia Yao Impact of Forest Canopy Closure on Snow Processes in the Changbai Mountains, Northeast China Environ. Sci. 2022. Vol. 10. P. 1–26.
26. Kuchment L.S., Gelfan A.N. Physical/mathematical model of the snow cover formation and melting in forest. *Meteorologia i gidrologiya [Meteorology and hydrology]*. 2004. No. 4. P. 85–94.
27. Stigter, Emmy E. Litt, Maxime Steiner, Jakob F. Bonekamp, Pleun N. J. Shea, Joseph M. Bierkens, Marc F. P. Immerzeel, Walter W. The importance of snow sublimation on a Himalayan glacier. *Frontiers in Earth Science*. 2018. Vol. 6. P. 108–124.
28. Sexstone G.A., Clow D.W., Stannard, D.I. and Fassnacht, S.R. Comparison of methods for quantifying surface sublimation over seasonally snow-covered terrain. *Hydrological Processes*. 2016. Vol. 30. P. 3373–3389.
29. Radic Valentina, Menounos Brian, Shea Joseph, Fitzpatrick Noel, Tessema1 Mekdes A. and Déry Stephen J. Evaluation of different methods to model near-surface turbulent fluxes for a mountain glacier in the Cariboo Mountains, BC, Canada. *The Cryosphere*. 2017. Vol. 11. P. 2897–2918.
30. Molotch, N.P., Blanken, P.D., Williams, M.W., Turnipseed, A.A., Monson, R.K. & Margulis, S.A. Estimating sublimation of intercepted and sub-canopy snow using eddy covariance systems. *Hydrological Processes*. 2007. Vol. 21(12). P. 1567–1575.
31. Helgason Warren D. and Pomeroy J.W. Uncertainties in Estimating Turbulent Fluxes to Melting Snow in a Mountain Clearing 62-th Eastern snow conference, Waterloo, Canada 2005. P. 129–142.
32. Kuchment L.S. and Gelfan A.N. The determination of the snowmelt rate and the meltwater outflow from a snowpack for modelling river runoff generation. *Journal of Hydrology*. 1996. Vol. 179. P. 23–36.
33. Gelfan A.N., Pomeroy J.W. and Kuchment L.S. Modeling forest cover influences on snow accumulation, sublimation, and melt. *Journal of Hydrometeorology*. 2004. Vol. 5. No. 5. P. 785–803.
34. Postnikov A.N. Evaporation from the snow cover surface over the period of its bedding on the territory of Russia. *Uchenie zapiski RGGMU [Academic notes of RGGMU]*. 2016. No. 42. P. 55–63.
35. Wimmer F., Schlaffer S., der Beek T., and Menzel. Distributed modelling of climate change impacts on snow sublimation in Northern Mongolia. *Advances in Geosciences*. 2009. Vol. 21. P.117–124.
36. Gustafson J.R., Brooks P.D., Molotch N.P. and Veatch W.C. Estimating snow sublimation using natural chemical and isotopic tracers across a gradient of solar radiation. *Water Resources Research*. 2010. Vol. 46. No. 12. P. 1–14.
37. Jackson S.I. and Prowse T.D. Spatial variation of snowmelt and sublimation in a high-elevation semi-desert basin of western Canada. *Hydrological Processes*. 2009. Vol. 23. No. 18. P. 2611–2627.
38. Martinelli M. Moisture exchange between the atmosphere and alpine snow surfaces under summer conditions (preliminary results). *Journal of Meteorology*. 1960. Vol. 17. No. 2. P. 227–231.

39. West A.J. Snow evaporation from a forested watershed in the central Sierra Nevada. *Journal of Forestry*. 1962. Vol. 60. P. 481–484.
40. Doty R.D. and Johnston R.S. Comparison of gravimetric measurements and mass transfer computations of snow evaporation beneath selected vegetation canopies. *Proceedings of the 37-th Western Snow Conference*. 1969. Fort Collins, Colo, USA. P. 57–62.
41. Kaitera P. and Terasvirta H. Snow evaporation in South and North Finland 1969/79 and 1970/1971. *Aqua Fennica*. 1972. Vol. 2. P. 11–19.
42. Bernier P.Y. and Swanson R.H. The influence of opening size on snow evaporation in the forests of the Alberta Foothills. *Canadian Journal of Forest Research*. 1993. Vol. 23. No. 2. P. 239–244.
43. Golding D.L., Calculated Snowpack Evaporation during Chinooks along the Eastern Slopes of the Rocky Mountains in Alberta. *Journal of Applied Meteorology*. 1978. Vol. 17. No. 11. P. 1647– 1651.
44. Fassnacht S.R. Estimating alter-shielded gauge snowfall undercatch, snowpack sublimation, and blowing snow transport at six sites in the coterminous USA. *Hydrological Processes*. 2004. Vol. 18. No. 18. P. 3481–3492.
45. Pomeroy J.W., Parviainen J., Hedstrom N. and Gray D.M. Coupled modelling of forest snow interception and sublimation. *Hydrological Processes*. 1998. Vol. 12. No. 15. P. 2317–2337.
46. Schmidt R.A., Troendle C.A. and Meiman J.R. Sublimation of snowpacks in subalpine conifer forests. *Canadian Journal of Forest Research*. 1998. Vol. 28. No. 4. P. 501–513.
47. Zhang Y, Suzuki K., Kadota T. and Ohata T. Sublimation from snow surface in southern mountain taiga of eastern Siberia. *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres*. 2004. Vol. 109.
48. Kalyuzhnyi I.L., Lavrov S.A. Hydro/physical processes on the catchment. Saint Petersburg. Nestor-Istoriya, 2012. 615 p. (In Russ.).
49. Lavrov S.A. The climate change impact upon vertical moisture exchange in soils (the Volga River basin as a study case). *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2021. No. 4. P. 47–66. DOI: 10.35567/1999-4508-2021-4-3 (In Russ.).
50. Steiner J.F., Litt M., Stigter E.E., Shea J., Bierkens M.F.P. and Immerzeel W.W.: The Importance of Turbulent Fluxes in the Surface Energy Balance of a Debris. *The Cryosphere*. 2022. Vol. 16. P. 3775–3799.
51. Lavrov S.A. Regularities of the evaporation from the ground and water surface under the climate change impact. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2019. No. 1. P. 4–23. DOI: 10.35567/1999-4508-2019-1-1 (In Russ.).
52. Shutov V.A. A method of the snow meliorations hydrological role. *Vodniye resursy [Water resources]*. 1990. No. 1. P. 44–53 (In Russ.).
53. Delarov D.A., Kalyuzhnyi I.L., Shutov V.A. Evaporation from snow in its retention on agricultural fields. *Meteorologia i gidrologiya [Meteorology and hydrology]*. No. 9. 1985. P. 95–107 (In Russ.).
54. Kalyuzhnyi I.L., Shutov V.A. Current state and problems of the snow cover field studies. *Vodniye resursy [Water resources]*. 1998. Vol. 25. No. 1. P. 34–42 (In Russ.).
55. Wimmer F., Schlaffer1 S., Beek T. and Menzel L. Distributed modelling of climate change impacts on snow sublimation in Northern Mongolia *Advances in Geosciences*. 2009. Vol. 21. P. 117–124.
56. Sextstone Graham, Clow David W., Fassnacht Steven R., Liston Glen E., Christopher A. Hiemstra, Knowles John F. and Penn Colin A.. Snow sublimation in mountain environments and its sensitivity to forest disturbance and climate warming. *Water Resources*. 2017. Vol. 54. No. 2. P. 1191–1211.

Сведения об авторе:

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

About the author:

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

Содержание тяжелых металлов в воде рек Центрального Кавказа (бассейн реки Терек)

Ф.А. Атабиева  , А.С. Отарова 

 atabieva0812@mail.ru

ФГБУ «Высокогорный геофизический институт» г. Нальчик, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Выявление гидрологических и гидрохимических особенностей воды конкретных водных объектов имеет большое значение при решении задач экологического нормирования. Для России с ее крайним разнообразием природно-климатических условий это особенно актуально. Соответственно при экологическом нормировании необходимо учитывать региональные особенности формирования химического состава природных вод. В статье представлены данные о содержании растворенных форм тяжелых металлов (V, Cr, Mn, Zn, Cd, Pb, Mo, Ni) в воде рек Центрального Кавказа (Малка, Баксан, Черек, Урух, Терек, Нальчик, Лескен, Чегем, Шалушка, Урвань, Куркужин) в среднем и нижнем течении. Обеспеченность стока рек в 2021 г. составила 50 %. Водные ресурсы бассейна р. Терек играют ключевую роль в экономике региона. По степени хозяйственного и экологического воздействия бассейн, имеющий большое промышленно-хозяйственное, лечебно-оздоровительное и рекреационное значение, относится к числу наиболее напряженных. **Методы.** Результаты получены в ходе полевых исследований 2021 г., в рамках которых отобраны и проанализированы 154 пробы. Концентрацию растворенных форм соединений тяжелых металлов измеряли атомно-абсорбционным спектрометром «МГА-915М». Определение минерализации и водородного показателя проводили с использованием портативного кондуктометра HANNA (HI 991300). **Результаты.** Получены данные о средних концентрациях в воде растворенных форм тяжелых металлов, представлена их пространственная изменчивость. Рассмотрена сезонная динамика концентраций. Установлены приоритетные загрязняющие вещества и основные источники их поступления.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: загрязнение, реки Центрального Кавказа, бассейн р. Терек, растворенная форма соединений тяжелых металлов, предельно допустимые концентрации.

Для цитирования: Атабиева Ф.А. Отарова А.С., Содержание тяжелых металлов в воде рек Центрального Кавказа (бассейн реки Терек) // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2023. № 3. С. 89-101. DOI: 10.35567/19994508_2023_3_6.

Дата поступления 08.12.2022.

HEAVY METALS CONTENT IN THE WATER OF THE RIVERS OF THE CENTRAL CAUCASUS (THE TEREK RIVER BASIN)

Fatimat A. Atabieva  , Asiyat S. Otarova 

 atabieva0812@mail.ru

Vysokogorny Geophysical Institute Nalchik, Russia

ABSTRACT

Relevance. The identification of the hydrological and hydrochemical characteristics of the water of specific water bodies is of great importance in solving the problems of environmental regulation. For Russia, with its extreme diversity of natural and climatic conditions, this is

© Атабиева Ф.А. Отарова А.С., 2023

especially important. Accordingly, during environmental regulation, it is necessary to take into account the regional peculiarities of the formation of the chemical composition of natural waters. The article presents data on the content of dissolved forms of heavy metals TM (V, Cr, Mn, Zn, Cd, Pb, Mo, Ni) in the water of the rivers of the Central Caucasus (Malka, Baksan, Cherek, Uruk, Terek, Nalchik, Lesken, Chegem, Shalushka, Urvan, Kurkuzhin) in the middle and lower the current. The security of river flow in 2021 was 50 %. The water resources of the Terek River basin play a key role in the economy of the republics. In terms of the degree of economic and environmental impact, the basin, which has great industrial, economic, health and recreational significance, is among the most strained. **Methods.** The results were obtained during field studies in 2021, during which 154 samples were selected and analyzed. The concentration of dissolved forms of heavy metal compounds was measured with an atomic absorption spectrometer "MGA-915M". The measurement of mineralization and hydrogen index was carried out using the HANNA conductometer (HI 991300). **Results.** Data on the average concentrations of dissolved forms of heavy metals are given. Spatial variability is presented. The seasonal dynamics of concentrations is considered. Priority pollutants of water bodies and the main sources of their input are identified.

Keywords: pollution, rivers of the Central Caucasus, river basin. Terek, dissolved form of heavy metal compounds, maximum permissible concentrations.

For citation: Atabieva F.A., Otarova A.S. Heavy metals content in the water of the rivers of the Central Caucasus (the Terek River basin). *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2023. No. 3. P. 89-101. DOI: 10.35567/19994508_2023_3_6.

Received 08.12.2022.

ВВЕДЕНИЕ

Тяжелые металлы – особо опасные химические вещества. В отличие от загрязняющих веществ органической природы, в той или иной степени разлагающихся в природных водах, соединения тяжелых металлов стабильны и сохраняются в водном объекте длительное время даже после устранения источника загрязнения [1–9].

Исследованные в представленной работе водосборные бассейны рек характеризуются вертикальной зональностью, многообразием подстилающих горных пород, что предопределяет повышенное содержание тяжелых металлов в воде рек Центрального Кавказа – Малка, Баксан, Черек, Чегем, Урук, Тerek, Нальчик, Лескен, Шалуха, Урвань, Куркужин (бассейн р. Тerek). Например, качество воды р. Малка в фоновом створе соответствует III классу («умеренно загрязненная») из-за высокого содержания металлов, что связано с наличием полиминеральных руд на водосборной территории. Ниже по течению на качество воды р. Малка оказывает отрицательное влияние сброс сточных вод отходов спиртового производства. По многолетним наблюдениям р. Лескен является одной из чистых рек, но в фоновом створе отмечается повышенное содержание ионов тяжелых металлов¹.

Водные ресурсы бассейна Терека играют ключевую роль в экономике республик и интенсивно используются для орошения и обводнения сельскохозяйственных земель, рыбного хозяйства, хозяйственно-питьевого и промышленного водоснабжения, гидроэнергетики. Приказом Западно-Каспийского

¹ Схема комплексного использования и охраны водных объектов бассейна реки Тerek. Кн. 2. Оценка экологического состояния и ключевые проблемы речного бассейна. 17 с.

бассейнового водного управления от 30 сентября 2014 года № 51/а-П утверждена разработанная Схема комплексного использования и охраны водных объектов (СКИОВО) рек бассейна Каспийского моря на юг от бассейна Терека до государственной границы РФ. Согласно СКИОВО² основным водопользователем является сельское хозяйство, которое потребляет более 92 % воды от общего водозабора, крупные водопотребители – рыбная отрасль, жилищно-коммунальное хозяйство и гидроэнергетика. По степени хозяйственного и экологического воздействия бассейн, имеющий большое промышленно-хозяйственное, лечебно-оздоровительное и рекреационное значение, относится к числу наиболее напряженных.

В проекте СКИОВО рассмотрены вопросы использования и охраны водных объектов на территории, включающей бассейны рек Каспийского моря и, в частности, территории бассейна р. Терек. Определены лимиты и квоты на забор воды из водных объектов и сброс сточных вод нормативного качества. Лимиты изъятия стока соответствуют НДС на водные объекты в части нормативов допустимого изъятия стока водных объектов. Они ограничивают антропогенное воздействие, вызванное забором части стока рек, и обеспечивают необходимый объем экологического стока для устойчивого функционирования водных экосистем². В табл. 1 приведены данные по объемам водозабора поверхностных вод и сброса сточных вод по некоторым водохозяйственным участкам в бассейне р. Терек.

Для эффективной охраны водных объектов от загрязнения сточными водами необходимо создание системы регламентации веществ двойного генезиса (естественного и техногенного) с учетом природно-климатических особенностей водосборов водных объектов. В данном случае, содержание тяжелых металлов характеризуется существенной пространственно-временной неоднородностью, зачастую их концентрации оказываются выше принятых федеральных нормативов (ПДК).

Таблица 1. Показатели объемов забора поверхностных вод из водного объекта и сброса сточных вод, соответствующих нормативам качества
Table 1. Indicators of volumes of surface water intake from a water body and wastewater discharge corresponding to quality standards

Код в/х участка и наименование водного объекта	Годовой сток обеспеченностью 95 %, млн м ³	Забор поверхностной воды, млн м ³ /год	Сброс сточных вод, млн м ³ /год
07.02.00.006 Черек	2181,52	70,97	38,08
07.02.00.007 Баксан без р. Черек	2243,0	63,18	11,99
07.02.00.005 Малка от истока до Кура-Марьинского канала	308,0	1,54	0,92

Учет региональных особенностей водных объектов позволит увеличить величину допустимой антропогенной нагрузки, что важно при определении НДС. В настоящее время очевидна необходимость в расчете фоновых концен-

² Схема комплексного использования и охраны водных объектов бассейна реки Терек. Кн. 1. Общая характеристика речного бассейна. 158 с.

траций соединений молибдена и марганца для определения доли возможного антропогенного вмешательства («приращения» к фону).

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Истоки рек Баксан, Малка, Терек, Чегем, Черек, Урух берут начало в ледниках Главного Кавказского и Бокового хребтов (рис. 1). У истока в летний период эти реки имеют ледниковое питание, вниз по течению тип питания рек меняется. Истоки рек Нальчик, Лескен, Шалущка, Урвань, Куркужин расположены на северных склонах Пастбищного (Мелового) и Лесистого хребтов (рис. 1), значительно ниже Главного Кавказского хребта и не имеют современного оледенения. Поэтому у истоков этих рек преобладает подземное и грунтовое питание.

Главный хребет и его отроги на большей части покрыты ледниками и фирновыми полями. Только на крутых склонах обнажаются слагающие их породы (гнейсы, граниты и др.), дающие начало подвергающимся разрушению и сносу осыпям [10, 11]. Особенности рельефа, высотная поясность горных ландшафтов, неравномерное распределение осадков, резкие колебания температур по высотным зонам способствуют процессам выветривания. Выщелачивание поверхностными и подземными водами пород бассейновых территорий приводит к повышению в воде рек концентраций соединений тяжелых металлов.

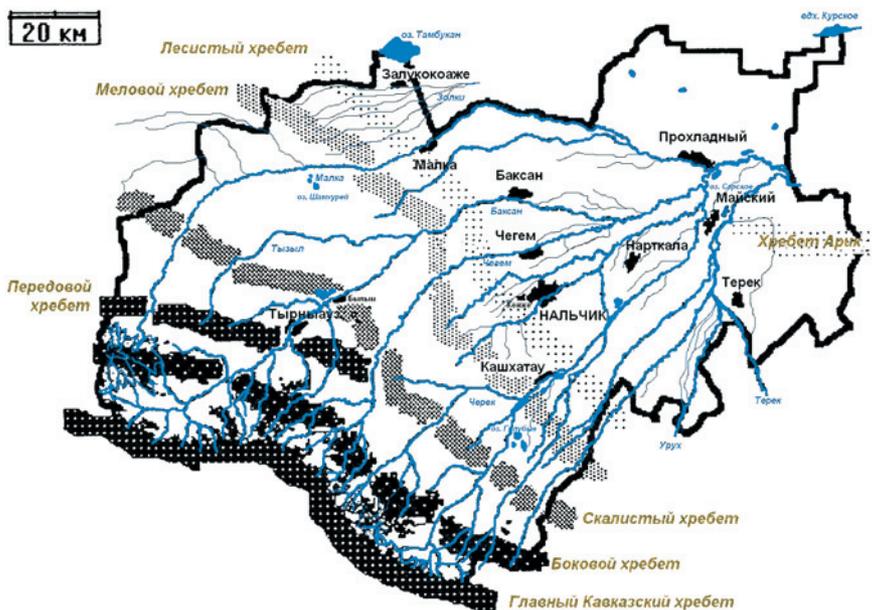


Рис. 1. Картограмма хребтов северного склона Центрального Кавказа.
Fig.1. Map – diagram of the ridges of the northern slope of the Central Caucasus.

Анализ загрязнения воды рек Центрального Кавказа растворенными формами тяжелых металлов (V, Cr, Mn, Zn, Cd, Pb, Mo, Ni) проводится ежегодно сотрудниками испытательного лабораторного центра Высокогорного геофизического института в рамках маршрутно-экспедиционных работ вдоль северного склона хребтов Центрального Кавказа.

Пробы воды отбирали в постоянных створах. Створ I для каждой реки располагается в предгорной зоне (среднее течение), створ II – в равнинной части (нижнее течение). Высота водосборов в среднем течении составляет 700 м над уровнем моря, в нижнем течении – 200 м. В 2021 г. отборы проб воды проведены семь раз (в зимнюю межень, в половодье – на подъеме, пике и спаде, в период прохождения дождевого паводка и осенью). Отобрано и проанализировано 154 пробы воды.

При отборе проб фиксировали температуру воздуха, воды, прозрачность, водородный показатель и уровень минерализации. Пункты наблюдений приведены в табл. 2. Для определения уровня содержания растворенных форм соединений металлов пробы воды фильтровали через фильтры с диаметром пор 0,45 мкм. Полученный фильтрат консервировали азотной кислотой (HNO_3) из расчета 0,1 мл на 100 мл пробы. Концентрацию измеряли атомно-абсорбционным спектрометром «МГА-915М». Определение минерализации и водородного показателя проводили с использованием портативного кондуктометра HANNA (HI 991300)³ [12, 13].

Таблица 2. Перечень пунктов отбора проб воды рек Центрального Кавказа, 2021 г.
Table 2. List of sampling points of the rivers of the Central Caucasus, 2021

Водный объект	Расстояние от истока, км	Пункт отбора
р. Малка	88	с. Малка
	190	г. Прохладный
р. Куркужин	40	с. Куба-Таба
	64	с. Карагач
р. Баксан	100	с. Исламей
	169	г. Прохладный
р. Чегем	68	с. Лечинкай
	87	г. Чегем-2
р. Шалушка	20	с. Шалушка
	34	пост ДПС, сады
р. Нальчик	30	г. Нальчик
	43	с. Нартан
р. Урвань	15	Ост. «27 км ж/д»
	44	с. Новоивановское
р. Черек	54	г. Кашхатау
	112	п. Октябрьский
р. Лескен	38	с. Лескен
	61	ст. Александровская
р. Урух	76	с. Урух
	105	ст. Александровская
р. Терек	151	с. Эльхотово
	230	с. Хамидие

³ ПНД Ф 14.1:2.253-09. Методика выполнения измерений массовых концентраций Al, Ba, Be, V, Fe, Cd, Co, Li, Mn, Cu, Mo, As, Ni, Sn, Pb, Se, Sr, Ti, Cr, Zn в природных и сточных водах методом атомно-абсорбционной спектроскопии с использованием атомно-абсорбционного спектрометра с электротермической атомизацией «МГА-915». М., 2009.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Минерализация рек с преобладанием ледникового питания (Баксан, Малка, Терек, Чегем, Черек, Урух) достигает максимумов в марте, когда реки переходят на грунтовое питание. Минимальные значения минерализации наблюдаются в июне, июле. В качестве примера представлены графики для рек Малка, Баксан и Терек (рис. 2). Для рек с преобладанием ледникового питания, длительность половодья которых несколько месяцев (май – август), в результате таяния ледников и сезонного снежного покрова значительно увеличивается расход воды, что приводит к разбавлению воды и существенному уменьшению минерализации.

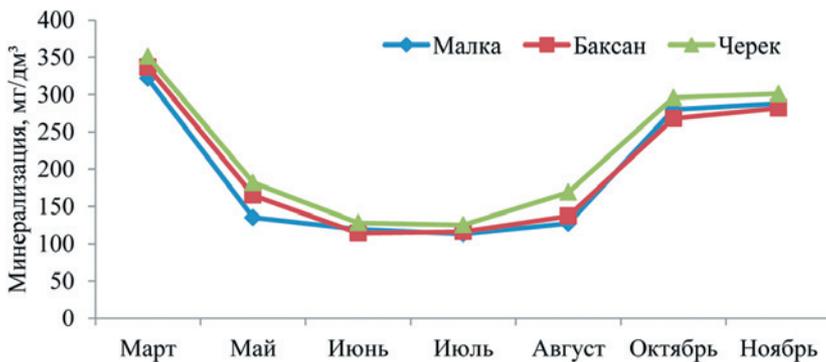


Рис. 2. Минерализация воды рек Малка, Баксан, Черек.
Fig.2. Mineralization of the Malka, Baksan, and Cherek rivers water.

Изменчивость минерализации воды рек Нальчик, Лескен, Шалушка, Урвань, Куркужин с преобладанием грунтового питания значительно отличается от закономерностей, наблюдаемых для рек с ледниковым питанием (рис. 3). Например, в воде рек Нальчик, Шалушка, Куркужин резкого уменьшения минерализации в летние месяцы не отмечено, а высокие значения минерализации воды в р. Куркужин могут свидетельствовать о значительном влиянии антропогенного фактора, т. к. по степени загрязненности по многолетним данным воды реки относятся к «грязным».

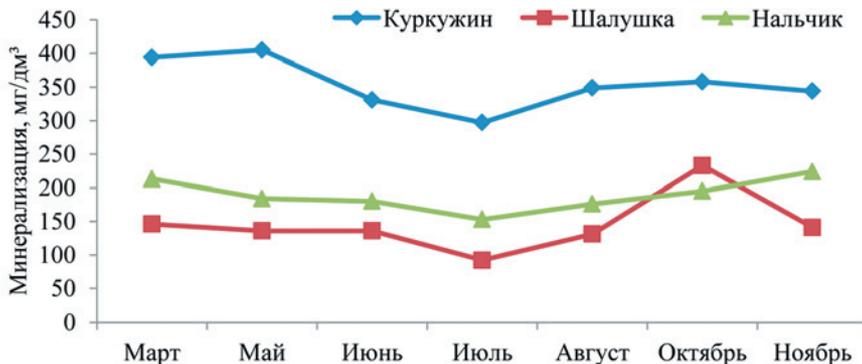


Рис. 3. Минерализация воды рек Куркужин, Шалушка, Нальчик.
Fig.3. Mineralization of the Kurkuzhin, Shalushka, and Nalchik rivers water.

Значения водородного показателя в воде рек изменяются незначительно и составляют от 7,50 до 8,78 единиц.

Одним из важных показателей качества воды является содержание тяжелых металлов. Соединения тяжелых металлов относятся к веществам двойного генезиса: они могут содержаться в воде за счет естественных факторов формирования ее химического состава и в результате антропогенного воздействия. По результатам многолетних данных в водах исследуемых рек по соединениям V, Cr, Cd, Ni не отмечено превышения предельно допустимых концентраций для водоемов рыбохозяйственного назначения (ПДК_{рх}). По соединениям Zn, Pb наблюдаются единичные случаи превышения ПДК_{рх}. По соединениям Mn, Mo во всех реках фиксируются превышения ПДК_{рх}. Поэтому в таблицах даны результаты для веществ, концентрации которых превышают ПДК_{рх}.

Средние значения концентраций растворенных форм Mn, Mo и диапазоны их изменчивости в воде рек с преобладанием ледникового или грунтового питания представлены в табл. 3 и табл. 4. Концентрации молибдена и марганца во всех исследованных реках превышают значения ПДК_{рх}. Максимальные значения молибдена зафиксированы в воде рек Черек и Баксан, в нижнем течении (5 и 4,9 ПДК соответственно). Максимальные значения марганца установлены в нижнем течении р. Терек. В реках с преобладанием грунтового питания максимальные значения молибдена и марганца наблюдаются в среднем течении р. Урвань (8,3 и 17,6 ПДК).

Как отмечено в [14], территория Северного Кавказа загрязнена соединениями никеля, цинка, меди, хрома, олова, свинца, а отдельные ландшафты и соединениями молибдена, вольфрама, марганца, стронция. В естественных условиях ионы металлов поступают в поверхностные воды, в основном, за счет выветривания, выщелачивания, растворения минералов и пород, слагающих водосборный бассейн. При антропогенном загрязнении соединения тяжелых металлов выносятся в водоемы со сточными водами обогатительных фабрик, металлургических заводов, предприятий химической промышленности и шахтными водами. Таковые на исследуемой территории отсутствуют, за исключением давно законсервированного Тырныаузского горно-обогатительного комбината. Тырныаузский горно-обогатительный комбинат и «хвостохранилище» расположены в Баксанском ущелье, по которому протекает р. Баксан, но максимальные значения молибдена обнаружены в воде р. Урвань, исток которой расположен на склонах Пастбищного (Мелового) хребта, является протоком р. Черек и впадает в р. Черек на 58 км от устья⁴.

В долине р. Урвань имеются родники, возможно, влияющие на химический состав воды реки. В бассейне Терека основное русло реки и все основные притоки имеют общее северное направление, в результате чего пересекают карстовую зону в своем среднем течении. Для большинства рек бассейна величина их стока перед карстовой зоной наибольшая, поэтому в карстовые полости уходит значительная его часть. Соответственно, ниже карстовой зоны начинает выклиниваться подземный сток, в довольно значительном объеме увеличивая поверхностный.

⁴Государственный водный кадастр: 1kadastr.com.

Таблица 3. Концентрации Mn, Mo в воде рек с преобладанием ледникового питания в среднем и нижнем течении, 2021 г.

Table 3. Average values of Mn, Mo concentrations and the range of variation of values in the water of rivers with a predominance of glacial nutrition, in the middle and lower reaches, 2021

Показатель, мкг/дм ³	Среднее течение		Нижнее течение		ПДК, мкг/дм ³
	X _{cp}	X _{min} -X _{max}	X _{cp}	X _{min} -X _{max}	
р. Чегем					
Mo	1,42	0,1-3,33	1,59	0,1-4,24	1
Mn	13,51	4,38-25,38	9,79	5,27-16,70	10
р. Урух					
Mo	1,63	0,1-4,09	1,07	0,35-1,76	1
Mn	15,20	1,05-35,51	12,82	3,85-20,85	10
р. Баксан					
Mo	4,25	3,52-5,94	4,89	1,36-18,19	1
Mn	9,81	3,94-15,83	8,95	4,77-13,49	10
р. Черек					
Mo	1,40	0,1-3,34	5,01	1,41-12,50	1
Mn	20,77	3,97-33,66	10,87	5,58-21,48	10
р. Малка					
Mo	1,66	0,1-4,93	4,34	1,26-12,26	1
Mn	11,58	6,15-17,06	10,01	4,22-19,32	10
р. Терек					
Mo	1,47	0,1-4,70	4,36	1,5-9,68	1
Mn	14,60	5,02-29,31	13,90	3,86-32,55	10

Таблица 4. Концентрации Mn, Mo в воде рек с преобладанием грунтового питания в среднем и нижнем течении, 2021 г.

Table 4. Average values of Mn, Mo concentrations and the range of variation of values in the water of rivers with a predominance of ground feeding, in the middle and lower reaches, 2021

Показатель, мкг/дм ³	Среднее течение		Нижнее течение		ПДК, мкг/дм ³
	X _{cp}	X _{min} -X _{max}	X _{cp}	X _{min} -X _{max}	
р. Куркужин					
Mo	4,87	1,44-7,16	2,12	0,1-4,10	1
Mn	15,62	3,37-38,41	7,86	2,31-18,39	10
р. Шалушка					
Mo	1,95	0,36-5,06	5,20	0,84-18,59	1
Mn	8,22	1,77-15,94	17,00	4,94-33,30	10
р. Нальчик					
Mo	1,12	0,1-2,08	1,56	0,1-3,23	1
Mn	8,37	3,96-15,05	7,63	4,7-11,97	10
р. Урвань					
Mo	8,31	3,3-20,80	7,70	1,76-20,0	1
Mn	17,61	10,02-25,59	16,68	8,1-31,26	10
р. Лескен					
Mo	1,25	0,18-2,20	0,59	0,1-1,56	1
Mn	14,46	2,2-56,10	9,07	0,1-18,26	10

При этом большая часть стока, попавшая в подземный, в низовьях рек выклинивается и становится поверхностным стоком, поэтому подземное питание в стоке рек приобретает весьма значительную долю [15]. Возможно, именно карстовая зона привносит свой вклад в химический состав вод исследуемых рек.

Постоянное превышение предельно допустимых концентраций молибдена, марганца в воде рек бассейна Терека, вероятно, объясняется природным гидрогеохимическим фоном, в связи с чем ПДК этих загрязняющих веществ не могут быть соблюдены. Пространственная изменчивость концентраций молибдена и марганца представлена в табл. 2.

Вниз по течению рек концентрация молибдена в воде р. Баксан уменьшается с 12,79 до 6,10 мкг/дм³, в других реках пространственная изменчивость концентраций молибдена незначительна. Концентрации соединений марганца в воде рек Малка, Баксан, Терек, Куркужин уменьшаются, а в воде рек Урух, Лескен, Шалушка, Урвань увеличиваются вниз по течению. При анализе сезонной изменчивости концентраций соединений молибдена и марганца в реках с преимущественно ледниковым питанием (рис. 4, рис. 5) выявлено, что в летнее половодье эти показатели, в основном, имеют более низкие значения, чем в зимнюю межень.

В воде рек с преобладанием грунтового питания концентрации марганца в летние месяцы также уменьшаются (рис. 7), но концентрации молибдена (рис. 6) в июне-июле значительно превышают зимние, за исключением воды рек Шалушка и Урвань.

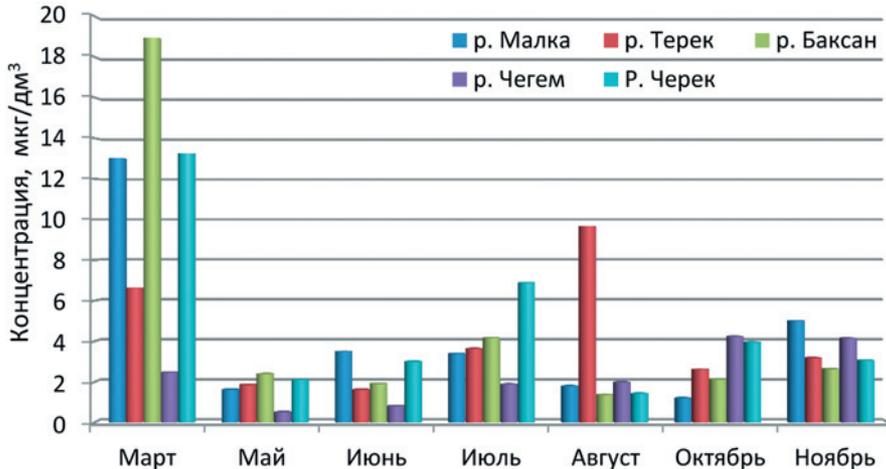


Рис. 4. Концентрация молибдена в реках с преимущественно ледниковым питанием.
Fig.4. Molybdenum concentration in rivers with predominantly glacial feeding.

Таким образом, анализ результатов проведенных исследований показал, что уровень содержания соединений молибдена и марганца оказывается значительно выше принятых для них общефедеральных нормативов (ПДК). Разработка и внедрение региональных предельно допустимых концентраций (РДК) [16–18] может позволить исправить ситуацию, когда ПДК не могут быть соблюдены в силу естественных причин, обусловленных природным гидрохимическим фоном.

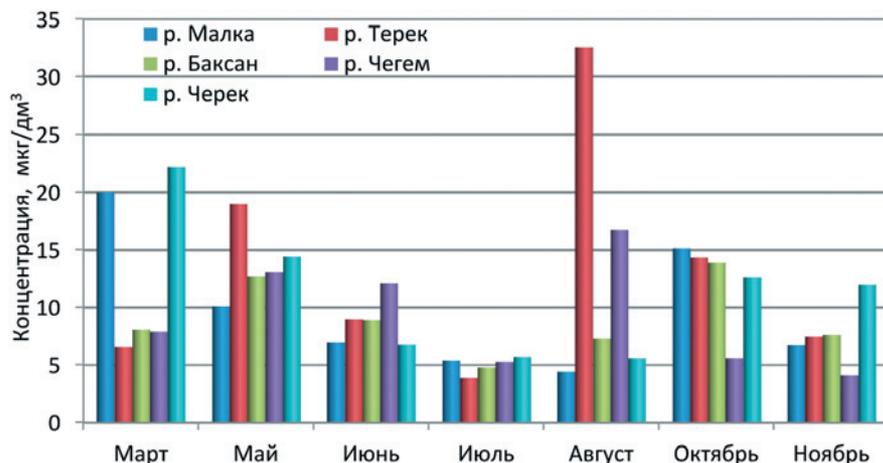


Рис. 5. Концентрация марганца в реках с преимущественно ледниковым питанием.
Fig.5. Manganese concentration in rivers with predominantly glacial feeding.

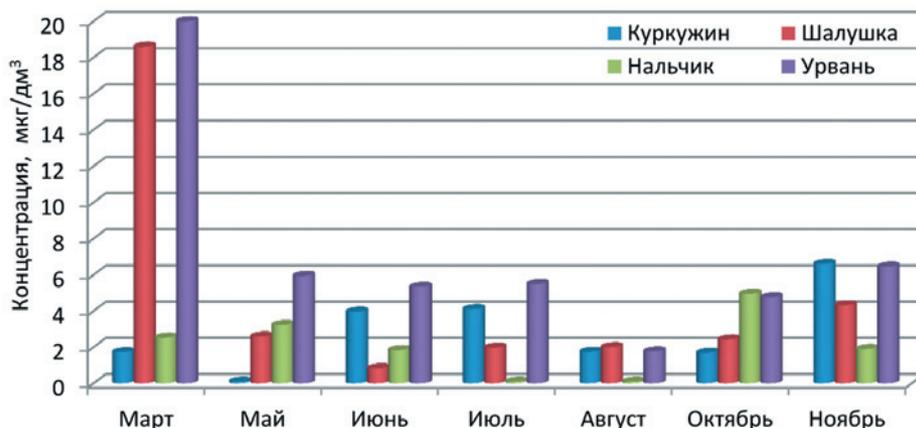


Рис. 6. Концентрации молибдена в воде рек с преобладанием грунтового питания.
Fig.6. Molybdenum concentrations in the water of rivers with a predominance of soil nutrition.

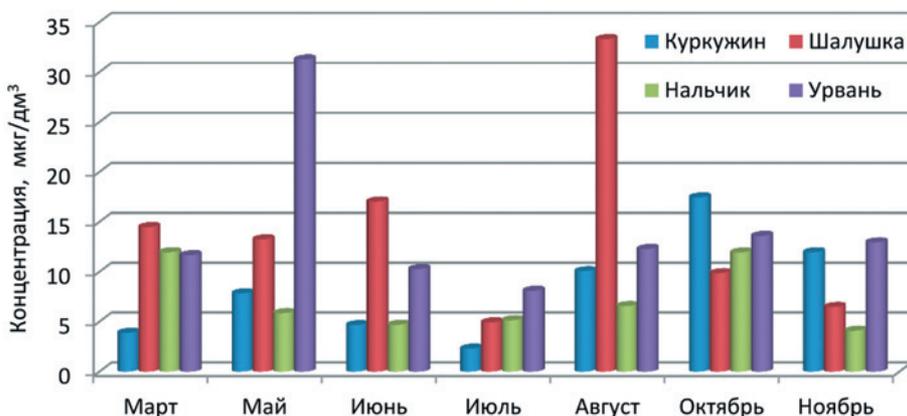


Рис. 7. Концентрации марганца в воде рек с преобладанием грунтового питания.
Fig. 7. Concentrations of manganese in the water of rivers with a predominance of soil nutrition.

ВЫВОДЫ

Таким образом, в ходе проведенных исследований установлено, что вода рек Центрального Кавказа (Малка, Баксан, Черек, Чегем, Терек, Нальчик, Шалушка, Урвань, Куркужин) содержит превышающие значения ПДК_{рх} по соединениям молибдена и марганца, что объясняется влиянием природного фактора.

Концентрации растворенных форм соединений молибдена и марганца в воде рек подвержены значительной сезонной изменчивости:

- для соединений Мо максимальные концентрации фиксируются в воде рек с преобладанием ледникового питания в зимнюю межень, в воде рек с преобладанием грунтового питания – в летние месяцы;

- для соединений Mn минимальные значения отмечены в летний период как в реках с преобладанием ледникового питания, так и в реках с грунтовым питанием.

Исследования содержания тяжелых металлов в указанных реках продолжаются, т. к. для разработки нормативов качества воды и допустимого антропогенного воздействия необходимы данные за более длительный период. В целях улучшения качества воды рек и снижения антропогенного воздействия веществ двойного генезиса определены приоритетные мероприятия:

- разработка нормативов качества воды водных объектов с учетом их природных особенностей;

- повышение ответственности юридических лиц и индивидуальных предпринимателей, осуществляющих хозяйственную и иную деятельность, оказывающую негативное воздействие на водные объекты;

- экологическое воспитание населения в традициях бережного отношения к водным ресурсам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Будников Г.К. Тяжелые металлы в экологическом мониторинге водных систем // Соросовский образовательный журнал. Биология. 1998. № 5. С. 23–29.
2. Мур Дж., Рамамурти С. Тяжелые металлы в природных водах: Контроль и оценка влияния / пер. с англ. М.: Мир, 1987. 288 с.
3. Никаноров А.М., Жулидов А.В. Биомониторинг тяжелых металлов в пресноводных экосистемах. Л.: Гидрометеоиздат, 1991. 310 с.
4. Перельман А.И. Геохимия. М.: Высшая школа, 1979. 423 с.
5. Мильков Ф.Н., Гвоздецкий Н.А. Физическая география СССР. Общий обзор. Европейская часть СССР. Кавказ. М.: Мысль, 1976. 448 с.
6. Duruibe JO, Ogweregbu MOC, Egwuruguru J.N. Heavy metal pollution and human bio-toxic effects // International Journal of Physics Science. 2007. 2(5). P. 112–118.
7. Larned, SAINT, Snelder T., Anvin M., McBride Gee. Qualité de l'eau dans les rivières de Nouvelle-Zélande: état actuel et tendances. // Journal néo-zélandais de la recherche marine et en eau douce. 2016. 50 (3). P. 389–417.
8. Davutluoglu OI, Seckin G, Ersu CB, Yilmaz T, Sari B. Heavy metal content and distribution in surface sediments of the Seyhan River, Turkey. // Journal of Environmental Management. 2011. 92. P. 2250–2259.
9. Superville P.J., Pridzhil E., Magnier A., Lesven L., Gao U., Bayens V. Daily fluctuations of Zn and Pb concentrations in the Defile River due to resuspension of heavily polluted sediments. // Science Total Environment 2014. 470. P. 600–607.
10. Гвоздецкий Н.А. Проблемы изучения карста и практика. М.: Мысль, 1972. 392 с.

11. Войткевич В.Г., Мирошников А.Е., Поваренных А.С., Прохоров В.Г. Краткий справочник по геохимии. Недра, Москва, 1977. 184 с.
12. Унифицированные методы мониторинга фоновое загрязнения природной среды / Под ред. Ф.Я. Ровинского. М.: Гидрометеиздат, 1986. 90 с.
13. Резников А.А., Муликовская Е.П., Соколов И.Ю. Методика анализа природных вод. М., 1970. С. 189–198.
14. Дьяченко В.В. Геохимия и оценка состояния ландшафтов Северного Кавказа: автореф. дис. ... д-ра геогр. наук: 25.00.23. Новороссийск, 2004. 326 с.
15. Панов В.Д., Базельюк А.А., Лурье П.М. Река Терек: Гидрография и режим стока. Ростов-на-Дону: Донской издательский дом, 2015. 606 с.
16. Лепихин А.П. К совершенствованию технологии регламентации антропогенных нагрузок на водные объекты // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2022. № 4. С. 100–102.
17. Веницианов Е.В., Аджиев Г.В., Возняк А.А., Чиганова М.А. Современные проблемы оценки, регулирования и мониторинга качества поверхностных вод // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2018. № 1. С. 47–59. DOI: 10.35567/1999-4508-2018-1-4.
18. Попов А.Н. О неопределенности результатов применения величин ПДК при оценке состояния водного объекта // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2022. № 4. С. 103–127.

REFERENCES

1. Budnikov G.K. Heavy metals in environmental monitoring of water systems. *Soros. Educational Journal. Biology*. 1998. No. 5. P. 23–29 (In Russ.).
2. Moore J., Ramamurti S. Heavy metals in natural waters: Control and assessment of influence / Trans. from English M.: Mir, 1987. 288 p. (In Russ.).
3. Nikanorov A.M., Zhulidov A.V. Biomonitoring of heavy metals in freshwater ecosystems. L.: Gidrometeoizdat, 1991. 310 p. (In Russ.).
4. Perelman A.I. Geochemistry / A.I. Perelman.-M.: Vysshaya shkola [Higher School], 1979. 423 p. (In Russ.).
5. Milkov F.N., Gvozdetsky N.A. Physical geography of the USSR. General overview. The European part of the USSR. Kavkaz. M.: Mysl, 1976. 448 p. (In Russ.).
6. Duruibe JO, Ogweregbu MOC, Egwuruguru JN. Heavy metal pollution and human bio-toxic effects. *International Journal of Physics Science*. 2007. 2(5):112-118.
7. Larned, SAINT, Snelder, T, Anvin, M, McBride, Gee. Qualité de l'eau dans les rivières de Nouvelle-Zélande: état actuel et tendances. *Journal néo-zélandais de la recherche marine et en eau douce*. 2016. 50 (3): 389-417.
8. Davutluoglu OI, Seckin G, Ersu CB, Yilmaz T, Sari B. Heavy metal content and distribution in surface sediments of the Seyhan River, Turkey. *Journal of Environmental Management*. 2011. 92:2250-2259.
9. Superville P.J., Pridzhil E., Magnier A., Lesven L., Gao U., Bayens V. (2014) Daily fluctuations of Zn and Pb concentrations in the Defile River due to resuspension of heavily polluted sediments. *Science Total Environment*. 2014. 470:600-607.
10. Gvozdetsky N.A. Problems of studying karst and practice. Moscow: Mysl [Conception], 1972. 392 p. (In Russ.).
11. Voitkevich V.G., Miroshnikov A.E., Povarennykh A.S., Prokhorov V.G. A brief guide to geochemistry. Nedra, Moscow, 1977. 184 p. (In Russ.).
12. Unified methods of monitoring background pollution of the natural environment / Edited by F.Ya. Rovinsky. M.: Gidrometeoizdat, 1986. 90 p. (In Russ.).
13. Reznikov A.A., Mulikovskaya E.P., Sokolov I.Yu. Methods of analysis of natural waters. M., 1970. P. 189–198. (In Russ.).
14. Dyachenko V.V. Geochemistry and assessment of the state of landscapes of the North Caucasus: dis. doc. geograf. nauk: 25.00.23. Novorossiysk, 2004. 326 p. (In Russ.).
15. Panov V.D., Bazelyuk A.A., Lurie P.M. The Terek River: Hydrography and flow regime. Rostov-on-Don: Don Publishing House, 2015. 606 p.

16. Lepikhin A.P. Towards improving the technology of regulation of anthropogenic loads on water bodies. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2022. No. 4. P. 100–102 (In Russ.).
17. Venitsianov E.V., Adzhienko G.V., Wozniak A.A., Chiganova M.A. Modern problems of assessment, regulation and monitoring of surface water quality. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2018. No. 1. P. 47–59. DOI: 10.35567/1999-4508-2018-1-4 (In Russ.).
18. Попов А.Н. On the uncertainty of the results of the application of MPC values in assessing the state of a water body. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2022. No. 4. P. 103–127 (In Russ.).

Сведения об авторах:

Атабиева Фатимат Адраевна, канд. хим. наук, руководитель испытательного лабораторного центра, ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», Россия, 360030, г. Нальчик, пр-т Ленина, 2; ORCID: 0000-0002-4452-0310; e-mail: atabieva0812@mail.ru

Отарова Асият Салиховна, младший научный сотрудник, испытательный лабораторный центр, ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», Россия, 360030, Нальчик, пр-т Ленина, 2; ORCID: 0000-0001-5623-7793; e-mail: otarova08@mail.ru

About the authors:

Fatimat A. Atabieva, Candidate of Chemical Sciences, Head, Testing Laboratory Center, Vysokogorny Geophysical Institute, pr. Lenina, 2, Nalchik, 360030, Russia; ORCID: 0000-0002-4452-0310; e-mail: atabieva0812@mail.ru

Asiyat S. Otarova, Junior Researcher, Testing Laboratory Center, Vysokogorny Geophysical Institute, pr. Lenina, 2, Nalchik, 360030, Russia; ORCID: 0000-0001-5623-7793; e-mail: otarova08@mail.ru

Поиски и разведка месторождений пресных подземных вод в олигоценовых палеодолинах Южного Зауралья

А.В. Скалин, В.А. Скалин, А.А. Скалин

✉ inform@uralgeoecology.ru, uralgeo@bk.ru

Научно-производственное объединение «Уралгеоэкология», г. Екатеринбург, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. На современных водоразделах Южного Зауралья, находящихся в условиях полуаридного климата, основным источником централизованного водоснабжения являются месторождения олигоцен-четвертичного водоносного горизонта Тобольского артезианского бассейна. **Методы.** Исследован аazonально-интенсивный пресный подземный сток олигоцен-четвертичного водоносного горизонта в палеодолинах на Миасс-Уйском междуречье, а также соленые озера как местные базисы его дренирования. Произведена количественная оценка ресурсного потенциала аazonального стока в палеодолинах. **Результаты.** Доказана взаимосвязь пространственного размещения месторождений пресных подземных вод олигоцен-четвертичного горизонта в палеодолинах с наличием соленых озер. Сформулированы критерии выделения месторождений пресных подземных вод на современных водоразделах. Определены значения модуля эксплуатационных ресурсов пресных подземных вод в олигоценовых палеодолинах. Даны рекомендации по ограничению водоотбора пресных подземных вод с целью предотвращения негативного воздействия на баланс лечебных соленых озер.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: месторождение пресных подземных вод, олигоценовые палеодолины, эксплуатационные ресурсы, Южное Зауралье.

Для цитирования: Скалин А.В., Скалин В.А., Скалин А.А., Поиски и разведка месторождений пресных подземных вод в олигоценовых палеодолинах Южного Зауралья // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2023. № 3. С. 102-113. DOI: 10.35567/19994508_2023_3_7.

Дата поступления 14.02.2023.

SEARCHING AND SURVEYING OF THE SWEET GROUNDWATER DEPOSITS IN OLILOCENE PALEOVALLEYS OF THE SOUTHERN TRANS-URAL

Anatoliy V. Skalin, Vladislav A. Skalin, Anton A. Skalin

✉ inform@uralgeoecology.ru, uralgeo@bk.ru

“Uralgeoekologia” Scientific/production Association, Ekaterinburg, Russia

ABSTRACT

Relevance. At the currently existing watersheds of the southern Trans-Ural in the conditions of semi-arid climate, the Tobol artesian basin Oligocene/Quaternary aquifer deposits are the main source of centralized water supply. **Methods.** We have investigated the azonal/intensive sweet groundwater runoff of the Oligocene/Quaternary aquifer in the paleovalleys at the Miass-Uysk rivers interfluvium, as well as salty lakes as local bases of its drainage. The azonal runoff resources potential in paleovalleys has been quantitatively estimated. **Results.** We have

© Скалин А.В., Скалин В.А., Скалин А.А., 2023

proved the interrelation between spatial localization of the Oligocene/Quaternary aquifer sweet groundwater deposits in the paleovalleys and the salty lakes presence. We have formulated the criteria of identification of the sweet groundwater deposits at the contemporary watersheds. We have determined the values of the sweet groundwater operational resources module in the Oligocene paleovalleys. We have recommended to limit abstraction of sweet groundwater in order to prevent the negative impact on the balance of the medical salty lakes.

Keywords: sweet groundwater deposit, Oligocene paleovalleys, operational resources, Southern Trans-Ural.

For citation: Skalin A.V., Skalin V.A., Skalin A.A. Searching and surveying of the sweet groundwater deposits in Oligocene paleovalleys of the Southern Trans-Ural. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2023. No. 3. P. 102-113. DOI: 10.35567/19994508_2023_3_7.

Received 14.02.2023.

ВВЕДЕНИЕ

Современные водораздельные территории Южного Зауралья находятся в условиях полуаридного климата с годовой суммой осадков до 400 мм. В Курганской области и в юго-восточных районах Челябинской области основным источником водоснабжения населенных пунктов, расположенных на водоразделах, являются пресные подземные воды олигоцен-четвертичного водоносного горизонта (ОВГ) Тобольского артезианского бассейна, входящего в Западно-Сибирский сложный артезианский бассейн.

Для обоснования организации поисковых работ по обнаружению месторождений пресных подземных вод в 1965–1985 гг. производственным геологическим объединением «Уралгеология» была произведена гидрогеофизическая съемка в модификации вертикальных электрических зондирований в масштабе 1:100 000 на площади около 100 тыс. км² территории Зауралья. Эта работа была отмечена Государственной премией. На основе существующей в тот период теории и практики гидрогеологических изысканий, гидрогеофизическая съемка строилась на предпосылке о площадном распространении олигоценовых отложений преимущественно прибрежно-морского генезиса. Опыт проведения поисковых работ показал, что перспективные участки были приурочены, главным образом, к палеодолинам среднего олигоцена, являющимися ложбинами стока и регулирующими емкостями. Такие перспективные участки для производства поисково-разведочных работ источников централизованного водоснабжения с запасами до 2000 м³/сут соответствуют содержанию понятия «месторождение пресных подземных вод» (МППВ).

Предметом исследований на Миасс-Уйском междуречье являлся аazonально-интенсивный пресный подземный сток в олигоценовых прадолинах, а также соленые озера в местах его разгрузки (на примере соленого лечебного озера Горькое-Виктория).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для разработки тактики поисково-разведочных работ использована методология геологоразведочных работ. Пресные подземные воды рассматривались в качестве полезного ископаемого, что в настоящее время носит дискус-

сионный характер в связи с действующей редакцией ФЗ «О недрах» [1]. Выбор методов исследования проведен с ориентацией на опыт работ гидрогеологических аналогов, выбираемых по типизации месторождений, разработанной А.С. Язвиным и Б.В. Боровским [2, 3]. Месторождения пресных подземных вод в олигоценых палеодолинах можно отнести к типу «в ограниченных по площади структурах».

Согласно принципу иерархии, тип можно подразделить на региональные виды по генезису прадолин. Например, целесообразно выделять «североуральский вид» месторождений пресных подземных вод в ледниковых палеодолинах неоплейстоцена или «южнозауральский вид» в речных прадолинах среднего олигоцена на Миасс-Уйском междуречье [4, 5]. Общей поисковой предпосылкой формирования видов месторождений пресных подземных вод является азонально-интенсивный пресный подземный сток в палеодолинах.

Поиски и оконтуривание олигоценых палеодолин целенаправленно не производились в ходе государственной гидрогеофизической съемки Зауралья. Одной из главных причин этого является сложность однозначной интерпретации материалов площадной электроразведки, поскольку изменение минерализации подземных вод ОВГ и увеличение глинистости отложений одинаково проявляются на показателях геоэлектрических полей. Кроме того, по степени изученности на тот период сформировалось представление, что отложения среднего и верхнего олигоцена преимущественно относятся к прибрежно-морской литофации и имеют региональное распространение [6–7]. В этой связи, интерпретация геоэлектрических полей производилась, главным образом, с использованием корреляционной зависимости удельного электрического сопротивления от минерализации подземных вод [8–10]. В качестве исходных данных использованы параметрические вертикальные электрические зондирования вблизи гидрогеологических скважин, в этом случае уравнение регрессии (при коэффициенте корреляции 0,8) имеет следующий вид:

$$\rho = 40 (M_0 + 0,3)^{-1} + 0,8, \quad (1)$$

где ρ – приведенное к условно однородному ОВГ кажущееся электрическое сопротивление, Ом·м;

M_0 – минерализация подземных вод из нижних водоносных слоев ОВГ, г/дм³.

Резистивиметрические наблюдения в пробах воды, выполненные В.Ф. Сомовым [8], при температуре 18 °С и одной и той же концентрации показали, что раствор поваренной соли является низкоомным, а гидрокарбоната натрия – высокоомным, отличаясь в 1,7 раза. Для установления зависимости между минерализацией и химическим составом грунтовых вод ОВГ были взяты 57 проб в конце опытных откачек из 57 кустов в Южном Зауралье [11]. Около большей части данного количества опытных кустов выполнены параметрические ВЭЗ, а остальные пробурены для оценки запасов. При $M_0 < 1,5$ г/дм³ воды относятся к I типу по классификации О.А. Алекина с дополнением Е.В. Посохова [12], при $1,5 < M_0 < 2,1$ г/дм³ – к II типу и при $M_0 > 2,1$ г/дм³ – к типу IIIа. Специфическими солями для первого типа является гидрокарбонат натрия, для второго – сульфат натрия, для типа IIIа – хлорид магния. Вследствие слоистого строе-

ния в ОБГ происходит нарастание минерализации воды от верхних водоносных слоев к нижним. По опытным кустам было установлено, что характерные значения градиентов изменения минерализации воды с глубиной составляют при $M_o < 1$ г/дм³ около 0,01 г/дм³ на 1 м, при $M_o > 1$ г/дм³ около 0,1 г/дм³ на 1 м.

В олигоценовых палеодолинах Южного Зауралья скорость водообмена определяет минерализацию подземных вод ОБГ. Для исследования корреляционной связи между минерализацией (M_o , г/дм³) подземных вод ОБГ и коэффициентом фильтрации (K , м/сут), средневзвешенным по мощности слоев ОБГ, была систематизирована информация по 70 опытным кустовым откачкам из скважин [13]. При коэффициенте корреляции 0,8 получено следующее уравнение регрессии:

$$M_o = (0,7 + 0,7 K)^{-1}. \quad (2)$$

Реликты среднеолигоценовых погребенных речных долин, сохранившиеся от эрозии, не выражены в рельефе и могут иметь ширину 0,5–1 км, длину – около 10 км, мощность песчано-глинистых отложений – до 50 м при геоэлектрических сопротивлениях более 30 Ом·м. Наибольшие значения водопроницаемости (до 200 м²/сут) характеризуют тальвеговые зоны, ширина которых составляет первые десятки метров. Оligocen-четвертичные отложения являются полифациальными, поэтому при смене аллювиальной песчаной фации на озерную или прибрежно-морскую происходит закономерное уменьшение водопроницаемости.

На современных водоразделах территории погребенных среднеолигоценовых речных долин в ограниченных по площади олигоценовых эрозионно-тектонических депрессиях занимают не более 10 %. Например, на Миасс-Уйском междуречье площадью (F) 9729 км² было произведено совмещение гидрогеофизических карт масштаба M 1:100 000 по ОБГ-минерализации (M_o) и мощности (H). В результате установлено, что вероятность обнаружения подземных вод ОБГ с минерализацией до 1,5 г/дм³ составляет 65 % при мощности более 30 м и 20 % при мощности 5–10 м (рис. 1).

Азонально-интенсивный пресный подземный сток из олигоценовых палеодолин на Миасс-Уйском междуречье разгружается в бессточные соленые озера, являющиеся местными базисами дренирования.

В качестве репрезентативного бассейна для гидрологических исследований был выбран водосбор площадью 33 км² бессточного соленого лечебного озера Горькое-Виктория в Щучанском районе Курганской области (рис. 2). Озеро Горькое-Виктория имеет площадь зеркала около 5 км², минерализацию воды – около 36 г/дм³. Рапа и грязи озера применяются для лечения заболеваний опорно-двигательного аппарата. Озеро Горькое-Виктория находится под многолетними наблюдениями гидрометеорологической службы. Оценка азонально-интенсивного стока ОБГ на водосборе бессточного озера Горькое-Виктория проведена методом составления многолетнего водного баланса озерной котловины в среднемноголетнем измерении:

$$Q_{\text{поА}} = Q_{\text{пов}} + W_{\text{ос}} + W_{\text{сн}} - W_{\text{п}}, \quad (3)$$

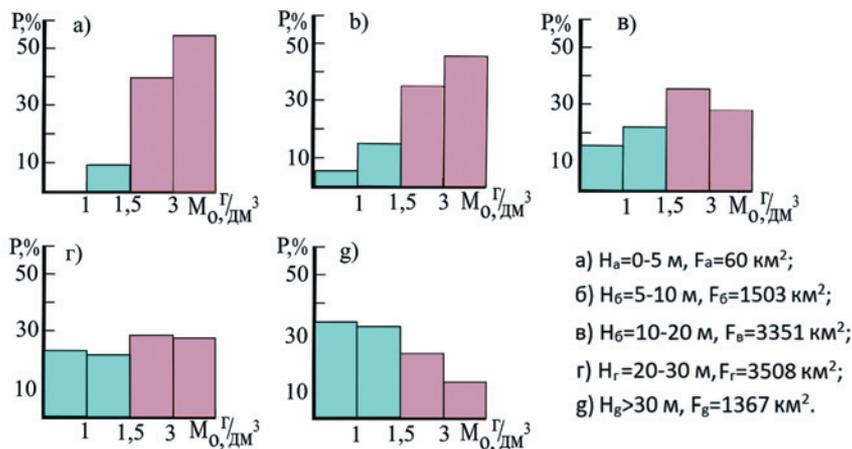


Рис. 1. Гистограммы выборок, полученных при совмещении гидрогеофизических карт минерализации (M_o) подземных вод ОВГ и карт мощности (H) на Миасс-Уйском междуречье.
 Fig. 1. Bar chats of samplings obtained in superposition of the hydro/physical maps of the Oligocene/Quaternary aquifer water minerarlization (M_o) and the capacity maps (H) at the Miass-Uysk interfluve.

где $Q_{\text{под}}$ – общий объем подземного питания озера, $982 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{год}$;
 $Q_{\text{пов}}$ – объем поверхностного притока в озеро, $363 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{год}$;
 $W_{\text{ос}}$ – объем выпадающих осадков на водное зеркало (за теплый период года), $1515 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{год}$;
 $W_{\text{сн}}$ – объем воды в снеге на льду озера, $425 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{год}$;
 $W_{\text{п}}$ – объем испарения с расчетной площади зеркала озера, $3285 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{год}$.

Элементы водного баланса определяли по данным непосредственных наблюдений на озерном посту и близлежащей метеостанции. Примем допущение об основном участии в подземном питании этого озера грунтовых вод, поскольку олигоцен-четвертичный водоносный горизонт отделяется от первого межпластового горизонта в опоках нижнего эоцена относительно водупорными глинами мощностью более 60 м [14]. С некоторым приближением можно считать, что площади подземного и поверхностного водосборов (без учета реальной площади среднеолигоценовой прадолины) совпадают. Не рассматривая в деталях эту известную методику гидрологических расчетов, разработанную В.А. Всеволожским [14], дадим основные выводы. Модуль азонально-интенсивного годового подземного стока ОВГ 50 % обеспеченности, определенный методом многолетнего водного баланса озер, составляет $0,9 \text{ дм}^3/\text{с} \cdot \text{км}^2$. Для сравнения, годовая норма зонального грунтового стока – $0,01-0,3 \text{ дм}^3/\text{с} \cdot \text{км}^2$.

Целесообразно отметить, что с позиции социально-экологического критерия необходимо ограничивать водозабор пресных подземных вод на водосборе лечебного озера Горькое-Виктория во избежание его высыхания до уровня не более величины стока для года 95 % обеспеченности.

Для определения гидрогеодинамическим методом модуля азонально-интенсивного пресного подземного стока ОВГ в олигоценовой палеодолине на

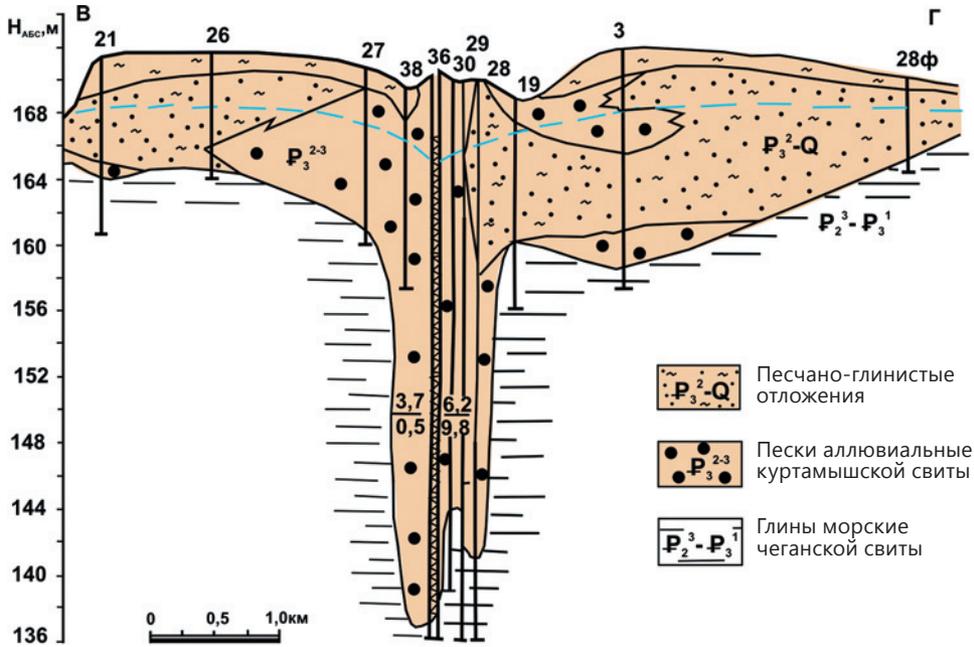
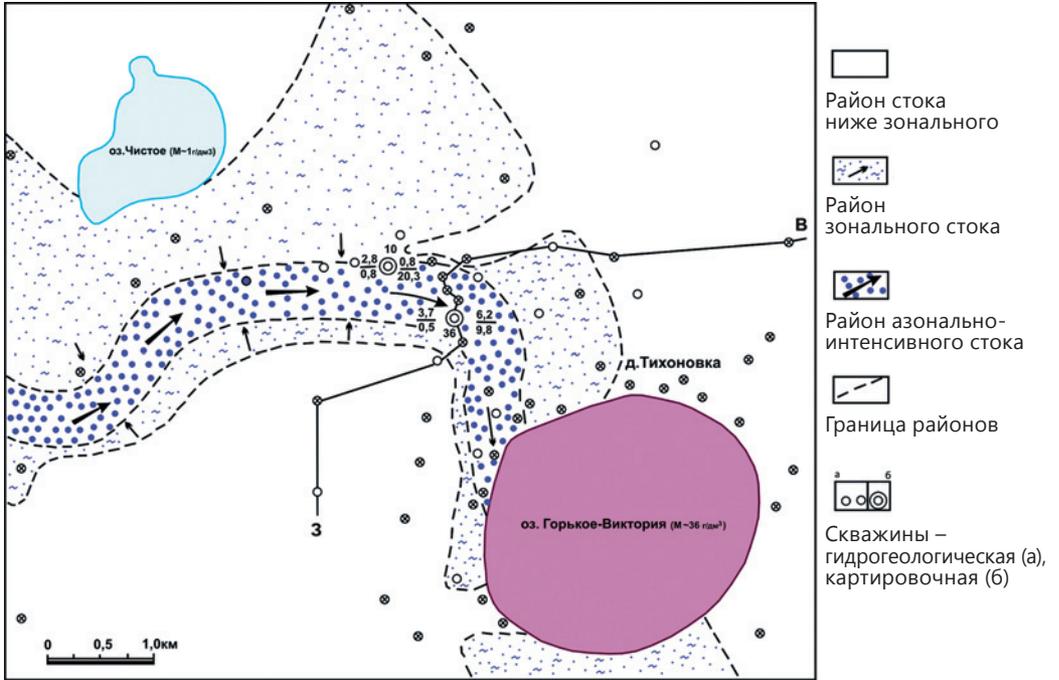


Рис. 2. Гидрогеологическая схема районирования по условиям формирования подземного стока ОВГ в олигоценовой палеодолине и за ее бровками на водосборе озера Горькое-Виктория.

Fig. 2. The hydro/geological scheme of zoning in terms of the Oligocene/Quaternary aquifer groundwater runoff formation conditions in an Oligocene paleovalley and outside its edges at the Lake Gorkoye-Victoria catchment.

водосборе озера (рис. 2) был проведен комплекс разведочных работ – буровых, геофизических исследований скважин (электрокаротаж и расходомерия при наливе), опытно-фильтрационных работ.

Технология разглинзации сетчатых фильтров скважин включала солянокислотную обработку, поскольку в разрезе ОВГ были обнаружены конкреции кальцита и сидерита. При воздействии 10 % раствором соляной кислоты на карбонатные стяжения происходит реакция выделения углекислого газа, который «взрывает» глинистую корку на стенках скважин и фильтров, устраняя «скин-эффект». Так, например, в центральной скважине 36 до обработки прифильтровых зон соляной кислотой удельный дебит откачки составлял $0,2 \text{ дм}^3/\text{с}\cdot\text{м}$, а через 34 сут после экспресс-налива $0,7 \text{ м}^3$ 10 % раствора HCl и откачки эрлифтом увеличился до $0,6 \text{ дм}^3/\text{с}\cdot\text{м}$.

По результатам разведки ОВГ в тальвеговой части олигоценовой палеодолины установлены следующие параметры: геозлектрическое сопротивление $65 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; приведенный коэффициент фильтрации $3,8 \text{ м/сут}$; минерализация подземной воды $0,45 \text{ г/дм}^3$; на бровке эти показатели составили $32 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $1,1 \text{ м/сут}$ и $0,79 \text{ г/дм}^3$ соответственно.

Закономерное изменение геозлектрических и гидрогеологических параметров от тальвега палеодолины к ее бровкам позволяет схематизировать в плане в виде пласта-полосы с условными границами второго рода (с постоянным расходом). Перспективный участок в палеодолине озера Горькое-Виктория получил авторское наименование МППВ «Виктория», относящееся к южно-зауральскому виду.

Исследование геофильтрационной схемы ОВГ в разрезе производили на основе классификации реальных неупорядоченно-слоистых разрезов по двум критериям: параметру перетекания (В) и средневзвешенному по мощности слоев коэффициенту фильтрации (К). По этим критериям выделяется три класса разрезов ОВГ: первый класс при $V \leq 102$, $K \geq 10 \text{ м/сут}$; второй – при $102 < V \leq 104 \text{ м}$ и $100 \leq K < 10 \text{ м/сут}$; третий – при $V > 104 \text{ м}$, $10^{-1} < K < 100 \text{ м/сут}$ [13]. С учетом данной классификации и параметрической характеристики полей в ОВГ выполнялась гидрогеодинамическая схематизация разрезов для интерпретации кустовых опытных откачек. Для 1 класса разрезов может быть принята схема безнапорного однородного пласта, для 2 класса – безнапорного двухслойного пласта, для 3 класса – схема напорного изолированного пласта.

По результатам геофизических площадных и каротажных исследований был выбран в качестве рабочей гидрогеодинамической модели в разрезе МППВ «Виктория» безнапорный (при кратковременном возмущении – субнапорный) двухслойный пласт, который предполагает сооружение ярусного куста скважин 36 (рис. 3).

При опытных кустовых откачках из двухслойного пласта возникают геофильтрационные процессы, теоретически обоснованные В.А. Мироненко и В.М. Шестаковым [15]. В модели двухслойного пласта нижний водоносный слой определяет коэффициент водопроницаемости, а верхний, слабопроницаемый, – коэффициент гравитационной водоотдачи. Динамика водо-

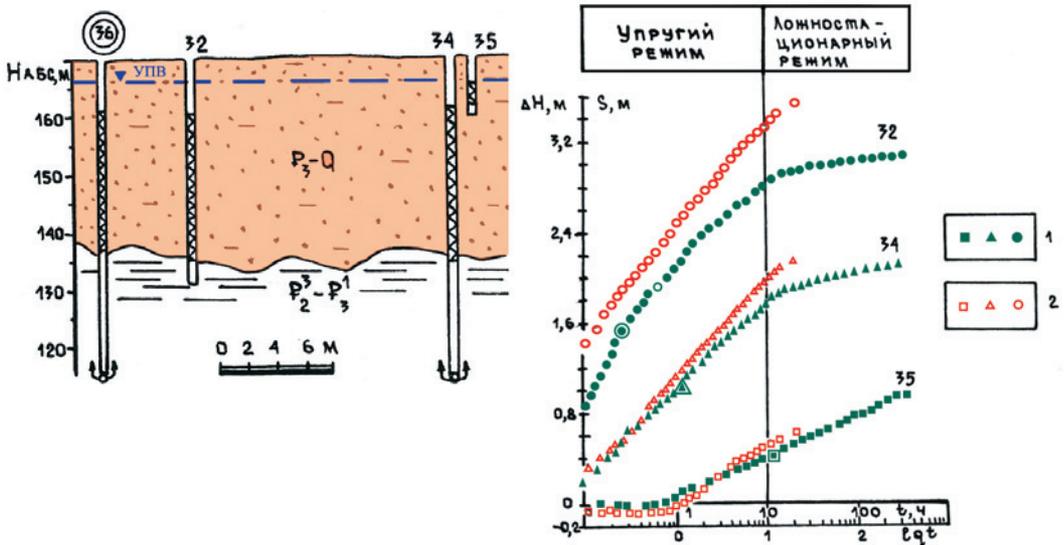


Рис. 3. Схематический гидрогеологический разрез ярусного куста 36 и графики временного прослеживания понижений (1) и восстановлений (2) уровней в верхних и нижних водоносных слоях ОВГ на МППВ «Виктория».

Fig. 3. The schematic hydrological section of tier group 36 and graphs of temporal monitoring of reductions (1) and restorations (2) of head of water in upper and lower Oligocene/Quaternary aquifer at "Victoria" sweet groundwater deposit.

отдачи от упругой до гравитационной подавляет влияние плановых границ, компрессионный гистерезис глинистых слоев при снижении уровней обуславливает заниженные значения коэффициента водопроводимости по восстановлению уровней.

На этапе упругого режима при опытной откачке из куста 36 (рис. 3) были определены следующие данные: дебит $501 \text{ м}^3/\text{сут}$; понижение в центральной скважине 36 составило 9,5 м; мощность ОВГ 30 м; коэффициент водопроводимости $115 \text{ м}^2/\text{сут}$; приведенный коэффициент фильтрации $3,8 \text{ м}/\text{сут}$; фактор перетекания 490 м; коэффициент уровнепроводности $1000 \text{ м}^2/\text{сут}$; коэффициент гравитационной водоотдачи 0,1. По гидрогеодинамическим расчетам модуль аazonально-интенсивного стока ОВГ для площади олигоценовой палеодолины МППВ «Виктория» (рис. 2) составил около $0,9 \text{ дм}^3/\text{с} \cdot \text{км}^2$, что согласуется с его величиной, определенной балансовым методом.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты исследований на Миасс-Уйском междуречье позволяют сформулировать поисковые предпосылки обнаружения месторождений питьевых подземных вод в ОВГ южнозуральского вида – геофизические, литолого-фациальные и гидрологические.

Геофизическая поисковая предпосылка – это наличие взаимосвязанных аномалий трех полей: геоэлектрического (при величинах удельного электрического сопротивления ОВГ более 30 Ом·м, гидрогеохимического (при мине-

рации менее 1 г/дм^3) и геофильтрационного (при значениях приведенного коэффициента фильтрации более 1 м/сут). Литолого-фациальная поисковая предпосылка – картирование палеодолин среднего олигоцена, где мощность олигоцен-четвертичных отложений составляет более 30 м , в разрезе которых мощность песчаных аллювиальных слоев – более 60% . Гидрологическая поисковая предпосылка – водосборы непересыхающих соленых озер с площадью водного зеркала более 3 км^2 . В условиях полуаридного климата Южного Зауралья именно такие озера служат местными базами дренирования аazonально-интенсивного стока пресных подземных вод ОВГ, характеризуемые модулем стока около $0,9 \text{ дм}^3/\text{с}\cdot\text{км}^2$.

В соленых озерах часто образуются лечебные грязи. В каждом конкретном случае необходимо решать, что ценнее – месторождение подземных питьевых вод в ОВГ или лечебно-оздоровительный водный объект. При ограниченном водоотборе, не превышающем аazonально-интенсивный сток для года 95% обеспеченности, уменьшается вероятность высыхания лечебных озер Южного Зауралья. К числу таких озер относится знаменитое своими лечебными грязями озеро Медвежье на Тобол-Ишимском междуречье в Петуховском районе Курганской области (площадь водосбора 409 км^2 , площадь водного зеркала 63 км^2 , минерализация воды – около 301 г/дм^3). Часть аazonально-интенсивного пресного подземного стока ОВГ в олигоценной палеодолине, питающего озеро Медвежье перехватывается водозабором МППВ «Утчанское», что требует гидрогеоэкологического регулирования при его эксплуатации.

В южном направлении, на Уй-Тогузакском междуречье, где климат более засушливый, происходит закономерное уменьшение величины модуля эксплуатационных запасов пресных безнапорных подземных вод, например, на Магнайском МППВ – до $0,6 \text{ дм}^3/\text{с}\cdot\text{км}^2$ [16].

При оценке запасов пресных подземных вод ОВГ Тобольского артезианского бассейна рекомендуется применять в качестве рабочей модели в разрезе – схему безнапорного двухслойного пласта. Анализ опыта эксплуатации водозаборов ОВГ Западно-Сибирского мега-бассейна, расположенных севернее, в климатической зоне избыточного увлажнения, свидетельствует об обоснованности выбора схемы двухслойного пласта в качестве расчетной [17, 18].

Выполненные исследования доказывают ошибочность двух гипотез образования соленых и рассольных озер Южного Зауралья. По гипотезе А.И. Ковальчука предполагалось, что решающая роль в питании соленых озер принадлежит вероятной элизионной разгрузке минерализованных ($3\text{--}10 \text{ г/дм}^3$) вод, которые по своему генезису соответствуют седиментогенным водам [19]. Однако с этой позиции сложно объяснить наличие пресных родников вблизи уезов соленых озер, например, у озера Горькое-Виктория (рис. 2). По гипотезе К.Н. Тележниковой предполагалось, что в питании соленых озер принимает вероятное участие разгрузка глубинных флюидов, имеющих мантийную природу и поступающих через тектонические разломы в фундаменте [20]. При обследовании прибрежной полосы озера Горькое-Виктория и предполагаемых «жерл грязевых вулканов» установлено, что это остатки ям от солеварения, которым занимались здесь в XIX в. жители д. Тихоновка.

Определение количественных характеристик величин зонального и азонального стока, характеризующих условия локализации месторождений пресных и слабосоленых вод, и оценка их ресурсного потенциала могут представлять интерес при проведении государственных гидрогеологических съемок масштаба 1: 200 000 в Зауралье [21]. Основой для проектирования поисково-разведочных работ в Зауралье должны быть карты районирования по условиям формирования ресурсов питьевых подземных вод разных типов месторождений, которые предлагается называть «гидрогеническими» (по аналогии с металлогеническими картами) [11, 13].

ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований установлены закономерности формирования эксплуатационных ресурсов пресных и слабосоленых вод месторождений южнозауральского вида с запасами до 2 тыс. м³ в олигоцен-четвертичном водоносном горизонте Тобольского артезианского бассейна. Это позволяет с позиций геолого-экономического и социально-экологического критериев проектировать поисково-разведочные работы для водоснабжения населенных пунктов на современных водоразделах в Курганской и Челябинской областях.

Выявленные поисковые предпосылки месторождений питьевых подземных вод в олигоценовых палеодолинах указывают на вероятность их обнаружения на водосборах непересыхающих соленых озер с площадью водного зеркала более 3 км². В случае обнаружения лечебных грязей в соленых озерах требуется ограничивать водозабор пресных подземных вод из олигоценовых палеодолин, являющихся регулирующими емкостями и ложбинами азонально-интенсивного стока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Язвин А.Л. Еще раз о «подземных водах и полезных ископаемых» // Разведка и охрана недр. 2020. № 5. С. 7–12.
2. Боровский Б.В., Дробноход Н.И., Язвин А.С. Оценка запасов подземных вод. Киев: Высшая школа, 1989. 407 с.
3. Боровский Б.В., Самсонов Б.Г., Язвин А.С. Методика определения параметров водоносных горизонтов по данным откачек. М.: Недра, 1979. 326 с.
4. Скалин А.А. Поиски и разведка месторождений подземных вод в ледниковых палеодолинах Северного Урала // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2018. № 6. DOI: 10.35567/1999-4508-2018-6-2.
5. Стефановский В.В., Плиоцен и квартал восточного склона Урала и Зауралья. Екатеринбург: ИГГ Уро РАН, 2006. 223 с.
6. Сигов А.П. Металлогения мезозоя и кайнозоя Урала. М.: Недра, 1969. 296 с.
7. Гидрогеология СССР. Т. XIV. Урал. М.: Недра, 1972. 648 с.
8. Сомов В.Ф., Демидовцев А.С. Поиски пресных вод геофизическими методами // Разведка и охрана недр. 1987. № 1. С. 51–55.
9. Мелькановичский И.М., Ряполова В.А., Хордикайнен М.А., Методика геофизических исследований при поисках и разведке месторождений пресных вод. М.: Недра, 1982. 239 с.
10. Зинченко В.С. Петрофизические основы гидрогеологической и инженерно- геологической интерпретации геофизических данных: уч. пособие. М.-Тверь: Изд-во АИС, 2005. 392 с.
11. Скалин А.В. Отчет о региональной оценке эксплуатационных запасов пресных подземных вод Тобольского артезианского бассейна на площадях Курганской, Свердловской и Челя-

- бинской областей / Уралгидроэкспедиция Уральского производств. геолог. объединения. Свердловск. 1987.
12. Посохов Е.В. Общая гидрогеохимия. Л.: Недра, 1975. 208 с.
 13. Скалин А.В. Формирование и разведка месторождений пресных подземных вод в олигоценных долинах Зауралья: автореф. дис. ... канд. геол.-минер. наук. М.: ВСЕГИНГЕО, 1987. 20 с.
 14. Штенгелов Р.С. Формирование и оценка эксплуатационных запасов пресных подземных вод. М.: Недра, 1988. 231 с.
 15. Мироненко В.А., Шестаков В.М., Теория и методы интерпретации опытно-фильтрационных работ. М.: Недра, 1986. 240 с.
 16. Дейнека В.К. Гидрогеология Торгайского прогиба. Костанай, 2005. 220 с.
 17. Палкин С.В. Палкин А.С. Результаты мониторинга подземных вод на Северо-Комсомольском месторождении // Разведка и охрана недр. 2005. № 11. С. 51–54.
 18. Тагильцев В.С. Гидрогеодинамические основы рациональной эксплуатации водозаборов и охраны подземных вод в нефтедобывающих районах Западной Сибири: автореф. дис. ... канд. геол.- минер. наук. Екатеринбург, 2013. 22 с.
 19. Ковальчук А.И. Вдовин Ю.П., Козлов А.В. Формирование химического состава подземных вод Зауралья. М.: Наука, 1980. 184 с.
 20. Тележникова К.Н. Формирование минеральных озер южной части Западно-Сибирской низменности: автореф. дис. ... канд. геол.-минер. наук. Свердловск, 1973. 42 с.
 21. Елохина С.Н., Жуковская Е.П., Черепанова Е.Р., Киндлер А.А., Оценка ресурсов подземных вод при создании комплекта карт гидрогеологического содержания масштаба 1: 200 000 г. Челябинска // Разведка и охрана недр. 2022. № 4. С. 43–49.

REFERENCES

1. Yazvin A.L. Once again about “groundwater and minerals”. *Razvedka i okhrana nedr [Survey and protection of subsoils]*. 2020. No. 5. P. 7–12 (In Russ.).
2. Borevskiy V.V., Drobnokhod N.I., Yazvin L.S. Assessment of the groundwater reserves. Kiev: Vysshaya shkola [Higher education institutions], 1989. 407 p. (In Russ.).
3. Borevskiy V.V., Samsonov B.G., Yazvin L.S. Methods of determination of the aquifers parameters in terms of the pump-down data. M.: Nedra, 1979. 326 p. (In Russ.).
4. Skalin A.A. Searching and surveying of groundwater deposits in glacial paleovalleys of the Northern Ural. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2018. No. 6. DOI: 10.35567/1999-4508-2018-6-2 (In Russ.).
5. Stefanovskiy V.V. Pliocene and quarter of the Ural and Transural eastern slope. Ekaterinburg: IGG Uro RAN, 2006. 223 p. (In Russ.).
6. Sigov A.P. Metallogeny of the Ural Age of Reptiles and Age of Mammals. M.: Nedra, 1969. 296 p. (In Russ.).
7. Hydro/ecology of the USSR. Vol. XIV. Ural. M.: Nedra, 1972. 648 p. (In Russ.).
8. Somov V.F., Demidovtsev A.S. Search for sweet waters with geo/physical methods. *Razvedka i okhrana nedr [Survey and protection of subsoils]*. 1987. No. 1. P. 51–55 (In Russ.).
9. Melkanovskiy I.M., Ryapolova V.A., Khordikainen M.A. Methods of geo/physical studies in researching and surveying of sweet water deposits. M.: Nedra, 1982. 239 p. (In Russ.).
10. Zinchenko V.S. Petro/physical foundations of the hydro/geological and engineering/geological interpretation of geo/physical data: a manual. M.-Tver: Izd-vo AIS, 2005. 392 p.
11. Sklalin A.V. The report on regional estimation of the Tobol artesian basin sweet groundwater operational reserves on the territories of Kurgan, Sverdlovsk and Chelyabinsk oblasts. *Uralgidroekspeditziya of the Ural Production Geological Association*. Sverdlovsk. 1987.
12. Posokhov E.V. General hydro/geo/chemistry. L.: Nedra, 1975. 208 p.
13. Sklalin A.V. Formation and surveying of the sweet groundwater deposits in Oligocene valleys of the Transural: an abstract of the candidate's thesis on geological/mineralogical sciences. VSEGINGEO. M. 1987. 20 p.
14. Shtengelov R.S. Formation and estimation of operational reserves of sweet groundwater. M.: Nedra, 1988. 231 p.

15. Mironenko V.A., Shestakov V.M. The theory and methods of interpretation of the experimental filtration operations. M.: Nedra, 1986. 240 p.
16. Deyneka V.K. Hydrogeology of the Torgaysk deflection. Kostanay, 2005. 220 p.
17. Palkin S.V., Palkin A.S. Results of the groundwater monitoring at the Severo-Komsomolsk deposit. *Razvedka i okhrana nedr [Survey and protection of subsoils]*. 2005. № 11. С. 51–54.
18. Tagiltsev V.S. Hydro/geo/dynamic foundations of the water intakes rational usage and groundwater protection in the petrol/mining areas of the Western Siberia: an abstract of the candidate's thesis on geological/mineralogical sciences. Ekaterinburg, 2013. 22 p.
19. Kovalchuk A.I., Vdovin Y.P., Kozlov A.V. Formation of the Transural groundwater chemical composition. M.: Nedra, 1980. 184 p.
20. Telzhnikova T.N. Formation of the mineral lakes of the southern part of the Western-Siberian Plain: an abstract of the candidate's thesis on geological/mineralogical sciences. Sverdlovsk. 1973. 42 p.
21. Yelokhina S.N., Zhukovskaya E.P., Cherepanova E.R., Kindler A.A. The groundwater reserves estimation in composing a set of the Chelyabinsk hydrogeological maps of the 1:200 000 scale. *Razvedka i okhrana nedr [Survey and protection of subsoils]*. 2022. No. 4. P. 43–49.

Сведения об авторах:

Скалин Анатолий Владимирович, канд. геол.-минерал. наук, генеральный директор, НПО «Уралгеоэкология», Россия, 620027, г. Екатеринбург, ул. Мельковская, 9; e-mail: inform@uralgeoecology.ru, uralgeo@bk.ru.

Скалин Владислав Анатольевич, канд. экон. наук, коммерческий директор, НПО «Уралгеоэкология», Россия, 620027, г. Екатеринбург, ул. Мельковская, 9; e-mail: inform@uralgeoecology.ru, uralgeo@bk.ru.

Скалин Антон Анатольевич, технический директор, НПО «Уралгеоэкология», Россия, 620027, г. Екатеринбург, ул. Мельковская, 9; e-mail: inform@uralgeoecology.ru, uralgeo@bk.ru.

About the authors:

Anatoliy V. Skalin, Candidate of Geological/mineralogical Sciences, Director General, "Uralgeoekologiya", ul. Melkovskaya, 9, Ekaterinburg, 620027, Russia; e-mail: inform@uralgeoecology.ru, uralgeo@bk.ru

Vladislav A. Skalin, Candidate of Economic Sciences, Commercial Director, "Uralgeoekologiya", ul. Melkovskaya, 9, Ekaterinburg, 620027, Russia; e-mail: inform@uralgeoecology.ru, uralgeo@bk.ru

Anton A. Skalin, Technical Director, "Uralgeoekologiya", ul. Melkovskaya, 9, Ekaterinburg, 620027, Russia; e-mail: inform@uralgeoecology.ru, uralgeo@bk.ru

Экология водных систем: применение ингибиторов коррозии для очистки сточных вод

Г.Б. Браяловский , А.Ф. Никифоров , О.Б. Насчетникова ,
Е.В. Мигалатий 

✉ g.b.braialovsky@urfu.ru

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н.Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Системы открытого горячего водоснабжения населенных пунктов Свердловской области подвергаются интенсивной кислородной коррозии, особенно при отсутствии деаэрационного оборудования. Коррозионные процессы в системах водоснабжения имеют серьезные экологические последствия, т. к. продукты коррозии вызывают загрязнение водных объектов. В статье рассмотрена возможность применения ингибиторов коррозии на основе комплексов нитрилотриметилфосфоновой кислоты (НТФ) с цинком и магнием для обработки воды в системах горячего водоснабжения. **Методы.** Процессы замедления коррозии и осадкообразования отработывали на воде р. Чусовой. Оценка скорости коррозии проведена методом поляризационного сопротивления. Выполнены эксперименты по изучению влияния различных параметров на коррозионные процессы. **Результаты.** Обнаружена высокая эффективность применения соединений на основе НТФ в блокировке процессов коррозии и осадкообразования в системах горячего водоснабжения. Установлены оптимальные дозы реагентов для обработки воды (р. Чусовая). Определена скорость образования защитной пленки на поверхности металла, а также установлено снижение выноса продуктов коррозии в сточные воды.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: водные ресурсы, коррозия, осадкообразование, ингибиторы коррозии, водоснабжение.

Для цитирования: Браяловский Г.Б., Никифоров А.Ф., Насчетникова О.Б., Мигалатий Е.В. Экология водных систем: применение ингибиторов коррозии для очистки сточных вод. // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2023. № 3. С. 114-122. DOI: 10.35567/19994508_2023_3_8.

Дата поступления 26.12.2022.

ECOLOGY OF AQUATIC SYSTEMS: APPLICATION OF CORROSION INHIBITORS FOR WASTE WATER TREATMENT

Georgy B. Brayalovsky , Olga B. Naschetnikova , Aleksandr F. Nikiforov ,
Evgeniy V. Migalatiy 

✉ g.b.braialovsky@urfu.ru

B.N.Yeltsin Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

ABSTRACT

Relevance. The Sverdlovsk Oblast open hot water supply systems experience active oxygen corrosion, in particular, in the absence of de-aeration equipment. Corrosion

processes in any water supply systems produce serious environmental consequences as the corrosion products contaminate water bodies. The article deals with the possibility of using corrosion inhibitors based on nitrilotrimethylphosphonic acid (NTP) complexes with zinc and magnesium to treat water in hot water supply systems. **Methods.** We studied the corrosion/sedimentation processes retarding on the Chusovaya River water. To estimate the corrosion rate we applied the polarization resistance method. We have carried out experiments to study the various parameters impact upon the corrosion processes. **Results.** We have stated high effectiveness of the NTF-based compounds application in inhibition of the corrosion and sedimentation processes in hot water supply systems. The optimal reagent doses to treat water (the Chusovaya River) have been determined. We have determined the rate of the protective film formation on a metal surface, as well as have proved the decrease of the corrosion products discharge with wastewaters.

Keywords: corrosion, sedimentation, corrosion inhibitors, NTF, hot water supply.

For citation: Brayalovskiy G.B., Naschetnikova O.B., Nikiforov A.F., Migalatiy E.V. Ecology of aquatic systems: Application of corrosion inhibitors for waste water treatment. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, management*. 2023. No. 3. P. 114-122. DOI: 10.35567/19994508_2023_3_8.

Received 26.12.2022.

ВВЕДЕНИЕ

Важнейшим видом загрязнения водных экосистем являются продукты коррозии [1]. Коррозия – сложный физико-химический процесс. В ее основе лежит электрохимическое растворение металлов и сплавов. В процессе коррозии одновременно протекают как минимум две реакции – окисления и восстановления. Если одну из них по какой-то причине удастся затормозить, процесс коррозии существенно замедляется и металл становится коррозионноустойчим.

Коррозия в системах теплоснабжения (котлах, теплообменных установках, трубах) протекает с высокой скоростью. Элементы из углеродистой стали, подвергаясь действию горячей воды (50 °С и выше), склонны к язвенной коррозии – формированию коррозионных каверн и свищей. После образования рыхлой, незащитной ржавчины (гидроксида железа) на поверхности стали образуются так называемые пары неравномерной аэрации – области с повышенным и пониженным подводом кислорода. Эти пары начинают работать как локальные гальванические элементы. Области с пониженной аэрацией (доставка кислорода затруднена) выступают в качестве анодов, которые растворяются и образуют язвы.

В настоящее время реагентная обработка воды является наиболее эффективным и доступным методом борьбы с коррозионными процессами в связи с относительно невысокими капитальными затратами, при этом узлы приготовления и дозирования реагентов просты и надежны в эксплуатации.

Начиная с 1980-х годов в практике применения реагентов в качестве ингибиторов коррозии стали широко использоваться органофосфонаты (ОФ). Тенденции в области их создания и применения подробно рассмотре-

ны в работе [2]. Рядом нормативных документов рекомендовано использование реагентов на основе ОФ в системах теплоснабжения и горячего водоснабжения^{1,2,3,4}.

В последние годы всесторонне исследуются известные и зарекомендовавшие себя ингибиторы – комплексоны в ряду азотсодержащих фосфоновых кислот НТФ: этилендиаминтетра-ЭДТФ, диэтилентриаминпента-ТПФ, гексаметилендиаминтетра-ГМДТФ, метилфосфоновые кислоты и др. и композиции на их основе [3–20]. Продолжающиеся исследования НТФ в качестве ингибитора многоцелевого назначения свидетельствуют о практической значимости реагента. В этом плане перспективными соединениями на основе НТФ являются комплексоны цинка (Zn-НТФ) и магния (Mg-НТФ). Преимущество комплексонов (Mg-НТФ) перед реагентами (Zn-НТФ) заключается в том, что ПДК цинка и магния для водоемов рыбохозяйственного назначения составляет 0,01 мг/л и 40 мг/л соответственно. Применение реагентов на основе магния при их сбросе на очистные сооружения уменьшает риск негативного воздействия на биотические сообщества водных объектов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование по снижению отложений и коррозионных процессов методом использования ингибиторов проводили на р. Чусовой. Общая жесткость воды – 1,4 мг-экв/л, кальциевая жесткость – 0,8 мг-экв/л, щелочность – 1,0 мг-экв/л. Учитывая качество воды источника водоснабжения, возможность применения ингибиторов на основе органофосфонатов исследовали при температуре 60–90 °С и времени экспозиции 180 мин. В качестве ингибиторов коррозии использовали композиционные составы, состоящие из НТФ и ее комплексонов с цинком и магнием. Композиции получали при мольном соотношении НТФ:Ме–2,5:1 путем растворения соответствующих навесок оксидов цинка и магния в 2,5 % растворе НТФ.

Исследования проводили на лабораторной установке, представленной на рис. 1. По завершению эксперимента отложения на теплообменнике растворяли 0,1н соляной кислотой, нейтрализовали остаточную кислоту щелочью. Количество карбоната кальция в теплообменнике определяли по стандартной методике комплексонометрическим методом.

Скорость коррозии контролировали в течение всего эксперимента (интервал 30 мин) с помощью коррозиметра «Эксперт-004» методом измерения поляризационного сопротивления. Эффективность ингибирования коррозии и солеотложений рассчитывали по формуле:

¹ Руководство по контролю качества питьевой воды. Т. 1. Женева. Всемирная организация здравоохранения, 1994. 257 с.

² СНиП 41-02-2003. Тепловые сети. М.: ФГУП ЦПП, 2005. 38 с.

³ СП 41-104-2000. Проектирование автономных источников теплоснабжения. М.: ГУ П ЦПП, 2000. 16 с.

⁴ МУ 1-321-03. Методические указания по коррекционной обработке питательной воды паровых котлов, подпиточной воды систем теплоснабжения, водогрейных котлов комплексоноватами ОЭДФ-Zn, НТФ-Zn. Ростов-на-Дону, 2003. 20 с.

$$Z = \frac{П - П_{инг}}{П} \cdot 100 \%,$$

где $П$ – количество отложений, мг/скорость коррозии в контрольном опыте, мм/год;
 $П_{инг}$ – количество отложений, мг/скорость коррозии в опытах с реагентом, мм/год.

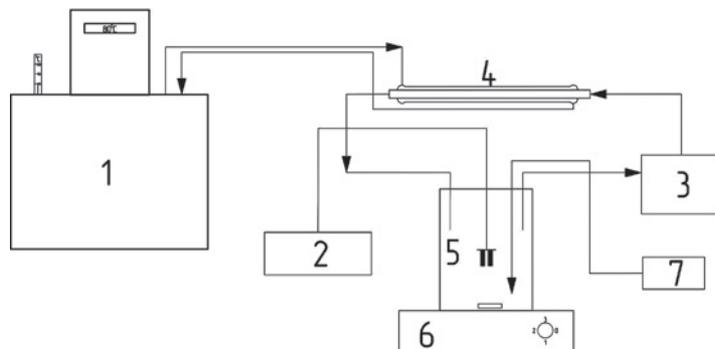


Рис. 1. Схема установки одновременного определения скорости коррозии и осадкообразования: 1 – термостат; 2 – коррозиметр; 3 – перистальтический насос; 4 – теплообменник; 5 – емкость с исследуемой водой; 6 – магнитная мешалка; 7 – компрессор.

Fig. 1. Scheme of installation for simultaneous determination of the corrosion and sedimentation rate: 1 – thermostat, 2 – corrosionmeter, 3 – peristaltic pump, 4 – heat exchanger, 5 – tank with test water, 6 – magnetic stirrer, 7 – compressor.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты опытов по изучению влияния реагентов Zn-НТФ и Mg-НТФ на процесс осадкообразования на стеклянном теплообменнике установки (рис. 1) представлены в таблице. Очевидно, что применение даже минимальных концентраций комплексонов (0,5–1 мг/л) позволяет практически полностью предотвратить процесс осадкообразования.

Таблица. Ингибирование осадкообразования

Table. Inhibition of sedimentation

Реагент	Концентрация, мг/л	Температура, °С	Количество отложений, мг	Эффективность, %
Контроль (без ингибитора)	–	60	0,8	–
	–	70	1,1	–
	–	80	1,2	–
	–	90	1,6	–
Zn-НТФ, Mg-НТФ	0,5	60	–	близка к 100
	0,5	70	–	близка к 100
	1,0	80	–	близка к 100
	1,0	90	–	близка к 100

Зависимость скорости коррозии от времени экспозиции (времени контакта раствора со стальными электродами) показана на графике (рис. 2). Установлено, что образование защитной пленки на поверхности металла у цинкового комплексоноват происходит в первые 60 мин, у магниевого реагента защитная пленка формируется в равных условиях за 90 мин. Полученные данные сви-

детельствуют о том, что цинковый комплексонат на поверхности металла образуется с более высокой скоростью, чем магниевый. Однако по своей эффективности магниевый комплексонат практически не уступает его цинковому аналогу. В пользу этого вывода свидетельствует внешний вид электродов по окончании экспозиции (рис. 3).

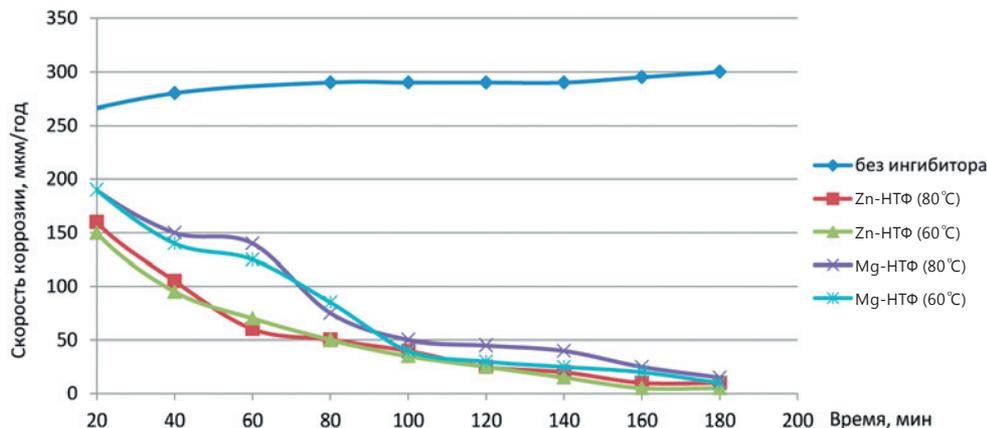


Рис. 2. Зависимость скорости коррозии от времени экспозиции: концентрация Zn-НТФ – 20 мг/л; концентрация Mg-НТФ – 20 мг/л.
 Fig. 2. Dependence of corrosion rate on exposure time. The concentration of Zn-NTP is 20 mg/l, the concentration of Mg-NTP is 20 mg/l.

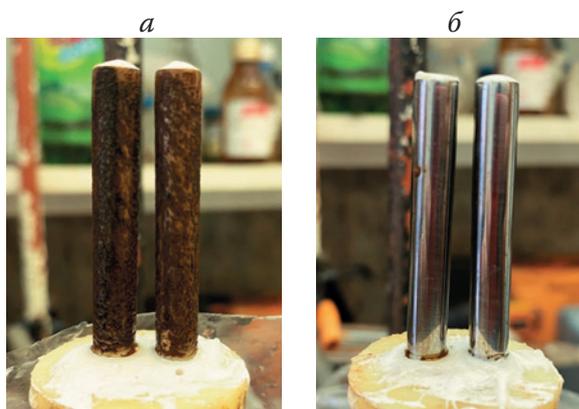


Рис. 3. Коррозия электродов при температуре 70 °С, времени экспозиции 3 ч, концентрации Mg-НТФ – 20 мг/л: *а* – без реагента, *б* – с реагентом.
 Fig. 3. Electrode corrosion. Temperature 70 °C. Exposure time – 3 hours. Concentration of Mg-NTP – 20 mg/l: *a* – without the reagent, *b* – with the reagent.

Исследованы также зависимости скорости коррозии от концентрации магниевого и цинкового комплекса (рис. 4, рис. 5).

Из данных графиков на рис. 4 и рис. 5 следует, что использование реагентов, содержащих как цинковые, так и магниевые комплексонаты, позволяет с высокой степенью эффективности ингибировать величину коррозии, снижая ее более чем в 10 раз при концентрации ингибиторов от 15 мг/л и выше (в диапазоне температур 60–80 °С).

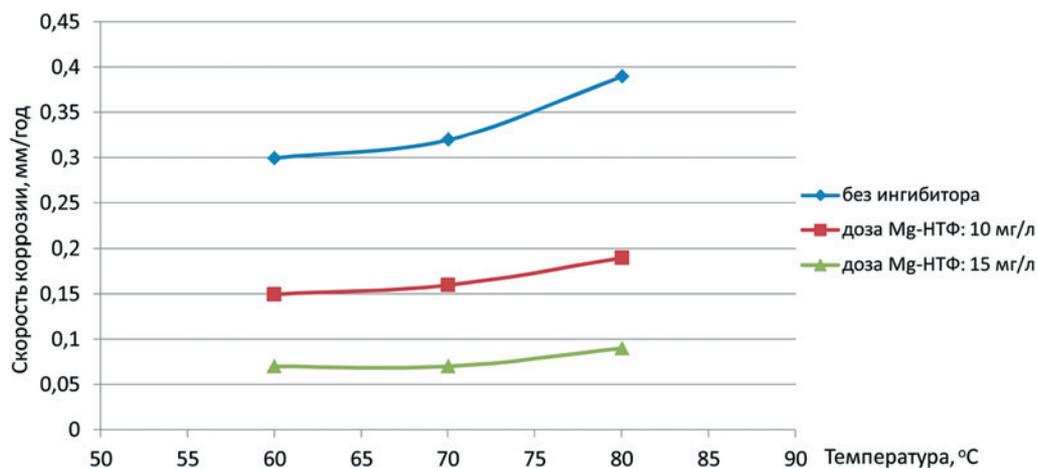


Рис. 4. Зависимость скорости коррозии от дозы ингибитора Mg-НТФ при различных температурах: 60–80 °С.

Fig. 4. The dependence of the corrosion rate on the dose of Mg-NTP inhibitor at different temperatures: 60–80 °С.

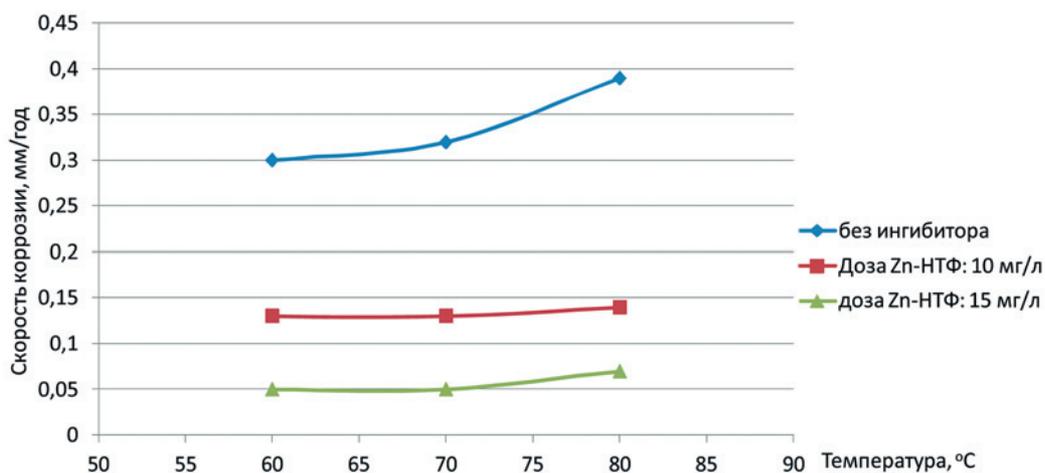


Рис. 5. Зависимость скорости коррозии от дозы ингибитора Zn-НТФ при различных температурах: 60–80 °С.

Fig. 5. Dependence of the corrosion rate on the dose of Zn-NTP inhibitor at different temperatures: 60–80 °С.

ВЫВОДЫ

Важным направлением охраны водных ресурсов является снижение сброса продуктов коррозии со сточными водами из систем транспортировки, нагрева и охлаждения воды предприятий коммунального хозяйства и промышленного сектора экономики. Так, применение не обескислороженной воды из р. Чусовой приводит к аварийному (свыше 300 мкм/год) уровню коррозии стали в системах открытого горячего водоснабжения.

В рамках проведенного исследования установлено, что степень снижения коррозионных процессов зависит от дозы ингибиторов на основе НТФ. Эффективной можно считать дозу НТФ свыше 15 мг/л. Применение рассматриваемых ингибиторов позволяет полностью предотвратить образование карбонатных отложений на поверхностях теплообмена, а скорость коррозии снижается до 5–10 мкм/год. Однако ПДК по данным комплексонам составляет 5 мг/л, что ограничивает использование этих реагентов в допустимых концентрациях для систем открытого горячего водоснабжения.

Особенную практическую значимость данных ингибиторов можно выделить для систем оборотного водоснабжения промышленных предприятий. На основе данной технологии можно стремиться к максимальному сокращению продувочных вод чистых и грязных оборотных циклов. Актуальной задачей является изучение снижения содержания НТФ при очистке сточных вод. Применение цинковых и особенно магниевых комплексонатов на основе НТФ позволяет практически полностью не только подавить процессы коррозии, но и существенно уменьшить неблагоприятное воздействие указанных реагентов на живые организмы водоемов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Будников Г.К. Тяжелые металлы в экологическом мониторинге водных систем // Соросовский образовательный журнал. 1998. № 5. С. 23–29.
2. Цирульников Н.В., Дрикер Б.Н., Фетисова Т.С., Тарантаев А.Г. Тенденции в области создания и применения химических реагентов для стабилизационной обработки воды с целью предотвращения солеотложений и коррозии металлов систем водопользования // Коррозия: материалы, защита. 2011. № 7. С. 12–25.
3. Boels L., Wagterveld R. M., Witkamp G. J. Ultrasonic reactivation of phosphonate poisoned calcite during crystal growth // Ultrasonics Sonochemistry. 2011. Vol. 18. No. 5. P. 1225–1231.
4. Hoang T.A., Ang H.M., Rohl A.L. Investigation into the effects of phosphonic inhibitors on the formation of calcium sulfate scales // Desalination and Water Treatment. 2011. Vol. 29. P. 294–301.
5. Дятлова Н.М., Дытюк А.Т., Самакаев Р.Х. и др. Применение комплексонов в нефтеперерабатывающей промышленности. М.: НИИТЭХИМ, 1983. С. 25–27.
6. Labjar N., Hajjaji S., Lebrini M., Idrissi M.S., Jama C., Bentiss F. Enhanced corrosion resistance properties of carbon steel in hydrochloric acid medium by aminotris(methylenephosphonic): Surface characterizations // Journal of Material Environment Science. 2011. Vol. 2. No. 4. P. 2028–2508.
7. Labjar N., Lebrini M., Bentiss F., Chihib N.E., Hajjaji S.E., Jama C. Corrosion inhibition of carbon steel and antibacterial properties of aminotris-(methylenephosphonic) acid // Material Chemistry Physics. 2010. Vol. 119. No. 1–2. P. 330–336.
8. Kalyani D.S., Rao S.S., Babu M.S., Rao B. V.A., Sreedhar B. Electrochemical and surface analytical studies of carbon steel protected from corrosion in a low-chloride environment containing a phosphonate-based inhibitor // Register of Chemistry. Intermed. 2014.
9. Labjar N., Lebrini M., Bentiss F., Chihib N., Hajjaji S., Jama Ch. Corrosion inhibition of carbon steel and antibacterial properties of aminotris-(methylenephosphonic) acid // Material Chemistry Physics. 2010. Vol. 119. No. 1–2. P. 330–336.
10. Liu F., Lu X., Yang W., Lu J., Zhong H., Chang X., Zhao Ch. Optimizations of inhibitors compounding and applied conditions in simulated circulating cooling water system // Desalination. 2013. Vol. 313. P. 18–27.
11. Kosyakova P.B., Khripun M.K., Myund L.A. On inhibition of calcium sulfate crystallization with phosphonic complexes // Russian Journal of Applied Chemistry. 2010. Vol. 83. No. 6. P. 969–973.
12. Shaw S., Sorbie K. S., Boak L. The effects of barium sulfate saturation ratio, calcium, and magnesium on the inhibition efficiency – part I: phosphonate scale inhibitors // SPE Production and Operations. 2012. Vol. 27. No. 3. P. 306–317.

13. Baraka-Lokmane S., Sorbie K. S. Effect of pH and scale inhibitor concentration on phosphonate-carbonate interaction // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2010. Vol. 70. No. 1–2. P. 10–27.
14. Rodriguez-Navarro C., Benning L. G. Control of crystal nucleation and growth by additives // *Elements*. 2013. Vol. 9. P. 203–209.
15. Kelland M.A. Effect of various cations on the formation of calcium carbonate and barium sulfate scale with and without scale inhibitors // *Indian English Chemistry Register*. 2011. Vol. 50. P. 5852–5861.
16. Sridharan D., Karthikeyan Ch., Maruthamuthu S., Manoharan S., Palaniswamy N. Impact of mixed inhibitor on electrochemical behavior of inland water biofilm formed on 316L stainless steel // *Indian English Chemistry Register*. 2013. Vol. 52. No. 46. P. 16175–16181.
17. Hoang T.A., Ang H.M., Rohl A.L. Effects of organic additives on calcium sulfate scaling in pipes // *Australian Journal of Chemistry*. Vol. 62. No. 8. P. 927–933.
18. Akjol E., Oner M., Barouda E., Demadis K.D. Systematic structural determinants of the effects of tetraphosphonates on gypsum crystallization // *Crystals Growth Description*. 2009. Vol. 9. No. 12. P. 5145–5154.
19. Zhang B., Zhang L., Li F., Hu W., Hannam Ph.M. Testing the formation of Ca-phosphonate precipitates and evaluating the anionic polymers as Ca-phosphonate precipitates and CaCO₃ scale inhibitor in simulated cooling water // *Corrosion Science*. 2010. Vol. 52. No. 12. P. 3883–3890.
20. Дрикер Б.Н., Тарасова С.А., Обожин А.Н. и др. Комплексный ингибитор солеотложений, коррозии и биообрастаний на основе органических фосфонатов // *Энергосбережение и водоподготовка*. 2010. № 1. С. 4–6.

REFERENCES

1. Budnikov G.K. Heavy metals in environmental monitoring of water systems. *Sorosovskiy obrazovatelnyy zhurnal [Soros Educational Journal]*. 1998. No. 5. Pp. 23–29 (In Russ.).
2. Tsurulnikova N. V., Driker B. N., Fetisova T. S., Tarantayev A. G. Trends in the creation and application of chemical reagents for stabilization water treatment in order to prevent salt deposition and corrosion of metals of water use systems. *Korrosiya: materialy i zashchita [Corrosion: materials, protection]*. 2011. No. 7. P. 12–25 (In Russ.).
3. Boels L., Wagterveld R. M., Witkamp G. J. Ultrasonic reactivation of phosphonate poisoned calcite during crystal growth. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2011. Vol. 18. No 5. P. 1225–1231.
4. Hoang T. A., Ang H. M., Rohl A. L. Investigation into the effects of phosphonic inhibitors on the formation of calcium sulfate scales. *Desalination and Water Treatment*. 2011. Vol. 29. P. 294–301.
5. Dyatlova N. M., Dytyuk L. T., Samakaev R. H. et al. The use of complexons in the oil refining industry. Moscow: NIITEKHIM, 1983. P. 25–27 (In Russ.).
6. Labjar N., Hajjaji S., Lebrini M., Idrissi M. S., Jama C., Bentiss F. Enhanced corrosion resistance properties of carbon steel in hydrochloric acid medium by aminotris(methylenephosphonic): Surface characterizations. *Journal of Material Environment Science* 2011. Vol. 2. No 4. P. 2028–2508.
7. Labjar N., Lebrini M., Bentiss F., Chihib N. E., Hajjaji S. E., Jama C. Corrosion inhibition of carbon steel and antibacterial properties of aminotris-(methylenephosphonic) acid. *Material Chemistry Physics*. 2010. Vol. 119. No 1–2. P. 330–336.
8. Kalyani D. S., Rao S. S., Babu M. S., Rao B. V.A., Sreedhar B. Electrochemical and surface analytical studies of carbon steel protected from corrosion in a low-chloride environment containing a phosphonate-based inhibitor. *Respective Chemistry. Intermed.* 2014.
9. Labjar N., Lebrini M., Bentiss F., Chihib N., Hajjaji S., Jama Ch. Corrosion inhibition of carbon steel and antibacterial properties of aminotris-(methylenephosphonic) acid. *Material Chemistry Physics*. 2010. Vol. 119. No 1–2. P. 330–336.
10. Liu F., Lu X., Yang W., Lu J., Zhong H., Chang X., Zhao Ch. Optimizations of inhibitors compounding and applied conditions in simulated circulating cooling water system. *Desalination*. 2013. Vol. 313. P. 18–27.
11. Kosyakova P. B., Khripun M. K., Myund L. A. On inhibition of calcium sulfate crystallization with phosphonic complexes. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2010. Vol. 83. No 6. P. 969–973.
12. Shaw S., Sorbie K. S., Boak L. The effects of barium sulfate saturation ratio, calcium, and magnesium on the inhibition efficiency – part I: phosphonate scale inhibitors. *SPE Production and Operations*. 2012. Vol. 27. No 3. P. 306–317.

13. Baraka-Lokmane S., Sorbie K. S. Effect of pH and scale inhibitor concentration on phosphonate-carbonate interaction. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2010. Vol. 70. No 1–2. P. 10–27.
14. Rodriguez-Navarro C., Benning L. G. Control of crystal nucleation and growth by additives. *Elements*. 2013. Vol. 9. P. 203–209.
15. Kelland M. A. Effect of various cations on the formation of calcium carbonate and barium sulfate scale with and without scale inhibitors. *Indian English Chemistry Register*. 2011. Vol. 50. P. 5852–5861.
16. Sridharan D., Karthikeyan Ch., Maruthamuthu S., Manoharan S., Palaniswamy N. Impact of mixed inhibitor on electrochemical behavior of inland water biofilm formed on 316L stainless steel. *Indian English Chemistry Register*. 2013. Vol. 52. No 46. P. 16175–16181.
17. Hoang T. A., Ang H. M., Rohl A. L. Effects of organic additives on calcium sulfate scaling in pipes. *Australian Journal of Chemistry*. Vol. 62. No 8. P. 927–933.
18. Akyol E., Oner M., Barouda E., Demadis K. D. Systematic structural determinants of the effects of tetraphosphonates on gypsum crystallization. *Crystals Growth Description*. 2009. Vol. 9. No 12. P. 5145–5154.
19. Zhang B., Zhang L., Li F., Hu W., Hannam Ph. M. Testing the formation of Ca-phosphonate precipitates and evaluating the anionic polymers as Ca-phosphonate precipitates and CaCO₃ scale inhibitor in simulated cooling water. *Corrosion Science*. 2010. Vol. 52. No 12. P. 3883–3890.
20. Driker B. N., Tarasova S. A., Obozhin A. N. et al. Complex inhibitor of salt deposition, corrosion and biofouling based on organic phosphonates. *Energoberezheniye i vodopodgotovka [Energy saving and water treatment]*. 2010. No. 1. P. 4–6 (In Russ.).

Сведения об авторах:

Браяловский Георгий Борисович, канд. техн. наук, доцент, кафедра водного хозяйства и технологии воды, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620049, г. Екатеринбург, ул. Мира, 17; ORCID: 0000-0003-0031-7393; e-mail: g.b.braialovsky@urfu.ru

Никифоров Александр Федорович, д-р хим. наук, профессор, кафедра водного хозяйства и технологии воды, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620049, г. Екатеринбург, ул. Мира, 17; ORCID: 0000-0002-9779-9538; e-mail: a.f.nikiforov@urfu.ru

Насчетникова Ольга Борисовна, канд. техн. наук, доцент, кафедра водного хозяйства и технологии воды, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620049, г. Екатеринбург, ул. Мира, 17; ORCID: 0000-0002-6020-4406; e-mail: o.b.naschetnikova@urfu.ru

Мигалатий Евгений Васильевич, д-р техн. наук, профессор, кафедра водного хозяйства и технологии воды, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620049, г. Екатеринбург, ул. Мира, 17; ORCID: 0000-0002-1393-0077; e-mail: e.v.migalatiy@urfu.ru

About authors:

Georgy B. Brayalovsky, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Water Management and Water Technology, B.N. Yeltsin Ural Federal University, 620002, , ul. Mira, 17, Ekaterinburg, 620002, Russia; ORCID: 0000-0003-0031-7393; e-mail: g.b.braialovsky@urfu.ru

Aleksander F. Nikiforov, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Department of Water Management and Water Technology, B.N. Yeltsin Ural Federal University, 620002, ul. Mira, 17, Ekaterinburg, 620002, Russia; ORCID: 0000-0002-9779-9538; e-mail: a.f.nikiforov@urfu.ru

Olga B. Naschetnikova, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Department of Water Management and Water Technology, B.N. Yeltsin Ural Federal University, 620002, , ul. Mira, 17, Ekaterinburg, 620002, Russia; ORCID: 0000-0002-6020-4406; e-mail: o.b.naschetnikova@urfu.ru

Evgeny V. Migalatiy, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Water Management and Water Technology, B.N. Yeltsin Ural Federal University, 620002, ul. Mira, 17, Ekaterinburg, 620002, Russia; ORCID: 0000-0002-1393-0077; e-mail: e.v.migalatiy@urfu.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, кегль **12, межстрочный интервал 1,5, поля 2,5 см со всех сторон**. Римские цифры набираются в английском регистре.

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

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

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

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

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

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

Редакторы: Т.М. Принцева, Н.А. Валек

Подписано в печать 16.06.2023. Дата выхода в свет 26.06.2023.

Формат 70x100^{1/16}. Усл. печ. л. 7,75. 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.

117292, Москва, ул. Кедрова, дом. 8, корп. 1
Телефон: (499) 124-83-60 Факс: (499) 125-22-36
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 городах Владивосток, Чита, Пермь, Уфа.
620049, г. Екатеринбург, ул. Мира, 23
Телефон/факс: (343) 287-65-71
E-mail: wrm@wrm.ru, <http://wrm.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

