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
№ 1, 2024

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

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

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

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

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

РЕДКОЛЛЕГИЯ

Беляев С.Д., д-р геогр. наук, Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов (Екатеринбург, Россия)
Болгов М.В., д-р техн. наук, профессор, Институт водных проблем РАН (Москва, Россия)
Борисова Г.Г., д-р биол. наук, профессор, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (Екатеринбург, Россия)
Веницианов Е.В., д-р физ.-мат. наук, профессор, Институт водных проблем РАН (Москва, Россия)
Гареев А.М., д-р геогр. наук, профессор, Башкирский государственный университет (Уфа, Россия)
Зиновьев А.Т., д-р техн. наук, Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения РАН (Барнаул, Россия)
Козлов Д.В., 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)
Федоров Ю.А. д-р геогр. наук, профессор, Южный федеральный университет (Ростов-на-Дону, Россия)
Хафизов А.Р., д-р техн. наук, профессор, Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов (Уфа, Россия)
Шевчук А.В., д-р экон. наук, профессор, Совет по изучению производительных сил Всероссийской академии внешней торговли Минэкономразвития России (Москва, Россия)
Шмакова М.В., д-р геогр. наук, профессор, Институт озероведения РАН, (Санкт-Петербург, Россия)
Ясинский С.В., д-р геогр. наук, Институт географии РАН (Москва, Россия)

МЕЖДУНАРОДНЫЙ СОВЕТ

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

ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЙ РЕДАКТОР

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

ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО РОССИИ:

ПРОБЛЕМЫ, ТЕХНОЛОГИИ, УПРАВЛЕНИЕ

WATER SECTOR OF RUSSIA:

PROBLEMS, TECHNOLOGIES, MANAGEMENT

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

SCIENTIFIC/PRACTICAL JOURNAL

№ 1, 2024

ЕКАТЕРИНБУРГ
EKATERINBURG

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

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

EDITORIAL BOARD

CHIEF EDITOR

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

DEPUTY CHIEF EDITOR

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

MEMBERS OF THE EDITORIAL BOARD

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

INTERNATIONAL BOARD

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

EXECUTIVE EDITOR

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

СОДЕРЖАНИЕ

К 25-летию выхода в свет первого выпуска журнала
«Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление».....5

НАУКА В ЛИЦАХ

Анатолий Лепихин: главное для меня сегодня – обеспечить
научный рост моих учеников… 11

УПРАВЛЕНИЕ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ

К совершенствованию системы регламентации отведения взвешенных веществ
в поверхностные водные объекты с учетом их стохастической природы
Т.Н. Синцова, А.П. Лепихин.....16

ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ, ВОДНЫЕ ОБЪЕКТЫ

Гидрохимический режим и донные осадки предгорных озер Русского Алтая
Д.М. Безматерных, О.Н. Вдовина.....32

Влияние метеофакторов, свойств снега и климатических изменений
на процессы таяния снежного покрова
С.А. Лавров.....46

Экологическая оценка состояния водоемов различного типа бассейна
залива Шарапов Шар по концентрации хлорофилла «а» (Средний Ямал)
М.И. Ярушина, В.Ф. Мухутдинов, Л.Н. Степанов.....71

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Геохимическая характеристика рек Приэльтонья
Ю.А. Зимина Т.А. Шипаева, А.С. Венецианский, Г.А. Срослова, О.В. Зорькина.....89

Защита водных объектов от продуктов коррозии и минеральных отложений:
выбор оптимальных ингибиторов
А.А. Протазанов, Б.Н. Дрикер, Н.Н. Стягов.....100

Указатель статей, опубликованных в журнале «Водное хозяйство России:
проблемы, технологии, управление» в 2023 году.....109

Требования к оформлению материалов.....125

CONTENT

On the occasion of the 25th Anniversary of the first issue of "Water Sector of Russia:Problems, Technologies, Management" journal.....5

SCIENCE PERSONIFIED

Anatoly Lepikhin: My first priority for today is to support academic progress of my disciples… 11

WATER RESOURCES MANAGEMENT

To improving the system for regulating the discharge of suspended substances into surface water bodies, taking into account their stochastic nature
T.N. Sintsova, A.P. Lepikhin.....16

WATER RESOURCES, WATER BODIES

Hydro/chemical regime and bottom sediments of foothill lakes of the Russian Altay in 2022
D.M. Bezmatrnykh, O.N. Vdovina.....32

The influence of meteorological factors, snow properties and climate changes on the snow cover melting processes
S.A. Lavrov.....46

Ecological assessment of the different types water bodies of the Sharapov Shar Bay basin in terms of the chlorofill "a" concentration (the Middle Yamal)
M.I. Yarushina, V.F. Mukhutdinov, L.N. Stepanov.....71

ECOLOGICAL ASPECTS OF WATER/ECONOMIC ACTIVITIES

Geochemical characteristics of the rivers of the Elton region
Y.A. Zimina, T.A. Shipayeva, A.S. Venetsianskiy, G.A. Sroslova, O.V. Zorkina.....89

Protection of water bodies from corrosion products and mineral deposits: selection of optimal inhibitors
A.A. Protazanov, B.N. Driker, N.N. Styagov.....100

Index of the articles published in "Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management" journal in 2023.....109

Requirements to the material to be accepted.....125

К 25-ЛЕТИЮ ВЫХОДА В СВЕТ ПЕРВОГО ВЫПУСКА ЖУРНАЛА «ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО РОССИИ: ПРОБЛЕМЫ, ТЕХНОЛОГИИ, УПРАВЛЕНИЕ»

Наступивший год для редакции и редакционной коллегии – особенный: 25 лет назад, в 1999 году, вышел в свет первый выпуск нашего журнала. Сегодня, перелистывая страницы старых подшивок, невольно восстанавливаешь в памяти непростую историю становления и эволюции издания, достижений и проблем, которые зачастую приходилось решать буквально «с колес», ведь новый выпуск должен был выходить в срок.

Журнал – как настоящий живой организм – проходил этапы своего «взросления» и роста. Уже сам по себе факт, что отраслевое водохозяйственное издание появилось в конце 1990-х годов, в период, когда все научные сегменты (академический, вузовский, отраслевой) испытывали острый кризис, обусловленный реформированием науки, катастрофическим для нее переходом к рыночным отношениям и самофинансированию, – является весьма показательным. Наши коллеги, стоявшие у истоков создания журнала, под руководством идейного вдохновителя – первого директора Российского научно-исследовательского института комплексного использования и охраны водных ресурсов (РосНИИВХ), доктора технических наук, профессора Александра Михайловича Черняева в условиях отсутствия необходимого финансирования отраслевой науки продолжали упорно поднимать вопросы развития водохозяйственной отрасли, предлагали новые научные подходы и механизмы их решения. Одним из таких перспективных, нацеленных в будущее решений и стало создание своего отраслевого научного журнала.

Первые выпуски «Водного хозяйства России» были представлены по большей части материалами сотрудников организации-учредителя. При этом, несмотря на географическую и ведомственную локальность, в научных статьях поднимались вопросы поистине национального и наднационального масштабов: государственной водной и экологической политики, становления водного законодательства в Российской Федерации, деградации водных ресурсов, оценивался зарубежный опыт организации природоохранных мероприятий и пр. И как бы тяжело не было (особенно на первых порах), за все свое 25-летнее существование журнал стабильно выходил 6 раз в год, ни разу не нарушив периодичность. Подчеркнем, издание отраслевым НИИ периодического научного издания и публикация на первых порах на его страницах статей исключительно сотрудников организации мы оцениваем, по прошествии времени, в положительном аспекте. Полагаем, что выпуск журнала, в котором нашли отражение ключевые исследования института стал своеобразной заявкой НИИ, сигналом готовности вступить в открытый научный диалог, защитить интересы отраслевой науки и поделиться накопленным научным багажом.

Шло время и журнал год от года увеличивал свою читательскую аудиторию, становился известным в научных кругах, зарабатывая авторитет. Высо-

кий научный статус издание подтвердило в 2015 году, когда вошло в Перечень ВАК. К этому времени «Водное хозяйство России» уже прочно заняло свою нишу в ряду отечественных изданий водохозяйственной тематики, стало узнаваемым журналом со своим «лицом», своим издательским неповторимым стилем, своим кругом авторов и читателей.

Сегодня ведомственная принадлежность наших авторов достаточно широка и разнообразна. В основном у нас публикуются представители фундаментальной науки (профессорско-преподавательский состав высших учебных заведений, аспиранты, ученые Российской академии наук), существенно меньше – научные сотрудники отраслевых организаций (прежде всего, речь идет о НИИ). Научной политикой издания и непосредственной организационной деятельностью журнала руководит редакционная коллегия, в состав которой входят выдающиеся ученые из Санкт-Петербурга, Москвы, Ростова-на-Дону, Перми, Екатеринбурга, Барнаула, Уфы, Тольятти, в том числе академики РАН, а также ученые с мировым именем из других стран.

Изменились и внешние условия. Если в первое десятилетие развития журнала определенные сложности были связаны, прежде всего, с необходимостью продвигать издание, нарабатывать ему определенный статус, сегодня редакция сталкивается с необходимостью в условиях изменения государственной научной политики в постоянном режиме оценивать свой издательский продукт, мониторить его статистические параметры, анализировать возможности и перспективы дальнейшего развития в современных реалиях, создающих высокую конкуренцию и существенно повышающих градус ответственности редакционной коллегии и редакции.

Какую нишу среди журналов одной тематики в современных условиях и требованиях к научным изданиям займет тот или иной журнал? Наиболее остро данный вопрос стоит сегодня именно для отраслевых изданий, поскольку зачастую именно они оказываются уникальными журналами смежных тематик, имеющими невысокие количественные и качественные статистические характеристики (прежде всего, речь идет о библиометрических параметрах и наукометрическом анализе, без которых сегодня не обходится ни одна оценка научной результативности издания/ученого/организации).

В целях усиления коммуникации и представления «Водного хозяйства России» в академическом сообществе в 2017 году редакция приняла решение сделать открытым доступ к опубликованным статьям. Сегодня электронная версия журнала в открытом (бесплатном) варианте размещена на сайте Научной электронной библиотеки, издание включено в Российский индекс научного цитирования, индексируется на отечественных и международных информационных платформах – Российской государственной библиотеки, CyberLeninka, DOAJ, Crossref, ResearchBiB, EBSCO, Google Scholar и др. С 2019 г. всем статьям, публикуемым в «Водном хозяйстве России», присваивается номер цифрового идентификатора Digital Object Identifier (DOI), что соответствует принципам Женевской декларации о науке открытого доступа (Open Access).

Публикация в журнале «Водное хозяйство России» научных статей высокого качества, их актуальность для научного сообщества, а также эффек-

тивность проводимой редакционной политики, направленной на повышение публикационной активности издания и его интеграцию в информационное научное пространство, – все это вкупе обусловило рост наших библиометрических показателей. Не будем подробно останавливаться на статистических данных, отметим лишь ключевые (таблица 1)[1].

При этом заметим, что на момент публикации статьи, по данным Российского индекса научного цитирования (РИНЦ), «Водное хозяйство России» заняло почетное четвертое место среди отечественных водохозяйственных журналов Перечня ВАК.

Таблица 1. Изменение ключевых библиометрических параметров[2]

Название показателя	Год								
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Общее число цитирований журнала	124	105	156	136	192	179	222	260	327
Среднее число цитирований на 1 статью[3]	2,3	1,98	3	2,7	3,9	3,58	4,44	5,5	7,1
Двухлетний импакт-фактор РИНЦ	0,443	0,364	0,505	0,317	0,510	0,378	0,667	0,610	0,660
Двухлетний импакт-фактор по ядру РИНЦ	0,057	0,056	0,093	0,106	0,190	0,102	0,253	0,220	0,268
Пятилетний импакт-фактор РИНЦ	0,342	0,279	0,401	0,311	0,496	0,426	0,504	0,566	0,669
Пятилетний импакт-фактор по ядру РИНЦ	0,046	0,064	0,086	0,125	0,181	0,121	0,218	0,189	0,269

По данным РИНЦ, с 2016 по 2022 гг. в нашем журнале была опубликована 341 статья. Таким образом, за указанный период произошел прирост количества публикации более чем в 2 раза и составил – 110 % (рис. 1).

Как видим, показатели журнала «Водное хозяйство России» стабильно и аккуратно растут, что свидетельствует как о высоком качестве научных статей, их привлекательности для научного сообщества, так и о верно выбранной редакционной политике, а также ее прозрачности (отсутствии искусственных накруток статистических параметров). С такими показателями наше издание вошло в К2 согласно категорированию российских научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты кандидатских и докторских диссертаций (см. Постановление Правительства РФ от 25 января 2024 г. № 62).

[1] Справедливости ради, необходимо подчеркнуть, что издание научного журнала – весьма специфическая деятельность, ее результаты, проявляющиеся, в том числе, в цитируемости опубликованных работ, можно оценить не раньше, чем через 2–3 года после выхода очередного выпуска. Другими словами, сегодня мы можем более-менее корректно оценить работу журнала только до 2019–2020 гг.

[2] Данные публикационной активности издания взяты с портала: https://www.elibrary.ru/title_profile.asp?id=8576.

[3] Для установления данного показателя мы разделили итоговую цифру статистического анализа РИНЦ «Общее число цитирований журнала в текущем году» на показатель «Число статей в РИНЦ» конкретного года, в котором проводится соответствующий подсчет. Так, если в 2022 году общее число цитирований журнала составило – 327, то с учетом публикации 46 статей в данный год, получаем среднее в 7,1 цитирования на 1 статью.

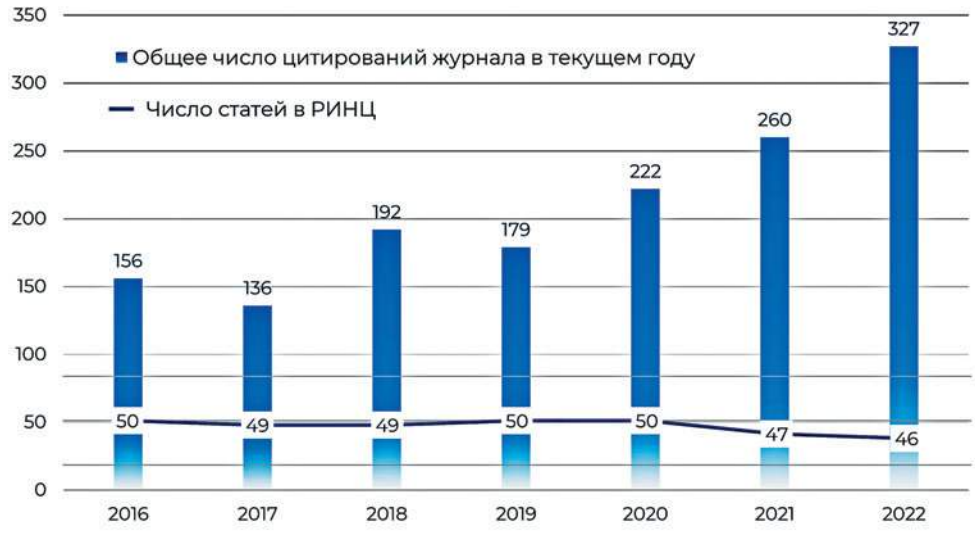


Рис. 1. Прирост цитируемости журнала по данным РИНЦ.

Оценка любого научного журнала не может осуществляться без учета его тематической специфики, а также интегрированности в контекст изданий аналогичной тематики. В настоящее время отраслевая водохозяйственная наука ограничена небольшим кругом научных журналов, в которых отражается ее развитие. Фактически, в России издается только 10 журналов водохозяйственной тематики, входящих в Перечень ВАК[4]. Из них 3 издания входят в Russian Science Citation Index (RSCI) – «Водные ресурсы», «Природообустройство», «Гидротехническое строительство». В ядро РИНЦ помимо русскоязычных версий журналов «Водные ресурсы», «Гидротехническое строительство» входят их англоязычные варианты – «Power Technology and Engineering», «Water Resources», а также – «Природообустройство». В Scopus индексируются – «Water Resources», «Power Technology and Engineering»; в Web of Science – «Water Resources». Конечно же, каждое из этих изданий уникально в своем роде и неповторимо. Однако, в большинстве своем, научные журналы, заявленные в РИНЦ как издания водохозяйственного направления, имеют статус изданий смежных тематик: лесного и сельского хозяйства, гидротехнического строительства, мелиорации и ирригации, геологии, жилищно-коммунального хозяйства и др. Осмелимся утверждать, что именно «Водное хозяйство России» сегодня в большей мере, нежели другие отечественные издания, нацелено на публикацию статей по водохозяйственной тематике. Наше мнение подтверждают данные отчетов РИНЦ «Распределение публикаций по тематике» и «Распределение публикаций по ключевым словам» (рис. 2).

[4] По данным РИНЦ, в тематике «водное хозяйство» сегодня индексируются следующие журналы Перечня ВАК: «Водные ресурсы» («Water Resources»), «Гидротехническое строительство» («Power Technology and Engineering»), «Природообустройство», «Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление», «Мелиорация и водное хозяйство», «Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева», «Мелиорация», «Мелиорация и водное хозяйство».



РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМАТИКЕ

№	Тематическая рубрика	Публикаций
1.	Водное хозяйство	511
2.	Геофизика	188
3.	Биология	155
4.	Охрана окружающей среды. Экология человека	135
5.	Геология	50
6.	Химия	42
7.	Экономика. Экономические науки	32
8.	География	19
9.	Сельское и лесное хозяйство	18
10.	Строительство. Архитектура	11
11.	Государство и право. Юридические науки	11
12.	Энергетика	6
13.	Механика	5
14.	Горное дело	4
15.	Математика	3

Рис. 2. Скриншот статистического отчета РИНЦ «Распределение публикаций по тематике».

Серьезная комплексная проблема отраслевых изданий связана с их тотальным самоцитированием. Водохозяйственная научная периодика развивается исключительно локально: журналы изолируются от других изданий смежных тематик, в подавляющем большинстве сосредоточены на себе, активно цитируют собственные публикации, привязаны в научных исследованиях и статьях к организации-учредителю, массово цитируют российских ученых. По всей видимости, эта ситуация объективно связана как со спецификой российских водохозяйственных изданий, так и своеобразием российской водохозяйственной науки в целом: междисциплинарным характером, постановкой и решением конкретных практических задач. В результате, подобная локальность не способствует прогрессивному развитию конкретной области знания и отраслевой науки в целом, а, напротив, становится одним из главных сдерживающих факторов.

К сожалению, несмотря на соблюдение условий для индексации изданий в международных базах цитирования: открытый доступ в сети Интернет, наличие у подавляющего большинства отечественных изданий метаданных на двух языках (русском и английском), индексация на зарубежных платформах, – отечественные водохозяйственные журналы имеют, в основном, русскоязычную читательскую аудиторию. Ситуация усугубляется международными ограничениями, при которых научные журналы оказываются «выпавшими» из мирового публикационного (и, что хуже всего, исследовательского) процесса.

Но жизнь не стоит на месте и мы, несмотря ни на что, уверенно строим планы на будущее. Так, к примеру, поставлена задача подачи заявки от журнала на вступление в RSCI, вхождение в ядро РИНЦ.

Несмотря на феноменальное развитие Интернета, научные журналы были и остаются самым авторитетным хранилищем научных знаний. Публикация в них выступает неотъемлемой частью научного исследования и представляет его промежуточный или конечный результат. Статья, опубликованная в научном журнале в современном мире научных коммуникаций, является оперативным способом распространения информации о результатах оригинальных на-

учных исследований, основным источником библиометрических исследований и оценки развития науки, достижений участников научного процесса – авторов, организаций, региона и страны в целом. С другой стороны, опубликованная статья закрепляет интеллектуальные права исследователя и отражает его отношение к исследованиям предшественников посредством цитирования их работ. Именно журнальные статьи, как наиболее массовый вид публикаций, представляют особый интерес для анализа масштабов, структуры и источников развития научных исследований. Выпуск отраслевого журнала помогает продвигать интересы отраслевой науки, делает ее более видимой в потоке научной информации, включает в научно-исследовательский контекст. В современных условиях тотальных ограничений перед нами стоит важная задача изменить акценты в своей деятельности, искать новые реперные точки развития.

История развития издания, индикаторы его публикационной активности демонстрируют, что журнал «Водное хозяйство России» обладает достаточно стабильными характеристиками для дальнейшего продвижения в научное сообщество, пользуется авторитетом в научной среде, являясь востребованным среди специалистов водной отрасли. Однако редакцией отмечается необходимость пополнения редакционного портфеля высокорейтинговыми статьями авторитетных авторов, молодых специалистов с перспективными идеями и разработками. Необходима дальнейшая интеграция издания в информационное пространство. На наш взгляд, это будет повышать научный уровень и статус журнала, «работать» на повышение его востребованности.

В настоящее время, когда меняется государственная политика в сфере научной информации, необходимо консолидировать усилия всех участников издательского процесса: учредителя – авторов – рецензентов – редколлегии. Перед нами стоит непростая задача: с одной стороны, – сохранить индивидуальное «лицо» специализированного научно-практического водохозяйственного издания, с другой, – соответствовать общим требованиям, продиктованным как новыми отечественными и зарубежными издательскими стандартами, так и тотальными международными ограничениями. Именно в совместно реализуемых мероприятиях мы видим возможность прогрессивного изменения издания, принципиальный переход его на качественный новый уровень.

Вот уже четверть века мы выпускаем журнал благодаря, прежде всего, нашим авторам, рецензентам. Ваша неоценимая поддержка, неравнодушное отношение, высокий профессионализм – позволяли наполнять наши номера интересными научными материалами.

Желаем Вам, дорогие наши читатели, авторы, рецензенты (всем, кто причастен к этому увлекательному путешествию, под названием – выпуск журнала) успехов и больших творческих достижений, которые, надеемся, воплотятся в прекрасные научные статьи и в нашем издании.

От имени редакции и редакционной коллегии,
главный редактор журнала ***А.Е. КОСОЛАПОВ***

1 января 2024 года исполнилось 75 лет известному российскому специалисту в области моделирования гидрологических процессов, доктору географических наук, профессору, академику Российской академии естественных наук, ведущему научному специалисту РосНИИВХ Анатолию Павловичу Лепихину. Свой юбилей известный ученый-гидролог встретил новыми идеями и планами, ведь так было всегда – именно активная жизненная позиция, неравнодушное отношение к своему делу стоят за многолетней плодотворной научной деятельностью юбиляра.

Анатолий Лепихин:
Главное для меня сегодня – обеспечить научный рост моих учеников…



Научные труды А.П. Лепихина характеризуются широким диапазоном рассматриваемых разделов гидрологии – от структуры и характера формирования многолетних колебаний стока до регламентации техногенных воздействий на поверхностные водные объекты. Многогранные научные интересы позволили ученому значительно расширить круг задач гидрологии, решаемых численными методами, результаты его творческого поиска и проведенных в этом направлении исследований опубликованы в ведущих международных журналах. Разработки, результаты исследований Анатолия Павловича широко применяются в решении практических задач водопользования, в том числе для моделирования техногенного воздействия на водные объекты, решения вопросов оценки и минимизации вредного воздействия, а также прогнозирования аварийных ситуаций на водных объектах. Еще одна актуальная область научных интересов Анатолия Павловича – проблематика формирования экстремальных гидрологических процессов.

Анатолий Павлович Лепихин подготовил и опубликовал свыше 300 научных работ. Широкую известность получили работы ученого по анализу статистических функций распределения концентраций химических показателей качества воды в водных объектах. Существенный интерес представляют его исследования по особенностям слияния рек Сылвы и Чусовой, а также ис-

пользование выявленных эффектов для улучшения качества воды, подаваемой на водоснабжение г. Перми. Эти работы имели не только большое практическое значение, но и впервые показали условия формирования вихревых структур в зоне слияния рек.

Более двадцати лет А. П. Лепихин возглавлял Камский филиал РосНИИВХ, на базе которого решались ключевые задачи исследования состояния водных объектов региона, повышения эффективности их использования. Все эти годы энергии ученого хватало и на большую научно-педагогическую деятельность. С 1996 года А.П. Лепихин преподавал на кафедре гидрологии и охраны водных ресурсов Пермского государственного научно-исследовательского университета. В Горном институте Уральского отделения Российской Академии наук Анатолий Павлович с 2005 года возглавляет лабораторию проблем гидрологии суши (ПГС). При непосредственной помощи и с участием А.П. Лепихина был подготовлен целый ряд кандидатских диссертаций и в настоящее время этот процесс активно продолжается. Закономерный результат – сегодня лаборатория ПГС на 90 % состоит из молодых ученых – учеников Анатолия Павловича.

Анатолий Павлович Лепихин является не только постоянным автором научных публикаций в нашем журнале, но и ведет большую редакционную работу по экспертной оценке статей, продвижению издания, повышению его научного потенциала. Его советы и предложения для нас неоценимы.

Сегодня А.П. Лепихин отвечает на наши вопросы в рамках рубрики журнала «Наука в лицах».

– Анатолий Павлович, какой тропинкой ныне известный гидролог вышел к своим научным вершинам? Кто или что повлияло на Ваше решение заниматься наукой?

– Я окончил простую, даже не городскую школу, однако из нашего класса выпуска 1966 года, трое стали докторами наук, профессорами. Согласитесь, сегодня далеко не все, даже элитные школы, могут представить такие показатели. Вообще, середина шестидесятых годов – это определенный пик развития отечественной науки. Проходила масса различных олимпиад, отлично работали «вертикальные лифты» в науке, вся система образования действовала слаженно и эффективно. У школьников, как говорится, с молодых ногтей воспитывали интерес к науке, желание ей заниматься. Отсюда и результаты, которыми мы и сегодня по праву гордимся.

– В 2021 году Вы были признаны лауреатом премии I степени Пермского края в области науки, ранее, в 2007 году, стали лауреатом краевого конкурса «Экология. Человек года». Вас по праву считают создателем нового научного направления – применения статистических методов моделирования в гидрохимии, в том числе для моделирования техногенного воздействия крупных горнодобывающих, металлургических и других промышленных комплексов на водные объекты. Как формировались Ваши научные предпочтения, от теории – к практике или конкретные практические задачи определяли тематику исследований?

– Гидрология – это в значительной мере прикладная наука. Поэтому я, в первую очередь, осмысливаю прикладную составляющую той или иной темы, а в процессе ее разработки стараюсь провести некоторые теоретические обобщения. Вот, к примеру, мы много сил и времени уделяем исследованиям структуры течения при слиянии рек Сылвы и Чусовой, потому что это определяет качество воды на водозаборе г. Перми. С одной стороны, эти исследования направлены на решение важной социальной задачи – обеспечение качественного и эффективного питьевого водоснабжения большого города, а с другой – это очень серьезное направление научного поиска в области гидродинамики.

Мы разработали простую схему селективного отбора для основного питьевого водозабора города Перми, позволившую практически вдвое снизить жесткость забираемой воды. Были изучены факторы формирования и особенности обратных течений, оказывающих существенное влияние на качество забираемой воды в нижнем бьефе Камской ГЭС.

Другая задача, которой мы занимаемся, имеет тоже большое прикладное значение. Это тематика регламентации отведения высокоминерализованных рассолов, которые у нас сбрасываются в Верхней Каме, где разрабатывается одно из крупнейших в мире Верхне-Камское месторождение калийно-магниевых солей. Проблема в том, что эти рассолы обладают высокой плотностью и традиционные методы расчетов, которые применяются на протяжении более 50 лет не работают, хотя во всех нормативных документах они прописываются. Необходимы другие, более эффективные методики.

– Каким, по Вашему мнению, должно быть «качественное» научное исследование?

– Гидрология, хотя и прикладная область знания, тесно связана с другими естественными науками. Поэтому передовые научные исследования в данной области должны быть конкретны, но при этом максимально основаны на новейших достижениях в смежных областях знаний. Например, мы знаем одного из крупнейших гидрологов, классика вузовских учебников Антуана Шези, но он при этом входит в перечень 100 крупнейших гидродинамиков всех времен и народов. Тут очень сложно разделить.

– Как Вам удавалось так эффективно на протяжении многих лет совмещать руководство Камским филиалом РосНИИВХ и лабораторией проблем гидрологии суши в Горном институте Уральского отделения Российской академии наук? Или у Вас в сутках больше 24 часов? Этот симбиоз как-то повлиял на Вашу научную деятельность?

– Когда я совмещал эти должности, был несколько помоложе. Старался, в первую очередь, решать принципиальные вопросы и не заниматься рутиной. Это значительно упрощает движение вперед. Самое главное, надо находить и поддерживать, выбирать эффективных единомышленников, на которых можно опираться. Думаю, мне это удавалось.

– Вы преподавали на кафедре гидрологии и охраны водных ресурсов Пермского государственного научно-исследовательского университета, руководите работой аспирантов, являетесь членом нескольких диссертационных и научно-технических советов, не одно поколение научных работников выросло на Ваших глазах. Нынешнее поколение молодых ученых готово к научным прорывам? В чем его особенность по сравнению со старшими товарищами и почему не так много желающих заниматься научной деятельностью?

– В настоящее время, к сожалению, в силу широкого комплекса проблем, интерес к научной деятельности у молодежи существенно снижается. Хотя есть молодые специалисты, которые не только хотят, но и могут успешно заниматься наукой. Задача представителей старшего поколения – оказывать им всестороннюю поддержку, как в свое время помогали и нам. В этом и есть смысл развития науки, закон сохранения традиций и передачи опыта.

– Если говорить о стратегических задачах управления водными ресурсами России и охраны водных объектов, какие актуальные на современном этапе направления Вы бы выделили?

– В первую очередь, на фоне существующей климатической нестабильности необходимо определиться с ресурсной базой водного хозяйства. Во-вторых, исходя из интересов всех водопользователей, сформировать научно обоснованные требования к предоставляемым ресурсам, провести их ранжирование, а потом отработать технологии оптимального, регионального управления этими ресурсами.

Передовая водохозяйственная наука должна обеспечивать эффективное решение водохозяйственных задач как в масштабах страны и регионов, так и для отдельных водопользователей.

– Анатолий Павлович, заниматься наукой, действительно, сложно, как думают люди?

– Научная деятельность – это профессия, а в любой профессии есть свои сложности и особенности, есть и приятные моменты. В этом отношении профессиональное занятие наукой не отличается от других профессий.

– Есть ли ученые, которых Вы считаете для себя образцом?

– Мне посчастливилось общаться с целой плеядой известных ученых, наиболее сильное впечатление на меня произвели академики М.И. Быдыко, А.С. Монин. Вообще, в истории гидрологии немало ярких ученых и интересных личностей. Михаил Андреевич Великанов, Виктор Григорьевич Глушков – это гидрологи, которых все знают. Однако, если взять изданные бюллетени Государственного гидрологического института в период его создания и формирования за 1920–1924 годы, то больше всего публикаций у Александра Александровича Саткевича, заместителя директора института. А.А. Саткевич – крупный ученый-гидродинамик, был приговорен в 1918 году к расстрелу и его спасла А. Колонтай, обратившись лично к Ленину.

Он много занимался гидродинамикой русловых потоков, изучал структуру многолетних колебаний стока, используя методы теории нелинейных колебаний. Именно он первым предложил и обосновал термин «теоретическая гидрология». В 1938 году А.А. Саткевич был расстрелян, а в 1956 году восстановлен в составе Академии наук.

Еще один крупнейший, но малоизвестный в гидрологии ученый – Сергей Александрович Христианович. Пять лет работал в математико-гидрологическом отделе ГГИ. Разработал базовые уравнения по решению задач волн прорыва и быстротоков неустановившихся течений в реках и каналах. В 1937 году защитил две докторские диссертации. Вот эти базовые уравнения и методы их решения долгое время считались единственно возможными и классическими. У него есть мемуары «Воспоминания академика», где он писал, как был рад, что после Ленинградского университета попал в ГГИ, где его учили эффективному использованию математических методов для решения актуальных практических задач. Именем С.А. Христиановича назван один из крупнейших институтов Сибирского отделения наук РАН – Институт теоретической и прикладной механики.

– Если бы представилась возможность задать любому ученому любой эпохи вопрос, кто был бы этот ученый и что бы Вы спросили?

– Мне было бы интересно узнать у Э. Галлея, как ему удалось еще в начале XVIII века так точно оценить мировой водный баланс, а у А. Шези – почему он не включил в свою формулу для оценки средней скорости течения ускорение свободного падения, хотя был знаком с работой И. Ньютона.

– Если у Вас остается свободное время, чему Вы его посвящаете?

– Я люблю историю, поэтому в свободное время стараюсь что-то новое почитать, посмотреть по широкому спектру исторической тематики. Вот, например, знакомясь с историей древних цивилизаций, конечно, заинтересовался вопросами гидрологии. Инки в Южной Америке за тысячу лет до римских строили акведуки, которые были более технически совершенны, потому что надо было переводить воду при колоссальных уклонах и сооружать такие профили, которые сдерживали бы эти уклоны. Даже с позиции современных знаний такие системы очень сложно реализовать. Да и по римским акведукам, два из которых до сих пор действуют, многие вещи до сих пор непонятны, как это было сделано. Я пытался разобраться. Сложение римских цифр, не говоря уже об умножении, очень сложное. А для того, чтобы рассчитать скорость потока, нужно возводить в дробные степени. Используя римские цифры, сделать это практически невозможно. Были, вероятно, принципиально другие подходы, об этом можно долго рассказывать.

– Анатолий Павлович, что для Вас является самым главным в жизни?

– Сначала было стремление добиться каких-то успехов в науке, в гидрологии, сейчас для меня главное – обеспечить научный, карьерный рост моих учеников.

УДК 556.531; 771.712 *DOI: 10.35567/19994508-2024-1-16-31*

К совершенствованию системы регламентации отведения взвешенных веществ в поверхностные водные объекты с учетом их стохастической природы

Т.Н. Синцова[1] ✉, **А.П. Лепихин**[1,2]

✉ tanya_sinzova@mail.ru

[1]*Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь, Россия*

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

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Вся действующая в настоящее время система регламентации основывается на допущениях, что физические или химические показатели качества воды однозначно определяются совокупностью внутриводоемных и внешних антропогенных процессов. Однако динамика параметров, влияющих на состояние водного объекта, описывается, как правило, достаточно сложными случайными процессами. Наиболее ярко стохастическая природа показателей качества воды проявляется в регламентации взвешенных веществ. **Методы.** Для анализа колебаний содержания взвешенных веществ использовались материалы как регулярных наблюдений на сети Росгидромета, так и собственных наблюдений. Применение современных измерительных комплексов открывает принципиально новые возможности в системе сбора и обработки данных. **Результаты.** Исходя из действующей нормативной погрешности измерений концентраций взвешенных веществ, а также их естественной дисперсии в русловых потоках показана технологическая невозможность выполнения действующих нормативных требований к регламентации отведения взвешенных веществ. Предложена альтернативная система регламентации взвешенных веществ на основе использования автоматических измерительных комплексов. Указаны необходимые условия для обеспечения корректности функционирования системы регламентации отведения взвешенных веществ.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: взвешенные вещества, регламентация, стохастика, поверхностные водные объекты, качество воды, гетерофазнонеконсервативные вещества.

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания: проект «Исследование закономерностей эволюции гидросферы в районах интенсивного недропользования с целью минимизации экологического риска и обеспечения устойчивости водопользования», регистрационный номер НИОКТР № 1022040500593-9-1.5.12.

Для цитирования: Синцова Т.Н., Лепихин А.П. К совершенствованию системы регламентации отведения взвешенных веществ в поверхностные водные объекты с учетом их стохастической природы // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 1. С. 16–31. DOI: 10.35567/19994508-2024-1-16-31.

Дата поступления 14.11.2023.

© Синцова Т.Н., Лепихин А.П., 2024

To improving the system for regulating the discharge of suspended substances into surface water bodies, taking into account their stochastic nature

Tatyana N. Sintsova[1] ✉, **Anatoly P. Lepikhin**[1,2]

✉ tanya_sinzova@mail.ru

[1] *Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia*
[2] *RosNIIVKh Kama Branch , Perm, Russia*

ABSTRACT

Relevance. The entire current regulation system is based on the assumptions that physical or chemical indicators of water quality are unambiguously determined by a combination of internal and external anthropogenic processes. However, rather complex random processes usually describe the dynamics of the parameters that determine the state of a water body. The stochastic nature of water quality indicators is most clearly manifested in the regulation of suspended sediments. **Methods.** To analyze the suspended matter content variations we used outputs of both regular Rosgidromet network observation and our own observations. Application of the advanced gauging complexes create principally new opportunities in the system of data collection and processing. **Results.** Based on the current regulatory error in measuring the concentrations of suspended solids, as well as their observed natural dispersion in channel flows, we have shown that it is technologically impossible to fulfill the current regulatory requirements for regulating the removal of suspended sediments. We have proposed an alternative system for the regulation of suspended solids based on the use of automatic measuring systems, based on the assessment of water turbidity through a change in its optical density. We present the necessary preconditions for providing the correct functioning of the system for suspended matter disposal regulation.

Keywords: suspended solids, regulation, stochastics, geochemical, metrological, technological approaches, threshold indicators, heterophase non-conservative substances.

Financing: The work has been done with financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of the governmental assignment: "Investigation of regularities of the hydro/sphere evolution in the areas of intensive use of mineral resources in order to mitigate environmental risks and to provide sustainability of water use", registration number No. NIOKTR1022040500593-9-1.5.12.

For citation: Sintsova T.N., Lepikhin A.P. To improving the system for regulating the discharge of suspended substances into surface water bodies, taking into account their stochastic nature. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management.* 2024. No. 1. P. 16–31. DOI: 10.35567/19994508-2024-1-16-31.

Received 14.11.2023.

ВВЕДЕНИЕ

Проблематика отведения содержания взвешенных веществ в водные объекты довольно широка и включает, как минимум, семь актуальных аспектов регламентации:

– гидробиологические [1–3];
– санитарно-гигиенические[1,2];
– гидродинамические [4–9];
– географические [6–8, 10, 11];

[1] СанПиН 2.1.5.980-00. Гигиенические требования к охране поверхностных вод.
[2] СанПиН 2.1.4.1074-01. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества.

– технологические[3,4];
– мониторинговые [8, 12];
– гидрохимические [6–8, 13].

Каждому из этих аспектов посвящено большое количество исследований. Однако, несмотря на широкий охват проблематики, они не включают такой актуальный аспект, как статистические характеристики колебаний концентраций взвешенных веществ в водных объектах. Детальное исследование этого важного аспекта стало возможным только при переходе на автоматические системы контроля. Отметим, что именно данная проблематика может играть ключевую роль в построении современных систем регламентации взвешенных веществ в водных объектах.

Оценка актуального состояния и возможных экстремальных характеристик любого физического или химического показателя качества воды водных объектов может рассматриваться только с определенной погрешностью, соответственно, для того чтобы нормативы качества были эффективны, необходимо, чтобы они учитывали данную погрешность с требуемой надежностью. Содержание взвешенных веществ в наибольшей мере определяется гидрологическим режимом рассматриваемого водотока, являющимся сложным случайным процессом, поэтому его регламентация – наиболее яркий пример вероятности невыполнения установленных требований.

Значительное разнообразие факторов, определяющих в водотоке содержание взвешенных веществ, их существенная внутригодовая изменчивость обусловили для данного поллютанта принципиально отличную схему регламентации. Его регламентация строится не на некоторых пороговых значениях, единых для всех водных объектов, а на основе нормирования локальных изменений качества воды между фоновым и контрольным створами. Согласно Методике[5] содержание взвешенных веществ в контрольном створе водного объекта не должно превышать более чем на 0,25 мг/л по сравнению с фоновым створом показатели в водных объектах первой категории и на 0,75 мг/л – в водных объектах второй категории. Однако, согласно нормативным документам[6,7], средняя квадратическая погрешность определения взвешенных веществ составляет 10 %. Возникает вопрос, как должна быть построена система производственного мониторинга, которая позволяла бы с требуемой надежностью гарантировать выполнение требований. Парадокс ситуации заключается в том, что, с одной стороны, С.Н. Черкинский еще в 1947 г. указывал [14] на низкую обоснованность данных нормативов, отме-

[3] Р 52.24.353-2012. Отбор поверхностных вод суши и очищенных сточных вод.
[4] ПНД Ф 12.15.1-08. Методические указания по отбору проб для анализа сточных вод.
[5] Методика разработки нормативов допустимых сбросов загрязняющих веществ в водные объекты для водопользователей (с изменениями на 18 мая 2022 г.). Утв. Приказом Минприроды России от 29 декабря 2020 г. № 1118.
[6] РД 52.08.104-2002. Методические указания. Мутность воды. Методика выполнения измерений. Федеральная служба России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. СПб. Гидрометеоиздат, 2002.
[7] РД 52.24.468-2019. Массовая концентрация взвешенных веществ и сухого остатка в водах. Методика измерений гравиметрическим методом. Росгидромет. ФГБУ ГХИ. 2019.

чая, что они основывались на материалах Английской Королевской комиссии по пресноводному рыбоводству 1907 г., а, с другой стороны, взвешенные вещества являются наиболее распространенным и наиболее часто регламентируемым компонентом загрязнения отводимых сточных вод, т. к. они, кроме непосредственного воздействия на гидробионтов, могут выступать как активный транспортер гетерофазнонеконсервативных поллютантов. Однако ролью взвешенных веществ в переносе данных поллютантов можно пренебречь, если будет выполнено одно из следующих неравенств [6]:

$$\left(a_i \frac{S}{\rho_S}\right) \le C_{\phi i}, \qquad \left(a_i \frac{S}{\rho_S}\right) \le C_{ПДКi}, \tag{1}$$

где a_i – концентрация подвижных форм i – поллютанта на взвешенных частицах;

S – концентрация рассматриваемых взвешенных наносов;

ρ_S – плотность материала взвешенных наносов;

$C_{\phi i}$ – естественное фоновое содержание i – ингредиента в воде водного объекта.

Постановка задачи

Стохастичность как физических, так и химических показателей качества воды поверхностных водных объектов обусловливается совокупностью как метрологической погрешности их определения, так и случайным характером параметров их определяющих. Статистические особенности распределений концентраций поллютантов в отводимых сточных водах рассмотрены в [7]. Наиболее очевидны неопределенности, связанные с метрологической погрешностью определения показателей качества воды. Данные неопределенности невелики, относительная среднеквадратическая погрешность определения показателей качества воды, как правило, составляет ~ 10%[6]. При этом считается, что при формировании погрешностей измерений выполняются условия центральной предельной теоремы и их колебания описываются нормальным распределением, хотя в ряде случаев колебания погрешностей измерений могут описываться другими, существенно отличными от нормального распределениями [15]. Значительно более сложный характер носит оценка контролируемых показателей, связанная с их пространственно-временной изменчивостью, а также факторами формирования гидрологического и гидрохимического режимов водных объектов.

Учитывая тот факт, что практически все охраняемые водные объекты характеризуются турбулентным режимом, их оценка должна учитывать внешние, внутренние, пространственные и временные масштабы состояния водного объекта. При этом, если внутренние масштабы турбулентности определяются по гипотезе А.Н. Колмогорова [16] кинематической вязкостью воды (ν [м^2/с]) и скоростью диссипации турбулентной энергии (ε [м^2/с^3]), то внешние пространственные масштабы устанавливаются морфометрией водного объекта. Временные масштабы при диффузионном механизме переноса содержания контролируе-

мых показателей связаны с пространственными следующим образом $T = H^2/K_{zz}$, где T – характерный временной масштаб; H – характерный размер поперечного сечения; K_{zz} – коэффициент вертикальной турбулентной диффузии.

При корректном решении задач регламентации взвешенных веществ принципиальное значение, кроме принятия и установления допустимых пороговых уровней по концентрациям, имеет также необходимость принятия пространственно-временных масштабов действия данных нормативов [6]. Чувствительность гидробионтов к воздействию токсикантов, как показывают многочисленные исследования [1–3, 13, 17], в значительной мере определяется и временем воздействия. В то же время любая система как технического, так и питьевого водоснабжения обладает определенной инерционностью, поэтому в общем случае должно проводиться сопоставление пространственно-временных масштабов системы водопользования и соответствующих масштабов формирования качества воды.

Конечной целью организации и проведения водоохранных мероприятий является сохранение поверхностных водных объектов в близком к их естественному состоянию. Установление регламентируемых параметров удобнее всего проводить, исходя из оценки однородности качества воды в фоновом и контрольном створах. Данное требование, в первую очередь, относится к задаче регламентации взвешенных веществ, т. к. содержание взвешенных веществ в водных объектах, кроме внешнего воздействия, определяется также внутриводоемными факторами – гидродинамическим режимом водного потока. Поэтому система его регламентации строится на оценке значимости локальных превышений содержания взвешенных веществ в контрольном створе над фоновым. Полное описание стационарного случайного процесса задается установлением его функции распределения и автокорреляции, эти характеристики должны учитываться при построении системы регламентации. Если $f_ф(S)$, $f_к(S)$ – соответственно, функции плотности распределения взвешенных веществ в фоновом и контрольном створах, P – вероятность, тогда в общем случае необходимо, чтобы

$$|f_к(S) - f_ф(S)| \le P. \quad (2)$$

В настоящее время известно большое количество критериев оценки близости статистических распределений [18]. При этом оценка однородности концентраций взвешенных веществ в фоновом и контрольном створах с методической позиции на основе сопоставимости их функций распределения представляется наиболее обоснованной. Однако такой подход существенно усложняет процедуры расчетов, поэтому традиционно используются некоторые точечные оценки. Формально в действующих методических указаниях[5] не указывается, какие параметры должны использоваться при оценке различия концентраций взвешенных веществ в контрольном и фоновом створах рассматриваемого водотока. Как правило, применяются разовые значения или некоторые локальные средние значения. При значительной дисперсии оценки взвешенных веществ использование единичных замеров совершенно некорректно. Если оценка строится на сопоставимости локальных средних

значений, то наиболее удобно использовать критерий Стьюдента: данный критерий, во-первых, является параметрическим, во-вторых, его оценки робастны, т. е. достаточно устойчивы к отклонениям от нормального распределения. Сама схема данного критерия записывается следующим образом:

$$\frac{(\overline{C}_K - \overline{C}_ф)}{\left[\frac{\sigma_K^2}{N_k} + \frac{\sigma_ф^2}{N_ф}\right]^{1/2}} < t_{1-p}(N), \quad (3)$$

где $t_{1-p}(N)$ – квантиль распределения Стьюдента 1-p порядка на основе N замеров в контрольном и фоновом створах, $N = N_k + N_ф - 2$;

$\overline{C}_K$ – средняя концентрация взвешенных веществ в контрольном створе на основе N_k замеров;

$\overline{C}_ф$ – средняя концентрация взвешенных веществ в фоновом створе на основе $N_ф$ замеров;

σ_K^2 – дисперсия содержания взвешенных веществ в контрольном створе;

$\sigma_ф^2$ – дисперсия содержания взвешенных веществ в фоновом створе.

При этом необходимо учитывать, что дисперсия содержания взвешенных веществ как в контрольном створе, так и в фоновом створе

$$\sigma_K^2 = \sigma_{EK}^2 + \sigma_{metk}^2, \quad (4)$$

$$\sigma_ф^2 = \sigma_{Eф}^2 + \sigma_{metф}^2, \quad (5)$$

где σ_E^2 – дисперсия изменения естественного содержания взвешенных веществ в рассматриваемом водотоке;

σ_{met} – метрологическая погрешность измерения взвешенных веществ, соответственно, в контрольных и фоновых створах водотоках.

Используя соотношение (3), несложно оценить требуемое количество параллельных замеров взвешенных веществ в контрольном и фоновом створах для того, чтобы обеспечить выполняемость данного норматива с надежностью 1-p. При этом необходимо подчеркнуть, что измерения должны быть статистически однородными при заданных условиях.

Формально в действующей в настоящее время системе регламентации[8,9] не вводится и не рассматривается надежность соблюдения нормативных требований, априорно предполагается, как уже отмечалось, абсолютная надежность систем контроля. Однако, так как в качестве минимального нормативного расхода используется минимальный месячный расход года 95 % обеспеченности, можно предположить, что соблюдение нормативов должно обеспечиваться с надежностью 95 %. Критическое значение $t_{1-p}(N)$ монотонно убывает с увеличением N и стремится к $t_{1-p}(N) \to \text{const}$ при $N \geq 120$, при этом $t_{95\%} \to 1{,}64$.

Рассмотрим простейший пример. Пусть выполняется вполне естественное допущение, что $N_k \sim N_ф$, функция распределения подчиняется нормальному

[8] Методические указания по разработке нормативов допустимых воздействий. Утв. Приказом Минприроды России № 328 от 12.12.2007 г.

[9] РД 52.24.622-2001. Методические указания. Проведение расчетов фоновых концентраций химических веществ в воде водотоков.

закону, также дисперсии взвешенных веществ в фоновом и контрольном створах равны, в этом случае для оценки требуемого объема выборки, необходимой для соблюдения условий с надежностью 1-*p*, имеем

$$N \geq \left(\frac{\sigma \cdot \sqrt{2} \cdot t(N)}{\Delta C} \right)^2, \qquad (6)$$

где ΔC – разность выборочных средних значений концентраций взвешенных веществ в контрольном и фоновом створах.

Из соотношения (6) следует, что при указанных выше параметрах $\Delta\overline{C}$ = 0,25 мг/л, σ = 10 мг/л для обеспечения с надежностью 95 % выполнения данного норматива необходимо проведение $N > 9 \cdot 10^3$. Получается, что даже при ежедневных отборах проб воды в контрольном и фоновом створах для обеспечения соблюдения данных нормативных условий с требуемой надежностью 95 % нужны практически десятилетние наблюдения. Поэтому следует переходить на автоматические измерительные комплексы, где в качестве измеряемого показателя рассматриваются не непосредственно взвешенные вещества, а мутность воды, измеряемая через изменение оптической плотности (прозрачности воды). Современные технические средства контроля мутности хорошо отработаны, установлены надежные связи между мутностью воды и концентрацией взвешенных веществ.

Учитывая, что колебания содержания взвешенных веществ в русловых потоках характеризуются значительной дисперсией σ^2, принципиально важно определить, что должна обеспечивать регламентация взвешенных веществ – недопустимых статистически значимых в содержании взвешенных веществ с вероятностью P_1 или однородность содержания взвешенных веществ в фоновом и контрольном створах с надежностью P_2.

Формально, если исходить из требования (6), мы должны также принимать P_1 = 95 %, т. е. гарантировать, что вероятность различия в содержании взвешенных веществ в фоновом и контрольном створах должна быть менее 5 %. Однако, учитывая значимую дисперсию содержания *C*, это требование практически невыполнимо и экологически необоснованно. В то же время, если достаточно только наличия значимых статистических различий в содержании взвешенных веществ в контрольном и фоновом створах, то следует принимать *P* = 0,05.

Регламентация содержания взвешенных веществ в поверхностных водных объектах строится на оценке допустимости различия содержания данного поллютанта в фоновом и контрольном створах. Однако, чтобы корректно судить о значимости этих различий, они должны быть больше как их погрешности измерений, так и естественной флуктуации мутности в водотоке под воздействием турбулентных пульсаций. При этом система контроля должна позволять использовать как единичные, разовые замеры, так и их серии с осредненными значениями за некоторый промежуток времени.

Исходя из данной схемы, различия в содержании взвешенных веществ в фоновом и контрольном створах статистически значимы с надежностью 1-*p*, если будет выполняться неравенство

$$|\Delta C| \geq \sqrt{2}\left[\frac{\sigma_E^2}{N} + \frac{\sigma_{met}^2}{N}\right]^{1/2} \cdot t_{1\text{-}p}(N), \quad (7)$$

а при

$$|\Delta C| < \sqrt{2}\left[\frac{\sigma_E^2}{N} + \frac{\sigma_{met}^2}{N}\right]^{1/2} \cdot t_{1\text{-}p}(N) \quad (8)$$

нет оснований считать рассматриваемые различия статистически значимыми.

Необходимо, чтобы нормативные различия содержания взвешенных веществ между фоновым и контрольным створами были значимо больше ΔC_p. Для того чтобы уменьшить величину $\overline{\Delta C}_p^N$ (квантиль порядка p расчетного различия мутности воды в рассматриваемых створах при N параллельных измерениях), следует увеличить количество измерений или уменьшить погрешность измерений σ_{met}^2, т. к. величина турбулентной пульсации мутности воды не подлежит регулированию. При этом необходимо учитывать, что чем больший период измерений будет рассматриваться, тем больше будет дисперсия σ_E^2, обусловленная изменчивостью гидрологического режима водного объекта.

Задача регламентации принципиально упрощается, если рассматривать однородные по гидрологическому режиму временные интервалы, для которых величина дисперсии взвешенных веществ может приниматься как постоянная. В то же время пороговое значение допустимого превышения взвешенных веществ в контрольном створе по сравнению с фоновым должно определяться при единичных замерах соотношением в простейшем случае. Принимая, что колебания мутности воды подчиняются нормальному закону распределения, имеем:

$$\Delta C < (\sigma_E^2 + \sigma_{met}^2)^{1/2} \cdot P_{1\text{-}p}, \quad (9)$$

где $P_{1\text{-}p}$ – квантиль нормального распределения $N(0,1)$.

При этом $t_{1\text{-}p}(N) \rightarrow P_{1\text{-}p}$ при объеме рассматриваемой выборки $N \rightarrow \infty$. Современные измерительные комплексы обеспечивают весьма малую погрешность измерения, т. к. при этом, как правило, $\sigma_E^2 >> \sigma_{met}^2$, то соотношение (9) упрощается.

В целом, в допущении что колебания концентраций взвешенных веществ описываются нормальным распределением, при регламентации их отведения необходимо выполнение условия, при котором допустимое содержание взвешенных веществ в контрольном створе определяется следующим соотношением:

$$C_{взк} \leq C_{взф} \cdot (1 + K_p \cdot Cv), \quad (10)$$

где $C_{взк}$ – допустимая концентрация взвешенных веществ в контрольном створе;

$C_{взф}$ – текущее естественное содержание взвешенных веществ в фоновом створе;

K_p – квантиль порядка-p, устанавливаемая исходя из требования недопустимости с надежностью 1-p непревышения содержания взвешенных веществ в контрольном створе их естественных колебаний или нахождения с вероятностью p внутри диапазона их естественных колебаний.

Величина Cv определяется характером системы контроля качества отводимых сточных вод: чем меньше частота замеров и чем больше продолжительность времени между отдельными замерами, тем больше Cv. Если при этом различия в фоновом и контрольном створах с надежностью 95 %, то принимая в первом приближении $C_{взк} - C_{взф} \le Cv \cdot C_{взф} \cdot K_p$, $K_p = 1{,}64$, имеем $\Delta C_p < \sigma_{met} \cdot 1{,}64$. Данное соотношение может быть использовано как основное регламентирующее требование для взвешенных веществ при временных контролях $\Delta T < \left| \left(\frac{1}{Q} \left(\frac{\partial Q}{\partial t} \right) \right)^{-1} \right|$, где Q – расход водотока.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Существенный как практический, так и теоретический интерес представляют результаты статистической обработки колебаний мутности воды при различной частоте измерений в р. Каме (Камском водохранилище) в районе г. Березники (рис. 1). Данный участок представляет собой зону выклинивания Камского водохранилища. В теплый период при поддержании уровня воды, близкого к нормальному подпорному уровню, он характеризуется замедленным гидрологическим режимом, в зимний период при сработке водохранилища наблюдаются типичные речные условия. Данный водный объект испытывает значительные нагрузки от активно разрабатываемого крупнейшего Верхнекамского месторождения калийных и магниевых солей (ВКМКС), также он используется в водообеспечении промышленных предприятий этого комплекса.

Для анализа колебаний содержания взвешенных веществ использовали материалы регулярных наблюдений Росгидромета и собственных наблюдений с применением измерительного комплекса Valeoport MIDAS ECM (рис. 1). Данный прибор[10] позволяет определять направление и скорость потока, мутность, электропроводность, скорость звука в воде, температуру и давление. Измерительный комплекс может работать в нескольких режимах:

– в режиме профилирования, т. е. непрерывной регистрации изменений определяемых параметров с погружением или подъемом датчика;

– в режиме регистрации определяемых параметров на глубине погружения в течение длительного промежутка времени с заданной частотой.

Архитектура прибора позволяет производить измерения как в режиме реального времени с отображением и записью результатов на персональном компьютере, так и с записью во внутреннюю память прибора с последующей конвертацией этих данных.

Измеритель мутности регистрирует свет, рассеянный взвешенными в воде частицами, генерируя выходное напряжение, пропорциональное мутности или взвешенным твердым веществам. Используемая в данной работе модель – Midas ECM – имеет оптическую конструкцию, которая ограничивает измерительный объем в пределах 5 см от датчика, что позволяет проводить измерения вблизи дна, сводя к минимуму ошибочные отражения в ограниченных пространствах.

[10] Интернет-адрес Valeport MIDAS ECM https://www-valeport-co-uk.



Рис. 1. Картосхема исследуемого участка р. Камы (Камского водохранилища) в районе г. Березники.
Fig. 1. Map – diagram of the studied section of the Kama River (Kama Reservoir) in the area of Berezniki.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для оценки внутригодовой динамики содержания взвешенных веществ использовали материалы регулярных наблюдений Пермского ЦГМС – филиала ФГБУ «Уральское УГМС» на створе в 150 м выше автодорожного моста через р. Каму, т. е. рассматриваемые взвешенные вещества в значительной мере сформировались под воздействием естественных факторов. Результаты статистической обработки данных представлены в табл. 1.

Таблица 1. Статистические характеристики концентраций взвешенных веществ (мг/л) в р. Каме (Камское водохранилище) выше г. Березники при частоте измерений ν = 1/мес за период наблюдений Росгидромета 1974–2001 гг.
Table 1. Statistical characteristics of suspended solids concentrations (mg/l) in the Kama River (Kama Reservoir) upstream the city of Berezniki at a measurement frequency of ν = 1/month for the Rosgidromet observation period of 1974 – 2001.

Месяц	Объем выборки, N	Глубина, м	Среднее значение, $x_{ср}$	Среднеквадратическое отклонение	Коэффициент вариации, Cv	Коэффициент асимметрии, Cs	Эксцесс, Ex
Июль	9	9	15,578	11,743	0,754	1,382	0,059
Сентябрь	8	9	7,706	4,109	0,533	-0,446	-0,703
Октябрь	7	9	9,450	6,587	0,697	0,946	0,080
Февраль	6	0,5	6,867	4,720	0,687	0,349	0,193
Март	7	0,5	5,257	4,184	0,796	0,825	0,058

Как следует из данных табл. 1, концентрации взвешенных веществ характеризуются значительной изменчивостью, сопоставимой с их средними измеренными значениями, при этом коэффициент вариации *Cv* ~ 0,5 – 0,8. Следует подчеркнуть, что значимая изменчивость взвешенных веществ, хотя и существенно меньшая, чем представленная в табл. 1, фиксируется при значительно более краткосрочных наблюдениях при однородном гидрологическом режиме.

В табл. 2 представлены материалы измерений, выполненные с разной частотой за 22.07.2021 г., 14.10.2022 г. (ν = 1/с и 13.09-14.09.2021 ν = 12/ч). При такой высокой частоте измерений колебания мутности воды обусловлены турбулентными пульсациями.

Таблица 2. Статистические характеристики мутности воды (FTU) в р. Каме (Камском водохранилище) в районе г. Березники для различных частот измерений
Table 2. Statistical characteristics of water turbidity (FTU) in the Kama River (Kama Reservoir) in the area of Berezniki for different measurement frequencies

Дата	Объем выборки, N	Глубина, м	Частота измерений	Среднее значение, $x_{ср}$	Среднеквадратическое отклонение	Коэффициент вариации, *Cv*	Коэффициент асимметрии, *Cs*	Эксцесс, Ex
22.07.2021[1]	143	8	1/с	6,907	0,464	0,067	0,924	1,04
14.10.2022	538	7	1/с	6,659	0,502	0,075	1,132	2,07
13.09 – 14.09.2021	175	10	12/ч	6,394	0,362	0,057	0,824	1,109

Примечание: [1]измерения 22.07.2021 г. были выполнены при наличии существенной вертикальной плотностной стратификации водных масс.

Как следует из табл. 2, колебания мутности воды характеризуются весьма существенными значениями коэффициентов асимметрии и эксцесса. Эти особенности колебаний мутности воды подтверждаются материалами измерений, выполненными в другие сроки (22.07.2021 г. и 14.10.2022 г.) с использованием того же измерительного комплекса. Следует отметить, что существенная асимметрия колебаний мутности воды сохраняется и при измерениях со значительно меньшей частотой (ν = 12/ч) и продолжительностью измерений $T_{из}$ ~ 1 сут, выполненными 13–14.09.2021 г. с установкой прибора на глубине 10 м. При такой частоте измерений они вряд ли определяются только турбулентными пульсациями, вероятно, важную роль в их формировании играют значительно более инерционные, когерентные структуры.

Характерной особенностью пульсаций мутности воды является их значимая положительная асимметрия, соответственно, распределение показателей мутности в ее периферийных частях не описывается нормальным распределением (рис. 2). Данная особенность, по-видимому, обусловливается значительной отрицательной плавучестью взвешенных частиц. На наличие значительных тяжелых «хвостов» распределения взвешенных веществ указано в работе [7]. Значимое отличие распределения колебаний мутности воды, а, соответственно, и взвешенных веществ от нормального распределения, накладывает дополнительные трудности на порядок регламентации отведения взвешенных веществ.

При достаточной близости первых четырех статистических моментов показателей мутности воды при отсечке замеров с частотой 1/с и 12/ч следует обратить внимание на принципиальное отличие их спектральных плотностей (рис. 3–5), что вполне объяснимо принципиальным различием механизмов, обусловливающих их колебания.

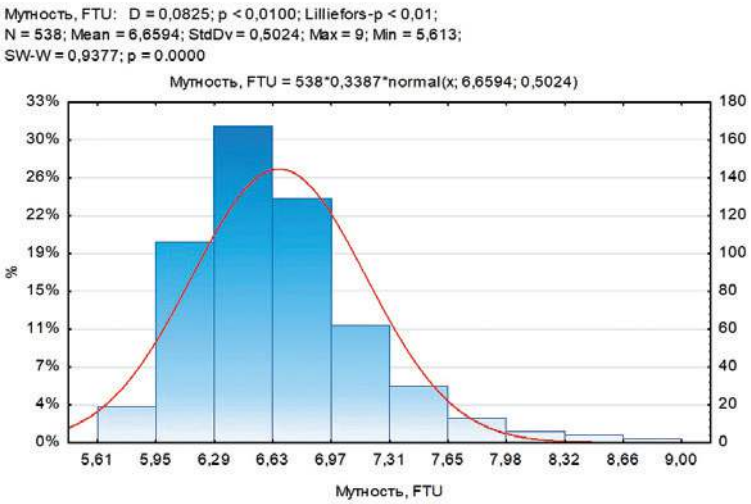


Рис. 2. График плотности вероятности распределения колебаний мутности воды в р. Каме (Камском водохранилище) в районе г. Березники при проведении эксперимента 14.10.2022 г. на глубине 7 м с частотой измерений ν = 1/с.
Fig. 2. Probability density graph of the distribution of fluctuations in water turbidity in the Kama River (Kama Reservoir) in the area of Berezniki during an experiment on October 14, 2022 at a depth of 7 m with the measurement frequency ν = 1/s.

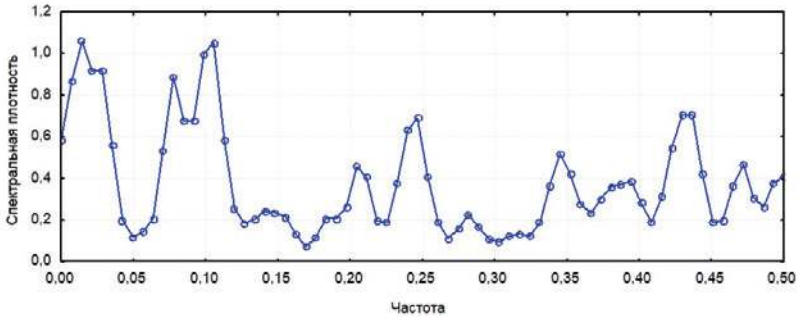


Рис. 3. График спектральной функции мутности в р. Каме (Камском водохранилище) в районе г. Березники за период измерений 22.07.2021 г. 13:54:36 – 22.07.2021 13:56:58 с 1-секундным интервалом.
Fig. 3. Graph of the spectral function of turbidity in the Kama River (Kama Reservoir) in the area of Berezniki for the measurement period 07/22/2021 13:54:36 – 07/22/2021 13:56:58 with a 1-second interval.

Если короткопериодные колебания мутности обусловливаются турбулентными пульсациями с ярко выраженными характерными временными масштабами T ~ 7 с и 40–50 с, то в суточных колебаниях отчетливо проявляются колебания с периодом ~ 0,25 и 5 ч. Период пять часов согласуется с характер-

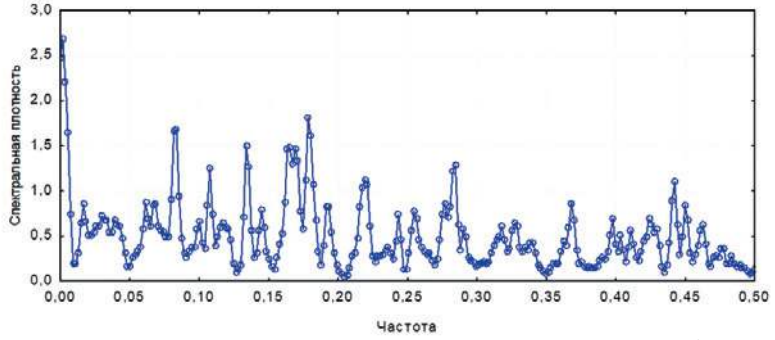


Рис. 4. График спектральной функции мутности в р. Каме (Камском водохранилище) в районе г. Березники за период измерений 14.10.2022 г. 14:48:30 –14:57:27 с 1-секундным интервалом.

Fig. 4. Graph of the spectral function of turbidity in the Kama River (Kama Reservoir) in the area of Berezniki for the measurement period 10/14/2022 14:48:30 –14:57:27 with a 1-second interval.

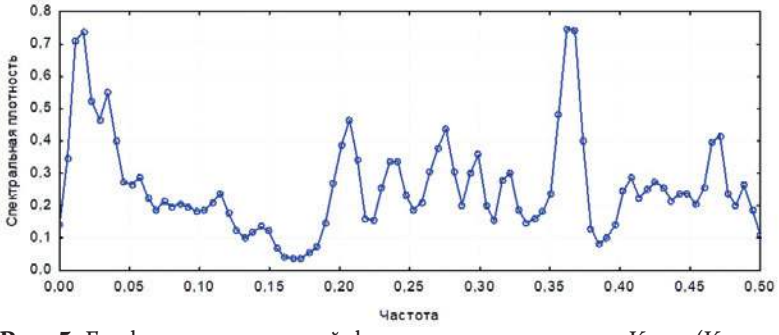


Рис. 5. График спектральной функции мутности в р. Каме (Камском водохранилище) в районе г. Березники за период измерений 13.09.2021г. 14:17:29 – 14.09.2021 4:47:28 с 5-минутным интервалом.

Fig. 5. Graph of the spectral function of turbidity in the Kama River (Kama Reservoir) in the area of Berezniki for the measurement period 09/13/2021 14:17:29 – 09/14/2021 4:47:28 with a 5-minute interval.

ным временем вертикального перемешивания водных масс вследствие вертикальной турбулентной диффузии. Очевидно, что $T \sim H^2/K_{zz}$, учитывая, что по многочисленным оценкам $K_{zz} = 0{,}07^* V_* H$, где H – глубина потока, м; V_* – динамическая скорость, $V_* = g^{1/2}V_{cp}/C$, g – ускорение свободного падения, м/с^2; V_{cp} – средняя скорость на глубине 10 м, C – коэффициент Шези. При $H \sim 10$ м, $V_{cp} = 0{,}532$ м/с, $C \sim 50$ м$^{1/2}$/с имеем $T \sim 5$ часов. Анализ колебаний мутности воды с 20-минутной частотой наблюдения представлен в работе [8].

ВЫВОДЫ

Применение современных измерительных комплексов открывает принципиально новые возможности в решении вопроса регламентации отведения взвешенных веществ, являющихся наиболее распространенным компонентом загрязнения сточных вод. Сложность этой задачи определяется многофакторностью формирования динамики потоков взвешенных веществ, их стохастическим характером. Поэтому традиционная схема регламентации, построенная на установлении порога не превышения содержания взвешенных веществ

в контрольном створе над фоновым, представляется некорректной при частоте контроля даже 1/сут, т. к. в водных объектах наблюдается значительная дисперсия взвешенных веществ, существенно возрастающая со снижением частоты опробования. Как следует из сопоставления табл. 1 и табл. 2, дисперсия содержания взвешенных веществ, вызываемая неоднородностью гидрологического режима водотока, на порядок больше дисперсий, обусловленных суточной изменчивостью внутриводоемных процессов. При этом принципиально важно подчеркнуть, что если обусловленная неоднородностью гидрологического режима дисперсия может быть принципиально уменьшена путем увеличения частоты опробования, переходом на гидрологически однородные отрезки, то дисперсия взвешенных веществ, вызванная турбулентными процессами, не может быть снижена и ее необходимо в обязательном порядке учитывать при регламентации отведения сточных вод.

Введенная более 80 лет назад традиционная схема регламентации отведения взвешенных веществ не учитывает сложный стохастический характер их динамики. Некорректность постановки задачи обусловила значительную внутреннюю противоречивость действующих в настоящее время методик и нормативов.

Для обеспечения корректности функционирования данной альтернативной, принципиально отличной от традиционной, схемы регламентации необходимо выполнение следующих условий:

– транспортирующая способность потока, определяющаяся его гидравлическим режимом, должна быть равномерна на участке от фонового до контрольного створа, а различие во времени отбора проб в этих створах существенно меньше времени добегания между ними. При этом для обеспечения однородности рядов по определению содержания взвешенных веществ в водном объекте должна обеспечиваться однородность их гидрологического режима;

– взвешенные вещества должны представлять собой химический нейтральный поллютант, не участвующий в транспортировке гетерофазнонеконсервативных веществ;

– размеры частиц взвешенных веществ должны быть однородны на всем рассматриваемом участке;

– влияние на содержание взвешенных веществ в фоновом створе вышерасположенного участка водного объекта должно быть минимально;

– нормативные различия содержания взвешенных веществ между фоновым и контрольным створами должны быть больше расчетных различий ΔC_p с надежностью 95 % при выполнении требования $\Delta C_p < \sigma_{met} \cdot 1{,}64$.

Для совершенствования системы регламентации отведения взвешенных веществ в поверхностные водные объекты с учетом их стохастической природы необходим переход на автоматические измерительные комплексы, обеспечивающие наименьшую погрешность измерения, а также на альтернативные системы регламентации взвешенных веществ ввиду технологической невозможности выполнения действующих нормативных требований к регламентации их отведения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лепихин А.П., Головачева С.И. К проблеме регламентации отведения взвешенных веществ в естественные водотоки // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2015. № 1. С. 4–13. DOI: 10.35567/1999-4508-2015-1-1.
2. Зиновьев Е.А., Китаев А.Б. О воздействии взвешенных частиц на гидрофауну // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2015. Т. 17. № 5. С. 283–288.
3. Чалов С.Р., Есин Е.В., Леман В.Н. Влияние взвешенных наносов на речные ихтиоцены // Известия ТИНРО. 2019. Т. 199. С. 179–192.
4. Гончаров В.Н. Движение наносов. М.-Л.: Главная редакция строительной литературы, 1938. 312 с.
5. Гришанин К.В. Основы динамики русловых потоков. М.: Транспорт, 1990. 320 с.
6. Веницианов Е.В., Лепихин А.П. Физико-химические основы моделирования миграции и трансформации тяжелых металлов в природных водах. Екатеринбург: Изд-во РосНИИВХ, 2002. 235 с.
7. Лепихин А.П., Синцова Т.Н. К статистике показателей качества отводимых сточных вод // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2023. № 2. С. 23–46. DOI: 10.35567/19994508_2023_2_2.
8. Чалов С.Р., Цыпленков А.С. Роль крупномасштабной турбулентности в изменении мутности речных вод // Вестник Московского университета. Сер. 5. География. 2020. № 3. С. 34–46.
9. Du Buat P.-L.-G. Principes d'hydraulique et de pyrodynamique. Paris, 1816; Hickin, E.J. River Geomorphology: Chapter 4 Sediment Transport, 1995. 106 p.
10. Долгоносов Б.М. Нелинейная динамика экологических и гидрологических процессов. Серия Синергетика: от прошлого к будущему. Книжный дом «Либроком», 2009. 440 с.
11. Dolgonosov B.M., Korchagin Catchment-scale model for predicting statistical distributions of hydrochemical and microbial indicators in river // Journal of Hydrology. 2013. Vol. 504. P. 104–114.
12. Богомолов, А.В., Лепихин А.П., Ляхин, Ю.С., Гребенева М.Г. Особенности колебаний вертикальных структур полей минерализации в Камском водохранилище в период летней межени в районе г. Березники // Горное эхо. 2021. № 4. С. 3–11. DOI:10.7242/echo.2021.4.1.
13. Лепихин А.П. К истории развития систем регламентации техногенных воздействий на водные объекты // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2021. № 2. С. 59–71. DOI: 10.35567/1999-4508-2021-2-4.
14. Черкинский С.Н. Санитарные условия спуска сточных вод в водоемы. М.: Изд-во МКХ РСФСР, 1947. 92 с.
15. Новоцкий Н.В., Зограф Н.А. Оценка погрешностей результатов измерений. Л.: Энергоатомиздат, 2- изд., Л.О., 1991. 304 с.
16. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. М.: Изд-во Наука, 1965. 639 с.
17. Чалов С.Р., Ефимов В.А. Гранулометрический состав взвешенных наносов: характеристики, классификации, пространственная изменчивость // Вестник Московского университета. Сер. 5. География. 2021. № 4. С. 91–103.
18. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М.: Физматлит, 2006. 816 с.

REFERENCES

1. Lepikhin A.P., Golovacheva S.I. On the problem of regulating the discharge of suspended substances into natural watercourses. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management.* 2015. No. 1. P. 4-13. DOI: 10.35567/1999-4508-2015-1-1 (In Russ.).
2. Zinoviev E.A., Kitaev A.B. On the impact of suspended particles on hydro/fauna. *Newsletter of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2015. T.17. No. 5. Pp. 283-288 (In Russ.).
3. Chalov S.R., Yesin E.V., Leman V.N. The influence of suspended sediments on river ichthyocenes. *Izvestia TINRO*. 2019. T. 199. Pp. 179–192 (In Russ.).
4. Goncharov V.N. Sediment movement. M.-L.: Glavnaya redaktsiya stroitelnoy literatury [*Main Publishing Board for Literature on Construction*], 1938. 308 p. (In Russ.).
5. Grishanin K.V. Fundamentals of channel flow dynamics. M.: Transport, 1990, 320 p. (In Russ.).
6. Venitsianov E.V., Lepikhin A.P. Physical/chemical basis for modeling the migration and transformation of heavy metals in natural waters. Ekaterinburg: Publishing house RosNIIVH, 2002. 235 p. (In Russ.).
7. Lepikhin A.P., Sintsova T.N. On the statistics of quality indicators of discharged wastewater. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management.* 2023. No. 2. P. 23-46. DOI: 10.35567/19994508_2023_2_2 (In Russ.).

8. Chalov S.R., Tsyplenkov A.S. The role of large-scale turbulence in changes in river water turbidity. *Bulletin of Moscow University.* Series 5. Geography. 2020. No. 3. Pp. 34–46 (In Russ.).
9. Du Buat P.-L.-G. Principes d'hydraulique et de pyrodynamique. Paris, 1816; Hickin, E.J. River Geomorphology: Chapter 4 Sediment Transport, 1995. 106 p.
10. Dolgonosov B.M. Nonlinear dynamics of ecological and hydrological processes. Synergetic series: from past to future. Book house «Librocom», 2009. 440 p. (In Russ.).
11. Dolgonosov B.M., Korchagin Catchment-scale model for predicting statistical distributions of hydrochemical and microbial indicators in river. *Journal of Hydrology*. 2013. Vol. 504. P. 104–114 (In Russ.).
12. Bogomolov, A.V., Lepikhin A.P., Lyakhin, Y.S., Grebeneva M.G. Features of fluctuations in the vertical structures of mineralization fields in the Kama Reservoir during the summer low-water period in the area of Berezniki. *Mountain Echo*. 2021. No. 4. Pp. 3–11. https://doi.org/10.7242/echo.2021.4.1 (In Russ.).
13. Lepikhin A.P. On the history of the development of systems for regulating technogenic impacts on water bodies. On the history of the development of systems for regulating technogenic impacts on water bodies. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management.* 2021. No. 2. Pp. 59-71. DOI: 10.35567/1999-4508-2021-2-4 (In Russ.).
14. Cherkinsky S.N. Sanitary conditions for the discharge of wastewater into water bodies. Publishing house of the MKH RSFSR, 1947. 92 p. (In Russ.).
15. Novotsky N.V., Zograf N.A. Estimation of errors of measurement results. L. Energoatomizdat, 2nd ed., L.O., 1991. 304 p. (In Russ.).
16. Monin A.S., Yaglom A.M. Statistical fluid mechanics. M.: Nauka, 1965. 639 p. (In Russ.).
17. Chalov S.R., Yefimov V.A. Granulometric composition of suspended sediments: characteristics, classifications, spatial variability. *Bulletin of Moscow University*. Series 5. Geography. 2021. No. 4. Pp. 91-103 (In Russ.).
18. Kobzar A.I. Applied mathematical statistics. For engineers and scientists. M.: Fizmatlit, 2006. 816 p. (In Russ.).

Сведения об авторах:

Лепихин Анатолий Павлович, д-р геогр. наук, профессор, главный научный сотрудник, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Камский филиал, Россия, 614002, г. Пермь, ул. Николая Островского, 113; заведующий лабораторией проблем гидрологии суши, Горный институт Уральского отделения Российской академии наук – филиал ФГБУН «Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук», Россия, 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78А; ORCID: 0000-0001-9874-3424; e-mail: lepihin49@mail.ru

Синцова Татьяна Николаевна, ведущий инженер, лаборатория проблем гидрологии суши, Горный институт Уральского отделения Российской академии наук» – филиал ФГБУН «Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук», Россия, 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78А; ORCID: 0000-0003-0327-4894; e-mail: tanya_sinzova@mail.ru

About the authors

Anatoly P. Lepikhin, Doctor of Geographic Sciences, Professor, Chief Researcher, Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection Kama Branch, ul. Nikolai Ostrovsky, 113; Perm, 614002, Russia; Head of the Laboratory of Land Hydrology Problems, "Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences" – branch of the Federal State Budgetary Institution of Science of the Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences ("Ural Branch of the Russian Academy of Sciences"), ul. Sibirskaya, 78A, Perm, 614007, Russia; ORCID:0000-0001-9874-3424; email: lepihin49@mail.ru

Tatyana N. Sintsova, Leading Engineer, Laboratory of Land Hydrology Problems, "Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences" – branch of the Federal State Budgetary Institution of Science of the Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences ("Ural Branch of the Russian Academy of Sciences"), ul. Sibirskaya, 78A, Perm, 614007, Russia; ORCID: 0000-0003-0327-4894; email: tanya_sinzova@mail.ru

УДК 556.551;627.157 *DOI: 10.35567/19994508-2024-1-32-45*

Гидрохимический режим и донные осадки предгорных озер Русского Алтая

Д.М. Безматерных ✉, О.Н. Вдовина

✉ bezmater@mail.ru

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

АННОТАЦИЯ

Актуальность. В последние десятилетия значительно выросла антропогенная нагрузка на предгорные озера Алтая, особенно – рекреационная. Однако гидрохимический режим и донные осадки большинства этих озер не изучены. **Методы.** В разные гидрологические сезоны 2022 г. исследованы основные гидрохимические характеристики и донные осадки шести предгорных озер: Ая, Белое, Киреево, Кокша, Колыванское и Светлое. Пробы донных осадков отобраны в конце мая-начале июня параллельно с гидрохимическими исследованиями. **Результаты.** Определена сезонная динамика гидрохимических характеристик. На химический состав поверхностных вод изученных озер наибольшее влияние оказали физико-географические характеристики их водосборов и особенности антропогенного воздействия.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Алтайский край, водоемы, низкогорные озера, рекреационное воздействие, донные грунты, качество воды.

Финансирование: Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИВЭП СО РАН (регистрационный № 121031200178-8).

Для цитирования: Безматерных Д.М., Вдовина О.Н. Гидрохимический режим и донные осадки предгорных озер Русского Алтая // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 1. С. 32–45. DOI: 10.35567/19994508-2024-1-32-45.

Дата поступления 18.05.2023.

Hydro/chemical regime and bottom sediments of foothill lakes of the Russian Altay

Dmitry M. Bezmaternykh ✉, Olga N. Vdovina

✉ bezmater@mail.ru

Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Barnaul, Russia

ABSTRACT

Relevance. Anthropogenic pressure on the Altay foothills lakes, especially recreational load, has increased significantly in recent decades. However, the hydro/chemical regime and bottom sediments for most of these lakes have not been studied. **Methods.** During different hydrological seasons of 2022 we studies the main hydro/chemical characteristics and bottom sediments of 6 foothill lakes were studied (Aya, Beloye, Kireevo, Koksha, Kolyvanskoye, and Svetloye). We took samples of bottom sediments in late May – early June, 2022 concurrently with hydro/chemical studies. **Results.** Seasonal dynamics of hydro/chemical parameters was determined. The chemical composition of the surface waters of the studied lakes was most influenced by the

© Безматерных Д.М., Вдовина О.Н., 2024

physical and geographical characteristics of their catchment areas and the peculiarities of the anthropogenic influence on the lakes.

Keywords: Altay Kray, reservoirs, low-mountain lakes, recreational impact, bottom soils, water quality, dynamics

Financing: This study was carried out as part of State Assignment (no. 121031200178-8).

For citation: Bezmatrnykh D.M., Vdovina O.N. Hydro/chemical regime and bottom sediments of foothill lakes of the Russian Altay in 2022. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2024. No. 1. P. 32–45. DOI: 10.35567/19994508-2024-1-32-45.

ВВЕДЕНИЕ

Алтай – самая высокая горная область Южной Сибири. Хребты его центральных и восточных районов поднимаются выше 3–4 км, они покрыты вечными снегами и ледниками. На Русском (Горном) Алтае насчитывается более 3500 озер, но только 75 из них имеют площадь свыше 1 км^2 [1]. К категории предгорных относят 102 озера Алтайского края и Республики Алтай [2].

Озера являются аккумулирующими геосистемами, которые сильно зависят от состояния их водосборных бассейнов [3], обусловленного как природными, так и антропогенными факторами, что позволяет использовать эти водоемы как чувствительные индикаторы региональных экологических изменений. Таким образом, физические и химические характеристики воды и донных осадков озер являются показателями экологического состояния не только самих озер, но и их водосборных бассейнов. Эти же показатели во многом определяют устойчивость озерных экосистем, потенциал самоочищения, темпы и направленность их сукцессий.

Гидрохимические характеристики и донные осадки большинства озер Алтая не изучены или малоизучены. В настоящее время на многие из этих водоемов, особенно на предгорные (низкогорные), значительно возросла рекреационная нагрузка. Водосборные бассейны исследованных озер интенсивно используются в рекреационных и сельскохозяйственных целях.

Цель исследования – изучить гидрохимический режим и донные осадки предгорных озер Русского Алтая для оценки состояния их экосистем в условиях современных антропогенных воздействий и изменений климата.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Согласно ГОСТ Р 59054-2020[1] все изученные озера по площади водного зеркала относятся к категории малых, а по максимальной глубине – к средним (оз. Ая), малым (озера Белое и Киреево) и очень малым (остальные) [4]. Их высота над уровнем моря находится в пределах 207–537 м (табл. 1).

Озеро Ая расположено в горной впадине на левом берегу р. Катунь. Ая – уникальный, единственный в своем роде, природный объект Алтая, до сих пор достоверно не установлен генезис озерной котловины [5]. Озеро относится к бессточным, оно не имеет поверхностного питания за счет впадающих и вытекающих ручьев и рек. Котловину наполняют подземные источники. Водоем

[1] ГОСТ Р 59054-2020. Охрана окружающей среды. Поверхностные и подземные воды. Классификация водных объектов.

является излюбленным местом отдыха туристов, на водосборе озера расположено более 40 баз отдыха, соответственно, высока степень антропогенного воздействия [6].

Таблица 1. Основные характеристики исследованных озер
Table 1. Main characteristics of the studied lakes

Озеро	Характеристики				
	Координаты	Площадь, га	Макс. глубина, м	Средняя глубина, м	Высота, м н.у.м.
Ая	51°54′15′′ с. ш. 85°51′13′′ в. д.	8,6	21,34	12,6	321
Белое	51°17′40′′ с. ш. 82°38′50′′ в. д.	299,0	6,87	4,6	537
Киреево	52°08′12′′ с. ш. 86°12′21′′ в. д.	39,5	5,22	2,1	251
Колыванское	51°21′50′′ с. ш. 82°11′30′′ в. д.	471,6	2,76	2,2	332
Кокша	52°18′39′′ с. ш. 85°43′51′′ в. д.	22,7	1,38	0,9	209
Светлое	52°17′37′′ с. ш. 85°39′01′′ в. д.	26,2	1,48	1,06	207

Озеро Киреево находится в Красногорском районе Алтайского края, оно зарегулировано дамбой на р. Ташта. Озеро также испытывает значительную рекреационную нагрузку, на его берегах расположено несколько туристических баз. Размерные характеристики озера очень малы, поэтому для него характерна высокая антропогенная нагрузка.

Озера Белое и Колыванское – тектонического происхождения, их отличительной особенностью являются многочисленные нагромождения скал – гранитных останцев различной формы. Озера привлекательны для туристов и в настоящее время для них характерна средняя степень антропогенного воздействия (оз. Белое – рекреационная и селитебная нагрузка, оз. Колыванское – рекреационная нагрузка) [7].

Озера Кокша и Светлое расположены в бассейне р. Кокша на Предалтайской равнине в районе луговых степей Северного Алтая и древней террасы р. Катуни. При небольшой площади водосбора, отсутствии впадающих ручьев (рек) и отрицательном балансе «осадки–испарение» озера имеют обильное питание, которое обусловлено подземными водами [8]. Фактически р. Кокша является протокой Катуни, часть которой в виде подземного потока скрыта под землей на глубинах до 25–30 м [9]. Из-за обилия ключей, бьющих со дна и питающих водоемы грунтовыми водами, зимой они не замерзают даже в сильные морозы, температура воды не опускается ниже +5 – +6 °С. Благодаря этому озера и незамерзающие части рек являются одним из немногих в регионе (и единственным таких масштабов) местом зимовки водоплавающих птиц, особенно лебедя-кликуна. Для оз. Светлое характерна средняя степень антропогенного воздействия (рекреационное воздействие), для оз. Кокша – относительно низкая (сельскохозяйственное воздействие).

В разные гидрологические сезоны (май-июнь, июль, сентябрь) 2022 г. исследованы основные гидрохимические характеристики шести предгорных озер Русского Алтая: Киреево Красногорского района, Ая (Айское) Алтайского района, Кокша и Светлое (Лебединое) Советского района, Колыванское Змеиногорского района, Белое Курьинского района Алтайского края (рис. 1). Пробы донных осадков были отобраны в конце мая – начале июня 2022 г. параллельно с гидрохимическими исследованиями. Всего отобрано 56 проб воды и 20 проб донных осадков. Прозрачность воды замеряли по белому диску Секки диаметром 20 см. Пробы воды отбирали с приповерхностного горизонта в пластиковую тару 1,5 л. Донные осадки собирали дночерпателем Петерсена.

Материал для исследований собирали и обрабатывали по стандартным гидрохимическим методикам [10, 11]. Гранулометрический анализ донных отложений выполнен в соответствии с ГОСТ 12536-2014[2]. Камеральная обработка гидрохимических проб и проб донных осадков проведена в лаборатории биогеохимии, хлорофилла «а» – в лаборатории гидробиологии ИВЭП СО РАН в соответствии с ГОСТ 17.1.4.02-90[3]. Статистический анализ полученных данных осуществлен в программе Statistica-12.



Рис. 1. Расположение исследованных озер.
Fig. 1. Location of the studied lakes.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

Донные осадки. Для всех изученных озер характерно преобладание илистых грунтов (табл. 2). По классификации современных терригенных осадков Н.М. Страхова [12] в озерах Ая и Кокша преобладали черные мелкоалевритовые илы, в оз. Светлое – черные крупноалевритовые илы, в оз. Колыванском – темно-серые глинистые и мелкоалевритовые илы, в озерах Белое и Кирее-

[2] ГОСТ 12536-2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава.
[3] ГОСТ 17.1.4.02-90. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла «а».

во – серые глинистые илы. В оз. Светлом выявлены участки дна, покрытые полуразложившимся комбикормом, которым служащие заказника обильно подкармливают зимующих здесь лебедей. Наименьшее содержание органического углерода отмечено в оз. Киреево, наибольшее – в оз. Ая. В центральной части оз. Ая выявлены жидкие черные илы с запахом сероводорода. Донные осадки изученных водоемов характеризовались небольшим содержанием органических веществ по типизации Н.В. Кордэ [13], т. е. относились к минеральным осадкам [14], только осадки оз. Ая можно охарактеризовать как переходные между минеральными и органоминеральными.

Таблица 2. Основные физические и химические показатели донных осадков исследованных озер, %

Table 2. Main physical and chemical indicators of bottom sediments in the studied lakes, %

Показатели	оз. Киреево	оз. Ая	оз. Кокша	оз. Светлое	оз. Белое	оз. Колыванское
$C_{орг.}$	1,2±0,4	10,2	6,8±1,5	3,1±1,7	7,6±2,4	5,0±1,2
Гранулометрический состав (размер частиц), мм:						
1–0,25	<0,01	5,75	3,08±0,85	16,05±9,76	7,59±2,04	1,73±0,37
0,25–0,05	5,89±1,09	24,65	23,90±3,22	43,59±14,58	17,88±5,35	18,09±3,56
0,05–0,01	43,01±11,50	39,24	47,91±5,67	20,24±9,18	25,01±10,04	39,57±3,48
0,01–0,005	17,15±2,92	13,12	8,27±1,38	7,37±4,76	9,79±3,58	11,36±0,63
0,005–0,001	14,04±3,16	11,96	12,29±4,36	9,65±7,86	13,89±4,29	14,33±1,53
< 0,001*	19,89±4,57	5,28	4,55±1,33	3,09±1,88	8,52±4,07	14,91±0,98
< 0,01**	51,08±10,50	30,36	25,11±6,90	20,12±14,49	32,19±11,52	40,60±3,05

Примечание: * – ил; ** – физическая глина.

Гидрофизические и гидрохимические показатели. По результатам анализа проб весной 2022 г. по уровню минерализации исследованные озера являлись ультрапресными – >0,2 г/дм^3: от 91,9 мг/дм^3 (оз. Колыванское) до 156,6 мг/дм^3 (оз. Белое). В соответствии с предложенной О.А. Алекиным [15] классификацией природных вод по химическому составу все изученные озера относятся к классу гидрокарбонатных, кальциевой группы (табл. 3). Минимальная прозрачность воды наблюдалась в оз. Киреево (0,39 м), максимальная – в оз. Ая (4,18 м), на озерах Кокша и Светлое – до дна. Вода озер Северного и Северо-Восточного Алтая (Ая, Киреево, Кокша, Светлое) по величине водородного потенциала относится к нейтральной-слабощелочной (pH = 7,4 – 7,6), озер Северо-Западного Алтая (Белое и Колыванское) – слабощелочной-щелочной (pH = 8,0 – 8,6). Окислительно-восстановительный потенциал (Eh) был положительный (186–268 мВ) и соответствовал окислительным условиям. Согласно классификации О.П. Оксиюк с соавторами [16], по содержанию общего фосфора озера Белое и Колыванское характеризовались как олиго-мезотрофные, Киреево, Кокша и Светлое – мезотрофные, оз. Ая – мезоэв-

трофное. Содержание нитритов во всех озерах ниже пределов обнаружения методами анализа. Концентрация нитратов достигала наибольших значений в заросшем макрофитами оз. Кокша, озерах Ая и Светлое, где служащие заказника обильно покармливают зимующих лебедей. Однако даже эти концентрации соответствуют чистым водам. На самых больших озерах Белом и Колыванском концентрация нитратов была ниже пределов чувствительности метода определения (< 0,1 мг/дм^3). Общее содержание органических веществ (по величине ХПК) определено наибольшим в оз. Киреево (15,7 мгO$_2$/дм^3), наименьшие величины зафиксированы в оз. Светлое (7,4 мгO$_2$/дм^3). При этом содержание легкоокисляемых органических веществ (по величине БПК$_5$) также было наибольшим в оз. Киреево (1,3 мгO$_2$/дм^3), а наименьшим – в оз. Ая (0,7 мгO$_2$/дм^3). Содержание хлорофилла «а» в воде соответствовало олиготрофным (озера Ая, Белое, Кокша и Светлое), мезотрофным (Колыванское) и эвтрофным (Киреево) водоемам.

Летом 2022 г. отчетливо проявилась разница в температурном режиме исследованных озер. Температура озер Кокша и Светлое была примерно в два раза ниже (10,2–10,7 °С), чем в остальных озерах (20,2–21,2 °С). Минимальная прозрачность воды по-прежнему наблюдалась в оз. Киреево (немного увеличилась – 0,48 м), максимальная – в оз. Ая (существенно уменьшалась – 1,58 м), а на озерах Кокша и Светлое – также до дна. Во всех озерах (кроме Колыванского) Eh несколько возрос и соответствовал окислительным условиям. Уровень минерализации воды существенно не изменился. В озерах Киреево и Кокша она возросла на 9,6–17,1 мг/дм^3, в остальных озерах незначительно понизилась на 1,0–9,1 мг/дм^3. Тип минерализации не изменился. Величина pH воды большинства озер незначительно повысилась, а в озерах Кокша и Светлое осталась без статистически значимых изменений. По содержанию общего фосфора оз. Колыванское стало мезоэвтрофным, остальные озера – олигомезотрофными. Концентрации нитратов в озерах Кокша и Светлое достоверно не изменились. В озерах Белое и Колыванское концентрация нитратов значительно возросла (до 0,71–1,14 мг/дм^3), а в оз. Ая значительно уменьшилась и стала ниже пределов обнаружения. Величина ХПК существенно возросла и достигала 20,8 мгO$_2$/дм^3 (вода «удовлетворительной чистоты») в оз. Ая, наименьшие показатели отмечены в оз. Белое – 15,8 мгO$_2$/дм^3 (класс «чистые воды»). При этом величина БПК$_5$ была наибольшей (превышала ПДКрх) в озерах Киреево (2,5 мгO$_2$/дм^3) и Колыванское, а наименьшей – в оз. Белое (0,6 мгO$_2$/дм^3), что в обоих случаях соответствовало предельно чистым водам. Содержание хлорофилла «а» в воде во всех озерах понизилось существенно и соответствовало олиготрофным (озера Ая, Белое, Кокша и Светлое), олигомезотрофным (Колыванское) и мезотрофным (Киреево) водоемам.

Осенью 2022 г. максимальная прозрачность воды увеличилась в оз. Белое (2,12 м), а минимальная – в озерах Колыванское (0,70 м) и Киреево (0,72 м). Eh в исследованных озерах несущественно изменился, но по-прежнему соответствовал окислительным условиям. Минерализация воды во всех озерах несколько повысилась, но осталась в пределах ультрапресной зоны.

Таблица 3. Основные физические и химические показатели воды исследованных озер
Table 3. Main physical and chemical parameters of the water in the studied lakes

Показатель	оз. Киреево	оз. Ая	оз. Кокша	оз. Светлое	оз. Белое	оз. Колыванское
27.05.2022 г. – 01.06.2022 г.						
Прозрачность, м	0,39±0,09	4,18±0,09	до дна	до дна	2,1±0,2	0,7±0,1
Eh, мВ	201±14	210±6	221±4	219±6	186±9	268±12
pH	7,4±0,0	7,5±0,2	7,6±0,01	7,5±0,1	8,0±0,1	8,6±0,1
Минерализация, мг/дм^3	115,0±3,2	110,0±6,3	107,8±1,7	119,3±3,9	156,6±14,6	91,9±0,9
CO_3^{2-}, мг/дм^3	<10	<10	<10	<10	<10	<10
HCO_3^-, мг/дм^3	79,3±0,0	75,2±5,4	73,2±5,3	81,3±2,0	112,0±8,4	62,6±0,9
Cl^-, мг/дм^3	<10	<10	<10	<10	<10	<10
SO_4^{2-}, мг/дм^3	11,5±0,6	10,6±0,0	15,8±0,0	15,8±0,0	<10	<10
Ca^{2+}, мг/дм^3	17,3±1,3	14,7±3,7	15,3±1,8	20,0±3,1	26,5±5,1	15,5±0,5
Mg^{2+}, мг/дм^3	7,2±0,7	8,0±1,6	6,8±1,4	6,0±2,1	8,4±0,9	4,8±0,0
$\Sigma Na^+ + K^+$, мг/дм^3	1,4±0,3	2,3±0,1	2,0±0,3	1,4±0,3	1,0±0,0	1,7±0,0
NO_3^-, мг/дм^3	0,25±0,04	0,30±0,00	3,04±0,48	2,97±0,59	<0,10	<0,10
NO_2^-, мг/дм^3	<0,033	<0,033	<0,033	<0,033	<0,033	<0,033
NH_4^+, мг/дм^3	0,14±0,09	0,09±0,02	0,05±0,00	0,06±0,01	0,09±0,00	0,15±0,06
PO_4^{3-}, мг/дм^3	0,009±0,007	0,022±0,010	0,017±0,002	0,009±0,004	0,015±0,000	<0,002
P общий, мг/дм^3	0,032±0,009	0,061±0,023	0,047±0,017	0,037±0,014	0,021±0,010	0,015±0,001
ХПК, мгO_2/дм^3	15,7±1,9	7,9±0,3	8,2±3,1	7,4±1,6	12,7±2,7	14,7±2,2
БПК$_5$, мгO_2/дм^3	1,3±0,03	0,7±0,1	0,8±0,1	0,8±0,1	0,6±0,1	1,1±0,1
ПО, мгО/дм^3	2,9±0,1	3,7±0,6	6,9±0,3	7,2±0,3	4,6±0,3	2,0±0,3
Хл. “а”, мг/м^3	25,63±6,36	3,04±0,61	0,55±0,08	0,34±0,08	5,29±0,72	13,55±0,94
20.07.2022 – 26.07.2022 г.						
Температура	21,2±0,8	21,2±0,1	10,7±1,0	10,2±1,1	22,6±0,6	20,2±0,6
Прозрачность, м	0,48±0,01	1,58±0,10	до дна	до дна	1,34±0,08	0,22±0,03
Eh, мВ	267±26	269±6	300±26	349±4	209±7	248±21
pH	7,6±0,1	8,2±0,1	7,6±0,1	7,4±0,0	8,4±0,2	8,6±0,0
Минерализация, мг/дм^3	132,1±2,3	106,1±3,8	117,4±2,7	113,5±2,7	147,5±5,9	90,9±0,2
CO_3^{2-}, мг/дм^3	<10	<10	<10	<10	<10	<10
HCO_3^-, мг/дм^3	95,6±2,03	70,2±3,52	80,4±2,0	79,3±1,8	105,7±4,1	61,0±0,0
Cl^-, мг/дм^3	<10	<10	<10	<10	<10	<10
SO_4^{2-}, мг/дм^3	<10	<10	<10	<10	<10	<10
Ca^{2+}, мг/дм^3	22,7±0,7	18,7±0,7	22,7±0,7	22,7±0,7	24,7±1,8	16,0±0,0
Mg^{2+}, мг/дм^3	6,4±0,4	4,8±0,7	4,0±0,8	3,6±0,0	7,2±0,7	3,6±0,0
$\Sigma Na^+ + K^+$, мг/дм^3	1,3±0,1	2,2±0,1	1,45±0,15	<1,0	1,8±0,3	1,9±0,0
NO_3^-, мг/дм^3	0,20±0,03	<0,10	3,20±0,42	3,18±0,27	1,14±0,56	0,71±0,06
NO_2^-, мг/дм^3	<0,033	<0,033	<0,033	<0,033	<0,033	<0,033
NH_4^+, мг/дм^3	0,24±0,03	0,14±0,02	0,20±0,01	0,11±0,00	0,09±0,02	0,58±0,09
PO_4^{3-}, мг/дм^3	0,009±0,001	0,006±0,001	0,005±0,001	0,006±0,001	0,007±0,002	0,028±0,005
P общий, мг/дм^3	0,024±0,002	0,017±0,004	0,017±0,003	0,016±0,002	0,022±0,006	0,087±0,020
ХПК, мгO_2/дм^3	19,5±0,3	20,8±0,4	18,7±0,6	18,3±0,3	15,8±0,2	18,8±0,3

Продолжение таблицы 3.

Показатель	оз. Киреево	оз. Ая	оз. Кокша	оз. Светлое	оз. Белое	оз. Колыванское
$БПК_5$, $мгO_2/дм^3$	2,5±0,1	2,03±0,1	1,1±0,1	0,8±0,1	0,6±0,1	2,5±0,2
ПО, $мгO/дм^3$	4,6±0,0	4,5±0,1	9,4±0,3	9,9±0,1	5,5±0,1	2,5±0,1
Хл. “a”, $мг/м^3$	16,42±1,59	3,07±0,40	0,59±0,10	0,44±0,17	4,13±1,31	51,86±15,64
05.09.2022 г. – 10.09.2022 г.						
Температура	18,5±0,3	18,8±0,3	7,6±1,4	8,8±0,7	19,6±0,2	19,5±0,5
Прозрачность, м	0,72±0,02	1,18±0,09	до дна	до дна	2,12±0,06	0,70±0,06
Eh, мВ	271±14	283±5	274±9	317±1	252±17	271±19
pH	7,8±0,0	8,3±0,1	7,5±0,0	8,0±0,1	7,9±0,0	7,7±0,0
Минерализация, $мг/дм^3$	149,7±1,5	109,5±1,2	140,7±2,0	149,4±5,4	169,7±5,7	106,3±1,1
CO_3^{2-}, $мг/дм^3$	<10	<10	<10	<10	<10	<10
HCO_3^-, $мг/дм^3$	108,8±1,0	70,2±1,8	98,6±1,0	104,7±3,7	123,0±4,4	71,2±2,0
Cl^-, $мг/дм^3$	<10	<10	<10	<10	<10	<10
SO_4^{2-}, $мг/дм^3$	<10	<10	<10	<10	<10	<10
Ca^{2+}, $мг/дм^3$	24,0±1,6	15,3±0,7	25,3±0,7	30,7±1,3	32,7±0,7	20,0±0,0
Mg^{2+}, $мг/дм^3$	6,8±0,4	7,2±0,7	4,4±0,4	3,6±0,0	6,0±1,4	3,6±0,0
$\Sigma Na^+ + K^+$, $мг/дм^3$	3,6±0,4	3,0±0,7	3,9±0,2	1,8±0,1	1,1±0,0	1,8±0,2
NO_3^-, $мг/дм^3$	0,67±0,12	0,40±0,03	2,57±0,22	3,56±0,13	0,40±0,02	0,23±0,02
NO_2^-, $мг/дм^3$	<0,033	<0,033	<0,033	<0,033	<0,033	<0,033
NH_4^+, $мг/дм^3$	0,12±0,01	0,07±0,00	<0,05	0,12±0,01	0,21±0,02	0,56±0,03
PO_4^{3-}, $мг/дм^3$	0,003±0,001	0,008±0,000	<0,002	<0,002	0,019±0,000	0,011±0,005
P общий, $мг/дм^3$	0,010±0,001	0,017±0,006	0,007±0,001	0,007±0,001	0,022±0,016	0,030±0,014
ХПК, $мгO_2/дм^3$	21,2±1,6	24,1±1,3	19,6±1,1	13,8±0,26	16,5±0,3	24,2±5,6
$БПК_5$, $мгO_2/дм^3$	2,2±0,1	1,8±0,1	1,0±0,1	0,5±0,0	0,5±0,1	2,2±0,1
ПО, $мгO/дм^3$	5,3±0,1	4,7±0,1	5,6±0,1	6,7±0,6	6,7±0,34	5,4±0,0
Хл. “a”, $мг/м^3$	12,37±1,91	1,25±0,32	0,46±0,12	0,26±0,06	2,16±0,17	8,54±1,32

Тип минерализации не изменился. В pH воды изученных озер наблюдались небольшие разнонаправленные изменения. Содержание общего фосфора в озерах Ая и Белое осталось без значимых изменений, в остальных озерах существенно понизилось. Максимальных величин оно достигало в оз. Колыванском, что соответствовало олигомезотрофным водам.

Концентрация нитратов в озерах Киреево и Ая существенно повысилась («слабозагрязненные» и «достаточно чистые» разряды качества вод). В озерах Белое и Колыванское их концентрация существенно понизилась (до 0,23–0,40 $мг/дм^3$), в озерах Кокша и Светлое изменения были не столь значительными. Величина ХПК возросла во всех озерах, кроме оз. Светлое. Максимальных значений она достигала в оз. Колыванском (класс воды «удовлетворительной чистоты»), минимальных – в оз. Светлом («чистые воды»). Величина $БПК_5$ незначительно снизилась во всех озерах, но в озерах Киреево и Колыванское она была близка к ПДКрх. Содержание хлорофилла «a» в воде во всех озерах также существенно понизилось, максимальный уровень выявлен в оз. Киреево, который соответствовал мезотрофному статусу.

Сравнение гидрохимического состава изученных озер с помощью кластерного анализа показало, что наиболее схожи озера Кокша и Светлое, которые относятся к одной озерно-речной системе (рис. 2). К этой группе, несмотря на морфометрические отличия, ближе всего по химическому составу вод, а также географически оз. Ая. Далее к ней примыкает оз. Киреево, которое также относится к озерам Северо-Восточного Алтая, но находится на противоположной стороне относительно р. Катуни. Наиболее отличными по химическому составу вод оказались озера Северо-Западного Алтая, причем оз. Белое существенно отличается, не только от озер Северо-Восточного Алтая, но и от оз. Колыванского.

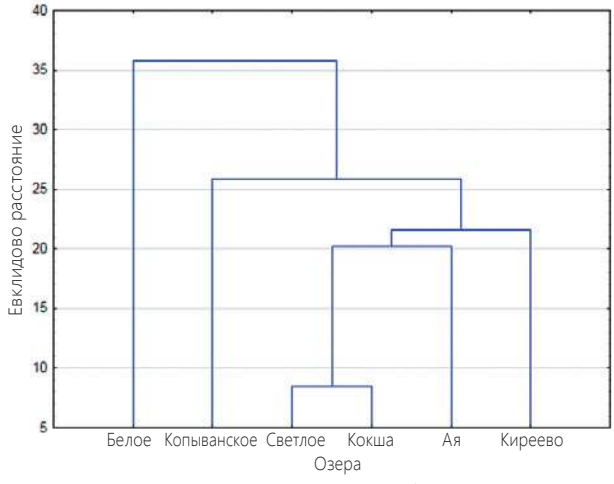


Рис. 2. Результаты кластерного анализа (single-linkage clustering) гидрохимических характеристик исследованных озер.
Fig. 2. Results of cluster analysis (single-linkage clustering) of hydrochemical characteristics for the studied lakes.

По некоторым из исследованных озер имеются ретроспективные данные о химическом составе вод, что позволяет оценить их многолетние изменения. По данным Н.Г. Селедцова [17] температура поверхностного слоя воды оз. Ая 17 сентября 1961 г. была 16 °С, летом 14–26 °С, 10 марта 1962 г. – 0 °С. Эти значения хорошо вписываются в выявленную нами сезонную динамику температуры воды. Химический состав воды 17 сентября 1961 г. также как в 2022 г. характеризовался преобладанием гидрокарбонатов. Общая минерализация составляла 185,4 мг/дм^3, что существенно выше значений 2022 г. Водородный потенциал равнялся 7,7, что укладывается в диапазон изменений проведенных исследований.

По данным исследований 1971–1972 и 1997–2003 гг. [6] соотношение основных ионов в воде оз. Ая было практически таким же, как и в 2022 г. Величина pH в разные годы колебалась от 6,5 до 8,8. За 30 лет отмечено снижение концентрации гидрокарбонатов от 135 до 98,9 мг/дм^3. К 2022 г. их величина еще снизилась до 70,2–75,2 мг/дм^3. В 1997–1998 гг. концентрация хлоридов составляла 17,6 мг/дм^3, а в 2022 г. она стала менее 10 мг/дм^3. По всей вероятно-

сти, именно этим обусловлено выявленное снижение общей минерализации. Противоположная тенденция отмечена в работе Г.Г. Русанова и С.В. Важова [5], которые считают, что в результате современных климатических изменений Алтая в сторону потепления и аридизации за 30 лет резко повысилась и минерализация воды в оз. Ая (с 88–164 до 234–240 мг/дм^3), а реакция водной среды стала слабощелочной.

Концентрации нитратов, нитритов и аммония в воде оз. Ая в 1997–2022 гг. по данным разных лабораторий значительно (на порядок) отличались, что, вероятно, обусловлено особенностями методов анализа, поэтому сравнивать полученные в рамках проведенного нами исследования данные с полученными ранее результатами не представляется возможным. Летние концентрации фосфатов в 1999 г. соответствовали нашим данным. Величины ХПК, ПО и $БПК_5$ в эти годы колебались, но существенных отличий по сравнению с полученными данными не обнаружено.

Летом 2002 г. содержание хлорофилла «а» в воде оз. Ая соответствовало уровню мезотрофных водных объектов. Еще в начале 1960 годов оз. Ая было олиготрофным [17]. В настоящее время оно пока еще сохраняет уровень мезотрофных водных объектов. Рассчитанная оптимальная нагрузка на оз. Ая с конца XX в. превышена примерно в 10 раз. Поступление в озеро загрязняющих веществ от рекреационной деятельности, хотя и носит сезонный характер, но, тем не менее, водоем уже не в состоянии самоочищаться в полном объеме. Так, в летний период 1999 г. и 2000 г. коли-индекс воды значительно превышал санитарные нормативы. По степени загрязненности водоем можно было отнести к умеренно загрязненному и даже загрязненному [6].

В монографии [7] отмечается, что повышение температуры воды оз. Колыванское, обусловленное изменением климата, уменьшением поверхностного и подземного стоков и высокая рекреационная нагрузка, сопровождающаяся усиленным поступлением в озеро биогенных элементов, будут способствовать бурному развитию фитопланктона и растительной биомассы в целом, что особенно характерно для непроточных и слабопроточных водоемов. В результате неизбежно произойдет ухудшение качества воды и ее газового режима. Вода станет непригодной для использования, резко ухудшатся условия жизни гидробионтов, начнутся заморы рыб и бентосной фауны.

По данным В.М. Рычкова и С.И. Рычковой [9], состав основных ионов и минерализация оз. Кокша ранее (дата отбора проб не указана) существенно не отличались от результатов проведенного нами исследования. Полученные химические данные согласуются с результатами гидробиологических исследований [18–20]. Уровень видового разнообразия и обилия макробеспозвоночных, значения большинства биоиндикационных индексов свидетельствуют о неблагоприятных условиях для развития зообентоса в озерах с наибольшей рекреационной нагрузкой – Ая и Киреево, и благоприятных условиях в озерах, в наименьшей степени подверженных рекреационной нагрузке – Кокша и Светлое. Согласно большинству биоиндкационных индексов вода озер Белое и Колыванское характеризовалась как «очень чистая» и «чистая» по шкале

Росгидромета[4]. В этих озерах значимых последствий антропогенного воздействия пока не выявлено, поскольку они отличаются значительно большими размерами и, соответственно, лучшими условиями самоочищения за счет разбавляющей способности воды [21].

Как следует из представленного выше анализа, на качество поверхностных вод изученных озер наибольшее влияние оказали не морфометрические характеристики озерных котловин, а физико-географические и геоэкологические особенности (вид и интенсивность природопользования) их водосборных бассейнов. Известно, что озера являются накапливающими элементами ландшафта, их экосистемы во многом зависят от почвенных и геохимических процессов в пределах бассейна, обусловленных климатом [3]. Кроме того, в связи с активным развитием туризма на Алтае для этих водных объектов характерна высокая антропогенная нагрузка, что особенно заметно на небольших предгорных водоемах. Причем воздействие оказывается не только на экосистемы водоемов, но и на ландшафты их водосборных бассейнов [5–7].

На основании анализа полученных лимнологических данных разработаны рекомендации по рациональному использованию изученных озер. Необходимо:

– сократить рекреационную нагрузку на оз. Ая (уменьшить число отдыхающих);

– контролировать рекреационную нагрузку на оз. Киреево (ограничить дальнейшее развитие туристических объектов на берегах);

– ограничить сельскохозяйственную нагрузку на водосборе оз. Кокша (следует отодвинуть обрабатываемые сельскохозяйственные угодья от уреза воды на 300–500 м, чтобы уменьшить поступление в озеро удобрений и ядохимикатов);

– необходимо более рационально организовать кормление зимующих лебедей на оз. Светлое;

– вести контроль за рекреационной и жилой застройкой берегов озер Колыванское и Белое.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованные в 2022 г. предгорные озера Алтайского края отличаются географическим положением, морфометрическими характеристиками и особенностям природопользования.

По содержанию основных ионов воды исследованных озер являются ультрапресными и относятся к классу гидрокарбонатных, кальциевой группы. По химическому составу вод наиболее схожи озера Кокша и Светлое, к ним примыкает оз. Ая, несколько больше отличается оз. Киреево; наиболее отличаются озера Белое и Колыванское. Выявленные особенности в высокой степени связаны с географическим положением изученных озер.

Для изученных гидрохимических характеристик установлена естественная внутригодовая динамика, обусловленная сменой гидрологических и биологи-

[4] ГОСТ 17.1.387-82. Охрана природы. Гидросфера. Правила контроля качества воды водоемов и водотоков.

ческих сезонов, а также изменением антропогенной нагрузки. Весной воды всех изученных озер по гидрохимическим показателям относились к классу «очень чистые». Летом качество вод трех озер (Ая, Киреево и Колыванское) ухудшилось за счет превышения ПДКрх для $БПК_5$. Осенью в озерах Ая и Киреево показатель $БПК_5$ снизился до нормативного уровня. Для всех изученных озер характерно преобладание илистых грунтов с небольшим содержанием органических веществ, что указывает на то, что их экосистемы справляются с поступающими биогенными и органическими веществами.

Анализ многолетних данных показал, что в оз. Ая наблюдается тенденция к уменьшению концентрации основных ионов и общей минерализации воды с 1960-х годов; достоверных изменений содержания биогенных элементов и органических веществ по сравнению с данными конца 1990-х гг. и начала 2000-х гг. не выявлено.

Таким образом, исследование гидрохимического режима и донных осадков шести предгорных озер Русского Алтая дает основание в общем оценить их экологическое состояние как хорошее, отдельные признаки загрязнения проявляются только в летний период. Анализ многолетних гидрохимических показателей не позволил выявить достоверных проявлений влияния изменения климата, что также может объясняться недостаточностью их изученности. Тем не менее, по результатам анализа полученных лимнологических данных разработаны рекомендации по рациональному использованию изученных озер, которые в т. ч. включают сокращение или контроль рекреационной и сельскохозяйственной нагрузки на озера, контроль рекреационной и жилой застройки берегов, более рациональное кормление зимующих лебедей.

Благодарности

Авторы благодарят сотрудников ИВЭП СО РАН М.С. Губарева, Е.Н. Крылову, Р.К. Свиридова и М.В. Лассого за помощь в проведении полевых работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гвоздецкий Н.А., Михайлов Н.И. Физическая география СССР. Азиатская часть. М.: Мысль, 1978. 512 с.
2. Соловов В.П. Продуктивность водоемов Алтайского края и пути их интенсивного рыбохозяйственного освоения // Биологические ресурсы внутренних водоемов Сибири и Дальнего Востока. М.: Наука, 1984. С. 13–24.
3. Россолимо Л.Л. Основы типизации озер и лимнологического районирования // Накопление вещества в озерах. М.: Наука, 1964. С. 5–46.
4. Губарев М.С., Безматерных Д.М., Свиридов Р.К. Современные данные о морфометрических характеристиках шести предгорных озер Русского Алтая // Известия Алтайского отделения Русского географического общества. 2023. № 68 (1). С. 5–15. DOI: 10.24412/2410-1192-2023-16801.
5. Русанов Г.Г., Важов С.В., Нерешенные проблемы озер Манжерокское и Ая. Бийск: АГГПУ им. В.М. Шукшина, 2017. 168 с.
6. Малолетко А.М. Прудникова Н.Г., Кириллова Т.В. и др. Озеро Ая и его окрестности (физико-географический очерк). Томск: Печатная мануфактура, 2004. 204 с.
7. Русанов Г.Г., Важов С.В., Бахтин Р.Ф. Колыванское озеро: происхождение, геоморфология, экология. Бийск: АГГПУ им. В.М. Шукшина, 2016. 168 с.
8. Галахов В.П., Губарев М.С. Водный баланс озера Светлое (Лебединое) // Известия Алтайского отделения Русского географического общества. 2018. Т. 3. № 50. С. 10–16.

9. Рычков В.М., Рычкова С.И. Феномен реки Кокши на Алтае // Природные ресурсы Горного Алтая. 2004. № 2. Режим доступа: http://altay-geojournals.ru/wp-content/uploads/2015/02/2-20.pdf (дата обращения 22.04.2022).
10. Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши. Ч. 2 / под ред. Л.В. Боевой. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2012. 720 с.
11. Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши. Ч. 1 / под ред. Л.В. Боевой. Ростов-на-Дону, 2009. 1150 с.
12. Методы изучения истории озер. Л.: Наука, 1986. 254 с.
13. Кордэ Н.В. Биостратификация и типология русских сапропелей. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 220 с.
14. Тарновский А.А. Геохимия донных отложений современных озер. Л.: Изд-во Ленинградского ун-та, 1980. 172 с.
15. Алекин О.А. Основы гидрохимии. Л.: Гидрометеоиздат, 1970. 444 с.
16. Оксиюк О.П., Жукинский В.Н., Брагинский Л.П. и др. Комплексная экологическая классификация качества поверхностных вод суши // Гидробиологический журнал 1993. Т. 29. № 4. С. 62–76.
17. Селедцов Н.Г. Айское, Манжерокское и Теньгинское озёра Горного Алтая // Известия Алтайского отдела Географического общества СССР. 1963. Вып. 2. С. 54–73.
18. Вдовина О.Н., Безматерных Д.М., Крылова Е.Н. Состав и структура сообществ донных беспозвоночных предгорных озер Светлое и Кокша (Алтайский край) // Известия Алтайского отделения Русского географического общества. 2022. № 3 (66). С. 33–47. DOI 10.24412/2410-1192-2022-16603.
19. Вдовина О.Н., Безматерных Д.М., Лассый М.В. Макрозообентос предгорных озер Северного и Северо-Восточного Алтая // Чтения памяти В.Я. Леванидова. 2023. Вып. 10. С. 33–40. DOI: 10.25 221/levanidov.10.04.
20. Bezmaternykh D.M., Vdovina O.N. Composition, structure and formation factors of macroinvertebrate communities in low-mountain lakes of the Russian Altai // Acta Biologica Sibirica. 2023. Vol. 9. P. 433–449. DOI: 10.5281/zenodo.8219818.
21. Скорняков В.А., Даценко Ю.С., Масленикова В.В. Картографирование условий самоочищения природных вод // Вестник Московского университета. Сер. 5. География. 1997. № 5. С. 62–66.

REFERENCES

1. Gvozdetsky N.A., Mikhailov N.I. Physical geography of the USSR. The Asian part. Moscow: Mysl, 1978. 512 p. (In Russ.).
2. Solovov V.P. Productivity of reservoirs of the Altay Kray and ways of their intensive fishery development. *Biological resources of inland reservoirs of Siberia and the Far East*. M.: Nauka, 1984. P. 13-24 (In Russ.).
3. Rossolimo L.L. Fundamentals of lake typification and limnological zoning. Accumulation of matter in lakes. Moscow: Nauka, 1964. P. 5-46 (In Russ.).
4. Gubarev M.S., Bezmaternykh D.M., Sviridov R.K. Modern data on morphometric characteristics of six foothill lakes of the Russian Altai. *Bulletin of the Altay Branch of the Russian Geographical Society.* 2023. No 4 (59). C. 74-82. DOI: 10.24411/2410-1192-2020-15908 (In Russ.).
5. Rusanov G.G., Vazhov S.V., Unsolved problems of the lakes Manzherokskoye and Aya. Biysk: V.M. Shukshin AGSPU, 2017. 168 p. (In Russ.).
6. Maloletko A.M. Prudnikova N.G., Kirillova T.V. et al. Lake Aya and its surroundings (physical and geographical sketch). Tomsk: Pechatnaya Manufactura Pabl., 2004. 204 p. (In Russ.).
7. Rusanov G.G., Vazhov S.V., Bakhtin R.F. The Lake Kolyvan: origin, geomorphology, ecology. Biysk: V.M. Shukshin AGSPU, 2016. 168 p. (In Russ.).
8. Galakhov V.P., Gubarev M.S. Water balance of lake Svetloe (Lebedinoe). *Bulletin of the Altay Branch of the Russian Geographical Society.* 2018. Vol. 3. No 50. P. 10-16. (In Russ.).
9. Rychkov V.M., Rychkova S.I. The phenomenon of the Koksha River in Altay. *Natural resources of the Altay Mountains*. 2004. № 2. URL: http://altay-geojournals.ru/wp-content/uploads/2015/02/2-20.pdf. (accessed: 04/22/2022) (In Russ.).

10. Manual on chemical analysis of surface waters of the land. Part 2 / Edited by L.V. Boeva. Rostov-on-Don: Southern Federal University Publ., 2012. 720 p. (In Russ.).
11. Manual on chemical analysis of surface waters of the land. Part 1 / Edited by L.V. Boeva. Rostov-on-Don, 2009. 1150 p. (In Russ.).
12. Methods of studying the history of lakes (Series: History of lakes). Leningrad: Nauka, 1986. 254 p. (In Russ.).
13. Korde N.V. Bio/stratification and typology of Russian sapropels. M.: USSR Academy of Sciences Publications, 1960. 220 p. (In Russ.).
14. Tarnovsky A.A. Geochemistry of bottom sediments of modern lakes. Leningrad: Leningrad University Publications, 1980. 172 p. (In Russ.).
15. Alekin O.A. Fundamentals of hydrochemistry. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1970. 444 p. (In Russ.).
16. Oksiyuk O.P., Zhukinsky V.N., Braginsky L.P., etc. Complex ecological classification of the quality of surface waters of the land. *Hydrobiological Journal.* 1993. Vol. 29. No. 4. P. 62-76. (In Russ.).
17. Seledtsov N.G. Aiskoye, Manzherokskoye and Tenginskoye lakes of the Altay Mountains. *Bulletin of the Altay Branch of the Geographical Society of the USSR*. 1963. Iss. 2. P. 54-73. (In Russ.).
18. Vdovina O.N., Bezmaternykh D.M., Krylova E.N. Composition and structures of the bottom invertebrates communities of the foothills lakes Svetloye and Koksha (Altay Kray). *Bulletin of the Altay Branch of the Russian Geographical Society.* 2022. No 3(66). P. 33-47. DOI: 10.24412/2410-1192-2022-16603 (In Russ.).
19. Vdovina O.N., Bezmaternykh D.M., Lassy M.V. Macroinvertebrates the foothill lakes of the northern and Northeastern Altay. *Vladimir Ya. Levanidov's Biennial Memorial Meetings.* 2023. Is. 10. P. 33-40. DOI: 10.25 221/levanidov.10.04, https://elibrary.ru/jmtqev (In Russ.).
20. Bezmaternykh D.M., Vdovina O.N. Composition, structure and formation factors of macroinvertebrate communities in low-mountain lakes of the Russian Altay. *Acta Biologica Sibirica*. 2023. Vol. 9. P. 433-449. DOI: 10.5281/zenodo.8219818
21. Skornyakov V.A., Dotsenko Yu.S., Maslennikova V.V. Mapping conditions of self-purification of natural waters. *Bulletin of the Moscow University. Series 5. Geography.* 1997. No. 5. P. 62-66. (In Russ.).

Сведения об авторах:

Безматерных Дмитрий Михайлович, д-р биол. наук, доцент, заместитель директора по научной работе, ФГБУН «Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук» (ИВЭП СО РАН), Россия, 656038, Барнаул, ул. Молодежная, 1; ORCID: 0000-0002-7747-4939; e-mail: bezmater@iwep.ru

Вдовина Ольга Николаевна, канд. биол. наук, научный сотрудник, лаборатория гидробиологии, ФГБУН «Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук» (ИВЭП СО РАН), Россия, 656038, Барнаул, ул. Молодежная, 1; ORCID: 0000-0002-2479-3338; e-mail: olgazhukova1984@yandex.ru

About the authors

Dmitry M., Bezmaternykh, Doctor of Biological Sciences, Associate Professor, Deputy Director, Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1, Molodezhnaya St., Barnaul, 656038, Russia; ORCID: 0000-0002-7747-4939; e-mail: bezmater@iwep.ru

Olga N. Vdovina, PhD in Biology, Researcher of the Laboratory of Hydrobiology, Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1, Molodezhnaya St., Barnaul, 656038, Russia; ORCID: 0000-0002-2479-3338; e-mail: olgazhukova1984@yandex.ru

УДК 556.1; 556.132.4 *DOI: 10.35567/19994508-2024-1-46-70*

Влияние метеофакторов, свойств снега и климатических изменений на процессы таяния снежного покрова

С.А. Лавров

sergey_lavrov_50@mail.ru

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

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Процессы таяния снежного покрова имеют важнейшее значение при разработке методов расчета и прогноза весеннего половодья, формировании водных ресурсов, эксплуатации и проектировании водохозяйственных систем. Рост актуальности исследования данных процессов возрастает в условиях потепления климата с учетом экологических и социально-экономических последствий изменчивости характеристик снежного покрова в современных условиях. **Методы.** Для определения закономерностей процессов снеготаяния использована физически обоснованная математическая модель вертикального тепло-влагопереноса в снежном покрове и турбулентного теплообмена в атмосфере. Проведены численные эксперименты по оценке влияния основных метеофакторов и физических свойств снега на интенсивность снеготаяния в весенний период. **Результаты.** По итогам математического моделирования для ряда расположенных в бассейне Волги станций за период 1952–2020 гг. выполнен анализ изменчивости трендов отдельных характеристик снеготаяния и водоотдачи из снежного покрова. Расчеты показали, что в последние десятилетия сроки начала и конца снеготаяния сдвигаются на более ранний период года.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: снежный покров, снеготаяние, водоотдача, математическое моделирование, метеофакторы, климатические изменения.

Для цитирования: Лавров С.А. Влияние метеофакторов, свойств снега и климатических изменений на процессы таяния снежного покрова // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 1. С. 46–70. DOI: 10.35567/19994508-2024-1-46-70.

Дата поступления 20.11.2023.

The influence of meteorological factors, snow properties and climate changes on the snow cover melting processes

Sergey A. Lavrov

sergey_lavrov_50@mail.ru

State Hydrological Institute, St.-Petersburg, Russia

ABSTRACT

Relevance. The processes of melting snow cover are of crucial importance in the development of methods for calculating and forecasting spring floods, the formation of water resources, operation and design of water management systems. The growing relevance of the study of these processes increases in the conditions of climate warming, taking into account the environmental and socio-economic consequences of the variability of snow cover characteristics in modern conditions. **Methods.** To reveal the regularities of snowmelt processes, a physically based

© Лавров С.А., 2024

mathematical model of vertical heat and moisture transfer in the snow cover and turbulent heat exchange in the atmosphere was used. Numerical experiments were carried out to assess the influence of the main meteorological factors and physical properties of snow on the intensity of snowmelt in the spring period. **Results.** Based on the results of mathematical modeling for a number of stations located in the Volga basin for the period 1952–2020 we have analyzed the variability of trends in individual characteristics of snowmelt and water output from snow cover. Calculations have shown that, in recent decades, the dates of the beginning and end of snowmelt have shifted to an earlier period of the year.

Keywords: snow cover, snowmelt, water output, mathematical modeling, meteorological factors, physical properties, climatic changes

For citation: Lavrov S.A. The influence of meteorological factors, snow properties and climate changes on the snow cover melting processes. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2024. No. 1. P. 46–70. DOI: 10.35567/19994508-2024-1-46-70.

Received 20.11.2023.

ВВЕДЕНИЕ

Снеготаяние в гидрологической науке неразрывно связано с методами расчета и прогноза весеннего половодья и водохозяйственной деятельностью. Будучи важнейшим компонентом земной природной системы, снег взаимодействует со всеми поверхностями, которые покрывает. В значительной мере завися от воздействия климатических изменений, снег одновременно является и одним из основных источников обратной связи в климатической системе Земли. Таяние снежного покрова описывается сложной комбинацией процессов тепло-влагообмена между атмосферой и снегом, снегом и почвой, а также совокупностью происходящих в снежной толще процессов. Значительный вклад в изучение снежного покрова, ежегодно в течение 4–6 месяцев доминирующего в ландшафтах России, внес П.П. Кузьмин [1].

С учетом климатических тенденций и значимости данного компонента в формировании многих природных процессов в последние годы возросло внимание к точности расчетов и прогнозов характеристик снежного покрова. Методы математического моделирования в настоящее время являются ведущими при решении данных задач. Международным научным сообществом был организован проект по взаимному сопоставлению моделей земной системы и модели снега Earth System Model-Snow Model Intercomparison Project (ESM-SnowMIP). Участники проекта оценивают прогресс в моделировании формирования и таяния снежного покрова за последние два десятилетия. Всего представлено 27 моделей различной степени сложности из разных стран мира. Общие результаты по оценке моделей и тенденции их развития представлены в работах [2, 3]. Отметим, что разработанная учеными ИВП РАН Е.М. Гусевым и О.Н. Насоновой модель SWAP (Soil – Water – Atmosphere – Plants [4] вошла в тройку лучших моделей, участвующих в международном эксперименте ESM-SnowMIP.

Однако анализ результатов по данному проекту [3] привел к неожиданному выводу: расширение количества экспериментальных площадок и математических моделей не привели к более глубокому пониманию процессов, происходящих в снежном покрове. Имеются проблемы, связанные с параметризацией альбедо и коэффициентов поверхностного обмена, к тому же в отдельных мо-

делях многие характеристики противоречивы. Неоднозначно и понятие «лучшая модель». Например, четыре из лучших моделей для расчета запасов воды в снеге являются одними из худших по точности моделирования температуры поверхности снега. Как известно, недооценка температуры поверхности снега приводит к погрешностям расчета продолжительности залегания и таяния снежного покрова.

С более подробными результатами сравнения моделей по проекту ESM-SnowMIP и проблемами моделирования можно ознакомиться в работах [2, 3]. Общим и очевидным выводом, вытекающим из сопоставления моделей снега, является то, что между моделями существуют значительные различия. Однако следует отметить тот факт, что эти различия в наибольшей степени проявляются при расчетах в более теплых условиях [5], особенно – в период весеннего таяния снега. Именно в более теплых регионах средней широты, например, в бассейне Волги, характеристики снежного покрова могут быть подвержены значительным изменениям из-за потепления климата.

Учитывая, что снеготаяние носит сложный комплексный характер и в него вовлечены многочисленные физические процессы, очевидна потребность в более сложных моделях, которые имитируют не только интегральные характеристики, но и профили внутренних свойств снежного покрова. Проведение численных экспериментов с помощью подобных моделей поможет понять взаимосвязи и зависимости между метеопараметрами и характеристиками снежного покрова в процессе его формирования и таяния. К тому же, данные модели позволят оценить степень климатической обусловленности этих процессов и их тенденции в современных изменчивых климатических условиях. Подобные исследования в настоящее время становятся все более актуальными.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Наиболее распространенным и простым методом оценки пространственной и временной изменчивости запасов воды в снежном покрове в процессе снеготаяния являются маршрутные снегомерные съемки. Порядок производства наблюдений изложен в РД 52.08.730-2010[1]. На выбранном заранее постоянном участке ведутся периодические измерения высоты и плотности снега, определяющие водный эквивалент снегозапасов (в иностранной литературе Snow Water Equivalent (SWE)). Однако данный метод измерений, несмотря на высокую точность определения характеристик снега, ограничен протяженностью станций, а пространственная неоднородность снега делает этот метод неэффективным в больших масштабах. В качестве альтернативы в последние годы все большее распространение получили бесконтактные и дистанционные методы определения характеристик снега.

Для измерения высоты снежного покрова широко используются лидарные [6, 7] и ультразвуковые методы [8]. В работе [7] результаты наземного лазерного сканирования сопоставлены с данными тахеометрической съемки (геодезической съемки) и ручного зондирования снега в точке с помощью снегомерной рейки и ультразвукового метода. Наборы данных, полученные с помощью та-

[1] Руководящий документ РД 52.08-730-2010. Санкт-Петербург, 2010. 44 с.

хеометрии, были использованы в качестве эталонных. Анализ точности лазерных измерений по сравнению с тахеометрией показал, что отклонение средних значений составляет 4,5 см, а стандартное отклонение в масштабах экспериментальной площадки равно приблизительно 2 см на расстояниях до 300 м.

Для пространственных обобщений SWE перспективным подходом является метод дистанционного зондирования естественного гамма-излучения земной поверхности, степень поглощения которого зависит от снегозапасов [9, 10]. В 1960 – 1970 годы данный метод также использовался при маршрутных снегосъемках на экспериментальных водосборах Государственного гидрологического института [11]. Но наибольшее развитие получил метод авиационной гамма-съемки[2], который пока применяется в России лишь эпизодически [12].

В последнее время для измерения SWE получили развитие методы микроволнового дистанционного зондирования, включая активные и пассивные типы [13, 14]. Наиболее бурно развиваются методы спутниковой микроволновой радиометрии [15]. Для оценки запасов влаги в снеге предприняты также попытки использовать методы спутниковой гравиметрии, для этого привлекаются данные, полученные с помощью спутниковой миссии GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment) [16, 17].

Каждый из представленных выше методов имеет свои достоинства и недостатки. Дистанционные спутниковые методы, несмотря на привлекательность и масштабность, пока уступают в точности измерения наземным. Подробные обзоры использования различных методов и точности данных, воспроизводимых современными технологиями для оценки запаса воды в снежном покрове, можно найти в работах [8, 18 – 21]. Для более детального исследования процессов снеготаяния и водоотдачи из снежного покрова разработан ряд методов непосредственного измерения данных характеристик. Как правило, для этой цели используются элементарные водонепроницаемые площадки, как стационарные, так и переносные [1], а также лизиметры различных конструкций [22 – 27].

Для изучения динамики формирования и таяния снежного покрова в 1950–1960 годы применяли стационарные установки гамма-просвечивания, позволяющие измерять SWE с точностью до 2 мм [1]. Полученные с помощью лизиметров результаты натурных измерений могут служить информационной базой для тестирования точечных математических моделей снеготаяния. Проблема зачастую заключается в плохом соответствии между таянием снега на поверхности и водой, поступающей к основанию снежного покрова на единицу площади, т. е. водоотдачей. Перемещение воды с поверхности снежного покрова к его основанию носит сложный характер: талая вода движется как по полувертикальным изолированным каналам, так и вдоль стратиграфических особенностей, препятствующих вертикальному потоку. В результате, измеряемая водоотдача из снежного покрова подвержена значительным вариациям и находится в зависимости от площади лизиметров незакрытого типа. По данным работы [24] коэффициенты вариации водоотдачи из снега

[2] Методические рекомендации по оценке запасов воды на поверхности водосборов в период весеннего снеготаяния на основе авиационных гамма-съемок. Ленинград, 1986. 37 с.

для лизиметров площадью 2 м^2 составляли 0,1–1,0, для лизиметров площадью 6 м^2 – 0,1–0,3, для лизиметров площадью 10 м^2 – 0,02–0,08. Изменчивость ежемесячного оттока из лизиметров площадью 10 м^2 обычно находилась в пределах 4 % друг от друга.

Высокая степень вариации водоотдачи из снежного покрова на небольших площадях (2 м^2 или менее), характерная для незакрытых лизиметров таяния снега, может быть проблемой для разработчиков моделей таяния снега. Использование лизиметров закрытого типа искажает процессы снеготаяния и водоотдачи и приводит к большим погрешностям – до 30 % [1].

Несмотря на постоянное совершенствование методов измерения характеристик снежного покрова, наибольшее распространение получили расчетные методы. В настоящее время разработан широкий класс моделей формирования и таяния снежного покрова – от простых регрессионных моделей до очень сложных моделей с распределенными параметрами. Выбор модели для расчетов зависит от объема исходной информации и необходимой степени детальности воспроизведения процессов, протекающих в пределах снежной толщи. Обзор многих методов расчета таяния снега дан в работе [28].

Простейшие из моделей основаны на использовании уравнений, включающих температурный коэффициент стаивания:

$$M = b\,(T_a - T_b), \qquad (1)$$

где M – количество тающего снега, мм/сут;

T_a – среднесуточная температура, °С;

T_b – пороговая температура, °С (пороговая температура T_b обычно устанавливается равной 0 °С, но в особых случаях могут использоваться другие значения);

b – температурный (градусно-дневной) коэффициент таяния снега (мм/(°С·сут), в иностранной литературе обычно используется обозначение DDF.

Установлено, что DDF снега значительно варьирует в разных регионах, изменяясь от 1 до 10 мм/(°С·сут).

В концептуальную модель таяния снега (1) внесено множество улучшений, в результате которых учтено влияние на коэффициент стаивания различных факторов, включая состояния снега, плотности, лесного покрова, загрязнителей поверхности снега, топографии и т. д. Например, в исследовании [29] для расчета изменения DDF в разные сезоны использовали плотность снега, в работе [30] смоделировано сезонное изменение между минимальным и максимальным значениями DDF за год с применением синусоидальной функции. Применяя в качестве входных переменных данные о среднесуточной температуре воздуха, давлении пара, направлении ветра и величине суммарной солнечной радиации, авторы исследования [31] проанализировали эффективность различных регрессионных моделей и установили, что если учитывается только одна метеорологическая переменная, наиболее информативной является среднесуточная температура воздуха. Наилучшие же результаты дает добавление в уравнение (1) таких переменных, как среднесуточное давление пара, скорость ветра и суммарное количество солнечной радиации.

Улучшение модели, основанной на температурном коэффициенте стаивания, идет также по пути изменения ее структуры и появлении пространственно-распределенной модели «градус – день». В работе [32] исследуемый бассейн разделен сеткой с ячейками размером 20×20 м и разработана модель распределенного почасового таяния снега. Модель использует коротковолновое излучение ясного неба с поправкой на температуру воздуха и рельеф местности для улучшения оценки таяния. Авторы исследования [33] создали распределенную почасовую модель таяния снега с разрешением 30 м, используя коэффициенты стаивания и расчеты коротковолнового излучения ясного неба, которые учитывали местный наклон.

При использовании в модели в явном виде элементов полного теплового баланса поверхности снега она расценивается как физическая модель энергетического баланса. Существует широкий диапазон таких моделей, различающихся в зависимости от того, какой из элементов измеряется прямо и какие эмпирические уравнения используются для оценки остальных элементов. Значительный вклад в разработку данного класса моделей внесли Кузьмин и Андерсон [1, 34].

Общая форма модели энергетического баланса при таянии снега имеет вид:

$$L_S M_S = R_S + Q_E + Q_S + Q_G + Q_P, \quad (2)$$

где L_S – удельная теплота таяния снега;

M_S – количество тающего снега;

R_S – радиационный баланс поверхности снега;

Q_E – скрытый тепловой поток, вызванный испарением со снега;

Q_S – явный турбулентный тепловой поток;

Q_G – тепловой поток из почвы;

Q_P – тепло, передаваемое в снежную толщу дождем.

Процесс таяния, когда снег достаточно толстый, можно лучше оценить, разделив его на множество слоев. В работе [35] использован метод конечных разностей для расчета многослойной модели снега, автор учитывает множество параметров снега, в т. ч. и потоки жидкой воды через разные слои.

Создание моделей, основанных на использовании теплового баланса, начинается с интегрирования уравнений, описывающих баланс массы и энергии. Вместе с тем, в моделях с распределенными параметрами процессы, протекающие в пределах снежного покрова, рассматриваются детально. В эти модели вводятся дополнительные уравнения, отражающие отдельные свойства снежного покрова. Один из обычных способов упрощения этих уравнений предполагает разграничение между низкотемпературным сухим снегом и зрелым влажным снегом. Далее модели можно разделить на те, в которых решается уравнение теплового потока в сухом снеге [36, 37], и модели, основанные на уравнении движения воды в зрелом снеге [38, 39]. Недостаток такого подхода заключатся в том, что на его основе трудно реализовать переход между двумя этими уравнениями, особенно если имеет место несколько границ, разделяющих сухой и зрелый снег и изменяющихся в пространстве и во времени.

Моррис и Годфри [40, 41], используя результаты, полученные Колбеком [38] на основе анализа термодинамики влажного снега, разработали модель с распределенными параметрами, в которой отсутствует резкий переход между низкотемпературным и зрелым снегом, а уравнения теплового потока и движения воды решаются применительно к температурам, меньшим или равным 0 °С. Существует несколько успешных моделей в области водно-тепловой связи между мерзлым грунтом и снегом [42– 44]. Процессы метаморфизма снега были учтены в численной модели [45], которая детально описывает трансформацию профилей температуры, плотности и содержания жидкой влаги в снежном покрове в зависимости от погодных условий. Проведено сравнение смоделированных характеристик снежного покрова с наблюдениями в полевых условиях. Модель показала себя очень эффективной при моделировании эволюции стратиграфии снежного покрова в течение всего зимнего сезона.

Недостатком представленных выше моделей формирования и таяния снежного покрова является неполнота описания физических явлений, вовлеченных в данные процессы. Нами предлагается использовать физически обоснованную математическую модель вертикального тепло-влагообмена в системе атмосфера–снежный покров–почва, которая описывает большинство значимых процессов, протекающих в снежной толще. Данная модель является составной частью общей модели гидрологического цикла в точке водосбора [46, 47].

Для описания происходящих в снежном покрове процессов использовалась система трех дифференциальных уравнений в частных производных. Первое уравнение является уравнением сохранения энергии в снежной толще, записанным в универсальном виде, пригодном 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 [46]. Второе уравнение описывает изменения плотности твердой фазы воды в снеге в процессе замерзания–таяния, конденсации – испарения и в процессе оседания. Третье уравнение данной системы описывает поток жидкой влаги в талом снеге при снеготаянии. Уравнения турбулентной диффузии в прилегающем к снегу слое воздуха и теплового баланса его поверхности служат в качестве верхних граничных условий при решении уравнений тепло-влагопереноса в снежной толще и расчета интенсивности снеготаяния. Подробное описание алгоритма численной реализации модели и определение всех параметров и характеристик дано в работе [46].

В качестве исходной информации для математического моделирования использовали среднесуточные значения метеоэлементов: температура, осадки, влажность почвы, скорость ветер, влажность воздуха и облачность.

Тестирование модели

На наш взгляд, тестирование физически обоснованной математической модели, каковой является вышеописанная модель формирования снежного покрова, должно быть многоуровневым. Проверке на адекватность описания природных процессов должны подвергаться все ее блоки. В работе [48] подобный подход был осуществлен при моделировании испарения с поверхности

снега. Однако процессы снеготаяния и водоотдачи являются еще более неоднородными в пространстве и времени, чем испарение. Как было показано выше, лизиметрические исследования указывают на значительные вариации измеренных величин водоотдачи [24]. Поэтому нами для тестирования использовались наблюдения на водонепроницаемых стоковых площадках, проводимых на Валдайском филиале ГГИ в период с 1968 по 1978 гг. [49]. Наиболее полный ряд наблюдений представлен на площадке длиной 10 м и шириной 2 м. На рис. 1 приведены результаты сопоставления смоделированных и измеренных среднесуточных величин водоотдачи из снега за период весеннего половодья.

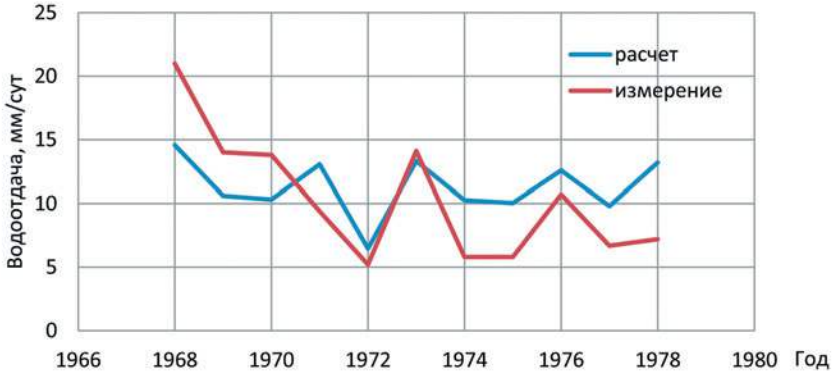


Рис. 1. Многолетняя динамика рассчитанных и измеренных среднесуточных значений водоотдачи из снега на водонепроницаемых стоковых площадках Валдайского филиала Государственного гидрологического института.
Fig. 1. Many-year dynamics of the pre-calculated and measured average daily values of water output from snow cover at the water-proof flow site of the State Hydrological Institute Valday Branch.

Сопоставление данных показывает, что имеются значительные погрешности расчета данной характеристики снеготаяния. Коэффициент корреляции между расчетными и измеренными величинами составляет всего 0,62. Данный факт объясняется невозможностью смоделировать все реальные условия снеготаяния, используя лишь среднесуточную метеорологическую информацию по станции Валдай, и отсутствие экспериментальной информации о потоках солнечной радиации. Тем не менее, модель довольно точно воспроизводит динамику многолетних изменений водоотдачи из снега, что, в общем, подтверждает возможность модели адекватно описывать основные закономерности метеозависимости процесса снеготаяния.

Выполнены также сопоставления модельных и измеренных значений суточных слоев водоотдачи для стоковых площадок Подмосковной водобалансовой станции. Данные измерений получены на основе использования метода прямой снегосъемки[1]. На рис. 2 приведено сравнение графиков хода суммарного слоя водоотдачи на стоковой площадке № 7 во время весеннего снеготаяния 1963 г. Коэффициент корреляции между расчетными и измеренными среднесуточными данными водоотдачи для этого случая равен 0,89, т. е. довольно высокий. Однако укажем на то, что нами выбран лучший вариант сопоставления, который был получен для упомянутой стоковой площадки. На дру-

гих площадках погрешности расчета выше. Это еще раз подтверждает факт значительной пространственной неоднородности водоотдачи и существенную роль локальных природных условий исследуемого участка водосбора в этом процессе.

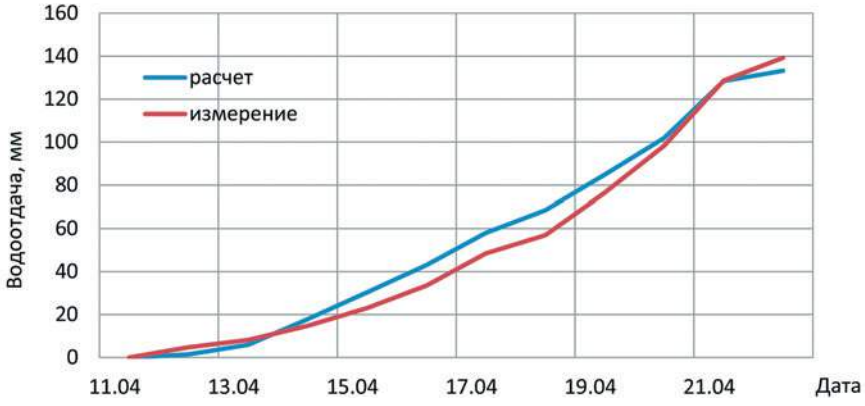


Рис. 2. Динамика суммарного слоя водоотдачи на Подмосковной водобалансовой станции, весна 1963 г.
Fig. 2. The dynamic of the total water output layer at the Moscow water balance station, spring 1963.

Влияние метеофакторов и свойств снежного покрова

Временную и пространственную изменчивость характеристик снеготаяния в основном определяют вариации таких метеорологических переменных, как влажность и температура воздуха, осадки, скорость ветра, потоки длинноволновой и коротковолновой радиации. В конечном итоге именно их изменчивость и приводит к климатическим изменениям многих гидрологических характеристик, в т. ч. и параметров снеготаяния.

Для лучшего понимания особенностей влияния метеорологических переменных на процессы снеготаяния выполнен ряд исследовательских работ [1, 50–52]. В статье [50] смоделированы условия таяния при различных температурах воздуха и потоков коротковолнового и длинноволнового излучения. Показано, что снег может таять при температуре воздуха –10 °С и оставаться замороженным при температуре +10 °С. В работе [51] представлен анализ обширных экспериментальных данных, полученных в одном из регионов Китая, о влиянии метеофакторов на свойства снега. Результаты исследований показали, что температура воздуха, температура снега и солнечная радиация имеют значительную положительную корреляцию с содержанием жидкой воды в снеге, а рассчитанные значения коэффициентов корреляции превышают 0,9.

В исследовании [52] изучены изменения метеорологических условий и характеристик снеготаяния на северо-западе Канады с 1999 по 2019 гг. Наиболее значительное влияние на весеннее таяние снега оказало изменение температуры и альбедо. При этом отмечен рост температуры и относительной влажности воздуха в период весеннего таяния снега. В то же время отсутствовали тенденции в изменении скорости ветра, потоков коротковолнового и длинноволнового излучения. Поэтому данные характеристики не оказали влияние на тренды

снеготаяния. При этом уменьшение количества осадков к концу зимы привело к серьезным изменениям в продолжительности и скорости таяния снега.

В работе [1] дана количественная оценка изменения суточной интенсивности снеготаяния в зависимости от приращения отдельных метеофакторов (табл. 1). Нами также выполнена подобная оценка чувствительности представленной выше физико-математической модели к влиянию различных метеорологических переменных на суточную интенсивность таяния снега (табл. 1). Полученные обобщения близки к результатам исследования [1]. Выполненные расчеты могут быть использованы как для оценки чувствительности величины снеготаяния к климатическим изменениям, так и для выявления погрешностей моделирования, связанных с неточностью задания метеоэлементов.

Таблица 1. Влияние приращения температуры воздуха (T), скорости ветра (u), давления водяного пара (e), нижней облачности ($N_н$), общей облачности ($N_о$) и альбедо снега (A) на изменение среднесуточной интенсивности снеготаяния
Table 1. Impact of the air temperature increase (T), wind velocity (u), water vapor pressure (e), lower cloudiness ($N_н$), total cloudiness ($N_о$), snow albedo (A) on the snow melt average daily intensity change

Фактор	Приращение фактора	Изменение интенсивности снеготаяния [1]	Изменение интенсивности снеготаяния (модель)
T, °C	+1	1,5 – 1,7	1,9
u, м/с	+1	-0,7 – 2,5	0,3
e, мб	+1	1,9 – 2,1	1,8
$N_н$, балл	+0,1	0,3	0,1
$N_о$, балл	+0,1	-0,8	-0,7
A, доли	+0,01	- 0,6	-0,5

Как отражено в табл. 1, рост температуры атмосферы приводит к заметному росту величины интенсивности снеготаяния. Изменение скорости ветра не столь однозначно влияет на снеготаяние. Данная метеорологическая характеристика определяет величину явных и скрытых турбулентных потоков тепла, связанного с испарением. При направлении потока тепла от атмосферы к снежному покрову рост скорости ветра приводит к росту величины снеготаяния, при направлении потоков тепла и пара от поверхности снега в атмосферу увеличение скорости ветра вызывает обратный эффект. Рост парциального давления пара уменьшает величину испарения и потока скрытого тепла от поверхности снега, что в итоге увеличивает интенсивность снеготаяния.

Рост альбедо снега лимитирует долю поглощенной снежным покровом коротковолновой радиации и однозначно уменьшает скорость снеготаяния (табл. 1). А вот рост облачности неоднозначно влияет на величину снеготаяния: с одной стороны, облачность уменьшает поток коротковолновой радиации, а с другой – увеличивает длинноволновое излучение атмосферы. Поэтому в зависимости от соотношения этих составляющих теплового баланса поверхности снега могут наблюдаться разнонаправленные тенденции изменения скорости снеготаяния в зависимости от облачности.

Поток солнечной радиации, наряду с температурой воздуха, является основным фактором, определяющим характеристики снеготаяния. Для задания радиационных характеристик нами использовались расчетные методы и данные об облачности. Набор параметров для расчета характеристик солнечной радиации включает солнечное склонение, широту в расчетной точке, альбедо снега. Задаются также угол наклона и угол поворота поверхности склона в расчетном пункте. В рамках данной работы проведено исследование роли экспозиции снежного склона на процесс снеготаяния. На рис. 3 приведены графики смоделированной водоотдачи из снежного покрова (с учетом суточного хода) за весенний период для метеоусловий Москвы (1953 г.) при различных углах наклона северных (отрицательный угол) и южных (положительный угол) склонов. Очевидно, что экспозиция склона и его угол наклона играют решающую роль при определении сроков снеготаяния, а также его интенсивности. На южных склонах интенсивность, начало и конец снеготаяния значительно опережают подобные характеристики для северных склонов. Особенно актуален данный факт в условиях пересеченного рельефа или горной местности, для которых период весеннего снеготаяния может существенно растянуться во времени.

Наряду с оценкой влияния метеоусловий на величину снеготаяния также исследована роль отдельных свойств снежного покрова в этом процессе. На наш взгляд, наиболее значимыми по эффекту воздействия на процесс снеготаяния являются коэффициент теплопроводности и водоудерживающая способность снега. Первая характеристика связана с теплофизикой таяния снега, вторая – с его водными свойствами. Обе эти характеристики зависят от структуры и плотности снежного покрова.

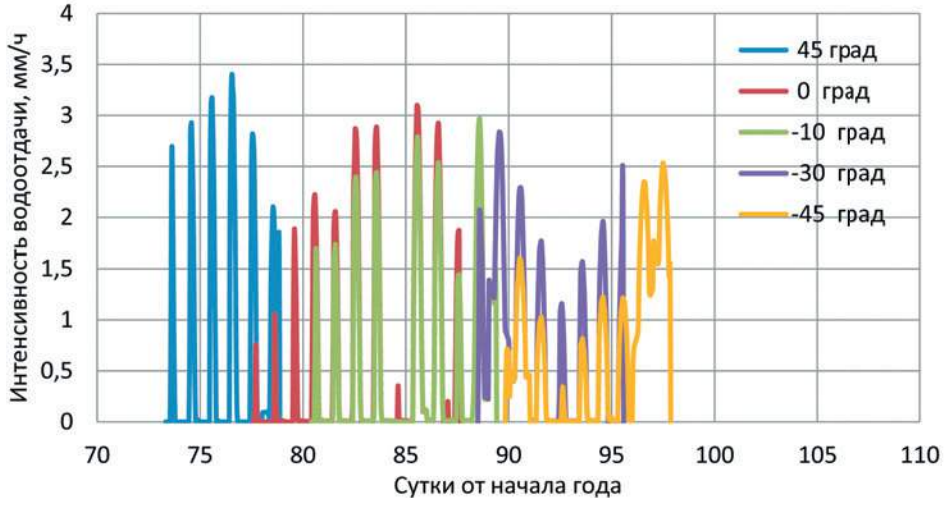


Рис. 3. Динамика часовых значений интенсивности водоотдачи в зависимости от экспозиции и угла наклона заснеженного склона, Москва, 1953 г.
Fig. 3.The dynamics of water output intensity hour values depending on the exposition and the snow-covered slope tilt angle, Moscow, 1953.

Расчеты показывают, что увеличение теплопроводности снега приводит к росту испарения [1], а это, как было показано выше, способствует уменьшению интенсивности снеготаяния. Однако при более высокой теплопроводности снега нагревание снежной толщи в весенний период происходит быстрее, следствием чего может стать его более ускоренное таяние. Таким образом, численные эксперименты показали неоднозначность влияния теплопроводности снега на интенсивность снеготаяния.

На перераспределение потоков тепла между атмосферой и снегом оказывает влияние и подстилающий почвенный покров. В ходе работы исследовано влияние коэффициента теплопроводности почвы на скорость снеготаяния. Результаты также неоднозначны. На начальном этапе снеготаяния более высокая теплопроводность почвы способствует более быстрому ее прогреванию и, соответственно, прогреванию снега. По нашим расчетам это приводит к более раннему началу снеготаяния и процесса водоотдачи, в последующие сроки влияние теплопроводности на интенсивность таяния снега практически отсутствует. Соответственно, на последнем этапе снеготаяние заканчивается раньше при более высокой теплопроводности почвы.

Как показали численные эксперименты, наиболее явное влияние на снеготаяние, в первую очередь на величину водоотдачи из снежного покрова, оказывает его водоудерживающая способность (рис. 4).

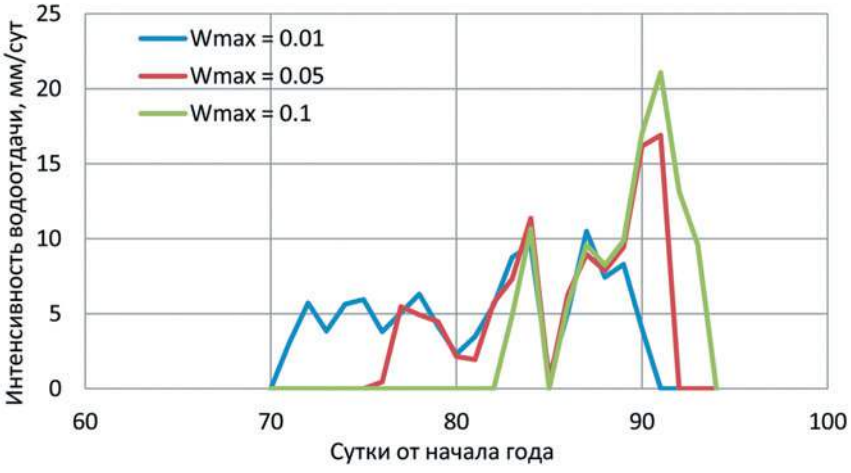


Рис. 4. Динамика суточных значений интенсивности водоотдачи в зависимости от водоудерживающей способности снега (W_{max}), Москва, 1953 г.
Fig. 4. The dynamics of the water output intensity hour values depending on the snow water-retaining ability (W_{max}), Moscow, 1953.

Рост данной характеристики способствует смещению сроков начала и окончания водоотдачи на более позднее время, иногда на несколько суток. При этом удерживаемая снегом жидкая вода может участвовать в процессах повторного замерзания – таяния, что также изменяет картину снеготаяния.

Кроме ошибок в расчетах, связанных с неточным заданием численных значений метеорологических характеристик, могут возникать ошибки рас-

чета интенсивности снеготаяния из-за осреднения данных характеристик за некоторый интервал времени. В нашем случае использованы среднесуточные значения метеоэлементов. Для исследования этого вопроса были проведены численные расчеты снеготаяния без учета суточного хода и с учетом такового для метеоусловий Нижнедевицкой водобалансовой станции. Результаты расчетов динамики снеготаяния показывают, что исключение учета суточного хода метеоданных приводит к уменьшению среднесуточных и максимальных величин снеготаяния. В зависимости от характера изменений метеорологических переменных в течение суток занижение максимальных значений водоотдачи может достигать 50 %.

Влияние климатических изменений

Учитывая экологические и социально-экономические последствия для водных ресурсов, эксплуатации и проектирования водохозяйственных систем, строительного проектирования, зимнего туризма, экологии и многих других аспектов, понимание влияния изменения климата на снежный покров имеет важнейшее значение. В связи с этим в последние десятилетия были проведены многочисленные исследования влияния текущих и прогнозируемых климатических изменений на характеристики снежного покрова. Остановимся на некоторых из них.

В рамках международного проекта ESM – SnowMIP в работе [53] с помощью разработанной модели взаимодействия поверхности суши с атмосферой SWAP была проведена оценка изменения снегозапасов SWE для 10 снегомерных площадок. В сценариях использовались два прогностических периода: 2036–2060 гг. и 2075–2099 гг. Полученные результаты показали, что в течение XXI в. на всех площадках ожидается уменьшение величины снегозапасов и продолжительности залегания снежного покрова, при этом преимущественное сокращение мощности снежного покрова и длительности его залегания происходит в наиболее теплых районах.

В работе [54], на основе модельных расчетов, сделан вывод о том, что на изменение снегозапасов в различных районах земного шара в основном влияют изменения температуры и осадков. Регионы, где повышается уровень SWE, ограничены северной Сибирью и северными районами Северной Америки в самый холодный период. В исследовании [55] анализ рядов наблюдений показал, что весенний снежный покров на арктических землях с конца 1980-х годов отступил в среднем на 5 дней раньше по сравнению с предыдущими двадцатью годами. Однако с конца 1980-х годов это отступление становится незначительным.

В исследовании [56] ряды снежного покрова смоделированы по всей территории Пиренеев с использованием данных, полученных из региональной климатической модели HIRHAM, как для контрольного периода (1960–1990 гг.), так и для конца XXI в. (2070–2100 гг.). По данным моделирования толщина и продолжительность снежного покрова в Пиренеях резко сократятся в течение следующего столетия, особенно в центральном и восточном секторах. Величина этих воздействий будет соответствовать заметному высотному градиенту: максимальный накопленный SWE может уменьшиться до 78 %, а сезон со снежным

покровом сократиться до 70 % при 1500 м над уровнем моря. Величина воздействий быстро уменьшается с увеличением высоты: характеристики снежного покрова останутся в основном одинаковыми в самых высоких секторах.

Климатические изменения уже оказывают значительное влияние на снежный покров в Европейских Альпах. В исследованиях, проведенных в Швейцарии, Франции, Австрии, Италии и Германии, отмечено общее уменьшение глубины снега и продолжительности снежного покрова с конца 1980-х годов по всей территории Европейских Альп [57, 58]. Прошлые и будущие тенденции таяния снега в Швейцарских Альпах проанализированы в работе [58]. В период с 1958 по 2019 гг. даты таяния снега наступали на 2,8 ± 1,3 дня раньше в среднем за десятилетие. Наибольший сдвиг в сторону более ранних дат таяния снега отмечен в конце 1980-х и начале 1990-х годов, после этого тенденции становятся незначительными.

Таяние снега является основным источником пресной воды во многих регионах Азии, которая является родиной «третьего полюса» в мире – самого большого объема пресной воды за пределами полярных ледяных щитов. Тающие снежные покровы и ледники этого региона питают некоторые из крупнейших рек Азии, от которых зависит снабжение водой более миллиарда человек. Однако, согласно новому исследованию [59], изменение климата сокращает поступление воды от таяния снега во многие реки Азии, угрожая водной безопасности миллионов людей. В связи с этим, количественная оценка таяния снега и его изменчивости в условиях потепления климата крайне необходима для управления водными ресурсами.

С использованием данных об осадках и температуре с высоким пространственным разрешением (приблизительно 1 км) в работе [60] рассчитаны месячные объемы таяния снега в Китае с площади 1 км^2 за период 1951–2017 гг. Для этого применена простая модель температурного индекса. Сценарии осадков и температуры, разработанные на основе пяти моделей CMIP5, использованы для прогнозирования будущего таяния снега. Результаты расчетов показывают, что среднегодовое таяние снега в Китае с 1951 по 2017 гг. значительно усилилось на Тибетском нагорье и сократилось в северной, центральной и юго-восточной частях страны. Во всем Китае наблюдалась тенденция к уменьшению таяния снега, но эти результаты не были статистически значимыми.

Для анализа влияния климатических условий на процессы снеготаяния нами использовались результаты расчетов по представленной выше математической модели формирования и таяния снежного покрова. Для моделирования привлечены данные наблюдений на метеостанциях Кострома, Ивдель, Москва (ВДНХ), Валдай, Тамбов, Воронеж за период с 1952 по 2020 гг. Проанализированы расчетные тренды таких характеристик снеготаяния, как сроки начала и окончания водоотдачи из снега и ее продолжительности, средняя и максимальная суточная интенсивность водоотдачи и ее объем. Выполнена оценка изменений данных характеристик за период 1978–2020 гг. по отношению к предшествующему периоду 1952–1977 гг. с определением их значимости по критерию Стьюдента.

В табл. 2 представлены результаты математического моделирования характеристик снежного покрова, связанных с процессами весеннего снеготаяния для метеоусловий вышеупомянутых станций, расположенных в бассейне Волги (за исключением ст. Ивдель). Остановимся подробнее на анализе изменчивости каждой из характеристик.

Таблица 2. Средние расчетные характеристики снеготаяния для различных станций за период 1952–2020 гг. и их изменения (Δ) за период 1978–2020 гг. по сравнению с предшествующим 1952–1977 гг.
Table 2. Average pre-calculated snowmelting characteristics for different stations over the 1952–2020 period and their changes (Δ) over the 1978–2020 period in comparison with the earlier 1952–1977 period

Характеристика		Валдай	Ивдель	Москва	Кострома	Воронеж	Тамбов
Начало водоотдачи с начала года, сутки	средняя	84,4	92,9	79,1	84,2	69,3	75,1
	Δ	0,3	-0,3	-5,5	-4,3	-5,6	-9,3
Окончание водоотдачи с начала года, сутки	средняя	105,3	107,0	98,2	101,8	85,0	91,4
	Δ	3,8	1,6	-3,7	-2,3	-3,5	-7,1
Продолжительность водоотдачи, сутки	средняя	20,9	14,1	19,1	17,6	15,7	16,3
	Δ	2,1	1,7	2,1	2	2,1	2,5
Объем водоотдачи, мм	средняя	267	139	223	197	148	143
	Δ	69	13	14	29	-9	-13
Средняя скорость водоотдачи, мм/ч	средняя	0,46	0,59	0,47	0,55	0,51	0,56
	Δ	-0,05	-0,01	-0,17	-0,04	-0,09	-0,10

Начало и конец снеготаяния. Анализ сроков начала и конца снеготаяния, а в нашем случае водоотдачи из снежного покрова, показывает, что они для всех станций сдвигаются на более ранний период года. При этом для половины станций тренды статистически значимы, за исключением Костромы, Ивделя и Валдая. Наиболее ярко эти тенденции проявляются для ст. Тамбов (рис. 5). Результаты моделирования соответствуют данным, опубликованным в работах [53–58]. Полученные закономерности являются следствием потепления воздуха в весенний период. Для бассейна Волги рост средней весенней температуры за 1978–2020 гг. по сравнению с периодом 1952–1977 гг. лежит в пределах 0,5 – 1,0 °С [61].

Продолжительность водоотдачи из снежного покрова. Судя по результатам моделирования, приведенным в табл. 2, данная характеристика имеет тенденцию к небольшому росту. Однако все расчетные тренды статистически не значимы. Продолжительность водоотдачи из снега в значительной степени определяет длительность весеннего половодья. В работе [61] нами было показано, что на 57 % частных водосборов Средней Волги (из 65 исследованных) наблюдается статистически значимое падение продолжительности половодья за последние 30 лет по сравнению с предыдущим периодом. Значимый рост продолжительности отмечен всего на 8 % водосборов, на остальной части

тренды были не значимы. Для Нижней Волги, наоборот, характерен рост продолжительности половодья – 60 % значимых трендов. И только на 8 % наблюдалось значимое падение продолжительности, т. е. весенние паводки для этой части бассейна Волги стали носить более затяжной характер.



Рис. 5. Динамика сроков начала и окончания снеготаяния для ст. Тамбов.
Fig. 5. The dynamics of the snowmelt dates starting and termination dates for the Tambov station.

Продолжительность снеготаяния зависит от ряда характеристик. Основными из них являются запас воды в снежном покрове в предвесенний период и интенсивность снеготаяния. Удлинение сроков снеготаяния, с одной стороны, может указывать на рост снегозапасов, с другой – на уменьшение средней интенсивности водоотдачи. В табл. 2 представлены результаты расчета объема водоотдачи в весенний период: в четырех случаях из шести водоотдача выросла, а на двух, более южных станциях наблюдается ее падение. Объем водоотдачи связан с осадками зимнего и весеннего периода. Как следует из анализа метеоданных, количество осадков холодного периода 1978–2020 гг. по сравнению с периодом 1952–1977 гг. увеличилось практически во всех частях бассейна Волги [61], за исключением некоторых районов бассейна Оки и Нижней Волги. Росту объема водоотдачи также способствует уменьшение испарения со снега в весенний период [48].

С другой стороны, практически повсеместно в бассейне Волги наблюдается рост количества оттепелей в зимний период, который приводит к уменьшению снегозапасов и объема водоотдачи весной [62]. Сочетание вышеназванных факторов в конечном итоге определяет объем водоотдачи из снега в весенний период в каждом конкретном случае и, соответственно, продолжительность снеготаяния.

Интенсивность водоотдачи из снега. Скорость таяния снега зависит от баланса тепловых потоков, поступающих на его поверхность. Судя по результатам моделирования (табл. 2), средняя интенсивность водоотдачи в период 1978–2020 гг. по сравнению с 1952–1977 гг. уменьшилась. При этом, тренды статистически значимы в половине случаев. Казалось бы, потепление климата приводит к однозначному росту скорости таяния снежного покрова весной. Так, например, в работе [52] для условий Западной Арктики (Канада) в период

с 1999 по 2019 гг. зафиксирован положительный тренд скорости снеготаяния при сравнении одинаковых десятидневных интервалов времени. Однако следует учитывать и другие факторы, например, рост температуры в весенний период приводит, как было показано выше, к более ранним срокам таяния снега. Следствием этого является ситуация, когда ранняя водоотдача из снега начинается при более низких потоках прямой солнечной радиации, что, несомненно, влияет на скорость снеготаяния.

Рассмотрим подробнее данную ситуацию для метеоусловий Тамбова, для которых был получен статистически значимый тренд снижения средней скорости водоотдачи за период снеготаяния. Согласно данным табл. 2, средняя скорость водоотдачи за период 1978–2020 гг. снизилась на 16 % по сравнению с периодом 1952–1977 гг., при этом водоотдача начиналась в среднем на 9 суток раньше. Расчеты показывают, что среднесуточные потоки прямой солнечной радиации при подобном смещении сроков снеготаяния в марте (период снеготаяния в Тамбове) уменьшаются также на 16 %, что понижает интенсивность водоотдачи. Отметим также то обстоятельство, что тренд роста потоков прямой солнечной радиации в весенний период зависит от даты начала снеготаяния. При более ранних сроках водоотдачи (например, в марте) тренд изменения потока радиации гораздо круче, чем при позднем таянии снега (например, в мае). Эта закономерность приводит к тому, что для южных районов смещение сроков снеготаяния на более ранний период оказывает более значимое воздействие на снижение интенсивности снеготаяния, чем для северных территорий.

Смещение сроков начала снеготаяния влияет не только на потоки солнечной радиации, поступающие на поверхность снега, но и на температурные условия при снеготаянии. На рис. 6 приведены многолетние тренды сумм положительных и отрицательных среднесуточных температур воздуха за период весеннего снеготаяния для условий Тамбова.

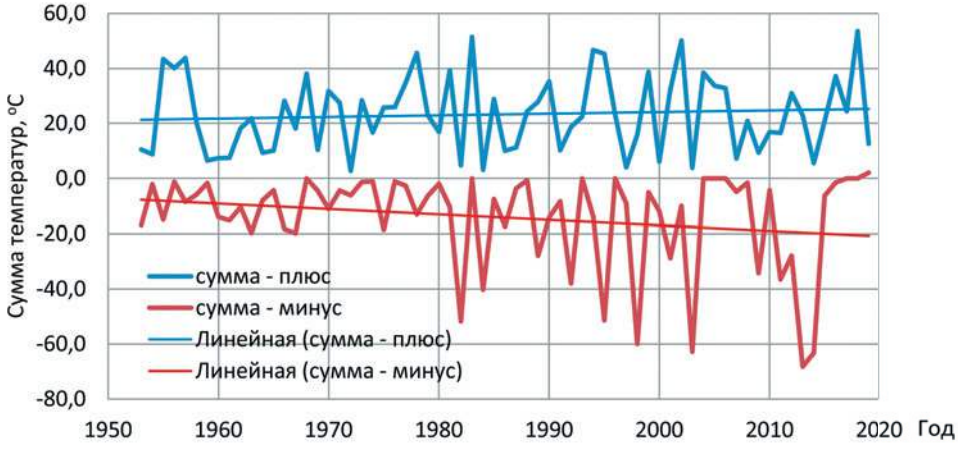


Рис. 6. Динамика сумм положительных и отрицательных среднесуточных температур воздуха за период весеннего снеготаяния для ст. Тамбов.
Fig. 6. The dynamics of positive and negative average daily air temperatures over the spring snow melting period for he Tambov station.

Как следует из данных рис. 6, одновременно с потеплением и смещением сроков таяния снега наблюдается заметный тренд роста сумм среднесуточных отрицательных температур воздуха за период снеготаяния, т. е. температурные условия становятся менее устойчивыми и растет вероятность повторного замерзания талой воды в снеге и, соответственно, удлинения продолжительности снеготаяния, снижения его интенсивности. При этом рост сумм положительных температур во время снеготаяния незначителен.

Отметим также то обстоятельство, что в последние десятилетия для условий бассейна Волги заметно снизилась скорость ветра [63], а это, как было показано выше, в отдельных случаях уменьшает турбулентный поток тепла в приповерхностном слое снежного покрова и является дополнительным фактором снижения скорости снеготаяния.

Выполненный выше анализ факторов, влияющих на интенсивность таяния снежного покрова, типичен не только для станции Тамбов. Основные его элементы в той или иной степени характерны и для других территорий России. С учетом близости средних многолетних значений интенсивности водоотдачи (табл. 2) и схожести характера ее изменчивости во времени построен график динамики усредненных величин для станций, включенных в наш анализ (рис 7).

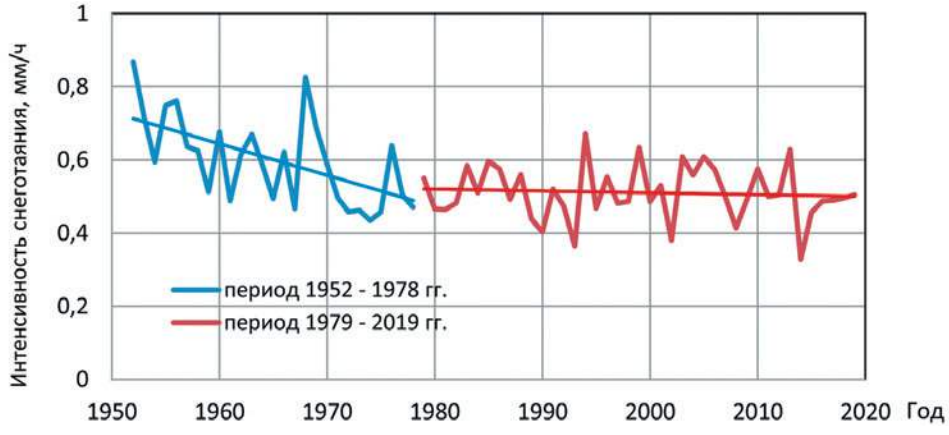


Рис. 7. Динамика средних многолетних величин интенсивности снеготаяния.
Fig. 7. He dynamics of average many-year values of the snow melting intensity.

Таким образом, в период 1952–1978 гг. произошло основное уменьшение интенсивности водоотдачи из снежного покрова. В последующие десятилетия величина данной характеристики снеготаяния оставалась практически постоянной.

ВЫВОДЫ

В представленной работе выполнен детальный обзор методов наблюдения за снеготаянием в различных странах и регионах мира. Результаты исследований указывают на значительную пространственную и временную изменчивость и актуальность изучения данной характеристики в современных условиях потепления климата.

Разработана физико-математическая модель формирования и таяния снежного покрова. Сопоставление с результатами наблюдений показало высокую сходимость расчетных характеристик с экспериментальными данными. На основе математической модели проведены детальные численные эксперименты по оценке влияния основных метеофакторов и физических свойств снега на скорость таяния и водоотдачи из снежного покрова. При этом исследовано влияние на величину снеготаяния таких основных факторов ее формирования, как температура и влажность воздуха, скорость ветра, поток солнечной радиации, плотность и альбедо снега, экспозиция склона, на котором залегает снежный покров.

Выполнена оценка изменений различных характеристик снеготаяния за период 1979–2020 гг. по отношению с предшествующему периоду 1952–1978 гг. Из данных наблюдений и расчетов следует, что сроки начала и конца снеготаяния сдвигаются на более ранний период. Средняя интенсивность водоотдачи из снежного покрова в течение весеннего периода в последние десятилетия на одних анализируемых станциях увеличивается, а на других уменьшается. Уменьшение величины водоотдачи из снега в основном вызвано сдвигом снеготаяния на более ранние сроки и уменьшением при этом потоков солнечной радиации, приходящих на снежный покров.

В период значительных климатических изменений возникает проблема долгосрочного прогноза изменений характеристик снеготаяния. Данный прогноз невозможен без надежных оценок изменения климатических характеристик. Современные климатические модели, по мнению климатологов, могут наиболее достоверно предсказать тренд температуры воздуха. У других климатических характеристик точность предвычисления гораздо ниже. Исходя из этого, мы можем с достаточной долей вероятности предположить, что прогноз характеристик снеготаяния затруднен без учета динамики радиационных составляющих тепловых потоков.

В представленной работе впервые на основе натурных наблюдений и математического моделирования проведено комплексное исследование влияния всех основных факторов окружающей среды, определяющих климатические изменения характеристик снеготаяния. Получены общие закономерности, объясняющие тенденции изменения данных характеристик, наблюдающиеся в последние десятилетия. В перспективе необходимо уделить больше внимания изучению региональных особенностей процессов снеготаяния.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузьмин П.П. Процесс таяния снежного покрова. Гидрометеоиздат, 1961. 350 с.
2. Gerhard Krinner, Chris Derksen, Richard Essery, Mark Flanner, Stefan Hagemann... ESM-SnowMIP: assessing snow models and quantifying snow-related climate feedbacks // Geoscientific Model Development. 2018. No. 11. P. 5027–5049.
3. Menard Cecile B., Essery Richard, Krinner Gerhard, Arduini Gabriele, Bartlett Paul... Scientific and human errors in a snow model intercomparison // Bulletin of the American Meteorological Society. 2020. Vol. 102. No. 1. P. 61–79.
4. Гусев Е.М., Насонова О.Н. Расчеты формирования снежного покрова на основе модели взаимодействия поверхности суши с атмосферой SWAP // Лед и Снег. 2019. № 59 (2). С. 167–181.

5. Nolin, A. W. and Daly, C.: Mapping «At Risk» Snow in the Pacific Northwest // Journal of Hydrometeorology. 2006. No.7. P. 1164–1171.
6. Deems J.S., Painter T.H. Lidar measurement of snow depth: accuracy and error sources // Proceedings 2006 International Snow Science Workshop: Telluride, Colorado, USA, International Snow Science Workshop. 2006. P. 330–338.
7. Prokop A., Schirmer M., Rub M., Lehning M., Stocker M.A comparison of measurement methods: terrestrial laser scanning, tachymetry and snow probing for the determination of the spatial snow-depth distribution on slopes // Annual Glaciology. 2008. Vol. 49. P. 210–216.
8. Ryan W.A., Doesken N.J., Fassnacht S.R. Evaluation of ultrasonic snow depth sensors for US snow measurements // Journal of Atmospheric Oceanology Technology. 2008. Vol. 25. P. 667–684.
9. Коган Р.М., Назаров И.М., Фридман Ш.Д. Основы гамма-спектроскопии природных сред. М.: Атомиздат, 1969, 520 с.
10. Loijens, U.S. Comparison of water equivalent of snow cover determined from airborne measurement of natural gamma radiation and from a snow course network // Proceedings of Eastern Snow Conference, 1974, Ottawa, Ontario. P. 112–122.
11. Зотимов Н.В. Исследование наземного метода измерения снегозапасов с использованием гамма-излучения земли // Труды ГГИ. 1968. Вып. 152. С. 25–36.
12. Воробьев В.А., Банщикова Л.С. О дистанционном мониторинге снежного покрова: к 60-летию разработки методов аэрогамма-съемки в России // Фундаментальная и прикладная климатология. 2022. Т. 8. № 4. С. 413–423.
13. Ulaby F.T., Stiles W.H. The active and passive microwave response to snow parameters: 2. Water equivalent of dry snow // Journal of Geophysical Researches Oceans. 1980. No. 85. P.1045–1049.
14. Singh K.K., Mishra V.D., Garg R.K. Microwave response of seasonal snow-cover measured by using a ground-based radiometer at 6.93 and 18.7 ghz frequencies and at dual polarization // Journal of the Indian Society of Remote Sensing. 2007. Vol. 35. P. 243–251.
15. Швецов А.А., Беликович М.В., Большаков О.С., Рыскин В.Г., Фейгин А.М. Федосеев Л.И., Корабовский А., Аверченко А.В. Дистанционное зондирование снежного покрова в миллиметровом диапазоне длин волн // Известия вузов. Радиофизика. 2017. Т. 110. № 3. С. 231–240.
16. Ткаченко Н.С., Лыгин И.В. Применение спутниковой миссии GRACE для решения геологических и географических задач // Вестник Московского университета. 2017. Сер. 4. Геология. № 2. С. 3–7.
17. Schmidt R. and Coauthors. GRACE observations of changes in continental water storage // Global Planetary Change, 2006. No. 50. P.112–126.
18. Чурюлин Е.В., В.В. Копейкин В.В., Розинкина И.А., Фролова Н.Л., Чурюлина А.Г. Анализ характеристик снежного покрова по спутниковым и модельным данным для различных водосборов на Европейской территории Российской Федерации // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 2 (368). С. 120–143.
19. Тихонов В.В., Соколова Ю.В., Боярский Д.А., Комарова Н.Ю. О возможности восстановления снегозапаса снежного покрова по данным спутниковой микроволной радиометрии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 5. С. 47–64.
20. Wrzesien, M.L., Durand M.T., Pavelsky T.M., Howat I.M., Margulis, S.A., Huning, L.S. Comparison of methods to estimate snow water equivalent at the mountain range scale: A case study of the California Sierra Nevada // Journal of Hydrometeorology. 2017. No. 18. P. 1101–1119.
21. Taheri M. and Mohammadian A. An Overview of Snow Water Equivalent: Methods, Challenges and Future Outlook // Sustainability. 2022. No. 14. 11395. P. 1–45.
22. Урываев П.А. Водоотдача из снега в поле и в лесу // Метеорология и гидрология. 1955. № 4. С. 34–45.
23. Kattelmann R. Spatial variability of snow-pack outflow at a site in Sierra Nevada, USA // Annals of Glaciology. 1989. Vol. 13. P.124–128.
24. Kattelmann R. Snowmelt lysimeters in the evaluation of snowmelt models // Annals of Glaciology. 2000. Vol. 31. P. 405–410.
25. Tekeli A.E., Sorman A.A., Sensoy A., Sorman A.U. Design, Installation of a Snowmelt Lysimeter and Analysis for Energy Mass Balance Model Studies In Turkey. 60th // Eastern Snow Conference Sherbrooke. Québec. Canada. 2003. P. 43–57.

26. Rücker A., Zappa M., Boss S., Freyberg J. An optimized snowmelt lysimeter system for monitoring melt rates and collecting samples for stable water isotope analysis // Journal of Hydrological Hydromechanics. 2019. No. 67. P. 20–31.
27. Webb R.W., Williams M.W., Erickson T.A. The spatial and temporal variability of meltwater flow paths: insights from a grid of over 100 snow lysimeters // Water Resources Research. 2018. Vol. 54. No. 2. P. 1146–1160.
28. Gang Zhou, Manyi Cui, Junhong Wan and Shiqiang Zhang. A Review on Snowmelt Models: Progress and Prospect // Sustainability. 2021. Vol. 13. No. 20. P. 1–27.
29. Martinec J., Rango A. Parameter values for snowmelt runoff modelling // Journal of Hydrology. 1986. No. 84. P. 197–219.
30. Anderson E.A., Monroe J.C. National Weather Service River Forecast System // Journal of Hydrology Division. 1973. Vol.100. P. 621–630.
31. Zuzel J.F., Cox L.M. Relative importance of meteorological variables in snow melt // Water Researchers. 1975. Vol. 11. P. 174–176.
32. Cazorzi F., Fontana G.D. Snowmelt modelling by combining air temperature and a distributed radiation index // Journal of Hydrology. 1996. No.181. P. 169–187.
33. Hock R. A distributed temperature-index ice- and snowmelt model including potential direct solar radiation // Journal of Glaciology. 1999. No. 45. P. 101–111.
34. Anderson E.A. Development and testing of snow pack energy balance equations // Water Resources Researches. 1968. No. 4. P. 19–37.
35. Anderson E.A. A point of energy and mass balance model of snow cover. NOAA // Technical Reports NWS. 1976. No. 19. P.138–144.
36. Кучмент Л.С., Демидов В.Е., Мотовилов Ю.Г. Формирование речного стока. М.: Наука, 1983. 216 с.
37. Yen Y.C. Effective thermal conductivity of ventilated snow // Journal of Geophysical Research. 1962. No. 67. P. 1091–1098.
38. Colbeck S.C. A theory of water percolation in snow // Journal of Glaciology. 1972. No. 11(63). P. 369–385.
39. Wankiewicz A. A review of water movement in snow // Proceedings modeling of snow cower runoff. US Army CRREL. Hanower, 1978. NH. P. 222–252.
40. Morris E.M., Godfray J. The European hydrological system snow routine // Proceedings modeling of snow cower runoff. US Army CRREL, Hanower, 1978. NH. P. 269–278.
41. Morris E.M. Modeling the flow of mass and energy within snowpack for hydrological forecasting // Annual of Glaciology. 1983. No. 4. P. 198–203.
42. Harlan R.L. Analysis of coupled heat-fluid transport in partially frozen soil // Water Resources Researches. 1973. No. 9. P. 1314–1323.
43. Flerchinger G.N., Hanson C.L. Modeling Soil Freezing and Thawing on a Rangeland Watershed // Trans Asia Pacific. 1989. No. 32. P. 1551–1554.
44. Gelfan A. Physically based model of heat and water transfer in frozen soil and its parameterization by basic soil data, predictions in ungauged basins // Promises Program. 2006. No. 303. P. 293–304.
45. Brun E., David P., Sudul M., Brunot G. A numerical model to simulate snow-cover stratigraphy for operational avalanche forecasting // Journal of Glaciology. 1992. Vol. 38. No. 128. P. 13–22.
46. Калюжный И.Л., Лавров С.А. Гидрофизические процессы на водосборе. СПб: Нестор-История, 2012. 615 с.
47. Лавров С.А. Физико-математическая модель гидрофизических процессов формирования стока в течение климатического года. Модель «ГГИ – ГИДРОФИЗИКА» // Метеорология и гидрология. 2023. № 12. С. 57–68.
48. 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.
49. Шутов В.А. Результаты наблюдения за водоотдачей из снега на водонепроницаемых площадках // Труды ГГИ. 1986. Вып. 308. С.142–151.
50. Kuhn M. Micro-meteorological conditions for snow melt // Journal of Glaciology. 1987. Vol. 33. No. 113. P. 24–26.

51. Qiang Fu, Peng Li, Tianxiao Li, Song Cui, Dong Liu, Peiru Yan and Hongguang Chen. Analysis of characteristic snow parameters and associated factors in a cold region in northeast China // Water Science & Technology: Water Supply. 2018. P. 1–8.
52. Matthew Y.T. Tsui. Changing Snowmelt Conditions in the Western Canadian Arctic // Theses and Dissertations (Comprehensive). 2022. P.1–97.
53. Гусев Е.М., Насонова О.Н., Ковалев Е.Э., Шурхно Е.А. Сценарные прогнозы изменения снегозапасов в связи с возможными изменениями климата в различных районах земного шара // Водные ресурсы. 2021. Т. 48. No 1. С. 100–113.
54. Hosaka M., Nohara D., Kitoh A. Changes in Snow Cover and Snow Water Equivalent Due to Global Warming Simulated by a 20km-mesh Global Atmospheric Model // SOLA, 2005. Vol. 1. P. 093–096.
55. Foster J.L., Cohen J., Robinson D.A., Estilow T.W. A look at the date of snowmelt and correlations with the Arctic Oscillation // Annals of Glaciology 2013. Vol. 54(62). P. 196–204.
56. López-Moreno J.I. Goyette S. Impact of climate change on snowpack in the Pyrenees: Horizontal spatial variability and vertical gradients // Journal of Hydrology. 2009. Vol. 374. Iss. 3–4. P. 384–396.
57. Christoph Marty. Climate Change and Snow Cover in the European Alps. The Impacts of Skiing on Mountain Environments, 2013. P. 30–44.
58. Vorkauf M., Marty Chr., Kahmen A., Hiltbrunner E. Past and future snowmelt trends in the Swiss Alps: the role of temperature and snowpack Climatic Change. 2021. Vol. 165. No. 44. P. 1–19.
59. Kraaijenbrink P.D.A., Stigter E.E., Yao T. Walter W. Immerzeel Show. Climate change decisive for Asia's snow meltwater supply // Nature Climate Change. 2021. Vol. 11. P. 591–597.
60. Yong Yang, Rensheng Chen, Guohua Liu, Zhangwen Liu, and Xiqiang Wang. Trends and variability in snowmelt in China under climate change // Hydrology Earth System Sciences, 2022. Vol. 26. P. 305–329.
61. Лавров С.А., Калюжный И.Л. Влияние климатических изменений на сток весеннего половодья и факторы его формирования в бассейне Волги // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2016. № 6. С. 42–60. DOI: 10.35567/1999-4508-2016-6-4.
62. Лавров С.А., Калюжный И.Л. Физические процессы и закономерности формирования зимнего и весеннего стока рек бассейна Волги в условиях изменения климата // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2012. № 4. С. 74–84. DOI: 10.35567/1999-4508-2012-4-7.
63. Анисимов О.А., Борзенкова И.И., Жильцова Е.Л., Захарова О.К., Кокорев В.А., Ренева С.А., Стрельченко Ю.Г. Гидрометеорологические условия волжского региона и современные изменения климата // Метеорология и гидрология. 2011. № 5. С. 33–42.

REFERENCES

1. Kuzmin P.P. Snow cover melting process. Gidrometeoizdat, 1961. 350 p. (In Russ.).
2. Gerhard Krinner, Chris Derksen, Richard Essery, Mark Flanner, Stefan Hagemann... ESM-SnowMIP: assessing snow models and quantifying snow-related climate feedbacks. *Geo/scientific Model Development.* 2018. No. 11. P. 5027–5049.
3. Menard Cecile B., Essery Richard, Krinner Gerhard, Arduini Gabriele, Bartlett Paul… Scientific and human errors in a snow model intercomparison. *Bulletin of the American Meteorological Society.* 2020. Vol. 102. No. 1. P. 61–79.
4. Gusev E.M., Nasonova O.N. Calculations of the snow cover formation based on the SWAP model of the ground/atmosphere interaction. *Ice and Snow*. 2019. No. 59 (2). P. 167–181 (In Russ.).
5. Nolin A.W. and Daly C.: Mapping «At Risk» Snow in the Pacific Northwest. *Journal of Hydrometeorology.* 2006. No.7. P. 1164–1171.
6. Deems J.S., Painter T.H. Lidar measurement of snow depth: accuracy and error sources. *Proceedings 2006 International Snow Science Workshop.* Telluride, Colorado, USA, International Snow Science Workshop, 2006. P. 330–338.
7. Prokop A., Schirmer M., Rub M., Lehning M., Stocker M. A comparison of measurement methods: terrestrial laser scanning, tachymetry and snow probing for the determination of the spatial snow-depth distribution on slopes. *Annual Glaciology*. 2008. Vol. 49. P. 210–216.

8. Ryan W.A., Doesken N.J., Fassnacht S.R. Evaluation of ultrasonic snow depth sensors for US snow measurements. *Journal of Atmosphere Oceanology Technology*. 2008. Vol. 25. P. 667–684.
9. Kogan R.M., Nazarov I.M., Fridman S.D. Basic gamma-spectroscopy of natural environments. M.: Atomizdat, 1969, 520 p. (In Russ.).
10. Loijens, U.S. Comparison of water equivalent of snow cover determined from airborne measurement of natural gamma radiation and from a snow course network. *Proceedings of Eastern Snow Conference*, 1974. Ottawa, Ontario. P. 112–122.
11. Zotimov N.V. Studies of the on-ground method of snow resources measurement with the use of the Earth gamma-radiation. *Proceedings of State Hydrological Institute*. 1968. Iss. 152. P. 25–36 (In Russ.).
12. Vorobyov V.A., Banshchikva L.S. About the snow cover remote monitoring: to commemorate 60th anniversary of the air/gamma/survey methods invention in Russia. *Fundamental and applied climatology*. 2022. Vol. 8. No. 4. P. 413–423 (In Russ.).
13. Ulaby F.T., Stiles W.H. The active and passive microwave response to snow parameters: 2. Water equivalent of dry snow. *Journal of Geophysical Researches Oceans*. 1980. No. 85. P. 1045–1049.
14. Singh K.K., Mishra V.D., Garg R.K. Microwave response of seasonal snow-cover measured by using a ground-based radiometer at 6.93 and 18.7 ghz frequencies and at dual polarization. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*. 2007. Vol. 35. P. 243–251.
15. Shvetsov A.A., Belikovich M.V., Bolshakov O.S., Ryskin V.G., Feygin A.M., Fedoseyev L.I., Korabovskiy A., Averchenko A.V. Snow cover remote sensing in the wavelength millimeter range. *Latest news of institutions of higher education. Radio/physics*. 2017. Vol. 110. No. 3. P. 231–240 (In Russ.).
16. Tkachenko N.S., Lygin I.V. Application of GRACE satellite mission for solving of geological and geographical tasks. *Moscow University newsletter*. 2017. Series 4. Geology. No. 2. P. 3–7 (In Russ.).
17. Schmidt R. and Coauthors. GRACE observations of changes in continental water storage. Global Planetary Change, 2006. No. 50. P.112–126.
18. Churyulin E.V., Kopeykin V.V., Rozinkna I.A., Frolova N.L., Churtulina A.G. Analysis of the snow cover characteristics based on satellite and model data for different watersheds on the European territory of the Russian Federation. *Hydro/meteorological studies and forecasts*. 2018. No. 2 (368). P. 120–143 (In Russ.).
19. Tikhonov V.V., Sokolova Y.V., Boyarskiy D.A., Komarova N.Y. About possibilities of the snow cover snow resource restoration according the satellite microwave radiometry data. *Current problems of the Earth remote sensing from cosmos*. 2021. Vol. 18. No. 5. P. 47–64 (In Russ.).
20. Wrzesien, M.L., Durand M.T., Pavelsky T.M., Howat I.M., Margulis, S.A., Huning, L.S. Comparison of methods to estimate snow water equivalent at the mountain range scale: A case study of the California Sierra Nevada. *Journal of Hydrometeorology*. 2017. No. 18. P. 1101–1119.
21. Taheri M. and Mohammadian A. An Overview of Snow Water Equivalent: Methods, Challenges and Future Outlook. *Sustainability*. 2022. No.14. 11395. P. 1–45.
22. Uryvayev P.A. Water output from snow in the field and in the forest. *Meteorology and hydrology*. 1955. № 4. C. 34–45.
23. Kattelmann R. Spatial variability of snow-pack outflow at a site in Sierra Nevada, U.S.A. *Annals of Glaciology*. 1989. Vol. 13. P.124–128.
24. Kattelmann R. Snowmelt lysimeters in the evaluation of snowmelt models. *Annals of Glaciology*. 2000. Vol. 31. P. 405– 410.
25. Tekeli A.E., Sorman A.A., Sensoy A., Sorman A.U. Design, Installation of a Snowmelt Lysimeter and Analysis for Energy Mass Balance Model Studies In Turkey. 60th. *Eastern Snow Conference Sherbrooke*. Québec. Canada, 2003. P. 43–57.
26. Rücker A., Zappa M., Boss S., Freyberg J. An optimized snowmelt lysimeter system for monitoring melt rates and collecting samples for stable water isotope analysis. *Journal of Hydrological Hydromechanics*. 2019. No. 67. P. 20–31.
27. Webb R.W., Williams M.W., Erickson T.A. The spatial and temporal variability of meltwater flow paths: insights from a grid of over 100 snow lysimeters. *Water Resources Research*. 2018. Vol. 54. No. 2. P. 1146–1160.
28. Gang Zhou, Manyi Cui, Junhong Wan and Shiqiang Zhang. A Review on Snowmelt Models: Progress and Prospect. *Sustainability*. 2021. Vol. 13. No. 20. P. 1–27.

29. Martinec J., Rango A. Parameter values for snowmelt runoff modelling. *Journal of Hydrology*. 1986. No. 84. P. 197–219.
30. Anderson E.A., Monroe J.C. National Weather Service River Forecast System. *Journal of Hydrology Division*. 1973. Vol. 100. P. 621–630.
31. Zuzel J.F., Cox L.M. Relative importance of meteorological variables in snow melt. *Water Researchers.* 1975. Vol. 11. P. 174–176.
32. Cazorzi F., Fontana G.D. Snowmelt modelling by combining air temperature and a distributed radiation index. *Journal of Hydrology*. 1996. No. 181. P. 169–187.
33. Hock R. A distributed temperature-index ice- and snowmelt model including potential direct solar radiation. *Journal of Glaciology*. 1999. No. 45. P. 101–111.
34. Anderson E.A. Development and testing of snow pack energy balance equations. *Water Resources Researches*. 1968. No. 4. P. 19–37.
35. Anderson E.A. A point of energy and mass balance model of snow cover. NOAA. *Technical Reports NWS.* 1976. No. 19. P. 138–144.
36. Kuchment L.S., Demidov V.E., Motovilov Y.G. Formation of the river runoff. M.: Nauka, 1983. 216 p. (In Russ.).
37. Yen Y.C. Effective thermal conductivity of ventilated snow. *Journal of Geophysical Researches*. 1962. No. 67. P. 1091–1098.
38. Colbeck S.C. A theory of water percolation in snow. *Journal of Glaciology*. 1972. No. 11(63). P. 369– 385.
39. Wankiewicz A. A review of water movement in snow. *Proceedings modeling of snow cower runoff*. US Army CRREL. Hanower, 1978. NH. P. 222–252.
40. Morris E.M., Godfray J. The European hydrological system snow routine. *Proceedings modeling of snow cower runoff*. US Army CRREL, Hanower, 1978. NH. P. 269–278.
41. Morris E.M. Modeling the flow of mass and energy within snowpack for hydrological forecasting. *Annals of Glaciology*. 1983. No. 4. P. 198–203.
42. Harlan R.L. Analysis of coupled heat-fluid transport in partially frozen soil. *Water Resources Researches.* 1973. No. 9. P. 1314–1323.
43. Flerchinger G.N., Hanson C.L. Modeling Soil Freezing and Thawing on a Rangeland Watershed. *Trans Asia Pacific*. 1989. No. 32. P. 1551–1554.
44. Gelfan A. Physically based model of heat and water transfer in frozen soil and its parameterization by basic soil data, predictions in ungauged basins. *Promises Program*. 2006. No. 303. P. 293–304.
45. Brun E., David P., Sudul M., Brunot G. A numerical model to simulate snow-cover stratigraphy for operational avalanche forecasting. *Journal of Glaciology*. 1992. Vol. 38. No. 128. P. 13–22.
46. Kalyuzhniy I.L., Lavrov S.A. Hydro/physical processes at a catchment. SPb: Nestor-Istoriya, 2012. 615 p. (In Russ.).
47. Lavrov S.A. Physical/mathematical model of hydro/physical processes of the runoff formation during a climate year. "GGI –GIDROFIZIKA" model. *Meteorology and hydrology*. 2023. No. 12. P. 57–68 (In Russ.).
48. Lavrov S.A. Influence of meteorological factors, snow properties and climate 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 (In Russ.).
49. Shutov V.A. Result of observations of water outcome from snow at waterproof sites. *Proceedings of GGI*. 1986. Iss. 308. P. 142–151 (In Russ.).
50. Kuhn M. Micro-meteorological conditions for snow melt. *Journal of Glaciology*. 1987. Vol. 33. No. 113. P. 24–26.
51. Qiang Fu, Peng Li, Tianxiao Li, Song Cui, Dong Liu, Peiru Yan and Hongguang Chen. Analysis of characteristic snow parameters and associated factors in a cold region in northeast China. *Water Science & Technology: Water Supply*. 2018. P. 1–8.
52. Matthew Y.T. Tsui. Changing Snowmelt Conditions in the Western Canadian Arctic. *Theses and Dissertations (Comprehensive).* 2022. P. 1–97.
53. Gusev E.M., Nasonova O.N., Kovalev E.E., Shurkhno E.A. Scenario forecasts of the snow resources change due to possible climate change in different regions of the terrestrial globe. *Water resources*. 2021. Vol. 48. No 1. P. 100–113 (In Russ.).

54. Hosaka M., Nohara D., Kitoh A. Changes in Snow Cover and Snow Water Equivalent Due to Global Warming Simulated by a 20km-mesh Global Atmospheric Model. *SOLA*, 2005. Vol. 1. P. 093–096.
55. Foster J.L., Cohen J., Robinson D.A., Estilow T.W. A look at the date of snowmelt and correlations with the Arctic Oscillation. *Annals of Glaciology.* 2013. Vol. 54(62). P. 196–204.
56. López-Moreno J.I. Goyette S. Impact of climate change on snowpack in the Pyrenees: Horizontal spatial variability and vertical gradients. *Journal of Hydrology*. 2009. Vol. 374. Iss. 3–4. P. 384–396.
57. Christoph Marty. Climate Change and Snow Cover in the European Alps. The Impacts of Skiing on Mountain Environments, 2013. P. 30–44.
58. Vorkauf M., Marty Chr., Kahmen A., Hiltbrunner E. Past and future snowmelt trends in the Swiss Alps: the role of temperature and snowpack Climatic Change. 2021. Vol. 165. No. 44. P. 1–19.
59. Kraaijenbrink P.D.A., Stigter E.E., Yao T. Walter W. Immerzeel Show. Climate change decisive for Asia's snow meltwater supply. *Nature Climate Change*. 2021. Vol. 11. P. 591–597.
60. Yong Yang, Rensheng Chen, Guohua Liu, Zhangwen Liu, and Xiqiang Wang. Trends and variability in snowmelt in China under climate change. *Hydrology Earth System Sciences*, 2022. Vol. 26. P. 305–329.
61. Lavrov S.A., Kalyuzhniy I.L. Influence of the climate change on the spring high-water runoff and its formation factors in the Volga River basin. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management.* 2016. No. 6. P. 42–60. DOI: 10.35567/1999-4508-2016-6-4 (In Russ.).
62. Lavrov S.A., Kalyuzhniy I.L. Physical processes and regularities of formation of winter and spring runoff of the Volga River basin rivers under the conditions of the climate change. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management.* 2012. No. 4. P. 74–84. DOI: 10.35567/1999-4508-2012-4-7 (In Russ.).
63. Anisimov O.A., Borzenkova I.I., Zhiltsova E.L., Zakharova O.K., Kokorev V.A., Reneva S.A., Strelchenko Y.G. Hydro/meteorological conditions of the Volga region and contemporary clime change. *Meteorology and hydrology*. 2011. № 5. P. 33–42 (In Russ.).

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

УДК 574.583; 571.121 *DOI: 10.35567/19994508-2024-1-71-88*

Экологическая оценка состояния водоемов различного типа бассейна залива Шарапов Шар по концентрации хлорофилла «а» (Средний Ямал)

М.И. Ярушина[1] ✉, В.Ф. Мухутдинов[2], Л.Н. Степанов[1]

✉ nvl@ipae.uran.ru

[1]*Институт экологии растений и животных Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Россия*
[2]*ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов, г. Екатеринбург, Россия*

АННОТАЦИЯ

Актуальность. В условиях интенсивного освоения и эксплуатации месторождений углеводородов важной задачей является минимизация негативных воздействий на водные экосистемы. В статье представлены результаты исследований фитопланктона и содержания хлорофилла «а» в водоемах различного типа на территории Крузенштернского газоконденсатного месторождения, расположенного на западном побережье Среднего Ямала. **Методы.** Измерен ряд физических и гидрохимических показателей воды. Идентифицирован видовой состав фитопланктона с использованием отечественных и зарубежных определителей. Содержание хлорофилла «а» определено классическим методом. Проведена оценка физиологического состояния фитопланктона по соотношению желтых и зеленых пигментов (пигментное отношение). **Результаты.** Получены первые фоновые материалы по составу, развитию и структурным характеристикам сообществ водорослей водных объектов территории месторождения и залива Шарапов Шар. Установлена значимая положительная корреляция между биомассой фитопланктона и концентрацией хлорофилла «а» альгоценозов залива. На основе анализа полученных величин содержания хлорофилла «а» определен трофический статус и качество вод исследованных водотоков и водоемов. Материалы исследований могут служить отправной точкой экологического мониторинга состояния водных объектов при обустройстве и эксплуатации месторождений углеводородов на Ямале.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: п-ов Ямал, залив Шарапов Шар, фитопланктон, биомасса, хлорофилл «а», пигментное отношение, трофический статус.

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН ИЭРиЖ УрО РАН по теме «Состояние и динамика биоресурсов животного мира Уральского региона, разработка научных основ его мониторинга и охраны» № 122021000084-4.

Для цитирования: Ярушина М.И., Мухутдинов В.Ф., Степанов Л.Н. Экологическая оценка состояния водоемов различного типа бассейна залива Шарапов Шар по концентрации хлорофилла «а» (Средний Ямал) // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 1. С. 71–88. DOI: 10.35567/19994508-2024-1-71-88.

Дата поступления 12.09.2023.

© Ярушина М.И., Мухутдинов В.Ф., Степанов Л.Н., 2024

Ecological assessment of the different types water bodies of the Sharapov Shar Bay basin in terms of the chlorofill "*a*" concentration (the Middle Yamal)

Margarita I. Yarushina[1] ✉, **Valery F. Mukhutdinov**[2], **Leonid N. Stepanov**[1]

✉ nvl@ipae.uran.ru

[1] *Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch of the RAS, Ekaterinburg, Russia*
[2] *Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection, Ekaterinburg, Russia*

ABSTRACT

Relevance. Under the conditions of intense development and use of the hydrocarbon fields, the minimization of negative consequences for aquatic ecosystems has become the most important issue. The article presents results of the studies of phytoplankton and the chlorofill *"a"* content in the different types of water bodies on the territory of the Kruzenstern gas-condensate field located at the Middle Yamal western bank. **Methods.** We have assessed the phytoplankton physiological state in terms of yellow and green pigments proportion (pigment proportion). **Results.** We have obtained the first background materials concerning composition, development and structural characteristics of the water bodies' algae communities on the territory of the field and the Sharapov Shar Bay. We have stated significant positive correlation between the bay algoceonosis phytoplankton biomass and the chlorofill *"a"* concentration. The trophic status and water quality of the studied water bodies and watercourses have been determined based on the analysis of the obtained values of the chlorofill *"a"* content. The materials of the studies can serve the starting point for ecological monitoring of the water bodies status during the hydrocarbon fields construction and operation on the Yamal.

Keywords: Yamal Peninsula, Sharapov Shar Bay, phytoplankton, abundance, biomass, chlorofill *"a"*, pigment proportion, trophic status.

Financing: The work has been done within the framework of the state assignment of the IEPaA of Russian Academy of Sciences Ural Branch according the title "The Ural Region fauna bio/resources status and dynamics; development of scientific basis of its monitoring and protection" No. 122021000084-4.

For citation: Yarushina M.I., Mukhutdinov V.F., Stepanov L.N. Ecological assessment of the different types water bodies of the Sharapov Shar Bay basin in terms of the chlorofill *"a"* concentration (the Middle Yamal). *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2024. No. 1. C. 71–88. DOI: 10.35567/19994508-2024-1-71-88.

Received 12.09.2023.

ВВЕДЕНИЕ

Ямал – один из важнейших стратегических нефтяных и газоносных районов России. В связи с усилением антропогенного воздействия на водные объекты в условиях интенсивного освоения месторождений углеводородов возрастает актуальность комплексной оценки их экологического состояния. Важной задачей в ходе освоения и эксплуатации месторождений является минимизация негативных воздействий на водные экосистемы.

В функционировании водных экосистем большую роль играет фитопланктон – первичное звено потоков энергии, продуцент автохтонного органического вещества, важный фактор самоочищения и фотосинтетической аэрации воды. Изменения структуры альгоценозов определяют количество доступных ресурсов для более высоких трофических уровней. Фитопланктон широко ис-

пользуется для биоиндикации экологического состояния водоемов и соответствует основным требованиям, предъявляемым к биоиндикаторам – отличается высоким таксономическим разнообразием, широко распространен в водных объектах разного типа [1]. Структурные и функциональные показатели планктонных водорослей тесно связаны с экологическими факторами и широко используются при проведении экологической экспертизы состояния водных объектов и оценки воздействия на них антропогенных факторов [2, 3].

Основным пигментом, обеспечивающим фотосинтез, является хлорофилл «а» (далее – Хл «а»). Его содержание – важнейшая характеристика, по которой определяют приблизительные показатели биомассы фитопланктона [4]. Хл «а» считается универсальным эколого-физиологическим маркером степени развития и фотосинтетической активности водорослей, уровень его содержания положен в основу шкал, разработанных для оценки трофического статуса водоемов, качества воды и включен в систему мониторинговых наблюдений [5–12]. Содержание пигмента тесно связано со степенью развития фитопланктона, его пространственным распределением, сезонными и многолетними изменениями, а также зависит от влияния гидрологических, гидрохимических и антропогенных факторов.

Сезонные изменения содержания Хл «а» повторяют динамику биомассы фитопланктона и определяются особенностями гидрометеорологических условий. Динамика концентраций Хл «а» меняется в водах разной трофии [13, 14], характеризуется весенним и осенним подъемами в мезотрофных водоемах и продолжительным летним максимумом в эвтрофных.

Спутниковое сканирование и дистанционное лазерное зондирование верхних горизонтов поверхности Карского моря в последнее время является одним из основных методов наблюдения за изменчивостью биогеохимических показателей [15–18 и др.]. Одновременно получены данные для материковых озерных систем п-ва Ямал. Однако интерпретация и использование данных с помощью сканеров нуждаются в совершенствовании. Для уточнения спутниковой информации разрабатываются и применяются адаптационные программы расчетов на основе натурных измерений.

Данные по концентрации Хл «а», определенного классическим методом, для водоемов и водотоков Ямала, а также для залива Шарапов Шар в литературе отсутствуют, несмотря на то что фитопланктон изучался продолжительное время [19–22 и др.]. Имеется богатая информация по содержанию зеленого пигмента для внешнего периметра полуострова, полученная в ходе многочисленных экспедиций в Байдарацкой губе, у северной оконечности полуострова, а также в Обской и Тазовской губах [15, 17, 18, 23–27 и др.].

Литературные данные о развитии альгоценозов в приливно-отливных зонах рек Ямала, отличающихся особыми условиями, крайне ограничены [28, 29]. Фитопланктон залива Шарапов Шар не исследован. Данные по содержанию Хл «а» отсутствуют.

Цель работы – оценить физиологическое состояние альгоценозов водных объектов западного побережья п-ва Ямал и акватории залива Шарапов Шар

по содержанию хлорофилла «а», определить их трофический статус и качество вод водоемов различного типа.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Характеристика района исследований

Исследования проводили на водных объектах Крузенштернского газоконденсатного месторождения (ГКМ), расположенного в западной части Среднего Ямала. Территория включает акваторию залива Шарапов Шар и низовья рек Мордыяха и Надуйяха. Своеобразие водной экосистемы залива – взаимное влияние приливно-отливных течений, приносящих морскую воду через проливы между островами Шараповы Кошки и сезонной динамики пресного материкового стока. В географическом отношении исследуемый район расположен в арктическом климатическом поясе полярных пустынь и тундр в северо-западной части п-ва Ямал.

Реки Надуйяха и Мордыяха относятся к водным объектам высшей рыбохозяйственной категории: здесь проходят нерест, нагул и зимовка ценных видов сиговых рыб – муксуна, чира, сига-пыжьяна и ряпушки[1].

Реки имеют сложную дельту и на большом протяжении (60–70 км) подвержены приливно-отливным и сгонно-нагонным явлениям. Питание рек и озер – атмосферное, сток поверхностный, коэффициент стока – 0,8. По гидрохимическому составу вода в реках пресная, слабоминерализованная. Максимальные расходы воды наблюдаются в половодье, минимальные – в период зимней межени. Основной фазой водного режима является весеннее половодье, приходящееся на июнь-июль. Летне-осенняя межень характеризуется малой водностью и продолжается до сентября. Ледостав начинается в начале октября и проходит в среднем 250 дней[2]. Сток воды зимой практически равен нулю из-за промерзания перекатов и прекращения грунтового стока. В протоках дельты полного перемерзания русла и заморных явлений не наблюдается.

Большинство озер относятся к термокарстовым. Они, как правило, невелики по площади и глубине. Химический состав речных и озерных вод существенных отличий не имеет [30]. Особенность территории – низкая минерализация вод. По ионному составу воды соответствуют гидрокарбонатным кальциево-натриевой группы.

Залив Шарапов Шар – мелководный: глубина не превышает 7 м в центральной части, на большей части акватории составляет менее 3 м, лишь в крайней южной части глуби́ны увеличиваются[3] [31]. Мелководные участки (1–1,5 м) вдоль побережья Ямала промерзают до дна. Воды залива характеризуются как солоноватые – от 12 до 22 $^{o}/_{oo}$. Минимальные величины отмечены в устьевых участках рек. После вскрытия рек паводковые воды, образующиеся в основ-

[1] Показатели состояния и правила таксации рыбохозяйственных водных объектов. ГОСТ 17.1.2.04-77. М.: Изд-во стандартов, 1987. 17 с.

[2] Атлас Ямало-Ненецкого автономного округа / гл. ред. С.И. Ларин. Омск: ФГУП «Омская картографическая фабрика», 2004. 303 с.

[3] Природные условия Байдарацкой губы. Основные результаты исследований для строительства подводного перехода системы магистральных газопроводов Ямал-Центр. М.: ГЕОС, 1997. 432 с.

ном за счет таяния снега, увеличивают речной сток и способствуют опреснению вод залива. Пресноводный сток порождает устойчивые квазистационарные потоки воды вдоль побережья [31]. В центре залива в зимний период образуется зона повышенной солености, обусловленная значительным снижением притока пресных вод.

Материал собран в ходе экспедиции Института экологии растений и животных УРО РАН в первой декаде августа 2013 г. Обследованы водоемы различного типа в бассейнах нижнего течения рек Мордыяха и Надуйяха, а также мелководный залив Шарапов Шар – вдоль западного побережья п-ва Ямал, от губы Крузенштерна до пр. Мутный Шар. Всего отобрано 56 проб фитопланктона и 48 проб для определения хлорофилла. Схема расположения точек сбора представлена на рисунке.

Пробы фитопланктона отбирали батометром Руттнера, фиксировали 4 % раствором формальдегида. Количественный анализ проводили в камере Нажотта объемом 0,01 мл (микроскоп Standart). Биомассу рассчитывали счетно-объемным методом[4] [32]. Для идентификации видового состава использовали отечественные и зарубежные определители.

Пробы отбирали с поверхностного горизонта (глубина 20–30 см) на морских станциях, дополнительно – с придонного горизонта. Одновременно определяли координаты станции, измеряли глубину, прозрачность, температуру, водородный показатель и концентрацию растворенного кислорода (табл. 1).

Содержание Хл «а» определяли стандартным методом [33, 34] на спектрофотометре «Spekol ZV». Для фильтрации использовали мембранные фильтры «Владипор» МФА-МА № 10 с размером пор 0,95–1,0 мкм. В лаборатории фильтры растирали в стеклянном гомогенизаторе в течение трех минут с добавлением 90 % раствора ацетона. Концентрацию хлорофилла «а» (Схл, мкг/л) рассчитывали по формуле[1]:

$$Схл = (11{,}85\times(E_{664}-E_{750})-1{,}54\times(E_{647}-E_{750})-0{,}08\times(E_{630}-E_{750}))\times V_1/l\times V_2,$$

где E – оптическая плотность экстракта при соответствующей длине волны;

V_1 – объем экстракта, мл;

l – длина кюветы, см;

V_2 – объем пробы, л.

Физиологическое состояние фитопланктона оценивали по соотношению желтых и зеленых пигментов (пигментное отношение – ПО, выраженное через отношение оптической плотности ацетонового экстракта в соответствующих максимумах поглощения E_{480}/E_{664}): ПО равное 1, или близкое к этому значению, характеризует состояние фитопланктона как вполне благополучное, ПО > 1 – альгоценозы находятся в угнетенном состоянии [6, 13, 14]. Оценка трофического статуса и качества вод исследованных водоемов разного типа проводилась согласно С.Е. Сиротскому [12].

Полученные данные по содержанию Хл «а» группировали по биотопам: речные – ст. 1, 2, 4, 5, 6, 7; озер – ст. 3; морские – ст. 8– 18, 22–31 (табл. 2). Статистическая обработка материала проводилась с помощью программы Statistica 8.0.

[4] Водоросли: справочник. Киев: Наукова думка, 1989. 608 с.

Таблица 1. Характеристика водных объектов на станциях отбора гидробиологических проб
Table 1. Characteristics of water bodies at hydrobiological sampling stations

№	Станции	Координаты		Глубина, м	Прозрачность, м	Температура, °С	pH	O_2 (ppm)
		с. ш.	в. д.					
1	р. Юнетаяха	70°39’17,5”	67°22’48,3”	1,0	до дна	–	6,6	9,50
2	пр. р. Юнетаяха	70°39’43,3”	67°18’33,2”	0,5	до дна	11,0	–	–
3	Озеро б/н № 1	70°41’05,3”	67°22’51’0”	1,1	до дна	13,0	6,9	9,0
4	р. Надуйяха	70°42’53,5”	67°25’45,2”	1,0	до дна	–	–	–
5	пр. Хойнтылнаюн	70°45’31,7”	67°27’05,3”	1,0	до дна	–	–	–
6	р. Монготояха	70°48’41,0”	67°26’06,5”	1,0	до дна	–	–	–
7	р.Юнетаяха,устье	70°37’31,2”	67°17’28,7”	1,2	до дна	11,0	–	–
8	Залив	70°39’35,0”	67°11’50,2”	1,3	0,35	–	6,8	–
9	Залив	70°40’26,6”	67°10’37,8”	2,7	0,35	–	6,8	–
10	Залив	70°39’52,1”	67°14’54,3”	1,8	–	–	6,8	–
11	Залив	70°44’42,8”	67°13’43,8”	2,5	2,05	11,0	6,8	–
12	Залив	70°44’48,2”	67°15’59,1”	0,5	0,50	11,0	6,8	–
13	Залив	70°44’50,4”	67°18’11,7”	1,7	1,30	–	6,8	–
14	Залив	70°44’43,0”	067°19’57,0”	0,8	до дна	–	6,8	–
15	Залив	70°43’16,6”	67°15’22,4”	2,5	1,10	–	6,8	–
16	Залив	70°42’26,1”	67°17’19,4”	1,2	0,60	11,0	6,8	–
17	Залив	70°40’51,2”	67°16’10,5”	1,5	0,50	11,0	–	–
18	Залив	70°40’38,6”	67°14’09,5”	2,5	0,90	11,0	6,8	–
19	р. Нюдя-Монгояха	70°33’27,6”	67°22’21,5”	0,5	до дна	12,0	–	–
20	оз. Ямто	70°32’13,6”	67°20’43,5”	1,0	до дна	12,0	–	–
21	р. Мордыяха	70°27’00,4”	67°20’16,2”	2,5	0,45	12,0	–	–
22	Залив	70°28’02,1”	67°13’59,3”	1,5	0,55	12,0	6,5	9,96
23	Залив	70°27’31,9”	67°11’51,6”	2,5	0,75	14,2	6,8	9,76
24	Залив	70°27’08,0”	67°09’39,7”	2,5	0,90	14,0	6,8	10,06
25	Залив	70°29’43,2”	67°07’17,7”	2,9	0,90	14,0	6,9	10,18
26	Залив	70°30’06,1”	67°10’21,7”	2,7	0,60	14,4	6,8	9,85
27	Залив	70°30’27,5”	67°11’33,3”	1,5	0,30	15,1	7,0	9,45
28	Залив	70°32’38,5”	67°12’55,4”	2,5	0,40	14,4	6,8	9,90
29	Залив	70°32’50,3”	67°14’28,1”	1,9	0,35	14,5	6,8	9,84
30	Залив	70°32’36,2”	67°10’32,9”	2,8	0,60	12,3	6,8	11,35
31	Залив	70°29’20,0”	67°16’58,8”	0,6	< 0,30	–	–	–
32	Озеро б/н № 2	70°29’20,0”	67°16’58,8”	1,0	0,5	–	–	–
33	Пр. Ямтосё	70°29’11,3	67°18’31,9”	2,5	до дна	–	–	–



1. р. Юнетаяха
2. р. Юнетаяха, протока
3. Озеро безымянное
4. р. Надуйяха
5. Протока Хойнтылнаюн
6. р. Монготояха
7. р. Юнетаяха, устье
8. Залив Шарапов Шар
9. Залив Шарапов Шар
10. Залив Шарапов Шар
11. Залив Шарапов Шар
12. Залив Шарапов Шар
13. Залив Шарапов Шар
14. Залив Шарапов Шар
15. Залив Шарапов Шар
16. Залив Шарапов Шар
17. Залив Шарапов Шар
18. Залив Шарапов Шар
19. р. Нюдя-Монгояха
20. оз. Ямто
21. р. Мордыяха
22. Залив Шарапов Шар
23. Залив Шарапов Шар
24. Залив Шарапов Шар
25. Залив Шарапов Шар
26. Залив Шарапов Шар
27. Залив Шарапов Шар
28. Залив Шарапов Шар
29. Залив Шарапов Шар
30. Залив Шарапов Шар
31. Залив Шарапов Шар
32. Озеро безымянное
33. Протока Ямтосё

Рисунок. Картосхема района исследований.
Fig. Schematic map of the study area.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Гидрохимические исследования

Гидрохимические и гидрологические показатели приведены в табл. 1. Температура воды изменялась незначительно: в реках и протоках 11,0–12,0 °С, в озерах 12,0–13,0 °С, в заливе 11,0–15,1 °С. Водородный показатель варьировал от 6,5 до 7,0, что соответствует уровню региональных фоновых значений – от 6,3 до 7,7 [30, 35]. Содержание растворенного кислорода не выходило за рамки предельно допустимых концентраций для рыбохозяйственных водоемов[1].

Прозрачность воды в разных частях залива варьировала в пределах 0,3–2,0 м, средняя величина составила 0,6 м. Минимальные значения отмечены в зоне малых глубин и в прибрежье, что объясняется повышенным содержанием взвешенных веществ в результате перемешивания толщи воды под воздействием сильных ветров и приливно-отливных явлений.

Таблица 2. Концентрация хлорофилла «а» и пигментное отношение в водотоках, водоемах и заливе Шарапов Шар, мкг/л
Table 2. Chlorophyll «a» concentration and pigment ratio in streams, reservoirs, and Sharapov Shar Bay, μg/L ± 10 %

№	Станции	Содержание Хл «а»			Пигментное отношение		
		поверхность	дно	среднее	поверхность	дно	среднее
1	р. Юнетаяха	1,0	2,0	1,5	4,2	2,0	3,1
2	пр. р. Юнетаяха	1,8	1,8	1,8	1,6	1,6	1,6
4	р. Надуйяха	4,1	4,1	4,1	2,1	2,1	2,1
5	пр. Хойнтылнаюн	1,2	1,2	1,2	1,4	1,5	1,5
6	р. Монготояха	8,7	8,7	8,7	1,6	1,6	1,6
7	р. Юнетаяха, устье	3,6	6,4	5,0	2,2	2,5	2,4
3	Озеро б/н № 1	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4
8	Залив Шарапов Шар	4,8	2,4	3,6	2,7	2,2	2,5
9	Залив Шарапов Шар	1,2	1,8	1,5	2,7	2,2	2,5
10	Залив Шарапов Шар	4,7	5,1	4,9	3,0	1,8	2,4
11	Залив Шарапов Шар	0,6	0,8	0,7	2,0	3,0	2,5
12	Залив Шарапов Шар	1,5	1,4	1,5	2,0	2,7	2,4
13	Залив Шарапов Шар	2,2	2,1	2,2	3,8	3,1	3,5
14	Залив Шарапов Шар	0,1	1,5	0,8	4,0	4,0	4,0
15	Залив Шарапов Шар	1,5	1,5	1,5	1,0	0,6	0,8
16	Залив Шарапов Шар	2,1	0,8	1,5	3,0	2,0	2,5
17	Залив Шарапов Шар	2,1	2,1	2,1	0,6	0,7	0,7
18	Залив Шарапов Шар	2,1	2,1	2,1	3,0	2,2	2,6
22	Залив Шарапов Шар	3,1	3,7	3,4	2,6	1,4	2,0
23	Залив Шарапов Шар	2,7	3,2	3,0	1,0	1,0	1,0
24	Залив Шарапов Шар	1,5	1,8	1,7	2,5	0,5	1,5
25	Залив Шарапов Шар	1,9	2,1	2,0	2,2	0,8	1,5
26	Залив Шарапов Шар	1,6	2,4	2,0	0,8	0,6	0,7
27	Залив Шарапов Шар	6,0	8,0	7,0	1,0	1,8	1,4
28	Залив Шарапов Шар	3,5	3,9	3,7	1,7	1,7	1,7
29	Залив Шарапов Шар	2,8	3,5	3,2	0,8	0,3	0,6
30	Залив Шарапов Шар	1,7	1,7	1,7	1,0	0,3	0,6
31	Залив Шарапов Шар	12,0	12,0	12,0	1,0	1,0	1,0

Фитопланктон

Видовой состав фитопланктона озер достаточно богат. Определено 74 видовых и внутривидовых таксона, относящихся к шести отделам [28]. Наиболее разнообразно представлены диатомовые и зеленые хлорококковые водоросли. Численность и биомасса фитопланктона варьировали в широких пределах – от 1868 до 7489 тыс. кл/л и от 0,06 до 5,160 мг/л соответственно. В составе альгоценозов, как правило, доминировали синезеленые: 70–84 % общей численности и 79–95 % суммарной биомассы соответственно.

В реках установлено 152 видовых и внутривидовых таксона, в протоках – 56. По числу видов преобладали диатомовые и зеленые хлорококковые водоросли. Отмечены солоноватоводные виды рода Nitzschia и *Gyrosigma scalproides* (Rabenhorst) Cleve. Численность водорослей в реках изменялась от 3012 до 6616 тыс. кл/л, биомасса – от 0,056 до 0,478 мг/л, в протоках – от 844 до 3970 тыс. кл/л и от 0,208 до 0,334 мг/л соответственно. Структуру альгоценозов практически во всех водотоках определяли мелкоклеточные зеленые и синезеленые водоросли. Основу численности составляли синезеленые – 52,7–87,0 % от суммарной. Диатомовые создавали в среднем 17–20 % (до 40 %) общей биомассы фитопланктона.

В целом в составе водорослей обследованных рек, проток и озер установлено 213 видов, разновидностей и форм из восьми отделов. Видовое разнообразие определяли диатомовые (49,8 %), зеленые (26,3 %) и синезеленые (12,7 %) водоросли. В составе фитопланктона отмечен высокий процент маловидовых родов, что является характерной особенностью альгофлоры северных широт [36–38]. Синезеленые, зеленые и золотистые водоросли представлены, в основном, планктонными пресноводными видами. Среди диатомовых основное ядро составляют обитатели литорали, дна и обрастаний. Видовое разнообразие фитопланктона возрастает в ряду озера → протоки → реки. Уровень количественного развития альгоценозов в озерах выше, чем в реках и протоках. Показатели численности и биомассы сопоставимы с величинами, полученными для других водоемов Ямала [39, 40 и др.].

Изучение водорослей планктона залива Шарапов Шар проведено впервые. В составе альгофлоры восточной части залива выявлено свыше 120 видовых и внутривидовых таксонов из семи отделов. Наиболее разнообразно представлены диатомовые водоросли – 92 вида, разновидности и формы. Зеленые и синезеленые водоросли насчитывали по 11 таксонов рангом ниже рода. Число представителей остальных отделов не превышало 3–4 видов для каждого. Выявленная флора водорослей носила, в основном, пресноводный характер. Представители морской флоры встречались единично.

Большинство видов широко распространены в водоемах различного типа на Ямале [41, 42 и др.]. Видовой состав фитопланктона на всех станциях был весьма однообразен и состоял из типичных представителей пресноводной и эстуарной флоры, а также форм микрофитобентоса. Синезеленые, зеленые и золотистые водоросли были представлены исключительно планктонными пресноводными видами. Среди диатомовых доминировали представители лито-

рали, дна и обрастаний. Из морских видов на отдельных станциях в небольших количествах отмечены *Nitzschia filiformis* W. Smith., *N. closterium* (Ehrenberg) W.Smith, *Gyrosigma fasciola* (Ehrenberg) Griffith et Henfrey, *Paralia sulcata* (Ehrenberg) Cleve, *Navicula spicula* Hieckie. Анализ биотопической принадлежности групп фитопланктонного сообщества показал, что истинно планктонные водоросли составляли лишь 40 % альгоценоза, включая массовые и часто встречающиеся формы. Уровень развития планктонных водорослей низкий: численность изменялась от 236 до 7759 тыс. кл/л, биомасса – от 0,001 до 0,5 мг/л; средние величины составили 2381 тыс. кл/л и 0,063 мг/л соответственно.

На формирование фитопланктона залива Шарапов Шар большое влияние оказывает сток речных вод. Из пресноводных видов остаются, в основном, толерантные к изменениям солености и температуры воды формы. В целом, для альгоценозов залива характерно доминирование диатомовых микроводорослей. По сравнению с материковыми водоемами видовое разнообразие значительно ниже. Максимальный уровень количественного развития фитопланктона наблюдается в устьевых районах рек Мордыяха и Надуйяха. В морской акватории залива отмечено снижение численности и биомассы. Прослеживается тенденция уменьшения количественных показателей с юга на север, что обусловлено не только уменьшением выноса водорослей из рек, но и существующими течениями [31]. Средние величины численности фитопланктона в заливе Шарапов Шар значительно выше, а показатели биомассы ниже приводимых в литературе данных для разных районов Байдарацкой губы[3,5] [25–27, 43, 48 и др.].

Хлорофилл «а»

Концентрация Хл «а» в реках и протоках изменялась от 1,0 до 8,7 мкг/л (табл. 2). На высокую вариабельность показателя указывает значение коэффициента вариации (C_V = 77 %). Наибольшая продуктивность выявлена у альгоценозов р. Монготаяхи. Существенные различия в содержании Хл «а», очевидно, связаны с разнородностью экологических условий водотоков и их водосборов, обусловленных гидрологическими факторами, а также обеспеченностью биогенными веществами. В районе некоторых станций отбора проб на прилегающих территориях проводился интенсивный выпас оленьих стад. Этот факт, на наш взгляд, объясняет повышенный уровень трофии на локальных участках водотоков.

Пигментное отношение варьировало в пределах 1,5–4,2. Средние величины (1,5–3,1) указывают на ослабленное физиологическое состояние фитопланктона во всех водотоках, что наиболее выражено в р. Юнетаяха (ст. 1). В поверхностном горизонте водоросли находились в более угнетенном состоянии, чем в придонных слоях. При одинаковых метеоусловиях и единой фазе сукцессии причиной такого явления, на наш взгляд, могли быть такие факторы, как гидрологические особенности водотока и недостаток биогенных веществ.

[5] Строительство поисково-оценочной скважины № 2 Скуратовской площади: Оценка воздействия на окружающую среду: Отчет о НИР / исп. И.Е. Каштанова, А.С. Петровский, С.В. Дубовцева [и др.]; ООО «Красноярскгазпром Нефтегазпроект». М., 2020. 314 с. Режим доступа: https://krasnoyarskgazprom-ngp.gazprom.ru/d/textpage/9b/155/ovos-na-pd-skuratovskaya-2.pdf (дата обращения 02.08.2023 г.)

Согласно классификации С.Е. Сиротского [12], р. Юнетаяха (ст. 1) с одноименной протокой (ст. 2) и пр. Хойнтылнаюн (ст. 5) соответствовали водоемам олиготрофного типа, реки Надуйяха (ст. 4), Монготаяха (ст. 6) и Юнетаяха (ст. 7) – водоемам мезотрофного типа. Воды первых трех водотоков (см. выше) на основании полученных величин концентрации Хл «а» относятся к 1 классу качества вод и характеризуются как «очень чистые», другие водотоки соответствуют 2 классу – «чистые».

Данные о содержании Хл «а» в водоемах получены только для одного безымянного озера, расположенного в пойме р. Юнетаяхи (ст. 3). Озеро представляет собой небольшой мелководный водоем (площадь 400 м^2). Концентрация Хл «а» составила 2,4 мкг/л, что позволяет отнести озеро к водоемам олиготрофного типа. Вода соответствовала 1 классу качества – «очень чистая». Величина ПО (2,4) характеризовала физиологическое состояние фитопланктона как угнетенное, что, вероятно, обусловлено конкуренцией за биогенные вещества с макрофитами и макроводорослями.

Данные спутникового зондирования внутренних водоемов Ямала показали, что средние за месяц (сентябрь, 2011 г.) концентрации Хл «а» изменялись в пределах 1,0–1,75 мкг/л [16]. Учитывая сезон и стадию вегетации фитопланктона, эти цифры можно считать близкими к реальности и сопоставимыми с полученными в рамках данного исследования данными.

Содержание хлорофилла «а» в заливе Шарапов Шар варьировало в широких пределах: 0,1–12,0 мкг/л у поверхности и 0,8–8,0 мкг/л в придонных горизонтах (табл. 2). Величина коэффициента вариации превышала 86 %. Отмечена тенденция небольшого увеличения средних концентраций хлорофилла «а» – от 1,8 мкг/л до 4,0 мкг/л в направлении с севера на юг. По мере удаления от берега, как правило, наблюдалось снижение содержания Хл «а», обусловленное, на наш взгляд, снижением поступления биогенных веществ, в отличие от прибрежной зоны, и реакцией водорослей на повышение солености воды [26]. В целом, средние концентрации пигмента, рассчитанные для столба воды в исследованной акватории залива, изменялись в пределах от 0,7 мкг/л (ст. 11) до 12,0 мкг/л (ст. 31).

На многих станциях максимальное содержание хлорофилла отмечено в придонных горизонтах, где водоросли укрываются от динамического воздействия волн. В отдельных случаях высокие концентрации пигмента наблюдались в прибрежной зоне (ст. 31), что связано с увеличением численности водорослей, обусловленным ветро-волновым нагоном и выносом из рек.

Средняя концентрация Хл «а» в заливе Шарапов Шар составила 2,9 мкг/л. Высокое содержание пигмента характерно для мелководных участков морей и устьевых районов рек. На большей части акватории Байдарацкой губы[3,5] средние величины Хл «а» были значительно ниже и изменялись от 0,1 мкг/л до 0,9 мкг/л [25–27 и др.].

Согласно классификации, разработанной для пресноводных водных объектов, трофический статус вод залива можно охарактеризовать как олиготрофный [12]. Однако, поскольку обследованная акватория является частью

морского залива, для характеристики трофического статуса вполне справедливо применить классификацию, разработанную для морских и океанических вод [44, 45]. Средневзвешенное содержание Хл «а» в эвфотическом слое более 1 мкг/л соответствует водоемам эвтрофного типа, от 1,0 до 0,5 мкг/л – мезотрофного типа, менее 0,2 мкг/л – олиготрофного. По этой классификации трофический статус вод залива соответствует высокопродуктивным водоемам эвтрофного типа. Высокие концентрации Хл «а» отмечены в эстуарии р. Оби [26]. Подобные мелководные опресненные участки морей являются зонами высокой первичной продукции, к которым приурочены места нагула многих видов рыб. В то же время по продукционным показателям фитопланктона Карское море относится к низко продуктивным арктическим морям олиготрофного типа [23, 26 и др.].

Для континентальных водных объектов отмечена среднезначимая отрицательная зависимость содержания Хл «а» от биомассы водорослей – $r = -0{,}58$, $n = 7$ и $p < 0{,}01$. В заливе Шарапов Шар установлена высокозначимая положительная корреляция между концентрацией Хл «а» и биомассой фитопланктона – $r = 0{,}80$, $n = 21$ и $p < 0{,}01$. Прямая (чаще линейная) связь концентрации Хл «а» с биомассой фитопланктона отмечена в работах многих авторов [46–48].

ПО на обследованных станциях варьировало в диапазоне от 0,3 до 4,0 (при среднем значении 1,8). На северных створах, между устьями рек Надуйяха и Юнетаяха, сообщества фитопланктона находились в наиболее угнетенном состоянии (ПО – от 2,3 до 4,0). В южной части залива, между устьями рек Юнетаяха и Мордыяха, альгоценозы развивались в более благоприятных условиях (ПО – от 0,5 до 2,0). На отдельных станциях обнаружены более высокие значения ПО у поверхности, чем в придонных горизонтах. На наш взгляд, это могло быть обусловлено метеоусловиями, когда при волновом перемешивании воды на поверхность поднимается детрит с отмершими клетками водорослей, доля каратиноидов в которых выше активного хлорофилла. В целом, фитопланктон на обследованной акватории залива находится в относительно удовлетворительном состоянии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные по итогам проведенного исследования данные позволяют оценить степень развития водорослей, их физиологическое состояние и продукционные возможности. Характерной особенностью распределения фитопланктона на акватории залива Шарапов Шар является его концентрация в прибрежных районах. Эта тенденция прослеживается как по распределению биомассы водорослей, так и по концентрации хлорофилла «а». Анализ данных показал среднезначимую отрицательную зависимость содержания Хл «а» от биомассы водорослей для континентальных водных объектов. В заливе установлена высокозначимая положительная корреляция между концентрацией Хл «а» и биомассой фитопланктона. Полученные величины содержания пигмента могут быть использованы для расчета биомассы водорослей в различного типа водных объектах Ямала и в прибрежной акватории полуострова.

Анализ полученных величин концентрации хлорофилла «а» показал, что состояние водных экосистем устьевых участков рек и их проток, впадающих в залив Шарапов Шар, а также небольших озер во время проведения исследований следует оценить, как вполне благополучное.

Согласно классификации, основанной на содержании хлорофилла «а», реки и пойменные водоемы относятся к водоемам мезотрофного типа. Обследованная акватория залива Шарапов Шар соответствует высокопродуктивным водоемам эвтрофного типа. В связи с усилением антропогенной нагрузки в процессе освоения и эксплуатации Крузенштернского ГКМ и выпаса оленьих стад возрастает вероятность увеличения трофности водотоков и водоемов, снижения качества вод.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семенченко В.П. Принципы и системы биоиндикации текучих вод. Минск: Орех, 2004. 125 с.
2. Макрушин А.В. Биологический анализ качества вод. Л., 1974. 60 с.
3. Щербак В.И., Семенюк Н.Е., Майстрова Н.В. Адаптація методів оцінки екологічного стану водойм мегаполісів України за фітопланктоном и фито микроперифитоном видповидно до Водної Рамковой Директиви 2000/60/ЕС // Доповіді НАН України. 2009. № 10. С. 206–211.
4. Hill V.J., Matrai P.A., Olson E. et al. Synthesis of integrated primary production in the Arctic Ocean: II. In situ and remotely sensed estimates // Progress in Oceanography. 2013. Vol. 110. P. 107–125. DOI: 10.1016/j.pocean.2012.11.005.
5. Винберг Г.Г. Первичная продукция водоемов. Минск: Изд-во Университетское, 1960. 329 с.
6. Бульон В.В. Первичная продукция планктона внутренних водоемов. Л.: Наука, 1983. 150 с.
7. Оксиюк О.П., Жукинский В.Н., Брагинский Л.П. и др. Комплексная экологическая классификация качества поверхностных вод суши // Гидробиологический журнал. 1993. Т. 29. № 4. С. 62–76.
8. Трифонова И.С. Оценка трофического статуса водоемов по содержанию хлорофилла *a* в планктоне // Методические вопросы изучения первичной продукции планктона внутренних водоемов. СПб.: Гидрометеоиздат, 1993. С. 158–166.
9. Carlson R.E. A trophic state index for lakes // Limnology and Oceanography. 1977. Vol. 22. No. 2. P. 361–369. DOI: 10.4319/lo.1977.22.2.0361.
10. Vollenweider R.A. Das Nährstoffbelastungsconzept als Grundlage fur den eutrophierungsprozess stehender Gewässer und Talsperren // Zeitschrift fur Wasser und Abwasser Forschung. 1979. Bd. 12. No. 2. P. 46–56.
11. Eutrophication of waters. Monitoring, assessment and control. Paris: OECD, 1982. 155 p.
12. Сиротский С.Е. Трофический статус водотоков бассейна рек Бурея, Зея, Бурейского и Зейского водохранилищ // Научные основы экологического мониторинга водохранилищ. Дружининские чтения. Хабаровск: ИВЭП ДВО РАН, 2005. Вып. 2. С. 95–99.
13. Минеева М.Н. Эколого-физиологические аспекты формирования первичной продукции планктона водохранилищ Волги: автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Нижний Новгород, 2004. 42 с.
14. Минеева Н.М. Растительные пигменты в воде волжских водохранилищ. М.: Наука, 2004. 156 с.
15. Ветров А.А. Хлорофилл, первичная продукция и потоки органического углерода в Карском море // Океанология. 2008. Т. 48. № 1, С. 38–47. DOI: 10.1134/S0001437008010050.
16. Кузнецова О.А., Копелевич О.В., Шеберстов С.В., Буренков В.И., Мошаров С.А., Демидов А.Б. Оценка концентрации хлорофилла в Карском море по данным спутникового сканера MODIS AQUA // Исследование Земли из космоса. 2013. № 5. С. 21–31.
17. Глуховец Д.И., Гольдин Ю.А. Исследование биооптических характеристик вод Карского моря с использованием данных спутниковых и судовых измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 4. С. 346–350.

18. Пелевин В.В., Завьялов П.О., Беляев Н.А., Коновалов Б.В., Кравчишина М.Д., Мошаров С.А. Пространственная изменчивость концентраций хлорофилла «а», растворенного органического вещества и взвеси в поверхностном слое Карского моря в сентябре 2011 г. по лидарным данным // Океанология. 2017. Т. 57. № 1. С. 183–193.
19. Ярушина М. И. Фитопланктон водоемов бассейна р. Мордыяхи // Современное состояние растительного и животного мира полуострова Ямал. Екатеринбург: УИФ Наука, 1995. С. 37–40.
20. Генкал С.И., Ярушина М.И. Диатомовые водоросли слабоизученных водных экосистем крайнего севера Западной Сибири. М.: ООО «Научный мир», 2018. 212 с.
21. Генкал С.И., Ярушина М.И. Флора Bacillariophyta планктона тундровых экосистем в зоне освоения газоконденсатного месторождения (п-ов Ямал) // Биология внутренних вод. 2019. № 4–1. С. 3–13. DOI: 10.1134/S0320965219040235.
22. Богданов В.Д., Богданова Е.Н., Мельниченко И.П., Степанов Л.Н., Ярушина М.И. Проблемы охраны биоресурсов при обустройстве Бованенковского газоконденсатного месторождения // Экономика региона. 2012. № 4. С. 68–79.
23. Ведерников В.И, Демидов А.Б., Судьбин А.И. Первичная продукция и хлорофилл в Карском море в сентябре 1993 г. // Океанология. 1994. Т. 34. № 5. С. 693–703.
24. Гаевский Н.А., Семенова Л.А., Матковский А.К. Трофический статус вод экосистемы Обско-Тазовской устьевой области по показателям фитопланктона // Вестник экологии лесоведения и ландшафтоведения. 2010. № 10. С. 170–179.
25. Мошаров С.А. Распределение первичной продукции и хлорофилла «а» в Карском море в сентябре 2007 года // Океанология. 2010. Т. 50. № 6. С. 933–941.
26. Суханова И.Н., Флинт М.В., Мошаров С.А., Сергеева В.М. Структура сообществ фитопланктона и первичная продукция в Обском эстуарии и на прилежащем Карском шельфе // Океанология. 2010. Т. 50. № 5. С. 785–800.
27. Житина Л.С., Ильяш Л.В. Состав и обилие фитопланктона Байдарацкой губы Карского моря в летний и осенний периоды // Вестник Московского университета. Сер. 16: Биология. 2013. № 2. С. 22–26.
28. Богданов В.Д., Степанов Л.Н., Богданова Е.Н., Мельниченко И.П., Ярушина М.И. Оценка современного состояния водных экосистем и проблемы охраны биологических ресурсов при обустройстве Крузенштернского ГКМ // Экономика региона. 2015. № 3. С. 266–278. DOI: 10.17059/2015-3-22.
29. Генкал С.И., Ярушина М.И. Материалы к флоре Bacillariophyta водоемов и водотоков бассейна реки Надуйяха (п-ов Ямал, Россия) // Альгология. 2016. Т. 26. № 1. С. 102–115.
30. Пыстина Н.Б., Баранов А.В., Ильякова Е.Е., Унанян К.Л. Исследования гидрохимических характеристик водных объектов в районе Бованенковского НГКМ // Вестник газовой науки. 2013. № 2(13). С. 107–112.
31. Коротков С.В., Бронников И.В., Голубев В.А., Паялов В.А. Инженерно-гидрометеорологические изыскания в заливе Шарапов Шар у западного побережья Ямала // Инженерные изыскания. 2011. № 6. С. 16–20.
32. Методика изучения биогеоценозов внутренних водоемов. М.: Наука, 1975. 240 с.
33. SCOR-UNESCO Working Group 17. Determination of photosynthetic pigments in sea water // Monographs on Oceanographic Methodology. Paris: UNESCO, 1966. 69 p. DOI: 10.25607/OBP-1940.
34. Jeffrey S.W., Humphrey G.F., New spectrophotometric equations for determining chlorophylls a, b, c1 and c2 in higher plants, algae and natural phytoplankton // Biochemistry and Physiology. Biochemie und Physiologie der Pflanzen. 1975. Vol. 167. No. 2. P. 191–194. DOI: 10.1016/S0015-3796(17)30778-3.
35. Ермилов О.М., Грива Г.И., Москвин В.И. Воздействие объектов газовой промышленности на северные экосистемы и экологическая стабильность геотехнических комплексов в криолитозоне. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. 147 с.
36. Гецен М.В., Стенина А.С., Патова Е.Н. Альгофлора Большеземельской тундры в условиях антропогенного воздействия. Екатеринбург: УИФ Наука, 1994. 147 с.
37. Ярушина М.И. Водоросли // Биоресурсы водных экосистем Полярного Урала. Екатеринбург: УрО РАН. 2004. С.18–56.

38. Биоразнообразие экосистем Полярного Урала. Сыктывкар: Коми НЦ УрО РАН. 2007. 252 с.
39. Биология гидробионтов экосистемы р. Мордыяхи. Свердловск, 1991. Рук. деп. в ВИНИТИ 06.06.91. № 2367 – В-91. 76 с.
40. Проблемы охраны биоресурсов при обустройстве Бованенковского газоконденсатного месторождения / Богданов В.Д., Богданова Е.Н., Мельниченко И.П., Степанов Л.Н., Ярушина М.И. // Экономика региона. 2012. № 4(32). С. 68–79.
41. Валеева Э.И. Водные экосистемы // Природная среда Ямала. Тюмень: ИПОС СО РАН, 1995. Т. 1. С. 10–21.
42. Науменко Ю.В., Семенова Л.А. К изучению водорослей некоторых водоемов полуострова Ямал (Западная Сибирь) // Новости систематики низших растений. СПб.: Наука, 1996. Т. 31. С. 46–52.
43. Новикова Ю.В., Артемьев С.Н. Гидробиологические исследования Байдарацкой губы Карского моря в 2015 году (фитопланктон, зообентос) // Современные проблемы и перспективы развития рыбохозяйственного комплекса М.: Изд-во ВНИРО, 2018. С. 193–197.
44. Кобленц-Мишке О.И., Ведерников В.И. Первичная продукция // Биология океана. Биологическая продуктивность океана. М.: Наука, 1977. Т. 2. С. 183–209.
45. Мордасова Н.В. Косвенная оценка вод по содержанию хлорофилла. Труды ВНИРО. 2014. Т. 152. С. 44–56.
46. Минеева Н.М., Митропольская И.В. Состав и продуктивность фитопланктона сопредельных участков Рыбинского и Горьковского водохранилищ // Биология внутренних вод. 2002. № 4. С. 25–33.
47. Минеева Н.М., Корнева Л.Г., Соловьева В.В. Продукционные характеристики фитопланктона волжских водохранилищ // Озерные экосистемы: биологические процессы, антропогенная трансформация, качество воды: мат-лы 3 межд. конф. Минск: БГУ, 2007. С. 29–30.
48. Мухутдинов В.Ф. Продуктивность фитопланктона и гидрохимический режим Юмагузинского водохранилища (р. Белая, Башкортостан) в первые годы его существования: Автореф. дис. … канд. биол. наук. Борок, 2013. 21 с.

REFERENCES

1. Semenchenko V.P. Principles and systems of the flowing waters bio/indication. Minsk: Orekh, 2004. 125 p. (In Russ.).
2. Makrushin A.V. Biological analysis of water quality вод. L., 1974. 60 p. (In Russ.).
3. Shcherbak V.I., Semenyuk N.E., Maystrova N.V. Adaptation of the Ukrainian megapolises' water ecological status assessment methods concerning phyto[plankton and phyto/micro/periphyton to the requirements of Framework Water Directive 2000/60/EC. *Newsletter of the Ukrainian Academy of Sciences.* 2009. No. 10. P. 206–211. (In Ukr.).
4. Hill V.J., Matrai P.A., Olson E. et al. Synthesis of integrated primary production in the Arctic Ocean: II. In situ and remotely sensed estimates. *Progress in Oceanography*. 2013. Vol. 110. P. 107–125. DOI: 10.1016/j.pocean.2012.11.005.
5. Winberg G.G. Original production of water bodies. Minsk: Izd-vo Universitetskoye. 1960. 329 p. (In Russ.).
6. Bulyon V.V. Original production of inland water bodies. L.: Nauka, 1983. 150 p. (In Russ.).
7. Oksiyuk O.P., Zhukinskiy V.N., Braginskiy L.P. *et al*. Integrated ecological classification of the inland surface waters quality. *Hydrobiological journal*. 1993. Vol. 29. No. 4. P. 62–76 (In Russ.).
8. Trifonova I.S. Assessment of the water bodies' trophic status according to the chlorophyll "*a*' content in plankton. *Methodical issues of the inland water bodies' original plankton production studies*. SPb: Gidrometeoizdat, 1993. P. 158–166 (In Russ.).
9. Carlson R.E. A trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography*. 1977. Vol. 22. No. 2. P. 361–369. DOI: 10.4319/lo.1977.22.2.0361.
10. Vollenweider R.A. Das Nährstoffbelastungsconzept als Grundlage fur den eutrophierungs-prozess stehender Gewässer und Talsperren. *Zeitschrift fur Wasser und Abwasser Forschung*. 1979. Bd. 12. No. 2. P. 46–56.
11. Eutrophication of waters. Monitoring, assessment and control. Paris: OECD, 1982. 155 p.

12. Sirotskiy S.E. Trophic status of the Bureya, Zeya rivers, and the Bureya and the Zeya reservoirs basin water courses. *Scientific foundations of the ecological monitoring of reservoirs. Druzhinin's Readings*. Khabarovsk: IVEP DVO RAN, 2005. Iss. 2. P. 95–99 (In Russ.).
13. Mineyeva M.N. Ecological/physiological aspects of the Volga reservoirs plankton primary production formation: abstract of the biological sciences doctoral thesis. Nizhniy Novgorod, 2004. 42 p. (In Russ.).
14. Mineyeva N.M. Vegetative pigments in the Volga reservoirs water. M.: Nauka, 2004. 156 p. (In Russ.).
15. Vetrov A.A. Chlorophyll, primary production and organic carbon flows in the Kara Sea. *Ocanology*. 2008. Vol. 48. No. 1. P. 38–47. DOI: 10.1134/S0001437008010050 (In Russ.).
16. Kuznetsova O.A., Kopelevich O.V., Sheberstov S.V., Burenkov V.I., Mosharov S.A., Demidov A.B. Assessment of the chlorophyll concentration in the Kara Sea according to the MODIS AQUA satellite scanner data. *The earth investigation from cosmos*. 2013. No. 5. P. 21–31 (In Russ.).
17. Glukhovets D.I., Goldin Y.A. Investigation of bio/optical characteristics of the Kara Sea water with the use of satellite and vessel observation data. *Contemporary problems of the Earth remote sounding from cosmos*. 2014. Vol. 11. No. 4. P. 346–350 (In Russ.).
18. Pelevin V.V., Zavyalov P.O., Belayev N.A., Konovalov B.V., Kravchishina M.D., Mosharov S.A. Spatial variability of the chlorophyll "*a*", dissolved organic matter and suspension concentrations within the Kara Sea surface layer in September, 2011 according to the lidar data. *Oceanology*. 2017. Vol. 57. No. 1. P. 183–193 (In Russ.).
19. Yarushina M.I. Phytoplankton of the Mordiyakha River basin water bodies. *Current status of the Yamal Peninsula flora and fauna*. Ekaterinburg: UIF Nauka, 1995. P. 37–40 (In Russ.).
20. Genkal S.I., Yarushina M.I. Diaomov algae of the poorly investigated aquatic ecosystems of the extreme north of the Western Siberia. M.: Nauchniy mir, 2018. 212 p. (In Russ.).
21. Genkal S.I., Yarushina M.I. Biology of the inland waters. 2019. No. 4–1. P. 3–13. DOI: 10.1134/S0320965219040235 (In Russ.).
22. Bogdanov V.D., Bogdanova E.N., Melnichenko I.P., Stepanov L.N., Yarushina M.I. Problems of the bio/resources protection in the process of construction of the Bovanenkovo gas-condensate field. *Region economy*. 2012. No. 4. P. 68–79 (In Russ.).
23. Vedernikov V.I., Demidov A.B., Sudbin A.I. Primary production and chlorophyll in the Kara Sea in September, 1993. *Oceanology*. 1994. Vol. 34. No. 5. P. 693–703 (In Russ.).
24. Gayevskiy N.A., Semenova L.A., Matkovskiy A.K. Trophic status of the Ob-Taz delta region ecosystem waters in terms of the plankton indicators. *Newsletter of forest and landscape ecology*. 2010. No. 10. P. 170–179 (In Russ.).
25. Mosharov S.A. Distribution of primary production and chlorophyll "*a*" in the Kara Sea in September, 2007. *Oceanology*. 2010. Vol. 50. No. 6. P. 933–941 (In Russ.).
26. Sukhanova I.N., Flint M.V., Mosharov S.A., Sergeyeva V.M. The structure of the phytoplankton communities and primary production in the Ob estuary and at the adjacent Kara offshore. *Oceanology*. 2010. Vol. 50. No. 5. P. 785–800 (In Russ.).
27. Zhitina L.S., Ilyash L.V. The Kara Sea Baydaratsk Guba phytoplankton composition and abundance during summer and fall periods. *Bulletin of the Moscow University*. Ser. 16: Biology. 2013. No. 2. P. 22–26 (In Russ.).
28. Bogdanov V.D., Stepanov L.N., Bogdanova E.N., Melnichenko I.P., Yarushina M.I. Assessment of the current state of aquatic ecosystems and problems of the biological resources protection in the process of the Kruzenstern gas-condensate filed construction. *Region economy*. 2015. No. 3. P. 266–278. DOI: 10.17059/2015-3-22 (In Russ.).
29. Genkal S.I., Yarushina M.I. Materials to flora Bacillariophyta of the Naduiyakh River basin watercourses and water bodies (the Yamal Peninsula, Russia). *Algology*. 2016. Vol. 26. No. 1. P. 102–115 (In Russ.).
30. Pystina N.B., Baranov A.V., Ilyakova E.E., Unanyan K.L. Investigations of the water bodies hydro/chemical characteristics in the area of the Bovanenkovsk gas-condensate field. *Bulletin of Gas Science*. 2013. No. 2(13). P. 107–112 (In Russ.).
31. Korotkov S.V., Bronnikov I.V., Golubev V.A., Payalov V.A. Engineering/hydro/meteorological survey in the Sharapov Shar Bay offshore the Yamal western bank. *Engineering surveying*. 2011. No 6. P. 16–20 (In Russ.).

32. Methods of the inland water bodies' bio/geo/ceonosis investigation. M.: Nauka, 1975. 240 p.
33. SCOR-UNESCO Working Group 17. Determination of photosynthetic pigments in sea water // Monographs on Oceanographic Methodology. Paris: UNESCO, 1966. 69 p. DOI: 10.25607/OBP-1940.
34. Jeffrey S.W., Humphrey G.F., New spectrophotometric equations for determining chlorophylls a, b, c1 and c2 in higher plants, algae and natural phytoplankton. *Biochemistry und Physiology. Biochemie und Physiologie der Pflanzen.* 1975. Vol. 167. No. 2. P. 191–194. DOI: 10.1016/S0015-3796(17)30778-3.
35. Yermilov O.M., Griva G.I., Moskvin V.I. The gas industry impact upon northern ecosystems and ecological stability of geo/engineering complexes in cryolite zone. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2002. 147 p. (In Russ.).
36. Getsen M.V., Stenina A.S., Patova E.N. Algaeflora of the Bolshezemelskaya Tundra under the conditions of anthropogenic impact. Ekaterinburg: UIF Nauka, 1994. 147 p. (In Russ.).
37. Yarushina M.I. Algae. Bioresources of the Polar Ural aquatic ecosystems. Ekaterinburg: UrO RAN. 2004. P.18–56 (In Russ.).
38. Biological diversity of the Polar Ural ecosystems. Syktykvar: Komi Scientific Center of the Russian Academy of Sciences Ural Branch. 2007. 252 p. (In Russ.).
39. Biology of the Mordiyakhi River ecosystem hydrocoles. Sverdlovsk, 1991. A copy is deposited with VINITI 06.06.91. No. 2367 – B-91. 76 p. (In Russ.).
40. Problems of the bio/resources protection in the process of construction of the Bovanenkovo gas/condensate field. Bogdanov V.D., Bogdanova E.N., Melnichenko I.P., Stepanov L.N., Yarushina M.I. *Region economy*. 2012. No. 4(32). P. 68–79 (In Russ.).
41. Valeyeva E.I. Aquatic ecosystems. *The Yamal natural environment*. Tyumen: IPOS ISO RAN, 1995. Vol. 1. P. 10–21 (In Russ.).
42. Naumenko Y.V., Semenova L.A. On the studying of algae of several water bodies of the Yamal Peninsula (Western Siberia). *News of inferior plants system*. SPb.: Nauka, 1996. Vol. 31. P. 46–52 (In Russ.).
43. Novikova Y.V., Artemyev S.N. Hydrobiological studies of the Kara Sea Baydaratsk Guba in 2015 (phytoplankton, zoobenthos). *Contemporary problems and development prospects of the fishery sector*. M.: Izd-vo VNIRO, 2018. P. 193–197 (In Russ.).
44. Koblents-Mishke O.I., Vedernikov V.I. Original production. Ocean biology. *Ocean biological productivity*. M.: Nauka, 1977. Vol. 2. P. 183–209 (In Russ.).
45. Mordasova N.V. Indirect assessment of water by the chlorophyll content. *VNIRO Proceedings*. 2014. Vol. 152. P. 44–56 (In Russ.).
46. Mineyeva N.M., Mitropolskaya I.V. Composition and productivity of phytoplankton of the adjacent water areas of the Rybinsk and the Gorkiy reservoirs. *Inland waters biology*. 2002. No. 4. P. 25–33 (In Russ.).
47. Mineyeva N.M., Korneva L.G., Solovyeva V.V. Production characteristics of the Volga reservoirs phytoplankton. Lake ecosystems: biological processes, anthropogenic transformation, water quality. *Proceedings of the 3rd International Conference*. Minsk: BGU, 2007. P. 29–30 (In Russ.).
48. Mukhutdinov V.F. Phytoplakton productivity and the Yumarguzinsk Reservoir (the Belaya River, Bashkortostan) hydro/chemical regime during the first years of its existence: Abstract of the candidate of biological sciences thesis. Borok, 2013. 21 p. (In Russ.).

Сведения об авторах:

Ярушина Маргарита Ивановна, канд. биол. наук, старший научный сотрудник, лаборатория экологии рыб и биоразнообразия водных экосистем, Институт экологии растений и животных Уральского отделения Российской академии наук, Россия, 620144, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта, 202, e-mail: nvl@ipae.uran.ru

Мухутдинов Валерий Фаметдинович, канд. биол. наук, главный специалист, отдел научно-методического обеспечения восстановления и охраны водных объектов, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Уральский филиал, Россия, 620049, г. Екатеринбург, ул. Мира 23; e-mail: wrm@wrm.ru

Степанов Леонид Николаевич, научный сотрудник, лаборатория экологии рыб и биоразнообразия водных экосистем, Институт экологии растений и животных Уральского отделения Российской академии наук, Россия, 620144, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта, 202, ORCID Степанова Л.Н.: 0000-0001-8082-4138, e-mail: stepanov@ipae.uran.ru

About the authors

Margarita I. Yarushina, Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Laboratory of ecology of fishes and aquatic biodiversity, Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch of RAS, ul. 8 Marta, 202, Ekaterinburg, 620144, Russia; e-mail: nvl@ipae.uran.ru

Valery F. Mukhutdinov, Candidate of Biological Sciences, Chief Expert, Department of Scientific/methodological Support of Water Bodies Restoration and Protection, Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection Ural Branch, ul. Mira, 23, Ekaterinbirg, 620049, Russia; e-mail: wrm@wrm.ru

Leonid N. Stepanov, Researcher, Laboratory of ecology of fishes and aquatic biodiversity, Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch of the RAS, Ekaterinburg, ul. 8 Marta, 202, Ekaterinburg, 620144,; e-mail: stepanov@ipae.uran.ru

УДК 550.46; 543.3 *DOI: 10.35567/19994508-2024-1-89-99*

Геохимическая характеристика рек Приэльтонья

Ю.А. Зимина ✉, Т.А. Шипаева, А.С. Венецианский, Г.А. Срослова, О.В. Зорькина

✉ zimina.yuliya@volsu.ru

ФГАОУ ВО «Волгоградский государственный университет», г. Волгоград, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Изучение химического состава природных вод, которые используются в бальнеологических целях, является важной задачей. Кроме того, этот показатель определяет условия обитания живых организмов, обеспечивая устойчивость экологических систем, что особенно актуально при рассмотрении состояния малых рек. Важно иметь представление не только о качественном и количественном составах водных объектов, но и исследовать динамические процессы, приводящие к изменениям в природной среде. **Методы.** На основе гидрохимического анализа впервые изучены особенности водной миграции химических элементов и их соединений в уникальном природном комплексе России – бассейне рек Приэльтонья. Анализ проведен на примере малых рек Чернавки и Хары, впадающих в Эльтон – крупнейшее по площади минеральное озеро Европы. Химический состав вод определяли с помощью капиллярного электрофореза, гравиметрического и потенциометрического методов анализа. **Результаты.** В результате геохимических расчетов установлены ведущие ионы вод изученных рек, представлен анализ основных факторов, оказывающих влияние на миграционную активность ионов. Получены солевые профили, которые отражают особенности миграции основных ионов в направлении по течению рек, представлены ряды водной миграции. Проведен анализ факторов среды, влияющих на концентрирование и рассеяние ведущих ионов в реках, впадающих в оз. Эльтон.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: оз. Эльтон, р. Чернавка, р. Хара, миграция химических элементов, гидрохимический анализ, солевой профиль, факторы среды.

Для цитирования: Зимина Ю.А., Шипаева Т.А, Венецианский А.С., Срослова Г.А., Зорькина О.В. Геохимическая характеристика рек Приэльтонья // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 1. С. 89–99. DOI: 10.35567/19994508-2024-1-89-99.

Дата поступления 11.03.2022.

Geochemical characteristics of the rivers of the Elton region

Yuliya A. Zimina ✉, Tatyana A. Shipaeva, Aleksey S. Venetsianskiy, Galina A. Sroslova, Olga V. Zorkina

✉ zimina.yuliya@volsu.ru

Volgograd State University, Volgograd, Russia

ABSTRACT

Relevance. The study of the chemical composition of natural waters used for balneological purposes is a very important task. In addition, this indicator determines the living conditions of living organisms, ensuring the sustainability of ecological systems, which is especially important when considering the problems of small rivers. At the same time, it is important to have an idea

© Зимина Ю.А., Шипаева Т.А, Венецианский А.С., Срослова Г.А., Зорькина О.В., 2024

not only about the qualitative and quantitative composition of water bodies, but also to study the dynamic processes that lead to changes in the natural environment. **Methods.** Based on hydro/chemical analysis, the features of water migration of chemical elements and their compounds in the unique natural complex of Russia – the Elton river basin were studied for the first time. The analysis was carried out on the example of small rivers – Chernavka and Khara, flowing into Elton – the largest mineral lake in Europe in terms of area. The chemical composition of the waters was carried out using capillary electrophoresis, gravimetric and potentiometric methods of analysis. **Results.** As a result of geochemical calculations, the leading ions of the waters of the studied rivers were identified, and an analysis of the main factors that influence the migration activity of ions is presented. The chemical composition of the waters of the Chernavka and Khara rivers is presented in the form of Kurlov's formulas. Their salt profiles were obtained, which reflect the features of the migration of the main ions in the direction along the rivers, the series of water migration are presented. The analysis of environmental factors affecting the concentration and dispersion of leading ions in the rivers flowing into Lake Elton was carried out.

Keywords: Elton, Chernavka, Khara, migration of chemical elements, hydro/chemical analysis, salt profile, environmental factors.

For citation: Zimina Y.A., Shipayeva T.A, Venetsianskiy A.S., Sroslova G.A., Zorkina O.V. Geochemical characteristics of the rivers of the Elton region. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2024. No. 1. P. 89–99. DOI: 10.35567/19994508-2024-1-89-99.

Received 11.03.2022.

ВВЕДЕНИЕ

Под действием различных факторов осуществляется перераспределение химических элементов в биосфере. Особую роль в этих процессах играют реки, в которых происходит так называемая водная миграция химических элементов, что приводит к их рассеиванию или концентрированию. Природные воды контактируют с атмосферным воздухом, подстилающими породами, почвами, живыми организмами. В результате этого происходит постоянный обмен химическими компонентами между всеми системами.

В особых условиях отсутствия стока, аридного климата формируются водные объекты с повышенной минерализацией. Такие водоемы, благодаря особенностям своей физико-химической и биологической структуры, быстрее, чем пресноводные, реагируют на изменения внешних условий, что приводит к изменению химического состава, глубины, а, следовательно, условий обитания живых организмов и другим последствиям. Изучение геохимических свойств водных объектов, закономерностей накопления одних химических соединений и рассеивания других необходимо для сохранения устойчивости экосистем соленых озер и рек, а также для рационального использования ценных водных ресурсов, в частности, в бальнеологических целях [1, 2].

Миграция химических веществ в водной среде происходит под действием внешних и внутренних факторов. К внешним факторам относятся температура, давление, кислотно-основный и окислительно-восстановительный потенциалы. Большую роль играют внутренние факторы: это физико-химические свойства самих химических веществ, к которым относятся способность подвергаться гидролизу, гидратации, растворению, седиментации, сорбции и т. д. Миграция химических элементов в реках обусловливает химический состав

водоемов, в который они впадают, обеспечивая баланс минералов в сопряженных системах – горных породах, в составе живых организмов [3, 4].

Эльтон – самое крупное озеро Волгоградской области и самое большое по площади минеральное озеро Европы. Озеро и семь впадающих в него рек являются частью Прикаспийского бессточного бассейна [5, 6]. Данная водная система находится на пути миграции перелетных птиц и является местом остановки во время перелета журавлей, куликов и других пернатых [7, 8].

В 1910 г. на берегу озера основан лечебный санаторий «Эльтон». С 2001 г. озеро и прилегающие к нему полупустынные ландшафты являются частью природного парка «Эльтонский». Антропогенное воздействие в данной экосистеме определяется следующими основными видами хозяйственного использования территории: грязелечебница санатория «Эльтон» [9], выпас сельскохозяйственных животных, туризм. Таким образом, оз. Эльтон и система впадающих в него рек имеют высокую экологическую и рекреационную ценность, а изучение геохимических особенностей этих водных объектов является актуальной задачей.

Уникальность экосистемы соленого оз. Эльтон и впадающих в него рек привлекает внимание ученых с точки зрения экологического исследования флоры и фауны. Проводились также исследования гидрохимических и других показателей соленых вод озера и впадающих в него рек [10 – 12]. Однако для более полного понимания происходящих процессов целесообразно также рассмотреть водные объекты Приэльтонья с точки зрения геохимической концепции миграции химических элементов.

Цель данной работы – выявление закономерностей накопления и рассеивания химических элементов в бассейнах рек, впадающих в оз. Эльтон, а также анализ природных факторов, формирующих физико-химическую структуру вод. Для решения поставленных задач выбраны реки Чернавка и Хара, как наименее и наиболее протяженные: длина р. Чернавки составляет 5,2 км, р. Хары – 46,4 км [10].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для геохимического анализа миграции веществ в бассейнах рек Чернавки и Хары проводился гидрохимический анализ вод в среднем течении рек и в устье. Пробы воды отбирали в соответствии с ГОСТ 31861-2012.

Определение ионов кальция, магния, натрия, калия, хлора, сульфат- и гидрокарбонат-ионов проведено методом капиллярного электрофореза в соответствии с ГОСТ 31869-2012. Общую минерализацию вод определяли гравиметрическим методом в соответствии с ПНД Ф 14.1:2:4.261-10, водородный показатель – потенциометрическим методом в соответствии с ПНД Ф 14.1:2:3:4.121-97. Данные представили в различных единицах: пересчет мг/дм^3 в мг-экв/дм^3 дает возможность выразить содержание элементов и соединений в эквивалентной форме, т. е. в химически равноценных единицах, пропорционально которым они вступают в реакцию. Представление значений в эквивалентных процентах (%-экв) необходимо для расчета основных геохимических показателей (табл.1).

Характеристика солевого состава вод наглядно представлена в виде формулы М.Г. Курлова, где содержание ионов приводится в процент-эквивалентах (%-экв). В формулу Курлова заносятся индексы анионов (в числителе) и катионов (в знаменателе) с их процентным содержанием в воде в порядке убывания (%-экв). Перед дробью указывается общая минерализация вод в г/дм^3, после дроби – наиболее важные внешние факторы, в нашем случае это pH среды. Названия химического состава вод были сформулированы, исходя из данных, представленных в формулах Курлова при соблюдении следующего правила: в названии используются только катионы и анионы с долей более 25 %; сначала дается название анионного, затем катионного состава вод; анион и катион с наибольшим весом ставятся на последнее место.

Солевой профиль, графическое отображение изменения ионного состава речных вод по направлению их течения составлен по следующим правилам. На оси абсцисс обозначены виды природных вод: атмосферные осадки – речные воды выше по потоку – речные воды ниже по потоку. По оси ординат – содержания ионов, выраженные в мг-экв/дм^3.

Коэффициент интенсивности миграции по Перельману (1961 г.) – это отношение содержания элемента в воде к его содержанию в литосфере с учетом общей минерализации воды. Увеличение Кх показывает возрастание интенсивности выноса элемента из зоны выветривания. Расчет коэффициента интенсивности водной миграции для химических элементов (Ca, Mg, Na, Cl) проводили по известной формуле:

$$K_x = \frac{m_x \times 100}{n_x \times a},$$

где m_x – содержание элемента в воде, мг/дм^3;
n_x – кларк этого элемента в литосфере, %;
a – минерализация воды, мг/дм^3.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты гидрохимического анализа и расчетов представлены в табл. 1.

Формула Курлова для вод атмосферных осадков:

$$M_{0,031}\frac{SO_4^{2-}(51)\ HCO_3^-(31)\ Cl^-(18)}{Ca^{2+}(43)\ (Na^+ + K^+)\ (39)}\ \text{pH 7,0.}$$

Формула Курлова для р. Чернавки:

– для вод выше по потоку:

$$M_{25,3}\frac{Cl^-(84)\ SO_4^{2-}(15)\ HCO_3^-(1)}{(Na^+ + K^+)(81)\ Mg^{2+}(12)\ Ca^{2+}(7)}\ \text{pH 7,6;}$$

– для вод ниже по потоку:

$$M_{28,7}\frac{Cl^-(95)\ SO_4^{2-}(4)\ HCO_3^-(1)}{(Na^+ + K^+)(84)\ Mg^{2+}(10)\ Ca^{2+}(6)}\ \text{pH 7,7.}$$

Формула Курлова для р. Хары:

– для вод выше по потоку:

$$M_{15,3}\frac{Cl^{-}(61)\ SO_4^{2-}(37)\ HCO_3^{-}(2)}{(Na^{+}+K^{+})(78)\ Mg^{2+}(12)\ Ca^{2+}(10)}\ \text{pH 8,1;}$$

– для вод ниже по потоку:

$$M_{15,9}\frac{Cl^{-}(74)\ SO_4^{2-}(24)\ HCO_3^{-}(2)}{(Na^{+}+K^{+})(76)\ Mg^{2+}(14)\ Ca^{2+}(10)}\ \text{pH 7,3.}$$

Таблица 1. Результаты гидрохимического анализа природных вод
Table 1. Results of hydro/chemical analysis of natural waters

Воды	Единица измерения	Минерализация	Ca^{2+}	Mg^{2+}	$Na^{+}+K^{+}$	Сумма анионов	Cl^{-}	SO_4^{2-}	HCO_3^{-}	Сумма катионов	pH
Атмосферные осадки	мг/дм³	31,26	3,77	1,03	2,41	–	2,86	8,22	8,44	–	
	мг-экв/дм³	–	0,19	0,08	0,17	0,44	0,08	0,23	0,14	0,45	7,0
	%-экв	–	43	18	39	100 %	18	51	31	100%	
р. Чернавка											
Речные воды выше по потоку	мг/дм³	25300	800	770	6190	–	11540	2170	120	–	
	мг-экв/дм³	–	40	63	428	531	325	61	2,0	388	7,6
	%-экв	–	7	12	81	100 %	84	15	1	100%	
Речные воды ниже по потоку	мг/дм³	28750	960	890	9430	–	18110	850	230	–	
	мг-экв/дм³	–	48	73	652	773	511	24	4,0	539	7,7
	%-экв	–	6	10	84	100 %	95	4	1	100%	
р. Хара											
Речные воды выше по потоку	мг/дм³	15300	670	530	4030	–	6040	3700	340	–	
	мг-экв/дм³	–	33,5	44	278	355,5	170	104	6	280	8,1
	%-экв	–	10	12	78	100%	61	37	2	100%	
Речные воды ниже по потоку	мг/дм³	15950	730	660	4140	–	7630	2470	260	–	
	мг-экв/дм³	–	36,5	54	286	376,5	215	70	4	289	7,3
	%-экв	–	10	14	76	100 %	74	24	2	100%	

Содержание ионов натрия и калия в воде определялось совместно без разделения. Однако, известно, что содержание ионов калия по отношению к концентрации натрия в реках не превышает 10 %, поэтому при определении химического названия вод содержанием ионов калия можно пренебречь. Таким образом, химический состав вод р. Чернавки в среднем течении реки и ниже по потоку характеризуется как хлоридный натриевый. Химический состав р. Хары выше по потоку – сульфатно-хлоридный натриевый, ниже по потоку – хлоридный натриевый.

По данным гидрохимического анализа был построен солевой профиль рек Чернавки и Хары (рис. 1 и рис. 2). Результаты расчетов коэффициента интенсивности водной миграции для химических элементов (Ca, Mg, Na, Cl) представлены в табл. 2.

На основании расчетов коэффициентов водной миграции распределили химические элементы в ряды водной миграции в порядке убывания миграционной активности (табл. 3)

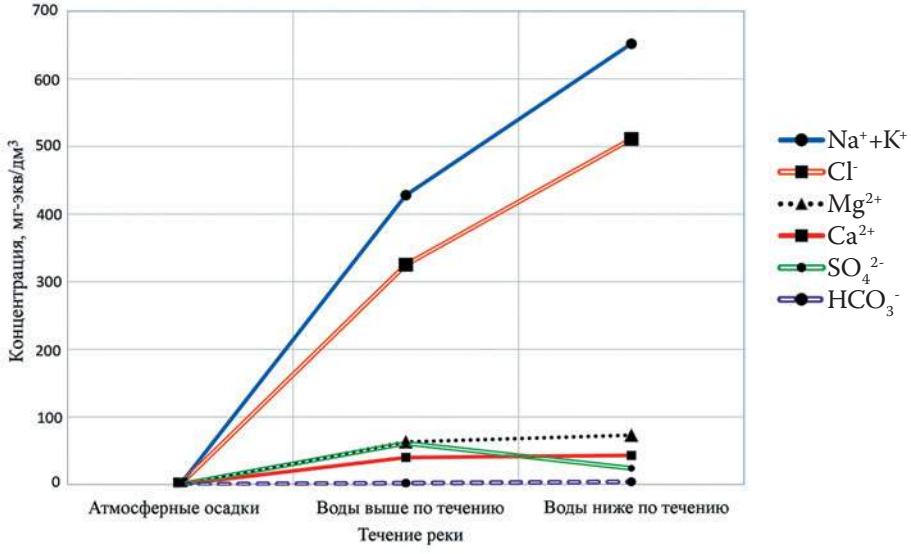


Рис. 1. Солевой профиль р. Чернавки.
Fig. 1. Salt profile of the Chernavka River.

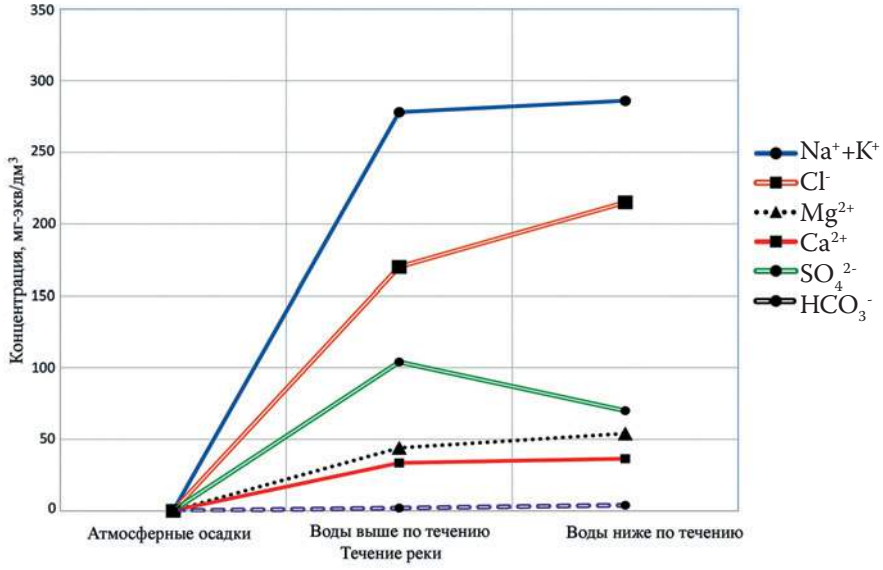


Рис. 2. Солевой профиль р. Хары.
Fig. 2. Salt profile of the Khara River.

Таблица 2. Интенсивность водной миграции элементов (K*x*)
Table 2. Intensity of water migration of elements (Kx)

Химический элемент	Ca	Mg	Na+K	Cl
р. Чернавка				
Речные воды выше по потоку	1,07	1,63	4,89	2683,10
Речные воды ниже по потоку	1,13	1,66	6,56	3705,37
р. Хара				
Речные воды выше по потоку	1,48	1,85	5,27	2322,18
Речные воды ниже по потоку	1,55	2,21	5,19	2813,94
Кларклитосферы, %	2,96	1,87	5,00	0,017

Таблица 3. Ряды водной миграции химических элементов
Table 3. Series of water migration of chemical elements

Миграционная активность элементов (Kx)	р. Чернавка		р. Хара	
	Речные воды выше по потоку	Речные воды ниже по потоку	Речные воды выше по потоку	Речные воды ниже по потоку
Очень сильная (n >10)	Cl	Cl	Cl	Cl
Сильная (n = 1–10)	Na+K	Na+K	Na+K	Na+K Mg
Средняя (n = 0,1–1)	Mg Ca	Mg Ca	Mg Ca	Ca
Слабая и очень слабая (0,01 – 0,1 и менее)	–	–	–	–

Геохимическая деятельность воды определяется суммой растворенных ионов в литре воды – общей минерализацией. Высокий уровень минерализации характерен для рек, протекающих в условиях засушливого, резко континентального климата, что соответствует природным условиям Приэльтонья. Существует несколько классификаций вод по степени минерализации. Одна из часто используемых в гидрологии предложена А.М. Овчинниковым: ультрапресные < 0,2 г/дм^3; пресные 0,2 –1,0 г/дм^3; солоноватые 1,0–3,0 г/дм^3; соленые 3,0–35,0 г/дм^3; рассолы > 35,0 г/дм^3. Согласно данной классификации, воды рек Чернавки и Хары относятся к группе соленых вод. Этот фактор понижает растворимость дренируемых пород. Растворяющая способность таких вод низкая, поэтому часть ионов, которые в пресных водах мигрируют в растворенном виде, здесь не может переходить в коллоидное состояние или выделяться в виде осадка.

Рассмотрим геохимическое поведение основных ионов, содержащихся в водах изучаемых рек, которое при условии низкой антропогенной нагрузки определяется преимущественно природными факторами и свойствами ионов.

Ионы натрия и хлора. Как следует из полученных данных, ведущими химическими элементами в водах рек Чернавка и Хара являются натрий и хлор. Данные элементы мигрируют в виде однозарядных ионов, образующихся в результате диссоциации солей, обладающих высокой растворимостью. Благодаря своим свойствам, хлор и натрий легко выщелачиваются из коры выве-

тривания и растворяются в сопряженных водных системах. Таким образом, повышенный коэффициент миграции хлора и натрия в реках обусловлен тем, что соединения этих элементов хорошо растворимы, не сорбируются, не усваиваются микроорганизмами, не окисляются и не восстанавливаются в природных водах. Эти элементы интенсивно концентрируются в водах оз. Эльтон.

Сульфат-ион. Более низкое содержание сульфат-ионов обусловлено меньшим присутствием этих ионов в подстилающих породах, невысокой растворимостью гипсов, являющихся основными источниками данных ионов. Сульфат-ионы используются микроорганизмами, населяющими Эльтон и впадающие в него реки, что также снижает их содержание в воде.

Гидрокарбонат-ион. Гидрокарбонатный и карбонатный ионы поступают в подземные и поверхностные воды при растворении с участием углекислого газа малорастворимых карбонатных минералов – кальцита и доломита, а также при гидролизе минералов кристаллических пород. Миграция гидрокарбонатного (и карбонатного) иона затруднена низкой растворимостью $CaCO_3$, а также биохимическими процессами, которые вносят вклад в выведение гидрокарбонат-ионов из миграционных потоков.

Кальций-ион. Ион кальция также поступает в воды при растворении кальцита, доломита, гипса, гидролитическом разложении полевых шпатов. Миграция кальция зависит от общей минерализации и содержания в водах других анионов. Сульфаты и карбонаты кальция малорастворимы и снижают миграцию кальция. Высокое содержание ионов хлора способствует увеличению миграции ионов кальция в связи с образованием растворимого $CaCl_2$. В нашем случае, несмотря на высокое содержание хлора, его недостаточно для повышения миграционной способности кальция. Кроме того, кальций-ион способен активно адсорбироваться на различных поверхностях, активно поглощается живыми организмами, т. к. является главным элементом живого вещества, что также уменьшает миграционную активность.

Магний-ион в подземные и поверхностные воды поступает при растворении доломитов, магнезитов и магниевых силикатов. Магний-ион характеризуется довольно слабой миграционной способностью и невысокой концентрацией в водах при хорошей растворимости его сульфатов и хлоридов. Основная причина – высокая сорбционная способность. Также магний способен активно участвовать в реакциях ионного обмена. Являясь катионом с небольшим ионным радиусом, он встраивается в кристаллические решетки других минералов (явление изоморфизма), при этом магний уходит из раствора. Например, так происходит доломитизация известняков. Кроме того, магний поглощают и усваивают растения, ведь он является важнейшим компонентом хлорофилла, а также участвует и в других обменных процессах.

Калий-ион. Калий распространен в природе также широко, как и натрий (их кларки равны 2,5 %). Соли калия – хлоридные, сульфатные и карбонатные имеют очень высокую растворимость. Однако миграция ионов калия в природных водах резко отличается от поведения натрия. Как выше было указано, концентрации калия в водах незначительны по сравнению с натрием. Калий

интенсивно потребляется и связывается живыми организмами, а также хорошо адсорбируется на поверхностях минералов и способен встраиваться в кристаллическую решетку различных глин.

Как следует из данных солевого профиля рек Хары и Чернавки (рис. 1 и рис. 2), в ходе водной миграции по направлению к устью рек происходит концентрирование основных ионов. Исключение составляют сульфат-ионы, что обусловлено, в первую очередь, увеличением общей минерализации. Это приводит к связыванию сульфат-ионов в нерастворимые соединения, которые выделяются в виде осадков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате геохимического анализа вод рек Хары и Чернавки установлено, что ведущими химическими элементами их состава являются ионы хлора и натрия, что определяется не только их концентрацией, но и повышенной миграционной способностью. Воды этих рек относятся к категории соленых вод.

Проанализирован характер геохимического поведения основных ионов. Исследования показали, что по течению рек, от истоков к устью, происходит концентрирование всех ионов, за исключением сульфат-ионов. Основные причины снижения миграционной способности сульфатов заключаются в уменьшении растворимости гипсов в условиях нарастающих концентраций ионов натрия и калия, а также вызваны способностью сульфат-ионов к биоаккумуляции микроорганизмами, которые присутствуют в водах изученных рек.

Геохимическая характеристика вод рек Хары и Чернавки представлена в наглядной форме в виде формул Курлова, солевых профилей, рассчитанных коэффициентов водной миграции. Определены ряды водной миграции, которые для изученных рек имеют вид: Cl>(Na+K) >Mg>Ca.

Представленные результаты могут быть основой для дальнейшего комплексного исследования экосистемы бассейна рек Приэльтонья, системного анализа взаимного влияния абиотических и биотических факторов среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sacco M., White N. E., Harrod C., Salazar G., Aguilar P., Cubillos C. F., Meredith K., Baxter B. K., Oren A., Anufriieva E., Shadrin N., Marambio-Alfaro Y., Bravo-Naranjo V., Allentoft M. E. Salt to conserve: a review on the ecology and preservation of hypersaline ecosystems. Biological reviews of the Cambridge Philosophical Society. 2021. Vol. 96. No. 6. 2828–2850. DOI: 10.1111/brv.12780. Режим доступа: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34053041/ (дата обращения 30.12.2023).
2. Ma H, Zhu G, Zhang Y, Sang L, Wan Q, Zhang Z, Xu Y, Qiu D. Ion migration process and influencing factors in inland river basin of arid area in China: a case study of the Shiyang River Basin. Environmental Science and Pollution Research. 2021. Vol. 28. P. 56305–56318. DOI:10.1007/s11356-021-14484-3. Режим доступа: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34053041/ (дата обращения 30.12.2023).
3. Lepokurova O. Chemical elements migration in water-travertin system (Tomsk region, Russia) / E3S Web Conference. 2019. Vol. 98. No. 8:07014. DOI: 10.1051/e3sconf/20199807014. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/344742782 (дата обращения 30.12.2023).
4. Myazina N. G., Savilova E. B. Hydrogeochemical characteristics of fresh waters in the springs of salt dome territories of the Cis-Urals region // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. Vol. 1010. No. 1: 012007. DOI: 10.1088/1755-1315/1010/1/012007. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/360046045/ (дата обращения 30.01.2023).

5. Моников С.Н., Судаков А.В. Историко-географическая уникальность озера Эльтон // Псковский регионологический журнал. 2011. № 12. С. 113–126.
6. Анисимов Л.А. Эльтон – недооцененный природный объект федерального значения // Недра Поволжья и Прикаспия. 2022. № 105. С. 43–48. DOI: 10.24412/1997-8316-2022-105-43-48.
7. Касаткина Ю.Н., Шубин А.О. Влияние кормовых ресурсов на поведение пролетных куликов-воробьев (Calidrisminuta) на озере Эльтон // Зоологический журнал. 2012. Т. 91. № 1. С. 95–110.
8. Рупасов С.В., Комарова Е.В., Дегтярева К.Е., Исайчев А.А., Мельников Н.А., Мельникова Т.А., Трусов Г.А. Материалы к орнитофауне окрестностей озера Эльтон в весенний период 2022 года // Русский орнитологический журнал. 2022. Т. 31. № 2213. С. 3387–3398. Режим доступа: https://readera.org/materialy-k-ornitofaune-okrestnostej-ozera-jelton-v-vesennij-period-2022-goda-140294340 (дата обращения 30.01.2023).
9. Калюжная И.Ю., Куринова А.Н., Сурганов В.И. Роль природных курортно-рекреационных факторов в лечебно-оздоровительной деятельности санатория // Естественные и технические науки. 2019. № 7(133). С. 94–101. DOI: 10.25633/ETN.2019.07.11.
10. Зинченко Т.Д., Головатюк Л.В., Горохова О.Г., Абросимова Э.В., Уманская М.В., Попченко Т.В., Шитиков В.К., Гусаков В.И., Болотов С.Э., Лазарева В.И., Селиванова Е.А., Балкин А.С., Плотников А.О. Функциональные особенности организации структуры планктонных и донных сообществ высокоминерализованных рек бассейна гипергалинного озера Эльтон (Россия) // Экосистемы: экология и динамика. 2021.Т. 5. № 1. С. 5–73. DOI: 10.24411/2542-2006-2021-10077.
11. Зинченко Т.Д., Розенберг Г.С. Опыт исследования малых рек в институте экологии Волжского бассейна РАН // Экология речных бассейнов: труды 10-й Международной научно-практической конференции / Владимир. 21 сентября 2021 г., С. 25–34.
12. Мязина Н.Г. Сопоставление гидрогеохимических особенностей озера Эльтон и Мертвого моря // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2013. № 1. С. 52–59.

REFERENCES

1. Sacco M., White N. E., Harrod C., Salazar G., Aguilar P., Cubillos C. F., Meredith K., Baxter B. K., Oren A., Anufriieva E., Shadrin N., Marambio-Alfaro Y., Bravo-Naranjo V., Allentoft M. E. Salt to conserve: a review on the ecology and preservation of hypersaline ecosystems. *Biological reviews of the Cambridge Philosophical Society*. 2021. Vol. 96. No 6. 2828-2850. doi: 10.1111/brv.12780. Access regime: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34053041/ (date 30.12.2023).
2. Ma H, Zhu G, Zhang Y, Sang L, Wan Q, Zhang Z, Xu Y, Qiu D. Ion migration process and influencing factors in inland river basin of arid area in China: a case study of Shiyang River Basin. *Environmental Science and Pollution Research*. 2021.Vol.28. P. 56305-56318. DOI: 10.1007/s11356-021-14484-3. [accessed January 2023]. Available from: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34053041/.
3. Lepokurova O. Chemical elements migration in water-travertin system (Tomsk region, Russia). *E3S Web Conference*. 2019. Vol. 98. No 8. 07014. DOI: 10.1051/e3sconf/20199807014 [accessed January 2023]. Available from: https://www.researchgate.net/publication/344742782.
4. Myazina N. G., Savilova E. B. Hydrogeochemical characteristics of fresh waters in the springs of salt dome territories of the Cis-Urals region. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* 2022. Vol. 1010. No 1. 012007. DOI: 10.1088/1755-1315/1010/1/012007 [accessed January 2023]. Available from: https://www.researchgate.net/publication/360046045/.
5. Monikov S. N., Sudakov A. V. Historical and geographical uniqueness of Lake Elton. *Pskov journal of regional studies*. 2011. No 12. P. 113–126 (In Russ.).
6. Anisimov L. A. Elton - an underestimated natural object of federal importance. *Subsoil of the Volga and Caspian regions*. 2022. No. 105. P. 43–48. DOI: 10.24412/1997-8316-2022-105-43-48 (In Russ.).
7. Kasatkina Yu. N., Shubin A. O. Influence of Food Resources on the Behavior of Migrating Sandpipers (*Calidrisminuta)* on the Lake Elton. *Zoological journal*. 2012. Vol. 91. No 1. P. 95–110 (In Russ.).
8. Rupasov S. V., Komarova E. V., Degtyareva K. E., Isajchev A. A., Mel'nikov N. A., Mel'nikova T. A., Trusov G. A. Materials on the avifauna of the vicinity of Lake Elton in the spring of 2022. *Russian Ornithological Journal*. 2022. Vol. 31. No 2213. P. 3387–3398. [accessed January 2023]. Available from: https://readera.org/materialy-k-ornitofaune-okrestnostej-ozera-jelton-v-vesennij-period-2022-goda-140294340 (In Russ.).

9. Kalyuzhnaya I. Y., Kurinova A. N., Surganov V. I. The role of natural health resort and recreational factors in the medical and health-improving activities of the sanatorium. *Natural and technical sciences*. 2019. No. 7(133). P. 94–101. DOI: 10.25633/ETN.2019.07.11 (In Russ.).
10. Zinchenko T. D., Golovatyuk L. V., Gorokhova O. G., Abrosimova E. V., Umanskaya M. V., Popchenko T. V., Shitikov V. K., Gusakov V. I., Bolotov S. E., Lazareva V. I., Selivanova E. A., Balkin A. S., Plotnikov A. O. Functional features of the organization of the structure of plankton and bottom communities of highly mineralized rivers in the basin of the hypersaline Lake Elton (Russia). Ekosistemy: ekologiya i dinamika [*Ecosystems: ecology and dynamics*]. 2021. Vol. 5. No. 1. P. 5–73. doi: 10.24411/2542-2006-2021-10077 (In Russ.).
11. Zinchenko T. D., Rozenberg G. S. Experience in the study of small rivers at the Institute of Ecology of the Volga Basin of the Russian Academy of Sciences. *Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference Ecology of River Basins*. Vladimir. September 21. 2021. P. 25–34 (In Russ.).
12. Myazina N.G. Comparison of hydro/geochemical features of the Lake Elton and the Dead Sea. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2013. No. 1. P. 52–59 (In Russ.).

Сведения об авторах:

Зимина Юлия Александровна, канд. хим. наук, доцент кафедры биологии и биоинформатики, ФГАОУ ВО «Волгоградский государственный университет», Россия, 400062, г. Волгоград, пр. Университетский, 100; ORCID: 0000-0002-1017-531x; e-mail: zimina.yuliya@volsu.ru

Шипаева Татьяна Александровна, канд. хим. наук, доцент кафедры биологии и биоинформатики, ФГАОУ ВО «Волгоградский государственный университет», 400062, г. Волгоград, пр. Университетский, 100; ORCID: 0000-0002-3983-8519; e-mail: shipaevat@volsu.ru

Венецианский Алексей Сергеевич, канд. с.-х. наук, доцент кафедры биологии и биоинформатики, ФГАОУ ВО «Волгоградский государственный университет», 400062, г. Волгоград, проспект Университетский, 100; ORCID: 0000-0002-3676-100x; e-mail: venetsianskii@volsu.ru

Срослова Галина Алексеевна, канд. биол. наук, доцент кафедры биологии и биоинформатики, ФГАОУ ВО «Волгоградский государственный университет», 400062, г. Волгоград, пр. Университетский, 100; ORCID: 0000-0002-9118-7098; e-mail: sroslova.galina@volsu.ru

Зорькина Ольга Владимировна, канд. техн. наук, заведующий кафедрой биологии и биоинженерии, ФГАОУ ВО «Волгоградский государственный университет», 400062, г. Волгоград, пр. Университетский, 100; ORCID: 0000-0003-3179-140x; e-mail: ov.zorkina@volsu.ru

About the author:

Yuliya A. Zimina, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the Department of Biology and Bioengineering, Volgograd State University. pr. Universitetskiy, 100, Volgograd, 400062, Russia; ORCID: 0000-0002-1017-531x; e-mail: zimina.yuliya@volsu.ru

Tatyana A. Shipaeva, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the Department of Biology and Bioengineering, Volgograd State University. pr. Universitetskiy, 100, Volgograd, 400062, Russia; ORCID: 0000-0002-3983-8519; e-mail: shipaevat@volsu.ru

Aleksey S. Venetsianskiy, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor of the Department of Biology and Bioengineering, Volgograd State University. pr. Universitetskiy, 100, Volgograd, 400062, Russia; 100, ORCID: 0000-0002-3676-100x; e-mail: venetsianskii@volsu.ru

Galina A. Sroslova, Candidate of Biological Sciences, Associate Professor of the Department of Biology and Bioengineering, Volgograd State University. pr. Universitetskiy, 100, Volgograd, 400062, Russia; ORCID: 0000-0002-9118-7098; e-mail: sroslova.galina@volsu.ru

Olga V. Zorkina, Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Biology and Bioengineering, Volgograd State University. pr. Universitetskiy, 100, Volgograd, 400062, Russia; ORCID: 0000-0003-3179-140x; e-mail: ov.zorkina@volsu.ru

УДК 628.168.3;628.147.22 *DOI: 10.35567/19994508-2024-1-100-108*

Защита водных объектов от продуктов коррозии и минеральных отложений: выбор оптимальных ингибиторов

А.А. Протазанов ✉, **Б.Н. Дрикер**, **Н.Н. Стягов**

✉ protazanov.a@yandex.ru

ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», г. Екатеринбург, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Предприятия химической, металлургической, нефтяной промышленности, энергетики потребляют значительные объемы воды. Сократить затраты помогает организация замкнутых и бессточных систем водоснабжения. Однако эффективность эксплуатации таких систем снижается из-за минеральных отложений и коррозии. В отечественной и зарубежной практике широко применяются технологии обработки, используемой в качестве хладоагента, теплоносителя или гидротранспорта воды реагентами, препятствующими образованию минеральных отложений и коррозии металла. К числу используемых реагентов относятся органофосфонаты и их комплексонаты. В настоящее время жесткие требования к содержанию ингибиторов в сбрасываемых сточных водах требуют создания реагентов, обладающих наибольшей эффективностью ингибирования солеотложений и коррозии при минимальных концентрациях, а также не содержащих тяжелых металлов и обладающих низкой токсичностью. **Методы.** В качестве объекта исследований использованы органофосфонаты, а также их композиционные составы, содержащие цинковые и магниевые комплексонаты. **Результаты.** Установлено, обосновано и экспериментально подтверждено, что органофосфонаты и их композиционные составы, содержащие магниевые комплексонаты, являются эффективными ингибиторами коррозии и солеотложений в диапазоне температур 70–90 °С в воде высокой минерализации.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: водные объекты, ингибирование солеотложений и коррозии, органофосфонаты, оборотное водоснабжение, коррозия.

Для цитирования: Протазанов А.А., Дрикер Б.Н., Стягов Н.Н. Защита водных объектов от продуктов коррозии и минеральных отложений: выбор оптимальных ингибиторов // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 1. С. 100–108. DOI: 10.35567/19994508-2024-1-100-108.

Дата поступления 04.12.2023.

Protection of water bodies from corrosion products and mineral deposits: selection of optimal inhibitors

Afanasiy A. Protazanov ✉, **Boris N. Driker**, **Nikolay N. Styagov**

✉ protazanov.a@yandex.ru

Ural State Forest Engineering University, Yekaterinburg, Russia

ABSTRACT

Relevance. Enterprises in the chemical, metallurgical, petroleum and energy industries consume great amounts of water. Organizing of closed and drainless water supply systems

© Протазанов А.А., Дрикер Б.Н., Стягов Н.Н., 2024

enables to diminish expenses. However, the operation of such systems shows that their efficiency is reduced due to mineral deposits and corrosion. One of the methods that solves the problem and is used in domestic and foreign practice is the treatment of water used as a refrigerant, coolant or hydraulic transport, with reagents that prevent formation of mineral deposits and metal. These reagents include organic phosphonates (OPs) and their complexons. Nowadays stringent requirements for the inhibitors' content in discharged wastewater require reagents that provide the greatest efficiency in inhibiting scale deposits and storage at minimum concentrations, and also do not contain active metals (Cu, Zn) and have low toxicity. **Methods**. We used organic phosphates and their composition compounds containing zinc and magnesium complexonates as an object of investigations. **Results.** We have established, substantiated and experimentally affirmed that magnesium complexonates NTPA and DPP are effective inhibitors of corrosion and scale deposits, in the 70-90 °C temperature range in model water of high mineralization.

Keywords: water bodies, inhibition of scale and corrosion, organophosphonates, recycled water supply, corrosion.

Forcitation: Protazanov A.A., Driker B.N., Styagov N.N. Protection of water bodies from corrosion products and mineral deposits: selection of optimal inhibitors. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2024. No. 1. P. 100–108. DOI: 10.35567/19994508-2024-1-100-108.

Received 04.12.2023.

ВВЕДЕНИЕ

Образование минеральных отложений и коррозия конструкционных сталей в технологических процессах, связанных с использованием воды в качестве хладагента, теплоносителя, гидротранспорта является серьезной проблемой уже более сотни лет и не теряет своей актуальности и в настоящее время [1–3].

Внедрение ресурсосберегающих технологий, создание замкнутых и бессточных систем водоснабжения усугубляет проблемы минеральных отложений и коррозии при использовании современного технологического оборудования. Об актуальности этих вопросов свидетельствуют данные, согласно которым отложения толщиной 1–2 мм приводят к перерасходу топлива на 10–13 %, вследствие коррозионного износа теряется до 25 % ежегодно производимой конструкционной стали. Для предотвращения минеральных отложений применяются химические реагенты, в число которых входят неорганические фосфаты и полифосфаты, низкомолекулярные полимеры, органические фосфонаты (ОФ) [4–12].

Наиболее успешным, с практической точки зрения, является использование для обработки водных систем органических фосфонатов. Это стало возможным благодаря работам по их синтезу, выполненным в СССР под руководством академика М.И. Кабачника. Уникальная способность органических фосфонатов ингибировать минеральные отложения различного химического состава и их малый (субстехиометрический) расход (1–5 мг/л), в зависимости от химического состава и строения, обеспечивали их широкое внедрение в различных отраслях промышленности. По существу, с большими или меньшими эксплуатационными затратами проблема минеральных отложений была решена к концу 1990-х годов. Однако остались вопросы, связанные с коррозионным износом. В значительной степени это связано с тем, что из-за отсутствия отложений поверхность металла становилась легкодоступной как для

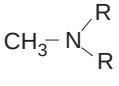
электрохимической, так и кислородной коррозии. Также, как и ингибирование образования отложений, проблемы коррозии решаются с использованием химических реагентов – хроматов, силикатов, органических аминосодержащих соединений и др.[1,2] [13, 14]. Их широкое применение ограничивается расходом, высокой стоимостью, вредным воздействием на окружающую среду.

Эффективную борьбу с коррозией обеспечивает использование органических фосфонатов в композиции с их комплексонатами, в частности, цинком [15–17]. Это позволяет предотвращать коррозию при одновременном ингибировании образования минеральных отложений. Однако использование подобных композиционных составов ограничивается, в первую очередь, их расходом (на порядок большим, чем применяется для предотвращения отложений – 10–100 мг/л обрабатываемой воды). Как следствие – увеличение стоимости, невозможность применения в системах отопления и горячего водоснабжения. В системах охлаждения не исключается возможность попадания воды в водоемы культурно-бытового (ПДК по цинку 1,0 мг/л) и рыбохозяйственного назначений (ПДК по цинку 0,01 мг/л).

Целью данной работы является исследование цинковых и магниевых комплексонатов для одновременного ингибирования солеотложений и коррозии.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

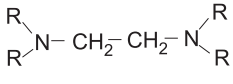
В качестве объектов исследования использовали органофосфонаты, а также их композиционные составы, содержащие цинковые и магниевые комплексонаты, отличающиеся количеством функциональных групп в молекуле реагента и длиной углеводородного радикала, соединяющего аминометиленфосфоновые группы:



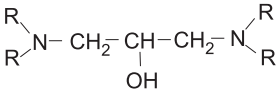
– метилиминодиметиленфосфоновая кислота (МИДФ),



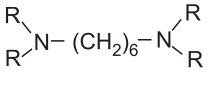
– нитрилотриметиленфосфоновая кислота (НТФ),



– этилендиаминтетраметиленфосфоновая кислота (ЭДТФ),



– 2-оксидиаминопропантетраметиленфосфоновая кислота (ДПФ),



– гексаметилендиаминтетраметиленфосфоновая кислота (ГМДТФ)

где R – $CH_2PO_3H_2$.

[1] Pat. 2005244315 USA, МКИ B 01D 011-02. Apparatus for dispensing a solid chemical block for water treatment / M.D. Greaves, B.D. Bedford et al. Заявл. 30.04.2004; Опубл. 03.11.2005; C.A. 2005. V. 143. 410584.

[2] Pat. 2019217496 USA МКИ C09K 8/54 2006.1 C23F 14.11.2006.1. Corrosion inhibitor blends / Hughes T.L. at al. Заявл. 08.05.2019; Опубл. 14.11.2019.

В качестве модельного раствора использовали воду высокой минерализации, мг/л: $CaCl_2$ – 1460; $MgSO_4$ – 2130; NaCl – 2030; $NaHCO_3$ _ 1200 (ионная сила μ = 0,19889 моль/л). Данный состав воды характерен для технологических систем в нефтяной и химической промышленности.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Предположительно поиск ингибиторов возможен и в случае увеличения количества функциональных групп и длины углеводородного радикала. В рамках проведенной работы изучена возможность использования ДПФ как ингибитора солеотложений. ДПФ является одним из наиболее перспективных реагентов, поскольку содержит в своем составе четыре функциональных группы $CH_2PO_3H_2$, разделенные тремя углеродными атомами. Сравнительный анализ эффективности ДПФ как ингибитора солеотложений проведен в динамических условиях. В качестве модельного раствора использовали пересыщенный раствор сульфата кальция. Сульфат кальция является традиционно используемой моделью, для которой характерны стабильные значения и воспроизводимость параметров зародышеобразования при кристаллизации.

Результаты сравнивали с реагентами, отличающимися количеством функциональных групп, длиной углеводородных радикалов. Обработку полученных экспериментальных данных проводили по уравнениям Гиббса-Фольмера $\beta = A \exp\left[-\frac{16\pi \cdot \sigma^3 \cdot м^2}{3R^3 \cdot T^3 \cdot \rho^2 \cdot \ln^2 \cdot S}\right]$, Оствальда-Фрейндлиха $r = \frac{2\sigma \cdot м}{R \cdot T \cdot \ln \cdot S}$, Христиансена-Нильсена $\beta = k \cdot \Delta C^n$, где σ – удельная поверхностная энергия, мДж/м^2, r – радиус критического зародыша, n – порядок реакции зародышеобразования, M – молекулярная масса кристаллизующейся соли, R – универсальная газовая постоянная Дж/моль*к, T – температура, K, ρ – плотность соли, г/см^3, S – относительное пересыщение, равное отношению начальной концентрации к равновесной, $\Delta C = C_{исх} - C_р$, n – порядок реакции, k – константа скорости.

По графику зависимости $\ln t_{инд} - 1/\ln^2 S$ рассчитаны значения σ и n, а по значению σ радиус критического зародыша – r. Значения параметров, представлены на рис. 1 и рис. 2.

На рис. 2 отражены рассчитанные значения параметров зародышеобразования (σ, n, d) для исследуемых реагентов. Из данных, представленных на рис. 2, следует, что с увеличением количества функциональных групп в молекуле реагента (МИДФ-НТФ-ЭДТФ) и длины углеводородного радикала, соединяющего аминодиметиленфосфоновые группы (ЭДТФ-ДПФ-ГМДТФ), растут кинетические параметры зародышеобразования и, соответственно, снижается расход реагента.

Обработка экспериментальных данных показала перспективность использования ГМДТФ и ДПФ для ингибирования солеотложений по сравнению с другими комплексонами. Однако для производства ГМДТФ используют в качестве исходного сырья гексаметилендиамин, по цене данный компонент не может конкурировать с другими отечественными ингибиторами, полученными на основе хлористого аммония и, особенно, из отходов производства полиаминов, применяющихся для получения НТФ и ОЭДФ.

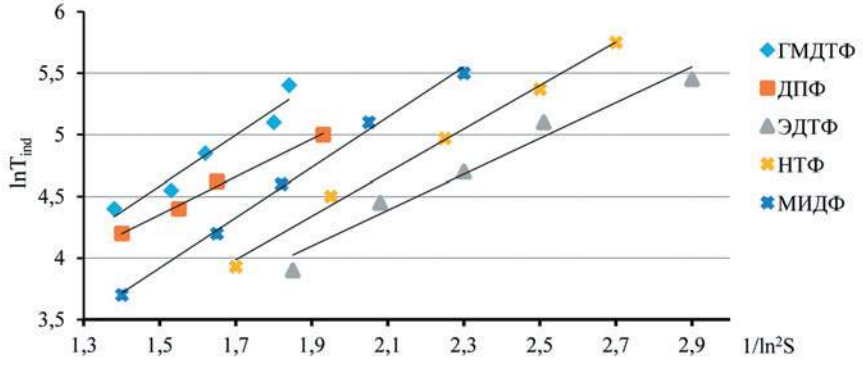


Рис. 1. Зависимость продолжительности индукционного периода от пересыщения.
Fig. 1. Dependence of the induction period duration on supersaturation.

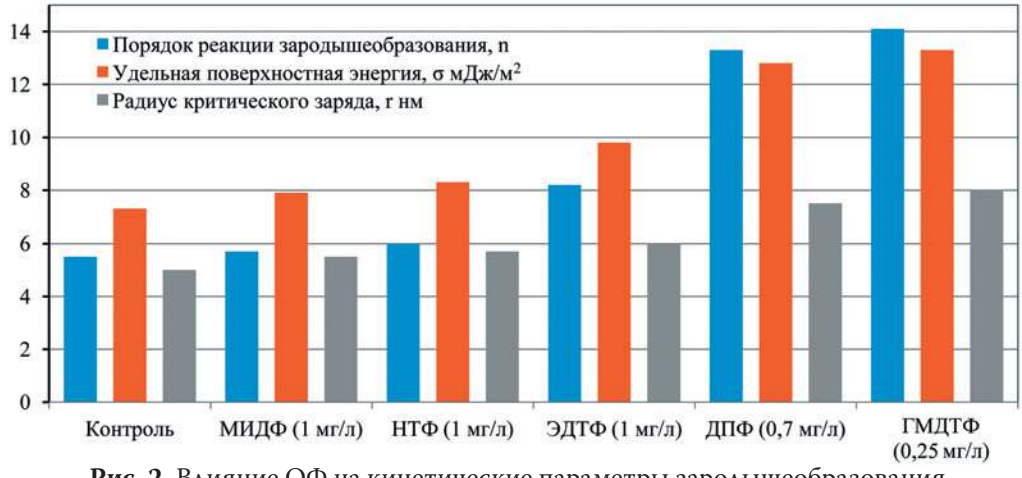


Рис. 2. Влияние ОФ на кинетические параметры зародышеобразования.
Fig. 2. The effect of OP on the nucleation kinetic parameters.

В случае использования ДПФ в качестве ингибитора солеотложений возможно его применение в виде магниевых комплексонатов для ингибирования и коррозии. Выбор адденда магния обусловлен тем, что он менее агрессивен по отношению к окружающей среде, а произведение растворимости (ПР) его гидроксида близко к ПР гидроксида цинка ($ПР_{Zn(OH)_2} = 1{,}4 \cdot 10^{-17}$, $ПР_{Mg(OH)_2} = 7{,}1 \cdot 10^{-12}$). Исследования проводили на установке, представленной в [18]. В ходе испытаний контролировали скорость коррозии методом измерения поляризационного сопротивления воды на приборе «Эксперт-004» [19].

В качестве примера на рис. 3 и рис. 4 представлены результаты ингибирования коррозии магниевыми и цинковыми комплексонатами в воде высокой минерализации.

На основе представленных на рис. 3 данных можно сделать вывод, что в изученном диапазоне температур, защитный эффект магниевого комплексоната НТФ выглядит предпочтительнее остальных комплексонатов органических фосфонатов при концентрации 30 мг/л. Дополнительно проведены исследования с концентрацией реагентов 50 мг/л. В изученном диапазоне температур

увеличивалась величина защитного эффекта (рис. 4). Замена ДПФ на НТФ и ОЭДФ в диапазоне концентраций 30–50 мг/л несущественно сказывается на эффективности реагентов, что позволяет рассмотреть возможность использования данных комплексонатов в качестве ингибиторов многоцелевого назначения. По своей эффективности магниевые комплексонаты не уступают цинковым. Снижение величины коррозии, в присутствии композиций на основе комплексонатов, может быть связано с образованием защитной пленки на металлической поверхности.

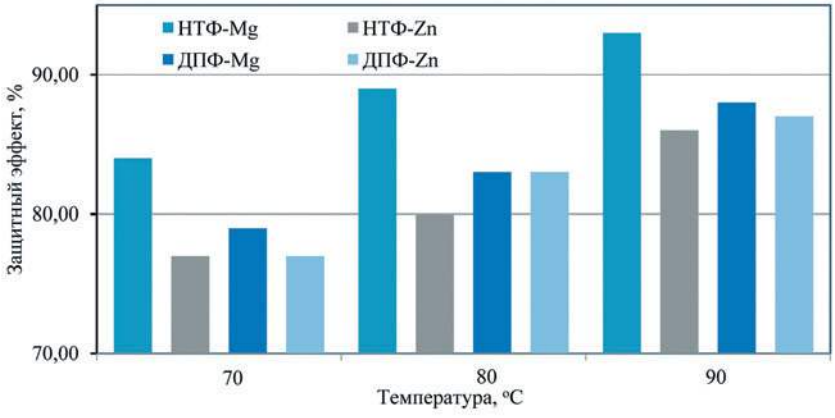


Рис. 3. Ингибирование коррозии при концентрации реагентов 30 мг/л.
Fig. 3. Corrosion inhibition at a reagent concentration of 30 mg/l.

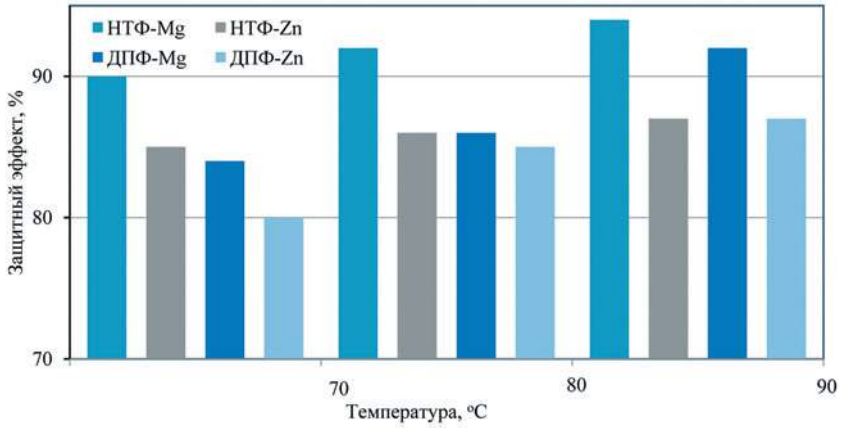


Рис. 4. Ингибирование коррозии при концентрации реагентов 50 мг/л.
Fig. 4. Corrosion inhibition at a reagent concentration of 50 mg/l.

ВЫВОДЫ

На основании результатов испытаний установлено, что реагент ДПФ демонстрирует хорошие потребительские свойства в качестве ингибитора солеотложений по сравнению с аналогичными отечественными ингибиторами. Его механизм действия заключается в адсорбции на микрозародышах кристаллизующихся солей, что приводит к прекращению их роста. В перспективе

возможно сокращение расхода органических фосфонатов за счет одновременного ингибирования солеотложений и коррозии.

Высокая эффективность ингибирования магниевого комплекса нитрилотриметиленфосфоновой кислоты делает его перспективным для применения не только в чистых оборотных циклах водоснабжения, но и в «грязных» циклах металлургических предприятий и предприятий нефтяной промышленности, для которых характерно высокое содержание солей, наличие примесей в виде взвесей и повышенное содержание различных форм железа. Продукты коррозии наносят непоправимый вред водной флоре и фауне, а также угрожают здоровью человека. В данном контексте предотвращение и минимизация их влияния на водные объекты становится необходимым условием для обеспечения устойчивого развития и сохранения природных ресурсов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балабан-Ирменин Ю.В., Липовских В.М., Рубашов А.М. Защита от внутренней коррозии трубопроводов водяных тепловых сетей. М.: Энергоатомиздат, 1999. 248 с.
2. Гарифуллин Ф.С., Габдуллин Р.Ф. Изучение условий образования и зон отложения комплексных осадков в добывающих скважинах // Разработка и эксплуатация нефтяных месторождений: сб. науч. тр. Уфа: Изд-во УГНТУ, 1999. С. 33–38.
3. Дрикер Б.Н., Тарасова С.А., Тарантаев А.Г. Ингибиторы многоцелевого назначения для систем оборотного водоснабжения // Экология и промышленность. 2012. № 3(32). С. 48–55.
4. Дятлова Н.М., Темкина В.Я., Попов К.И. Комплексоны и комплексонаты металлов. Химия. 1988. 544 с.
5. Кабачник М.И., Медведь Т.Я., Дятлова Н.М., Рудомино М.В. Фосфорорганические комплексоны // Успехи химии. 1974. Т. 43. Вып. 9. С. 1554–1574.
6. Рудомино М.В., Кабачник М.И., Дятлова Н.М. О некоторых особенностях комплексообразования фосфорорганических комплексонов // ДАН СССР. 1965. Т. 161. С. 607–610.
7. Рудомино М.В., Кабачник М.И., Дятлова Н.М. Фосфорорганические комплексоны // Успехи химии. 1968. Т. 37. С. 1161–1215.
8. Рудакова Г.Я., Ларченко В.Е., Цирульникова Н.В. Теория и практика применения комплексонов в энергетике // Современные технологии водоподготовки и защиты оборудования от коррозии и накипеобразования: тезисы конф. М.: ИРЕА, 2003. С. 11–19.
9. Cui C., Zhang S. Synthesis, scale inhibition and dispersion performance evaluation of the environmentally benign additive IA–AMPS–APEG copolymer. Environmental Science: Water Research Technologies. 2019. No. 5 (10). P. 1736–1747.
10. Ji Y., Chen Y., Le J., Qian M., Huan Y., Yang W., Yin X., Liu Y., Wang X., Chen Y. Highly effective scale inhibition performance of aminotrimethylenephosphonic acid on calcium carbonate // Desalination. 2017. No. 422. P. 165–173.
11. Kumar T., Vishwanatham S., Kundu S.S. A laboratory study on pteroyl-l-glutamic acid as a scale prevention inhibitor of calcium carbonate in aqueous solution of synthetic produced water // Journal of Petroleum Science Engineering. 2010. No. 71 (1–2). P. 1–7.
12. Liu D., Dong W., Li F., Hui F., Lédion J. Comparative performance of polyepoxysuccinic acid and polyaspartic acid on scaling inhibition by static and rapid controlled precipitation methods // Desalination. 2012. No. 304. P. 1–10.
13. Нудель В.С. Современное решение проблем коррозии на предприятиях металлургической отрасли // Черная металлургия. 2008. № 7(1303). С. 42–45.
14. Чугунов Д.О. Чиркунов А.А., Кузнецов Ю.И. Пассивация низкоуглеродистой стали с предварительной модификацией ее поверхности цинковым комплексом аминотриметиленфосфоновой кислоты // Успехи в химии и химической технологии. 2018. Т. 32. № 13 (209). С. 93–95.
15. Кузнецов Ю.И., Чиркунов А.А., Филиппов И.А. О влиянии модификации поверхности стали оксиэтилидендифосфонатом цинка на пассивацию ее растворами некоторых ингибиторов // Электрохимия. 2013. Т. 49. № 12. С. 1235–1242.

16. Линников О.Д., Дрикер Б.Н., Тарантаев А.Г., Мурашова А.И. Изучение возможности использования реагента КИСК-1 в качестве ингибитора коррозии и солеотложений // Практика противокоррозионной защиты. 2015. № 1(75). С. 45–50.
17. 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.
18. Дрикер Б.Н., Протазанов А.А., Цирульникова Н.В. Ингибитор многоцелевого назначения для систем водопотребления // Энергосбережение и водоподготовка. 2020. № 6. С. 13–17.
19. Ануфриев Н.Г., Комарова Е.Е., Смирнова Н.Е. Универсальный коррозиметр для научных исследований и производственного контроля коррозии металлов и покрытий // Коррозия: материалы, защита. 2004. № 1. С. 42–47.

REFERENCES

1. Balaban-Irmenin Y.V., Lipovskikh V.M., Rubashov A.M. Protection from internal corrosion of pipelines of water heating networks. M.: Energoatomizdat. 1999. 248 p. (In Russ.).
2. Garifullin F.S. Study of conditions of formation and zones of deposition of complex sediments in producing wells. F.S. Garifullin, R.F. Gabdullin. Development and exploitation of oil fields: Collection of scientific tr. Ufa: Publishing house of USNTU. 1999. Pp. 33–38 (In Russ.).
3. Driker B.N. Multi-purpose inhibitors for recycling water supply systems. B. N. Driker, S. A. Tarasova, A. G. Tarantaev. *Ecology and industry*. 2012. № 3(32). Pp. 48–55 (In Russ.).
4. Dyatlova N.M., Temkina V.Y., Popov K.I. Metal complexes and complexonates. *Chemistry*. 1988. 544 p. (In Russ.).
5. Kabachnik M.I., Medved T.Y., Dyatlova N.M., Rudomino M.V. Organophosphorus complexes. *Successes of chemistry*. 1974. Vol. 43. Iss. 9. Pp. 1554–1574 (In Russ.).
6. Rudomino M.V., Kabachnik M.I., Dyatlova N.M. On some features of the complexation of organophosphate complexes. DAN USSR. 1965. Vol. 161. Pp. 607–610 (In Russ.).
7. Rudomino M.V., Kabachnik M.I., Dyatlova N.M. Organophosphate complexes. *Successes of chemistry*. 1968. Vol. 37. Pp. 1161–1215 (In Russ.).
8. Rudakova G.Ya., Larchenko V.E., Tsirulnikova N.V. Theory and practice of the complexones application in power industry. *Modern technologies of water treatment and protection of equipment from corrosion and scale formation*. M.: IREA. 2003. Pp. 11–19 (In Russ.).
9. Cui C., Zhang S. Synthesis, scale inhibition and dispersion performance evaluation of the environmentally benign additive IA–AMPS–APEG copolymer. *Environment Sciences: Water Researches Technologies*. 5 (10) (2019), pp. 1736-1747.
10. Ji Y., Chen Y., Le J., Qian M., Huan Y., Yang W., Yin X., Liu Y., Wang X., Chen Y. Highly effective scale inhibition performance of aminotrimethylenephosphonic acid on calcium carbonate. *Desalination.* 422 (2017). Pp. 165–173.
11. Kumar T., Vishwanatham S., Kundu S.S. A laboratory study on pteroyl-l-glutamic acid as a scale prevention inhibitor of calcium carbonate in aqueous solution of synthetic produced water. *Journal of Petroleum Science Engineering*. 71 (1-2) (2010). Pp. 1–7.
12. Liu D., Dong W., Li F., Hui F., Lédion J. Comparative performance of polyepoxysuccinic acid and polyaspartic acid on scaling inhibition by static and rapid controlled precipitation methods. *Desalination*. 304 (2012). Pp. 1–10.
13. Weeks V.S. Modern solution of corrosion problems at the enterprises of the metallurgical industry. Ferrous metallurgy. *Bulletin of scientific, technical and economic information*. 2008. № 7(1303). Pp. 42–45 (In Russ.).
14. Chugunov D.O. Passivation of low-carbon steel with a preliminary modification of its surface with a zinc complex of aminotrimethylene phosphonic acid / D. O. Chugunov, A.A. Chirkunov, Yu.I. Kuznetsov. *Advances in chemistry and chemical technology*. 2018. Vol. 32. № 13 (209). Pp. 93–95 (In Russ.).
15. Kuznetsov Y.I., Chirkunov A.A., Filippov I.A. On the effect of modification of the surface of zinc oxy-ethylidene diphosphonate steel on its passivation with solutions of some inhibitors. *Electrochemistry*. 2013. Vol. 49. No. 12. Pp. 1235–1242 (In Russ.).

16. Linnikov O.D. Studying the possibility of using the KISK-1 reagent as an inhibitor of corrosion and salt deposits / O.D. Linnikov, B.N. Driker, A.G. Tarantaev, A.I. Murashova. *Practice of anticorrosive protection*. 2015. № 1(75). Pp. 45–50 (In Russ.).
17. 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.
18. Driker B.N., Protazanov A.A., Tsirulnikova N.V. Multi-purpose inhibitor for water consumption systems. *Energy saving and water treatment*. 2020. No. 6. Pp. 13–17 (In Russ.).
19. Anufriev N.G., Komarova E.E., Smirnova N.E. Universal corrosion meter for scientific researches and industrial controls of metal/coating corrosion. *Corrosion: materials, protection.* 2004. No. 1. P. 42–47 (In Russ.).

Сведения об авторах:

Протазанов Афанасий Андреевич, аспирант, Уральский государственный лесотехнический университет, 620100, Россия, г. Екатеринбург, Сибирский тракт, 37; ORCID: 0000-0002-6773-9550; e-mail: protazanov.a@yandex.ru

Дрикер Борис Нутович, д-р техн. наук, профессор, кафедра физико-химической технологии защиты биосферы, Уральский государственный лесотехнический университет, Россия, г. Екатеринбург, Сибирский тракт, 37; ORCID: 0000-0001-5791-9024; e-mail: bndriker 70191@mail.ru

Стягов Николай Николаевич, магистрант, Уральский государственный лесотехнический университет, 620100, Россия, г. Екатеринбург, Сибирский тракт, 37; ORCID: 0009-0006-3008-8957; e-mail: stiagovnn@m.usfeu.ru

About the authors:

Afanasiy A. Protazanov, 3rd year Postgraduate Student, Ural State Forestry University, Sibirsky trakt, 37, 620100, Ekaterinburg, Russia; ORCID: 0000-0002-6773-9550; e-mail: protazanov.a@yandex.ru

Boris N. Driker, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Physical/Chemical Technology of Biosphere Protection, Ural State Forestry University, Sibirsky trakt, 37, 620100, Ekaterinburg, Russia; ORCID: 0000-0001-5791-9024; e-mail: bndriker70191@mail.ru

Nikolay N. Styagov, 1st year Master's student, Ural State Forestry University, Sibirsky trakt, 37, 620100, Yekaterinburg, Russia; ORCID: 0009-0006-3008-8957; e-mail: stiagovnn@m.usfeu.ru

УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В ЖУРНАЛЕ «ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО РОССИИ: ПРОБЛЕМЫ, ТЕХНОЛОГИИ, УПРАВЛЕНИЕ» В 2023 ГОДУ

№ 1

Формирование стока малых рек в крупном городе бассейна Волги (на примере Нижнего Новгорода)

С.В. Ясинский[1], М.Б. Алиева[1], М.В. Шмакова[2]

[1] *Институт географии Российской академии наук, Москва, Россия*

[2] *Институт озероведения Российской академии наук – обособленное структурное подразделение Санкт-Петербургского федерального исследовательского центра РАН, Санкт-Петербург, Россия*

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Рассмотрено современное состояние формирования стока малых рек, протекающих в крупных городах в бассейне Волги (на примере г. Нижнего Новгорода). Одна из основных природоохранных проблем в городах бассейна Волги – отсутствие государственного комплексного геоэкологического мониторинга, в т. ч. мониторинга гидролого-геохимических процессов, не позволяющего органам исполнительной власти осуществлять и планировать научно обоснованную водохозяйственную деятельность, прогнозировать возникновение экстремальных ситуаций и эффективно ликвидировать их последствия. **Результаты.** Получены оценки характеристик годового речного стока шести наиболее крупных по площади малых рек Нижнего Новгорода с учетом ландшафтной структуры их водосборов, определен общий объем стока с территории города, поступающего в Чебоксарское водохранилище, выявлена его динамика за многолетний период и основные статистические параметры.

Идентификация защищенности гидрографической сети сельскохозяйственных территорий от диффузного загрязнения

Н.В. Кирпичникова, И.А. Вишневская, Ю.Д. Черненко

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

АННОТАЦИЯ

Актуальность. На примере формирования биогенного стока с сельскохозяйственных территорий в статье рассмотрены методические подходы к оценке диффузных источников загрязнения с позиции многолетней динамики, идентификации территорий с максимальной нагрузкой и потенциальной защищенности речных водосборов. **Результаты.** Предложены два методических подхода к оценке выноса биогенных элементов в гидрографическую сеть в зависимости от воздействия основного диффузного источника загрязнения – сельскохозяйственного сектора.

Оценка неканцерогенного риска здоровью населения Закаменского промышленного узла при использовании питьевой воды из подземных источников водоснабжения

И.Д. Ульзетуева[1],Б.О. Гомбоев[1,2], Н.Б. Гомбоева[2]

[1]*ФГБУН «Байкальский институт природопользования Сибирского отделения Российской академии наук», г. Улан-Удэ, Россия*

[2]*ФГБОУ ВО «Бурятский государственный университет имени Доржи Банзарова», г. Улан-Удэ, Россия*

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Основу формирования и функционирования Закаменского промышленного узла составляло градообразующее предприятие – Джидинский вольфрамо-молибденовый комбинат. В 1996 г. комбинат был закрыт, в 2014 г. проведена рекультивация нарушенных земель, при этом вопросы прекращения сброса загрязненных шахтных вод в водные объекты до сих пор не решены. Результаты. Получена количественная оценка неканцерогенного риска здоровью населения Закаменского промышленного узла, обусловленного химическим составом подземных питьевых вод. По результатам исследований рассмотрено токсическое воздействие питьевой воды из подземных источников водоснабжения на здоровье населения.

Численный анализ процессов переноса ртути в реках Ярлы-Амры и Чибитке (район Акташского горно-металлургического предприятия, Горный Алтай)

В.Ф. Рапута[1], Д.В. Юсупов[2]

[1]*Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, Россия*

[2]*Амурский государственный университет, г. Благовещенск, Россия*

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Ртутное загрязнение окружающей среды – значимая экологическая проблема Республики Алтай. Наиболее загрязненной территорией является район Акташского ртутного месторождения и примыкающей к нему промышленной площадки бывшего горно-металлургического предприятия с высоким уровнем накопленного экологического ущерба. **Результаты.** Установлено удовлетворительное согласие результатов экспериментальных и численных исследований распределения содержания ртути в донных отложениях по течению рек. Обсуждена возможность использования предложенной модели для проверки эффективности планируемых мероприятий по ликвидации накопленного экологического ущерба окружающей среде.

Исследования зоопланктона трансграничной реки Неман в период строительства и консервации Балтийской АЭС

Д.В. Кулаков[1,2]

[1] *Санкт-Петербургское отделение ФГБУН «Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук», Санкт-Петербург, Россия*

[2] *ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет», Санкт-Петербург, Россия*

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Изучение фонового состояния зоопланктона р. Неман (до введения в эксплуатацию БтАЭС) позволит использовать полученные данные для оценки возможных изменений в водотоке и разработать мероприятия по снижению и компенсации ущерба водным биоресурсам. **Результаты.** За период исследований в зоопланктоне обнаружено 85 таксонов видового и подвидового рангов. В период исследований строительные работы на площадке БтАЭС не оказывали влияния на водоток, но при эксплуатации атомной станции зоопланктон р. Неман будет испытывать механическое воздействие в зоне прямого влияния водозаборных устройств, тепловое воздействие будет сведено к минимуму.

Геохимическая характеристика гуминовых кислот, выделенных из отложений тундровых озер Мурманской области

А.В. Гузева[1], З.И. Слуковский[2]

[1] *Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Институт озероведения Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия*

[2] *Институт проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН, г. Апатиты, Россия*

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Данные о гуминовых кислотах озерных отложений ограничены и практически не охватывают водоемы холодноводных регионов. Исследование посвящено комплексному анализу геохимических и экологических особенностей гуминовых кислот, выделенных из донных отложений малых тундровых озер полуостровов Рыбачий и Средний Мурманской области. **Результаты.** Установлено, что изученные озерные отложения обеднены органическим веществом. Процессы гумификации и микробной трансформации органических веществ в аквальных экосистемах тундры замедлены, в т. ч. из-за холодных климатических условий. Полученные данные необходимо учитывать при проведении гидрохимических и геохимических исследований пресноводных экосистем северных регионов, а также при разработке оптимальной системы их геоэкологического мониторинга в условиях возрастающей антропогенной нагрузки.

Условия и реакция экосистемы эвтрофного Обского болота на антропогенное воздействие

О.Г. Савичев
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», *г. Томск, Россия*

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Оценка устойчивости водных экосистем к внешним воздействиям является одним из важных этапов нормирования уровня антропогенного влияния на окружающую среду В Томском политехническом университете проведен эксперимент по изучению самоочищения эвтрофного Обского болота, расположенного на территории площадью боле 150 км^2 в долине одной из крупнейших рек мира – Оби. **Результаты.** Исследуемый участок Обского болота характеризуется относительно благоприятными условиями самоочищения в случае потенциальных сбросов стоков в количестве, сопоставимом с притоком подземных вод палеогеновых отложений. Предположительно, этот вывод актуален и для других заболоченных участков р. Оби в ее среднем течении.

Биогеохимические процессы в рифтогенном озере Байкал

А.Н. Сутурин
Лимнологический институт Сибирского отделения Российской академии наук, г. Иркутск, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Выявление причин биогеохимической активности бентосных гидробионтов и их устойчивости к антропогенным процессам определяет актуальность работы. **Результаты.** Сложившая за миллионы лет байкальская экосистема неустойчива к антропогенным потокам и микробиологическим загрязнениям, которые вытесняют литофильные сообщества. Этот процесс обусловлен отсутствием или недостаточно эффективной работой очистных сооружений. Предотвращение сброса антропогенных загрязнений – основная задача охраны экосистемы Байкала.

№ 2

Регулирование изъятия водных ресурсов: проблемы и решения. Часть 2. Лимиты и квоты

С.Д. Беляев
ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Уральский филиал, г. Екатеринбург, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Анализ результатов применения действующего нормативно-правового и методического обеспечения регулирования водопользования выявил ряд пробелов и противоречий. В частности, остаются не вполне проясненными вопросы установления и корректировки значений лимитов и квот забора водных ресурсов и сброса сточных вод. Решение этих проблем позволит значительно повысить эффективность регламентной корректировки СКИОВО, обоснованность принятия решений по предоставлению водных объектов в пользование. **Результаты.** Даны рекомендации по уточнению нормативно-методического обеспечения расчета и корректировки лимитов/квот.

К статистике показателей качества отводимых сточных вод

А.П. Лепихин[1,2], Т.Н. Синцова[1]

[1]*Горный институт Уральского отделения Российской академии наук – филиал ФГБУН «Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук», г. Пермь, Россия*

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

АННОТАЦИЯ

Актуальность. В статье рассмотрены механизмы формирования функций распределения в отводимых сточных вод промышленных предприятий. **Результаты.** Показано, что нормальность распределения контролируемых химических показателей качества отводимых сточных вод является далеко не универсальной характеристикой. Статистические распределения рассматриваемых показателей зачастую характеризуются существенной асимметрией, значительно отклоняются от нормального распределения. Соответственно, для их статистической обработки некорректно использование только параметрических методов анализа.

О реальных возможностях достижения ПДК на водных объектах и их участках

В.Н. Заслоновский[1], Н.М. Шарапов[1], Д.В. Кочев[2], Д.Б. Закс[2]

[1] *ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Восточный филиал, г. Чита, Россия*

[2] *ФГБОУ ВО «Забайкальский государственный университет», г. Чита, Россия*

АННОТАЦИЯ

Актуальность. В работе отражена точка зрения авторов по вопросам использования ПДК для нормирования качества вод природных водных объектов. Утверждается, что нормативных значений этого показателя (особенно ПДКрх) в некоторых водных объектах или их участках достичь невозможно. Перечень загрязняющих веществ, присутствующих в воде и влияющих на ее качество, для различных водных объектов и их участков индивидуален. Антропогенная нагрузка на водные объекты по каждому из таких веществ также индивидуальна и зависит от состава водопользователей, водности и сезонов года. **Результаты.** Авторы предлагают принципиальные изменения подхода к методологии нормирования и улучшения качества природных вод поверхностных водных объектов.

Опыт комплексных натурных исследований с применением БПЛА при решении задач по оценке зон затопления территорий населенных пунктов (на примере реки Печоры)

А.И. Лучников[1,2], Н.А. Голдобин[1], С.А. Лепешкин[1]

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

[2] *ФГБУН «Горный институт Уральского отделения Российской академии наук», г. Пермь, Россия*

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Большинство населенных пунктов в нижнем течении р. Печоры подвержены периодическому затоплению и, как следствие, возникновению социально-экономических рисков для жизнедеятельности населения прибрежных территорий. Актуальность работы связана с оценкой зон затопления населенных пунктов на основе применения современных средств натурных исследований и гидродинамического моделирования. **Результаты.** Комплексные натурные исследования с применением БПЛА позволили получить качественные исходные данные для создания и верификации гидродинамической модели участка р. Печоры и последующего расчета границ зон затопления 34 населенных пунктов.

Выбор противопаводковых мероприятий с использованием вычислительных экспериментов (на примере нижнего течения реки Печоры)

Д.И. Перепелица[1], А.А.Тиунов,[1,2] А.П. Лепихин, [1,2]С.Р. Андреев[1], Н.А. Голдобин[1], С.А. Лепешкин[1]

[1] *Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь, Россия*

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

АННОТАЦИЯ

Актуальность. В нижнем течении р. Печоры в 32 населенных пунктах отмечается затопление жилой застройки при 1 % прохождении весеннего половодья. При этом уже для 50 % обеспеченности весеннего половодья затоплению подвержены 29 населенных пунктов. **Результаты.** Выполнен анализ возможных противопаводковых мероприятий, проведен расчет их эффективности и оценка экономической целесообразности. На основе проведенного исследования рекомендован комплекс противопаводковых мероприятий, эффективных с точки зрения защиты территории и экономически оправданных.

Применение беспилотных летательных аппаратов и геоинформационных систем при осуществлении мониторинга берегов и водоохранных зон водохранилищ

В.В. Сапрыгин, В.В. Глинка, Г.И. Скрипка

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

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Мониторинг возрастающей антропогенной нагрузки, а также проявлений опасных природных процессов только методами наземных наблюдений не позволяет в полной мере обеспечить соблюдение требований водного законодательства по использованию водоохранных зон водных объектов. Применение набора инструментов Agisoft Metashape Professional в сочетании с ArcGIS при создании баз данных и ГИС-проектов для водохранилищ значительно повышает эффективность мониторинга. **Результаты.** Показана возможность использования сформированных баз данных (географических, текстовых и др. материалов) для получения наиболее полной информации о состоянии водоохранных зон. Такой подход позволяет оперативно реагировать на опасные проявления природных и антропогенных процессов.

Решение методологических вопросов при выборе методов реабилитации эвтрофных водоемов

А.Н. Попов, В.Ф. Мухутдинов

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

АННОТАЦИЯ

Актуальность. В условиях интенсификации хозяйственной деятельности проблема выбора оптимальных мероприятий для реабилитации водных объектов приобретает все большую актуальность, поэтому особое значение имеет совершенствование научно-методического обеспечения водохозяйственной и водоохранной деятельности. **Результаты.** В рамках проведенного исследования предложена методика оперативного и объективного определения годовой удельной биогенной нагрузки на водоем до проведения полного цикла наблюдений, доказана возможность использования одного из многочисленных уравнений взаимосвязи между концентрациями фитопланктона и хлорофилла а, сформирована методика выбора приоритетных действий, направленных на реабилитацию водоемов макрофитного типа.

Применение биологического мониторинга на примере локального участка реки Туры (город Тюмень) для решения водохозяйственных задач

Т.Е. Павлюк, И.Н. Захарова, А.А. Чураков, В.Ф. Мухутдинов

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

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Бассейн р. Туры на 90 % расположен в Свердловской области, где в основном и формируется качество ее воды. Остальная часть приходится на Тюменскую область, на территории которой р. Тура приобретает большое хозяйственное значение как особый тип природного ландшафта, зона рекреации и транспортный судоходный путь. Контроль за формированием качества воды от стоков разного генезиса является основой для проведения эффективной природоохранной политики в регионе. **Результаты.** Описано состояние сообществ макрозообентоса двух створов р. Туры – фонового и контрольного, между которыми осуществляется выпуск очищенных сточных вод, дана оценка экологического состояния локального участка реки, рассчитанная по нескольким биотическим индексам.

№ 3

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

В.И. Коржов[1], И.В. Коржов[2], Д. А. Кудравец [1,2], О.В. Сорокина[1], Е.А. Волкова[2]

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

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

АННОТАЦИЯ

Актуальность. В представленной работе акцентировано внимание на актуальности создания и применения мобильных IT-средств, показаны их возможности при реализации практических задач управления водными ресурсами. **Результаты.** Проведенное моделирование управления водными ресурсами на исходном орошаемом участке позволило

определить численные значения и графики водоподачи 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.

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

Н.Н. Бортин[1], Д.Н. Василевский[1], Л.Н. Василевская[2], И.А. Лисина[2]

[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, индустриальные сточные воды и нефтепродукты. Однако имеются и другие мощные внешние источники загрязнения – это атмосферный и материковый стоки, которые формируются в виде выпадения поллютантов с атмосферными осадками на морские акватории и их водосборные территории. **Результаты.** Определена ежегодная масса поступления растворенных веществ на морские акватории и водосборные территории рек бассейна залива Петра Великого.

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

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

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. **Результаты.** Выявлено связанное с климатическим фактором изменение внутригодового распределения объемов естественных составляющих водного баланса, наиболее выраженное в последние десятилетия.

Повышение температуры воды Куйбышевского водохранилища и риски водопользования

К.В. Селезнева[1,2], А.В. Селезнева[1], В.А. Селезнев[1]

[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. **Результаты.** Установлено, что изменение термического режима Куйбышев-

ского водохранилища обусловлено глобальным потеплением климата. В современный период наблюдается повышение температуры воды Куйбышевского водохранилища, что обусловлено повышением температуры воздуха из-за глобального потепления климата.

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

С.А. Лавров
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. **Результаты.** 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.

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

Ф.А. Атабиева, А.С. Отарова
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. **Результаты.** В статье представлены данные о содержании растворенных форм тяжелых металлов в воде рек Центрального Кавказа (Малка, Баксан, Черек, Урух, Терек, Нальчик, Лескен, Чегем, Шалушка, Урвань, Куркужин) в среднем и нижнем течении. Установлены приоритетные загрязняющие вещества и основные источники их поступления.

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

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

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Доказана взаимосвязь пространственного размещения месторождений пресных подземных вод олигоцен-четвертичного горизонта в палеодолинах с наличием соленых озер. **Результаты.** 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.

Экология водных систем: применение ингибиторов коррозии для очистки сточных вод

Г.Б. Браяловский, А.Ф. Никифоров, О.Б. Насчетникова, Е.В. Мигалатий
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н.Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Системы отрытого 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. **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.

№ 4

Наука в лицах

В.И. Данилов-Данильян: Формула моей жизни – никогда не сиди без дела и не откладывай на завтра то, что можно сделать сегодня

АННОТАЦИЯ

Двигателями любой отрасли научного знания являются люди. От них зависит – станет ли отрасль прогрессивной, передовой или, напротив, потеряет темпы своего развития. Открываем новую рубрику нашего журнала «Наука в лицах», в которой мы будем представлять ведущих российских и зарубежных специалистов водохозяйственной отрасли.

Представлено интервью с членом-корреспондентом Российской академии наук Виктором Ивановичем Даниловым-Данильяном – известным ученым в области экономики природопользования, экономико-математического моделирования, теории устойчивого развития, экологии.

Наука в лицах

А.Н. Апацкий: если не мы, то кто?..

АННОТАЦИЯ

Александр Николаевич Апацкий на основании Постановления Совета Министров Республики Беларусь от 1 марта 2004 г. № 217 был назначен первым сопредседателем Совместной Белорусско-Российской комиссии по охране и рациональному использованию трансграничных водных объектов. Интервью раскрывает личность этого незаурядного управленца.

Россия – Белоруссия: 20 лет трансграничного водного сотрудничества

АННОТАЦИЯ

В статье представлена историческая ретроспектива деятельности Совместной Российско-Белорусской комиссии по охране и рациональному использованию трансграничных водных объектов за двадцатилетний период.

Первая научно-практическая конференция «О дальнейшем развитии российско-белорусского сотрудничества в сфере охраны и рационального использования трансграничных водных объектов»

АННОТАЦИЯ

Представлены итоги состоявшейся 7 июня 2022 года в Санкт-Петербурге первой научно-практической конференции «О дальнейшем развитии российско-белорусского сотрудничества в сфере охраны и рационального использования трансграничных водных

объектов», приуроченной к 20-летию подписания Соглашения между Правительством Российской Федерации и Правительством Республики Беларусь о сотрудничестве в области охраны и рационального использования трансграничных водных объектов.

О деятельности Совместной Российско-Белорусской комиссии по охране и рациональному использованию трансграничных вод

В.В. Захаренков, *руководитель российской части рабочей группы по бассейну реки Днепр Совместной Российско-Белорусской комиссии, начальник отдела водных ресурсов по Брянской, Калужской и Смоленской областям Московско-Окского БВУ Росводресурсов*

АННОТАЦИЯ

Представлены итоги совместной работы по Российской Федерации и Белоруссии по регулированию хозяйственной и иной деятельности, связанной с использованием трансграничных водных объектов.

Развитие российско-белорусского сотрудничества в сфере охраны и рационального использования трансграничных подземных водных объектов

О.В. Васнёва, О.А. Берёзко, Е.М. Черевач

Филиал «Институт геологии» Государственного предприятия «НПЦ по геологии», Республика Беларусь

АННОТАЦИЯ

Дальнейшее развитие российско-белорусского сотрудничества в сфере охраны и рационального использования трансграничных подземных водных объектов видится в создании единой картографической геоинформационной базы данных трансграничных территорий Республики Беларусь и Российской Федерации для накопления, хранения и использования геолого-гидрогеологической информации в целях управления ресурсным потенциалом подземных вод Беларуси и России.

Бассейновый подход к гидрологическому районированию Беларуси как фактор оптимального управления водными ресурсами

А.А. Волчек[1], П.С. Лопух[2]

[1] *Брестский государственный технический университет, г. Брест, Республика Беларусь*
[2] *Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь*

АННОТАЦИЯ

Актуальность. В связи с изменяющимися природно-климатическими условиями и увеличением антропогенной нагрузки вопросы колебания стока требуют детального исследования с целью прогнозирования состояния водных ресурсов. **Результаты.** Комплексный анализ формирования стока рек Беларуси с выделением однородных районов по синхронности и цикличности, положенный в основу гидрологического районирования, позволил дать объективную оценку водным ресурсам страны с учетом современных климатических изменений и антропогенных воздействий.

Мониторинг качества поверхностных трансграничных водных объектов бассейнов рек Днепр и Западная Двина по гидрохимическим и гидробиологическим показателям

Ю.Б. Голубихина, О.В. Синильникова, Т.А. Дмитриенко, В.Н. Поддуев, С.П. Денисенко

ФГБВУ «Центррегионводхоз», Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Для повышения эффективности управления водопользованием трансграничных водных объектов необходима эффективная система мониторинга состояния качества их вод. **Результаты.** Представлен анализ регулярных наблюдений за состоянием

поверхностных водных объектов на трансграничных водотоках, расположенных на территории Смоленской, Брянской, Псковской областей Российской Федерации. Рекомендовано продолжить проведение регулярных наблюдений за качеством воды и состоянием водных экосистем, донных отложений трансграничных водных объектов.

Особенности гидрологического режима трансграничных водных объектов Республики Беларусь и Российской Федерации

Е.Г. Квач
Государственное учреждение «Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды» (Белгидромет), г. Минск, Республика Беларусь

АННОТАЦИЯ

Актуальность. В статье рассмотрены изменения характеристик гидрологического режима основных трансграничных водных объектов Республики Беларусь и Российской Федерации. **Результаты.** Проанализирована эффективность мониторинга гидрологического режима трансграничных водных объектов на территории Беларуси.

О водохозяйственной обстановке в бассейнах рек Днепр и Западная Двина на территории Беларуси

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

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Представлена практика разработки и внедрения водоохранных мероприятий в бассейне Днепра, опыт проведения расчетов поступления загрязняющих веществ в водные объекты от точечных и рассредоточенных (диффузных) источников загрязнения и научно-методическое обеспечение в виде соответствующего Пособия П-ООС 17.06-03-2020. **Результаты.** Оценка поступления загрязняющих веществ в поверхностные водные объекты показала значимый вклад рассредоточенных источников загрязнения в общем объеме поступающих загрязнений, поэтому при планировании водохозяйственной деятельности и разработке мероприятий по улучшению экологического состояния поверхностных водных объектов необходимо изучение как точечных, так и рассредоточенных источников загрязнения.

Эколого-химическая оценка родников Брянской области по данным паспортизации

О.А. Соболева
ФГБОУ ВО «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского», г. Брянск, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Представлены результаты эколого-химической оценки родников городских и сельских поселений Брянской области на основе многолетних исследований по мониторингу состояния подземных вод. **Результаты.** Зарегистрировано значительное изменение химического состава родниковых вод и повышение содержания загрязняющих компонентов на территории малых городов Брянской области. Рекомендовано ведение постоянного мониторинга гидрохимических показателей городских родников.

Некоторые итоги деятельности и перспективы сотрудничества Смоленского ЦГМС и «Витебскоблгидромета»

Д.В. Мурач
Смоленский ЦГМС – филиал ФГБУ «Центральное УГМС», г. Смоленск, Россия

АННОТАЦИЯ

Представлены итоги совместной работы Смоленского ЦГМС–филиала ФГБУ «Центральное УГМС» и ГУ «Витебскоблгидромета». Дальнейшее развитие и углубление сотрудничества необходимо для оперативного обмена информацией и прогнозирования ситуаций на трансграничных участках водных объектов.

№ 5

Сценарные характеристики уровенно-минерализационного режима системы озер Айдар-Тузкан

М.Г. Гречушникова[1,2], А.В. Фролов,[1] Д.Н. Айбулатов[2]

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

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

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Работа посвящена прогнозу уровенного режима искусственно созданной системы озер Айдаркуль-Тузкан. Выполненные ранее прогнозы уровенного режима системы озер в сложившихся условиях требуют коррекции, учитывая большую практическую значимость водного объекта для региона. **Результаты.** При сохранении современного среднего притока коллекторно-дренажных вод 2,2 км^3/год, уровень воды в озере в перспективе будет иметь равновесную отметку 241,9 м абс и соленость воды 61‰. При уменьшении среднего притока до 1,7 км^3/год – равновесный уровень снизится до отметки 239 м абс.

Сравнительная оценка первичной продукции наземных и водных экосистем

В.В. Бульон

ФГБУН «Зоологический институт Российской академии наук», Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Представлена модель «озеро и его водосбор» для оценки потока вещества и энергии в озерных экосистемах, находящихся в окружении наземной растительности. **Результаты.** Установлена зависимость первичной продукции внутренних водоемов и наземных экосистем от географической широты. Уравнения регрессий отражают следующую закономерность: на низких широтах, вблизи экватора, значения первичной продукции внутренних водоемов и наземных экосистем мало различаются и приближаются к своему максимуму, в направлении высоких широт они непропорционально уменьшаются.

Состояние макрозообентоса малых озер урбанизированных территорий Карелии (на примере озер Плотичье и Китайское)

Е.С. Савосин

Институт биологии Карельского научного центра Российской академии наук, г. Петрозаводск, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Оценка особенностей формирования донного сообщества в водоемах в условиях возрастающих воздействий антропогенного характера представляется актуальной задачей научно-исследовательских работ, направленных на краткосрочный и долгосрочный мониторинг состояния водных объектов. **Результаты.** Установлено, что в

условиях хозяйственного освоения озер длительное эвтрофирование ведет к трансформации экосистемы и оказывает негативное влияние на биотические параметры качества поверхностных вод. Полученные результаты могут служить базисом для проведения комплексных работ по экологическому мониторингу водных объектов урбанизированных территорий.

Гидрография, морфометрия и мониторинг современного состояния озера Джылтырбас

Б.Е. Аденбаев, С.Б. Калабаев
Национальный университет Узбекистана имени Мирзо Улугбека, г. Ташкент, Республика Узбекистан

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Изучение гидрографии, морфометрии и мониторинг современного состояния оз. Джылтырбас позволяет разработать необходимые мероприятия по сохранению экосистемы водоема, его флоры и фауны. **Результаты.** Установлено, что за исследуемый период общий приток в озеро составил 7598,86 млн м3, отток – 4266,38 млн м3. Мониторинг гидрологического режима показывает, что ежегодное уменьшение стока р. Амударьи ставит под вопрос будущее состояние экосистемы озера.

Трансформация гидрологического и термического режимов реки Объяснения и бухты Золотой Рог в результате сброса морской воды с Владивостокской ТЭЦ-2

Н.Н. Бортин, А.М. Горчаков
ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Дальневосточный филиал, г. Владивосток, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Рассмотрено влияние сброса морских вод после охлаждения оборудования на Владивостокской ТЭЦ-2 в р. Объяснения на гидрологический, гидрохимический и термический режимы реки и бухты Золотой Рог. Дана оценка правомерности требования нормирования сброса морских вод. **Результаты.** Доказано, что в настоящее время р. Объяснения следует рассматривать как антропогенный водный объект, измененный в результате хозяйственной деятельности для обеспечения социальных потребностей города-порта Владивосток, не обладающий свойствами природных водных объектов.

Оценка влияния абиотических факторов на гетеротрофные бактериоценозы воды и донных отложений в северной части Каспийского моря

Д.Г. Баубекова, В.В. Проскурина
Волжско-Каспийский филиал ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии», г. Астрахань, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. В условиях дальнейшего развития промышленности Каспийского региона одной из основных природоохранных задач является реализация устойчивых мер экологического мониторинга акватории Каспийского моря, в частности, проведение комплексных наблюдений за состоянием экосистем Каспия. **Результаты.** Проведена оценка влияния абиотических факторов – гидрологического и температурного режимов – на изменение численности групп гетеротрофных бактерий в северной части Каспийского моря. Анализ сезонной динамики показал, что на всех этапах исследований количественные показатели сапротрофов были обусловлены воздействием природных факторов: половодьем, стоком Волги, температурным режимом.

Гидрологические условия функционирования Усть-Манычских рыбоходных каналов

В.Н. Шкура, А.В. Шевченко

[1,2] *ФГБНУ «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации», Новочеркасск, Россия*

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Усть-Манычские рыбоходные каналы характеризуются низкой эффективностью работы, что наносит ущерб рыбному хозяйству региона. Анализ проекта каналов позволил установить ряд ошибок и недостатков конструктивных решений, снижающих результативность их функционирования. **Результаты.** Установлено, что гидрологические условия р. Западный Маныч являются одним из основных факторов, определяющих эффективность функционирования Усть-Манычских рыбоходных каналов.

Развитие колониального оболочника *Botryllus schlosseri* и мшанки *Cryptosula pallasiana* в сообществах макрообрастания на искусственных субстратах (Севастопольская бухта, Черное море)

Л.Б. Далёкая

ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского» Российской академии наук, г. Севастополь, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Флуктуации численности и биомассы массовых видов макрообрастания следует учитывать при культивировании с целью получения из них биологически активных веществ, для прогнозирования закономерностей формирования прибрежных сообществ и разработки методов борьбы с этим видом биоповреждений. **Результаты.** Рассмотрена динамика оседания и развития массовых видов сообщества макрообрастания: колониального оболочника *Botryllus schlosseri* (Pallas, 1766) и мшанки *Cryptosula pallasiana* (Moll, 1803) на искусственных субстратах короткой и длительной экспозиции в вершинной части Севастопольской бухты.

№ 6

К вопросу развития технологий оценки степени загрязненности водных объектов на основе показателей комплексности загрязнения

В.П. Емельянова, Н.Н. Оленникова

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

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Сформулированы задачи научно-методического обеспечения потребителей технологиями оценки степени загрязненности, качества воды водных объектов по гидрохимическим показателям. **Результаты.** Изложена разработанная технология единой пятиступенчатой категорийности комплексности загрязненности воды водных объектов относительно нормативных требований, критериев высокого и экстремально высокого загрязнения.

Критерии выделения категории сильно измененных поверхностных водных объектов в Республике Беларусь на основе анализа международного опыта

Е.И. Громадская, О.М. Таврыкина

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

АННОТАЦИЯ

Актуальность. В Республике Беларусь назрела необходимость определения критериев для идентификации и классификации поверхностных водных объектов, имеющих естественное происхождение, но которые невозможно отнести к природным, поскольку они имеют постоянные и необратимые изменения гидроморфологических и, как следствие, гидрологических характеристик. Такие водные объекты в международной практике относят к сильно измененным водным объектам. **Результаты.** Разработаны условия, при которых водный объект будет определен как кандидат для последующего включения в перечень сильно измененных водных объектов.

Исследование закономерностей вариации показателей качества воды реки Исеть с использованием нейросетевых методик

О.М. Розенталь[1], В.Х. Федотов[2]

[1] *Институт водных проблем Российской академии наук, Москва, Россия*

[2] *Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, Чебоксары, Россия*

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Повышение эффективности управленческих решений с помощью современных методов искусственного интеллекта представляет интерес в связи с активным внедрением информационных технологий во всех отраслях экономики. **Результаты.** Выполненные с использованием нейросетевых методик экологические исследования показали, что ряд динамических и химических характеристик воды р. Исеть в окрестностях Екатеринбурга взаимно скоррелированы. Полученная информация может быть полезна для понимания природы вариабельности показателей состава и свойств воды и в дальнейшем для повышения эффективности прогноза качества водных ресурсов.

Оценка вероятности возникновения опасных для судоходства гидрологических явлений на нижней Волге и Дону

М.В. Георгиевский[1], Н.И. Горошкова[1], А.О. Еремеева[1], Г.Л. Гладков[2], А.В. Стриженок[1], Д.А. Семенова[1]

[1] *ФГБУ «Государственный гидрологический институт», Санкт-Петербург, Россия*

[2] *ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова», Санкт-Петербург, Россия*

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Изложены основные положения методики оценки вероятностей возникновения опасных гидрологических явлений для судоходства на внутренних водных путях. **Результаты.** Выполнена ретроспективная оценка вероятности неблагоприятных условий для навигации в бассейнах нижней Волги и Дона, связанных с изменением характеристик уровенного и ледового режимов. Результаты демонстрируют, что в исследуемых бассейнах в последние десятилетия уменьшается вероятность неблагоприятных гидрологических явлений, связанных с продолжительностью ледостава.

Анализ результатов моделирования и натурных данных содержания растворенного кислорода в Телецком озере

А.Т. Зиновьев, К.Б. Кошелев, А.В. Дьяченко

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

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Телецкое озеро – уникальный водный объект Западной Сибири, озеро и его водосборный бассейн включены ЮНЕСКО в список объектов мирового наследия.

Кислородный режим Телецкого озера является показателем, характеризующим состояние водоема. **Результаты.** Выполнены модельные расчеты содержания растворенного кислорода для экстремальных сценариев, которые демонстрируют лучшую реалистичность модифицированной модели.

Мониторинг естественных радионуклидов ряда U-238 в родниках Екатеринбурга

В.С. Семенищев, Ю.И. Насонова, С.М. Титова, А.В. Воронина, Е.И. Денисов
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Представлены результаты мониторинга содержания радона-222, а также определены удельные активности урана-238, радия-226 и свинца-210 в семи родниках с превышением уровня вмешательства по радону-222, расположенных в окрестностях г. Екатеринбурга. **Результаты.** Рассчитано, что среди исследованных радионуклидов вклад радона в годовую дозу облучения при употреблении родниковой воды составляет от 98,3 до 99,8 %. Таким образом, мониторинг радона является приоритетным для оценки пригодности по радиационному фактору природных питьевых вод подземного происхождения.

Использование метода нанофильтрации для очистки фугата установок обезвоживания осадков станций водоподготовки

Д.В. Спицов, А.Г. Первов, Тет Зо Аунг
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. В последние годы возрос интерес к нанофильтрации как к методу подготовки питьевой воды из поверхностных водоисточников за счет высокой эффективности удержания мембранами органических веществ. Представлено исследование возможности применения мембранных технологий для очистки фугата и утилизации концентрата мембранной установки. **Результаты.** Показано, что применение мембранной установки позволяет получить очищенную воду и обеспечить эффективное снижение таких показателей, как ХПК, концентрация алюминия, окисляемость до норм ниже требований к питьевой воде.

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 12.03.2024. Дата выхода в свет 26.03.2024.
Формат 70x100 $^{1}/_{16}$. Усл. печ. л. 7,875. Тираж 200 экз. Цена свободная.
Отпечатано в типографии ООО «ДжиЛайм»,
юридический адрес: 620078, г. Екатеринбург, ул Мира 37-25.
Тел.: +7(343)362-42-28, www.glime.ru, e-mail: g_lime@mail.ru

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

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

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

ФГБУ РОССИЙСКИЙ НИИ КОМПЛЕКСНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ И ОХРАНЫ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

ФГБУ РосНИИВХ – научное подразделение Федерального агентства водных ресурсов, создан для научного обеспечения государственных функций управления использования и охраны водных ресурсов, разработки нормативно-методической и проектной документации, направленной на устойчивое развитие водного хозяйства России и экономическую безопасность водопользования.

В структуру института входят филиалы в 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

