

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

№ 6, 2023



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)

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

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

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

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

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

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

Хафизов А.Р., д-р техн. наук, профессор, Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов (Уфа, Россия)

Шевчук А.В., д-р экон. наук, профессор, Совет по изучению производительных сил Всероссийской академии внешней торговли Минэкономразвития России (Москва, Россия)

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

МЕЖДУНАРОДНЫЙ СОВЕТ

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

№ 6, 2023

ЕКАТЕРИНБУРГ
EKATERINBURG



EDITORIAL BOARD

CHIEF EDITOR

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

DEPUTY CHIEF EDITOR

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

MEMBERS OF THE EDITORIAL BOARD

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

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

Galina G. Borisova, Dr. Sc. (Biological), Professor, Ural Federal University (Ekaterinburg, Russia)

Evgeniy V. Venitsianov, Dr. Sc. (Physical/mathematical), Professor, Russian Academy of Sciences Institute of Water Problems (Moscow, Russia)

Aufar M. Gareyev, Dr. Sc. (Geographical), Professor, Bashkir State University, Chair of Hydrology and Geo/ecology (Ufa, Russia)

Valeriy N. Zaslونovskiy, Dr. Sc. (Technical), Professor, Transbaikalian State University (Chita, Russia)

Aleksandr T. Zinoviyev, Dr. Sc. (Technical), Russian Academy of Sciences Siberian Branch Institute of Water and Environmental Problems (Barnaul, Russia)

Dmitriy V. Kozlov, Dr. Sc. (Technical), Professor, K.A. Timiryazev Russian State Agrarian University (Moscow, Russia)

Aleksandr F. Nikiforov, Dr. Sc. (Chemical), Professor, Ural Federal University (Ekaterinburg, Russia)

Vladislav A. 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)

Airat R. Khafizov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection (Ufa, Russia)

Anatoliy V. Shevchuk, Dr. Sc. (Economic), Professor, Ministry of Economic Development of the Russian Federation Russian Academy of External Trade Board for Studying Productive Forces (Moscow, Russia)

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

INTERNATIONAL BOARD

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

Памяти С.Н. Шашкова.....5

УПРАВЛЕНИЕ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ

К вопросу развития технологий оценки степени загрязненности
водных объектов на основе показателей комплексности загрязнения
В.П. Емельянова, Н.Н. Оленникова.....6

Критерии выделения категории сильно измененных поверхностных водных
объектов в Республике Беларусь на основе анализа международного опыта
Е.И. Громадская, О.М. Таврыкина.....21

Исследование закономерностей вариации показателей качества
воды реки Исеть с использованием нейросетевых методик
О.М. Розенталь, В.Х. Федотов.....33

Оценка вероятности возникновения опасных для судоходства
гидрологических явлений на нижней Волге и Дону
*М.В. Георгиевский, Н.И. Горошкова, А.О. Еремеева,
Г.Л. Гладков, А.В. Стриженок, Д.А. Семенова*.....44

ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ, ВОДНЫЕ ОБЪЕКТЫ

Анализ результатов моделирования и натурных данных
содержания растворенного кислорода в Телецком озере
А.Т. Зиновьев, К.Б. Кошелев, А.В. Дьяченко.....57

Мониторинг естественных радионуклидов
ряда U-238 в родниках Екатеринбурга
*В.С. Семенищев, Ю. И. Насонова, С.М. Титова,
А.В. Воронина, Е.И. Денисов*.....70

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Использование метода нанофильтрации для очистки
фугата установок обезжизнения осадков станций водоподготовки
Д.В. Спицов, А.Г. Первов, Тет Зо Аунг.....82

Требования к оформлению материалов.....95

CONTENT

In memoriam S.N. Shashkov.....5

WATER RESOURCES MANAGEMENT

On the issue of the development of technologies for assessing the degree
of water bodies water pollution based on indicators of the pollution complexity
V.P. Yemelyanova, N.N. Olennikova.....6

Norms for identifying a category of heavily modified water bodies
in Belarus based on the analysis of international experience
A.I. Hrmadskaya, A.M. Taurikina.....21

Investigation of patterns of variation in water quality indicators
of the Iset River with the use of neuronet methods
O.M. Rosenthal, V.K. Fedotov.....33

Assessment of dangerous hydrological events probability for navigation
on the Lower Volga and Don based on water levels and ice phenomena data
*M.V. Georgievsky, N.I. Goroshkova, A.O. Ereemeeva,
G.L. Gladkov, A.V. Strizhenok, D.A. Semenova*.....44

WATER RESOURCES, WATER BODIES

Modeling and observations of dissolved oxygen content in the Lake Teletskoye
A.T. Zinovyev, K.B. Koshelev, A.A. Dyachenko.....57

Monitoring of U-238 series natural radionuclides in springs near Ekaterinburg
V.S. Semenishchev, Y.I. Nasonova, S.M. Titova, A.V. Voronina, E.I. Denisov.....70

ECOLOGICAL ASPECTS OF WATER/ECONOMIC ACTIVITIES

Application of the nanofiltration method for fugat purification
of the sludge dewatering units of the water treatment stations
D.V. Spitsov, A.G. Pervov, Htet Zo Aung.....82

Requirements to the material to be accepted.....95

ПАМЯТИ СЕРГЕЯ НИКОЛАЕВИЧА ШАШКОВА

28 октября 2023 года ушел из жизни известный гидролог, специалист в области использования и охраны водных ресурсов Сергей Николаевич Шашков.



Сергей Николаевич родился 11 января 1953 года. В 1975 году закончил географический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, в 1986 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук по теме «Методика прогнозирования качества воды крупных каналов водоснабжения».

Свою трудовую деятельность Сергей Николаевич начал в 1976 г. во Всесоюзном научно-исследовательском институте ВОДГЕО Госстроя СССР, в 1988 году продолжил в Гидропроекте. С 1993 по 2006 годы занимал ответственные должности в Росгипроводхозе и Федеральном агентстве водных ресурсов.

В течение многих лет Сергей Николаевич руководил компанией ООО «ВЕД», которая была организована в 2006 году на основе объединения представителей трех крупных научно-инженерных школ, занимавшихся обоснованием водоохранных мероприятий еще во времена СССР – ВНИИ ВОДГЕО, НИС Гидропроекта и института ВОДНИИИНФОРМПРОЕКТ (головная организация в РСФСР по водохозяйственному проектированию, в т. ч. по разработке Схем комплексного использования и охраны водных объектов). Сравнительно небольшая компания пользовалась заслуженным авторитетом и активно выполняла работы в рамках разнообразных водных проектов и разработок, в т. ч. с проведением разномасштабных экспедиционных исследований.

Работы под руководством С.Н. Шашкова проводились в разных регионах России. Выполненные проекты охватывали разнообразную тематику, но главными были вопросы использования и охраны водных ресурсов. Значительный вклад Сергея Николаевича и руководимый им коллектив внесли в подготовку Схем комплексного использования и охраны водных объектов для бассейнов Волги, Оки, Днепра, Лены, Колымы, Индигирки, Яны, Алазеи, рек водосбора Охотского моря, Чукотки и Сахалина, а также в разработку Схемы комплексного использования и охраны водных объектов Республики Крым.

Сергей Николаевич Шашков – участник и руководитель более 150 проектов, реализованных в водохозяйственной сфере, соавтор 20 научных трудов. Высокая квалификация и большой опыт выполнения проектных работ позволял Сергею Николаевичу на высоком профессиональном и научном уровне решать сложные задачи в области гидрохимии, рационального использования и охраны водных ресурсов, внедрения новых подходов к оценке экологического состояния водных объектов.

Сергея Николаевича отличали высокая работоспособность, ответственное отношение к делу, умение организовать работу и доброе отношения к коллегам.

Светлая память об этом достойном человеке навсегда сохранится в сердцах многих людей, с которыми он вместе жил и работал!

Семья С. Н. Шашкова, коллеги и сокурсники

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

В.П. Емельянова  , Н.Н. Оленникова 

 yemelyanova1945@mail.ru

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. Выделено направление комплексной оценки степени загрязненности, качества воды водных объектов на основе научной обработки результатов химического анализа поверхностных вод, регулярно получаемых и пополняемых государственной наблюдательной сетью. Рассмотрены перспективные для практического использования сетевыми подразделениями Росгидромета методические аспекты комплексной оценки загрязненности воды, в т. ч. определены как одни из наиболее востребованных в этой сфере задачи по совершенствованию технологий анализа, интерпретации и представления данных о химическом составе поверхностных вод. **Методы.** Применены статистические методы обработки результатов химического анализа воды водных объектов в годовом режиме по 10–20 ингредиентам химического состава. **Результаты.** Изложена разработанная технология единой пятиступенчатой категоричности комплексности загрязненности воды водных объектов относительно нормативных требований, критериев высокого и экстремально высокого загрязнения. Предложены к использованию информативные и простые оценочные показатели на основе понятия «комплексность загрязненности воды», функционально дополняющие действующие в настоящее время оценки новым содержанием и назначением.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: водные объекты, загрязненность воды, комплексная оценка, химический состав, загрязняющие вещества, показатели качества.

Для цитирования: Емельянова В.П., Оленникова Н.Н. К вопросу развития технологий оценки степени загрязненности водных объектов на основе показателей комплексности загрязнения // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2023. № 6. С. 6–20. DOI: 10.35567/19994508_2023_6_1.

Дата поступления 11.04.2023.

ON THE ISSUE OF THE DEVELOPMENT OF TECHNOLOGIES FOR ASSESSING THE DEGREE OF WATER BODIES WATER POLLUTION BASED ON INDICATORS OF THE POLLUTION COMPLEXITY

Valentina P. Yemelyanova  , Natalia N. Olennikova 

 yemelyanova1945@mail.ru

Hydro/chemical Institute, Rostov-na-Donu, Russia

ABSTRACT

Relevance. The article sets out the tasks of scientific/methodological support of consumers with techniques of assessment of the pollution rate and water bodies' water quality in terms of

hydro/chemical indicators. The article identifies the trend in integrated assessment of pollution rate and water bodies' water quality based on scientific processing of the surface water chemical analysis results regularly obtained and updated by the state observation network. The article discusses methodical aspects of the water pollution integrated assessment that are prospective for use in practice of Rosgidromet network sections. In particular, these include the tasks concerning improvement of analysis techniques and interpretation/presentation of data on surface waters' chemical composition. **Methods.** We have used statistical methods of the water bodies' water chemical analysis results processing in annual mode in terms of 10-20 ingredients of chemical composition. **Results.** We have described the developed technique of a unified five-step category system of the water bodies' integrated pollution rate in respect of regulatory requirements and criteria of high and extremely high pollution rate. We have propose to use informative and simple assessment indicators based on the notion of "water pollution complexity", that functionally supplement currently active assessment with new content and purpose.

Keywords: water bodies, water pollution, integrated assessment, pollution complexity category, pollution complexity coefficients, high pollution, extremely high pollution, chemical composition, pollutants, pollution assessment, quality indicators.

For citation: Yemelyanova V.P., Olennikova N.N. On the issue of the development of technologies for assessing the degree of water bodies water pollution based on indicators of the pollution complexity. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2023. No. 6. P. 6–20. DOI: 10.35567/19994508_2023_6_1.

Received 11.04.2023.

ВВЕДЕНИЕ

Оптимальное решение стоящих перед водным хозяйством страны задач невозможно без объективной информации об уровне загрязнения водных объектов, разработки, внедрения и совершенствования научно обоснованных технологий анализа и обобщения данных о химическом составе поверхностных вод и оценки их качества. Совершенствование методических подходов, методологических аспектов комплексной оценки состояния водных объектов позволяет получить научно обоснованный и достаточно точный инструмент для принятия управленческих решений в ответственных экологических ситуациях. В этом направлении широкое практическое использование нашла систематизация параметров качества воды водных объектов с выделением групп относительных оценочных показателей.

Основу исследований в области оценки степени загрязненности, качества поверхностных вод составляют две группы гидрохимических показателей – натуральные и относительные [1]. Под относительными понимают показатели качества либо загрязненности поверхностных вод, получаемые расчетным путем с применением аналитических данных. Примером такого инструментария может служить широко используемый метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям¹, представляющий, по сути, систему формализованных взаимосвязанных и взаимно обуславливающих оценочных коэффициентов, индексов и классификации

¹ РД 52.24.643-2002. Методические указания. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод суши по гидрохимическим показателям. СПб.: Гидрометеоздат, 2003. 49 с.

степени загрязненности, качества воды водных объектов с учетом комплекса обнаруживаемых в ней химических веществ.

Накопленный многолетний опыт применения системы комплексной оценки в государственной наблюдательной сети послужил основанием для проведения работ по развитию группы относительных показателей на основе понятия «комплексность загрязненности воды» для расширения номенклатуры оценочных признаков, усовершенствования процедуры учета количества и разнообразия идентифицируемых в водных объектах химических веществ.

Цель проведенного исследования – совершенствование содержания и формы информационной продукции о качестве поверхностных вод, повышение результативности комплексной оценки степени загрязненности водных объектов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование основано на результатах химического анализа поверхностных вод, данных режимных гидрохимических наблюдений государственной наблюдательной сети Российской Федерации о качестве поверхностных вод, формирующихся в различных природных и антропогенных условиях Балтийского, Черноморского, Азовского, Баренцевского, Карского, Восточно-Сибирского, Каспийского и Тихоокеанского гидрографических районов. Расчетные данные относительных гидрохимических показателей комплексной оценки степени загрязненности воды водных объектов получены с использованием программного комплекса «Гидрохим ПК. UKISV-сеть» в соответствии с РД 52.24.643-2002 с учетом официально действующих нормативных требований на основе информации государственной наблюдательной сети Росгидромета за 2008–2021 гг.

В рамках исследования применен метод комплексной оценки загрязненности поверхностных вод¹ [1–3] по гидрохимическим показателям, а также статистические методы обработки результатов химического анализа воды в годовом режиме по 10–20 ингредиентам химического состава. Проведена оценка и сравнительный анализ расчетных данных о комплексности загрязненности воды, комплексности загрязненности воды высокого и экстремально высокого уровней в пунктах стационарных режимных наблюдений за химическим составом воды водных объектов различной категории в каждом гидрографическом районе различных территориальных образований. Анализируемые данные характеризовались многокомпонентностью, значительной вариабельностью во времени и пространстве, различием факторов формирования, антропогенной нагрузки.

Анализ и обобщение литературных данных [4–16] показали, что в течение длительного периода наблюдается активный рост научных разработок в области изучения качества поверхностных вод. Значимость и актуальность вопросов комплексной оценки загрязненности, качества поверхностных вод способствуют методологическому и методическому развитию оценочных гидрохимических исследований, модернизации оценок от простых к более информативным, необходимости учета большого количества факторов фор-

мирования качества вод. Наибольший результат был достигнут в разработке единых требований к комплексной оценке, основывающихся на выборе и группировке приоритетных показателей. Остаются значимыми некоторые проблемные вопросы, характер и степень изученности которых в настоящее время обуславливают целесообразность дальнейшего совершенствования и развития методологии оценивания качества поверхностных вод.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Заключение о качестве воды водных объектов определяют как достоверность данных химического анализа, так и обоснованность и доказательность последующих выводов о степени загрязненности, качестве исследуемых вод, тенденциях их изменения во времени и пр. Без систематизации, оперативной и тщательной обработки фактических данных о степени загрязненности поверхностных вод, без глубокого и всестороннего анализа сведений об уровне их загрязнения и его колебаниях во времени с учетом многообразия пространственных различий водных объектов невозможно непосредственно по фактическим результатам химического анализа получить выводы и оценки, необходимые для принятия управленческих решений.

Одним из важных направлений деятельности в области охраны поверхностных вод от загрязнения является научно-методическое обеспечение потребителя технологией оценки степени загрязненности воды водных объектов. Эта сфера гидрохимических исследований включает множество задач, к наиболее важным из которых на текущий момент можно отнести следующие:

- развитие методологии и совершенствование методов оценки, в т. ч. комплексной оценки качества поверхностных вод по гидрохимическим показателям;
- развитие методических подходов к разработке гидролого-гидрохимических методов оценки качества поверхностных вод;
- совершенствование методических подходов к оценке качества воды трансграничных водных объектов с учетом гидрохимических и гидролого-гидродинамических показателей;
- разработку методов и способов оценки качества воды с учетом комплекса ее свойств – химических, гидробиологических, токсикологических и др.;
- оптимизацию технологий анализа и интерпретации данных о загрязненности поверхностных вод, форм и содержания информационной продукции, развитие технологий информационного обеспечения потребителей разного уровня;
- совершенствование технологий представления данных о загрязненности поверхностных вод;
- широкое внедрение усовершенствованных методов, технологий и технических средств в практику мониторинга.

Работы по первому из обозначенных направлений, сформулированные ранее ФГБУ «Гидрохимический институт», представлены системой натуральных и относительных показателей загрязненности воды водных объектов [1–3] и внедрены в практическую деятельность государственной наблюдатель-

ной сети, а также других заинтересованных потребителей. Основой выбора оптимальной стратегии принятия управленческих решений и регулирования деятельности по наблюдению за качеством воды водных объектов при этом служит преобразованная по строго соблюдаемой технологии объективная режимная информация о загрязненности воды в пунктах и створах наблюдений. Существенную роль в этом сегменте играют оперативность, систематизация и структуризация данных режимного мониторинга о химическом составе поверхностных вод в рамках режимно-справочного банка данных «Качество поверхностных вод» (РСБД КПВ), обеспечивающего интеграцию, обработку и реализацию поступающих от подразделений государственной наблюдательной сети сведений.

Функционирование РСБД КПВ позволяет в автоматическом режиме оперировать совокупностью текущих и многолетних рядов данных о химическом составе поверхностных вод режимно-справочного характера на основе автоматизированных технологий, предусматривающих использование как типовых, так и оригинальных программных средств, отражающих специфику гидрохимических исследований. Именно нестандартные, квалифицированно учитывающие своеобразие массивов аналитических данных о химическом составе воды водных объектов, в т. ч. в области оценки степени загрязненности и качества поверхностных вод, программные средства обеспечивают смысловую, в достаточной степени обоснованную и весьма многообразную интерпретацию данных.

Гидрохимическая информация включает два вида данных – натуральные и относительные [1], которые взаимно обуславливают друг друга. Натуральные данные – это абсолютные показатели химического состава поверхностных вод, определяемые аналитическим путем. Под относительными понимают показатели, получаемые расчетным методом в процессе преобразования аналитических данных, т. е. формализованные. Относительные показатели качества воды водных объектов существенно видоизменяют и обогащают первоначальные данные.

В зависимости от поставленных задач могут быть разработаны различные виды относительных показателей, различающиеся количеством и составом отображаемых свойств воды водных объектов, степенью обобщения и формализации информации, формой выражения в зависимости от их физического смысла, размерности и пр. На рис. 1 представлена систематизация относительных показателей (ОП) загрязненности качества воды водных объектов с учетом количества отображаемых параметров химического состава, степени их обобщения и формализации, формам выражения. В сложной иерархии характеристик химического состава и свойств поверхностных вод относительные показатели загрязненности и качества несут в себе элементы оценки качества воды водных объектов либо полностью ассоциируются с классом оценок. Значительная часть относительных показателей в той или иной мере являются оценочными, что отличает их от показателей измерения.

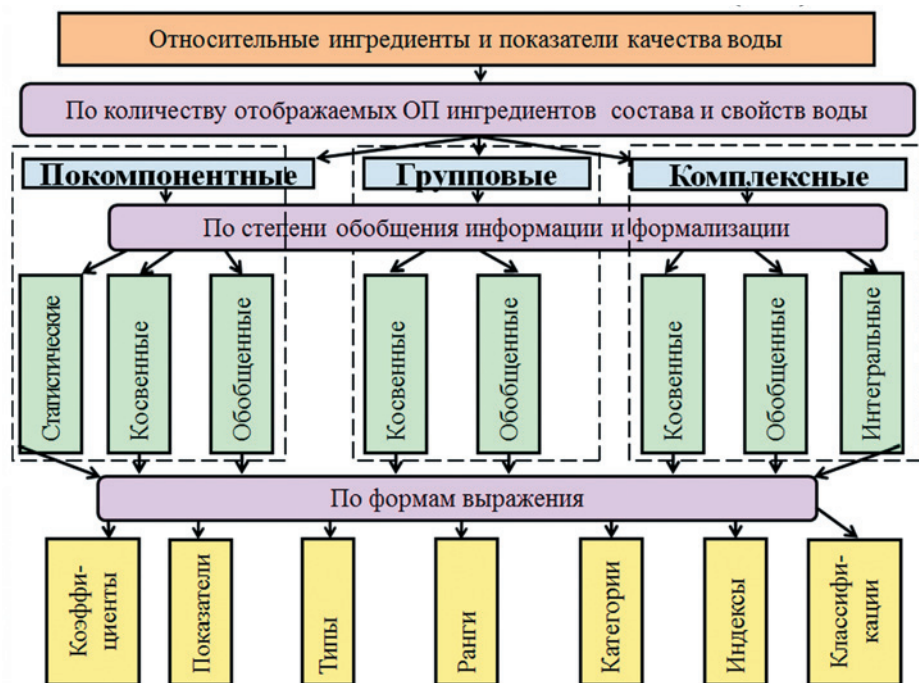


Рис. 1. Виды относительных показателей качества воды водных объектов [2].
Fig. 1. Types of relative water bodies water quality indicators [2].

С учетом количества отображаемых показателей, ингредиентов состава и свойств поверхностных вод выделяются три основных вида относительных оценок: покомпонентные, групповые, комплексные. По степени формализации можно выделить четыре их подвида: статистические, косвенные, обобщенные и интегральные. Подвиды косвенных и обобщенных относительных показателей характерны для каждого из основных видов и могут встречаться как в покомпонентных, так и в комплексных оценках. По формам выражения относительные характеристики разделяются на коэффициенты, показатели, индексы, классификации (равно как и типы), ранги, категории и т. п.

Для формирования целостного подхода к оценке качества воды водных объектов недостаточно проводить традиционный анализ их химического состава с использованием только концентраций в воде или результатов их статистической обработки. Необходимо разрабатывать и использовать на практике более разнообразные способы оценки результатов химического анализа воды для обоснования выводов и заключений о загрязненности, качестве воды и т. д. [1, 3].

Многими авторами предложены различные подходы к оценке качества поверхностных вод [3–14]. Большинство из них индивидуальны и рассматривают различные стороны изучаемой проблемы в разнообразных аспектах.

Накопленный многолетний опыт практического применения системы показателей комплексной оценки¹ [1, 2, 4, 5] позволил проводить, в частности, исследования по развитию используемых в работе государственной наблюдательной сети группы коэффициентов на основе понятия «комплексность за-

грязненности воды» с целью расширения спектра, номенклатуры оценок, что позволяет выполнять более разносторонний анализ и оценку первичных гидрохимических данных.

Для обеспечения инновационной технологии функционирования государственной сети наблюдений и распространения информации о загрязненности поверхностных вод изучена возможность усовершенствования практикуемого в настоящее время метода комплексной оценки степени загрязненности, качества воды водных объектов¹. Один из аспектов представленного направления исследований основан на учете все возрастающего разнообразия и количества идентифицируемых в воде водных объектов химических параметров загрязнения, т. е. на комплексности загрязненности воды.

Количество обнаруженных в воде водного объекта ингредиентов и показателей качества – простая и достоверная характеристика загрязненности водного объекта. Понятие «комплексность загрязненности воды водных объектов» отражает соотношение числа разнородных элементов химического состава, по которым наблюдается нарушение нормативных требований по их содержанию в воде, и общего количества изучаемых компонентов¹. Рост комплексности загрязненности воды указывает на то, что превышение ПДК происходит по большему перечню ингредиентов и на формирование качества воды оказывает значительное влияние антропогенный фактор, а значит, более обоснованным становится использование при оценке качества воды комплексного подхода.

Количественной характеристикой комплексности загрязненности воды является коэффициент комплексности загрязненности. Коэффициент комплексности загрязненности (К, %) – относительный косвенный показатель степени загрязненности поверхностных вод. Он показывает соотношение в каждой пробе воды количества загрязняющих веществ, содержание которых в течение календарного года превышает действующие нормативы либо границы естественных колебаний концентраций, к общему количеству изучаемых компонентов химического состава воды водных объектов [2]. Расчет коэффициентов комплексности каждого вида проводится по обоснованно подготовливаемым перечням показателей загрязненности воды, которые должны включать как сведения по основному химическому составу, характерному для рассматриваемого водного объекта в изучаемом створе, пункте наблюдений, так и возможным специфическим загрязняющим веществам¹, что обеспечивает сравнимость результатов как с гидрографической точки зрения, так и по административным делениям и пр.

Привязка сроков отбора проб воды водных объектов на химический анализ к характерным фазам их гидрологического режима в соответствии с одним из основных принципов организации государственного режимного мониторинга за состоянием и загрязнением поверхностных вод суши² в определенной степени позволяет учитывать влияние внутри- и межгодовой изменчивости водности водных объектов при проведении комплексной оценки загрязненности поверхностных вод.

² РД 52.24.309-2016. Организация и проведение режимных наблюдений за загрязнением поверхностных вод суши. Ростов-на-Дону: Росгидромет, ФГБУ «ГХИ», 2011. 103 с.

Примеры функционирования коэффициента комплексности загрязненности воды (K , %) различных водных объектов Каспийского и Тихоокеанского гидрографических районов по данным государственной наблюдательной сети за многолетний период, их внутри- и межгодовых изменений во времени и пространстве показаны на рис. 2. На текущий момент при оценке загрязненности поверхностных вод используют показатели комплексности загрязненности воды (K , %), комплексности высокой и экстремально высокой загрязненности воды ($K_{вз}$ и $K_{эвз}$, %), относящиеся к виду относительных, а по степени формализации к подвиду косвенных оценок [1].

При проведении расчетов каждого из трех показателей с целью их использования для сравнительной оценки загрязненности воды в различных створах, пунктах наблюдений, участках водных объектов используют исходные данные равной представительности, т. е. должны быть идентичными перечень учитываемых ингредиентов, число взятых для рассмотрения результатов анализа, их полнота, распределение в течение рассматриваемого периода времени и т. д.

Коэффициенты комплексности высокого и экстремально высокого уровней загрязненности ($K_{вз}$, % и $K_{эвз}$, %) являются относительными косвенными показателями загрязненности воды «высокого» и «экстремально высокого» уровней. Все три коэффициента учитывают состав и количество идентифицируемых в каждой пробе воды химических веществ, т. е. степень антропогенной нагрузки, ее изменение во времени. Накопленный многолетний опыт практического использования K , $K_{вз}$ и $K_{эвз}$ позволил продолжить дальнейшее развитие этого несложного, но эффективного и легко интерпретируемого направления оценки по отдельным коэффициентам и в целом как системы.

Теоретически коэффициенты комплексности значительно зависят как от характеристик природных факторов формирования химического состава воды, так и от характера и степени антропогенного воздействия. Все три коэффициента комплексности загрязненности выражаются в процентах, от 0 до 100 %. Коэффициенты весьма чувствительны, варьируют во времени и в пространстве.

По значениям K , $K_{вз}$, $K_{эвз}$, в соответствии с c^1 , определяют категории загрязненности воды: I категория – по комплексности загрязненности; II категория – по комплексности высокого загрязнения; III категория – по комплексности экстремально высокого уровня загрязненности. Категории, определенные по K , $K_{вз}$, $K_{эвз}$, характеризуют различные уровни загрязнения воды водных объектов и имеют различный физический смысл, поэтому пользуются ими параллельно. Получаемые характеристики дополняют общую картину загрязнения каждой пробы и набора проб за оцениваемый период. По каждому коэффициенту комплексности, как правило, фиксируют отличия встречаемости проб воды с разными уровнями загрязнения. Если характеристики не совпадают, ситуацию рассматривают с разных аспектов – в режиме хронического загрязнения, наблюдаемого большую часть времени года по K_1 , дополняют ее данными аварийного загрязнения по $K_{вз}$ и рассматривают как чрезвычайную ситуацию по $K_{эвз}$.

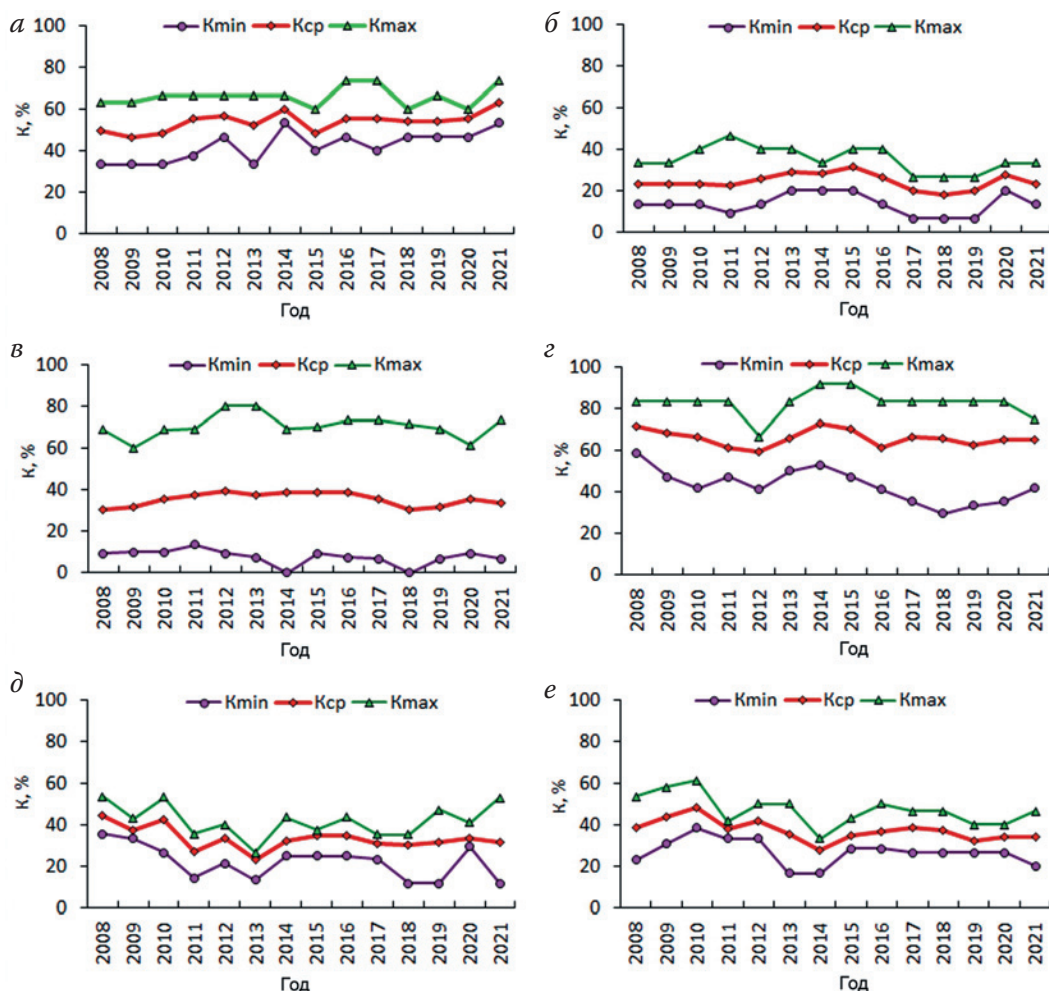


Рис. 2. Комплексность загрязненности воды водных объектов бассейна р. Камы и бассейна р. Амур: *а* – р. Белая, 10,5 км ниже г. Стерлитамака; *б* – р. Инзер, в черте д. Азово; *в* – бассейн р. Белой; *з* – р. Дачная, в черте г. Арсеньева; *д* – р. Левая Силинка, 3 км ниже пос. Горный; *е* – р. Зeya, 1 км ниже г. Свободный.
 Fig. 2. The complexity of water pollution of individual water bodies of the Kama River basin and the Amur River basin: *a*– the Belaya River, 10.5 km downstream Sterlitamak; *б* – the Inzer River, within the village of Azovo; *в* – the basin of the Belaya River (as a whole); *з* – the Dachnaya River, within the city of Arsenyev; *д* – the Left Silinka River (Silinka), 3 km downstream the settlement of Mountain; *е* – the Zeya River, 1 km downstream the city of Svobodny

С целью развития этого вида оценки и расширения сферы его использования разработана и апробирована новая процедура установления категориальности, в соответствии с которой устанавливается пятиступенчатая (от I до V) единая система категориив загрязненности воды по комплексности загрязнения, основанная на учете одновременно всех оцениваемых критериальных уровней – 1 ПДК, ВЗ и ЭВЗ.

Целью этой методики является существенное, аргументированное сжатие полного объема получаемой государственной наблюдательной сетью анали-

тической информации за определенный временной интервал, чаще за календарный год, т. е. установление единой категории степени загрязненности воды по комплексности загрязнения с учетом всех трех качественно различимых уровней загрязненности и их встречаемости.

За основу установления единой категории загрязненности воды принята бонитировка значений одновременно всех трех видов коэффициентов комплексности относительно нормативных требований и критериев обнаружения случаев высокого и экстремально высокого загрязнения воды (табл. 1). В табл. 1 приведены детализированные разбивки полных интервалов возможных значений коэффициентов комплексности для каждого показателя комплексности загрязненности воды одной пробы. При этом полные диапазоны каждого из значений K , $K_{ВЗ}$ и $K_{ЭВЗ}$ разбиты на три качественно различимые последовательные интервала характера загрязненности воды по числу наблюдаемых химических веществ, которые устанавливаются по единичным, по нескольким и по комплексу обнаруженных загрязняющих веществ.

Таблица 1. Бонитировка качественно различимых интервалов значений K , $K_{ВЗ}$, $K_{ЭВЗ}$ в пределах общих диапазонов различных видов коэффициентов от 0 до 100 %
Table 1. Bonitization of qualitatively distinguishable intervals of values of K , KVZ , KVZ within the general ranges of various types of coefficients from 0 to 100 %

Показатель комплексности загрязненности воды	Характер загрязненности воды водного объекта по числу ингредиентов и показателей качества воды					
	по единичным веществам		по нескольким веществам		по комплексам веществ, для $K_{ВЗ}$ и $K_{ЭВЗ}$ по группам веществ	
	№ интервала	интервал значений, %	№ интервала	интервал значений, %	№ интервала	интервал значений, %
K	(1)	(0; 10)	(2)	[10; 40)	(3)	[40; 100]
$K_{ВЗ}$	(4)	(0; 7)	(5)	[7; 15)	(6)	[15; 100]
$K_{ЭВЗ}$	(7)	(0; 5)	(8)	[5; 10)	(9)	[10; 100]

Примечание: Интервалы обозначают следующим образом: число слева – начало интервала, число справа – конец интервала; круглая скобка показывает, что стоящее при ней значение в интервал не входит; квадратная скобка – значение входит в интервал.

Разработанная технология одновременно учитывает и отображает количественные и качественные различия по каждой выделяемой категории соотношения в оцениваемой пробе воды уровней комплексности загрязнения (см. строки K , $K_{ВЗ}$ и $K_{ЭВЗ}$), (по ПДК, ВЗ и ЭВЗ) и встречаемости каждого вида в зависимости от числа ингредиентов и показателей качества (графы «по единичным», «по нескольким веществам», «по комплексам веществ»). Каждому сочетанию интервалов по распространенности определенного уровня загрязнения присваивают последовательно порядковый номер (от 1 до 9).

Для определения категории загрязненности воды по комплексности загрязнения с учетом уровней загрязнения и характера загрязненности воды по

каждому из определяемых в пробе загрязняющих веществ одновременно проводится идентификация существенности различий уровней загрязненности отдельными веществами по значениям каждого из критериев (ПДК, ВЗ и ЭВЗ). Учитываются характер комплексности загрязнения в зависимости от соотношения числа ингредиентов и показателей качества воды, изучаемых в водном объекте, и количеством тех из них, по которым фиксируются наблюдаемые значения комплексности загрязненности воды в соответствии с градациями значений K , $K_{ВЗ}$, $K_{ЭВЗ}$ номер интервала. При этом выделяют три группы характера загрязненности – по единичным, по нескольким, по комплексам загрязняющих веществ.

Для каждой группы разработаны частные интервалы значений K , $K_{ВЗ}$, $K_{ЭВЗ}$ по экспертным оценкам соответствующие между собой по значимости для оценки загрязненности воды (табл. 2). По номеру интервала или наблюдаемому сочетанию номеров в рассматриваемом створе, пункте наблюдений устанавливают категорию загрязненности воды за анализируемой период времени.

Таблица 2. Установление категории загрязненности воды водных объектов комплексом фиксируемых загрязняющих химических веществ
Table 2. Establishment of the category of water pollution of water bodies by a complex of polluting chemicals to be fixed

Категория загрязненности воды водных объектов	Номера интервалов, сочетания интервалов комплексности загрязнения воды, соответствующие категориям загрязненности					
I	(1);	(2);	(1) (4)			
II	(1) (5); (4);	(1) (7); (4) (7)	(1) (4) (7);	(1) (5) (7);	(2) (4)	(2) (7)
III	(1) (4) (8); (3) (4) (7);	(1) (6); (4) (8);	(1) (8); (5);	(2) (4) (7); (5) (7);	(3); (5) (8);	(3) (4); (7);
IV	(1) (4) (9); (2) (4) (8) (2) (8); (2) (9);	(1) (6) (7); (2) (5); (3) (4) (8); (1) (9);	(1) (5) (8); (2) (5) (8); (3) (5); (6)	(1) (6) (8); (2) (5) (9); (3) (5) (7); (6) (7);	(1) (8); (2) (6); (3) (7); (8);	(2) (6) (7); (3) (8); (6) (8);
V	(1) (5) (9); (3) (4) (9); (3) (6) (8); (5) (9);	(1) (6) (9); (3) (5) (8); (3) (6) (9); (6) (9)	(2) (4) (9); (3) (5) (9); (3) (9); (9);	(2) (6) (8); (3) (6); (4) (9);	(2) (6) (9); (3) (6) (7);	

Разработанная технология установления категории загрязненности воды водных объектов комплексом обнаруженных загрязняющих веществ в общих чертах основывается на результатах расчета K , $K_{ВЗ}$, $K_{ЭВЗ}$ в каждой пробе воды в каждом створе наблюдений отдельного водного объекта за химическим со-

ставом воды. В пределах государственной наблюдательной сети это производится с использованием программы «Гидрохим ПК. UKISV-сеть». По каждому их полученных значений K , $K_{ВЗ}$ и $K_{ЭВЗ}$ определяют, в соответствии с табл. 1, номер интервала для одной пробы воды или совокупность номеров для общего числа проб в течение календарного года. Затем по табл. 2 и выделенному номеру, либо набору номеров, выделяют соответствующее расчетным значениям их сочетание с последующим выходом на категорию загрязненности воды водного объекта.

Количество номеров интервалов не должно превышать три, т. к. используется три призначных характеристики. При определении сочетаний номеров интервалов значений коэффициентов комплексности загрязненности воды, соответствующих одной из категорий, расчет проводят по каждой пробе воды в створе наблюдений.

Далее выполняется группировка частных интервалов в возможные сочетания, характеризующиеся по экспертным оценкам как однородные по их загрязняющему эффекту и соответствующие определенной категории (табл. 2) загрязненности воды водного объекта по комплексности загрязнения от I «незначительная» до V «очень высокая». Дополнительно к процедуре выделения категорий загрязненности воды по комплексности загрязнения разработаны и апробированы также три вида новых оценок, характеризующих как текущее состояние, так и межгодовую динамику загрязненности воды химическими веществами.

Предложена дополнительная модификация коэффициента комплексности загрязненности – показатель межгодовой изменчивости загрязненности воды $\Pi_{и}$. Этот коэффициент отличается от применяемых тем, что соотносится с полной программой наблюдений за химическим составом воды в створах и пунктах наблюдений. Показатель межгодовой изменчивости загрязненности воды ($\Pi_{и}$) характеризует изменения, произошедшие по всему перечню определяемых в воде веществ по сравнению с предыдущим периодом (чаще календарным годом). Этот вид оценки также можно использовать отдельно или совместно для характеристики трех качественно различных уровней загрязнения относительно 1 ПДК, ВЗ и ЭВЗ: $\Pi_{и1}$, $\Pi_{иВЗ}$, $\Pi_{иЭВЗ}$.

Расчет значения показателя межгодовой изменчивости ($\Pi_{и}$) проводят по результатам химического анализа:

а) для каждой пробы воды за оцениваемый период времени (для государственной наблюдательной сети – календарный год) по формуле:

$$\Pi_{и_{fj}} = \frac{N'_{п_{рj}}}{N_{п_{рj}}} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где $\Pi_{и_{fj}}$ – показатель изменчивости загрязненности воды в f -м результате анализа для j -го створа наблюдений;

$N'_{п_{рj}}$ – число нормируемых ингредиентов и показателей химического состава воды в f -м результате анализа для j -го створа наблюдений, по которым обнаруживают концентрации в воде или значения показателя выше нормативного;

N_{npfj} – число нормируемых ингредиентов и показателей химического состава в f -м результате анализа для j -го створа наблюдений, определяемых в воде водных объектов в соответствии с программой наблюдений.

б) за оцениваемый временной интервал (для государственной наблюдательной сети – гидрологический сезон, квартал, календарный год и др.) оценивают средним значением показателя изменчивости:

$$\Pi_{I_{kj}} = \frac{\sum_{f=1}^{n_{I_{kj}}} \Pi_{I_{fj}}}{n_{I_{kj}}} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

где $\Pi_{I_{kj}}$ – показатель изменчивости загрязненности воды в j -м створе за k -й период времени;

$n_{I_{kj}}$ – число результатов химического анализа воды, для которых рассчитаны значения показателя изменчивости в j -м створе за k -й период времени.

Таким образом, «показатель изменчивости ($\Pi_{и}$)» представляет собой относительный косвенный показатель комплексности загрязненности воды водного объекта в створе, пункте наблюдений, характеризующий динамику количества и состава загрязняющих веществ при сравнении четко ограниченных периодов времени (календарный год, квартал, многолетний период и др.).

В условиях режимного мониторинга $\Pi_{и}$ отражает временные или пространственные колебания в составе загрязненности воды водных объектов по полному перечню химических параметров, охватываемых программой наблюдений, а также характеризует изменчивость спектра и количества загрязняющих воду веществ с неустойчивым, в отдельные периоды случайным и кратковременным режимом загрязненности ими поверхностных вод.

ВЫВОДЫ

Рассмотренные в статье предложения по развитию методических подходов к комплексной оценке загрязненности воды водных объектов основаны на результатах многолетнего практического внедрения метода комплексной оценки загрязненности поверхностных вод суши по гидрохимическим показателям.

Выделено и развито как перспективное, весьма простое в применении и одновременно достаточно информативное, направление оценки степени загрязненности воды по комплексности загрязнения, учитывающее изменение спектра и количества загрязняющих воду веществ в каждой отобранной пробе, класс опасности, распространенность, уровни загрязненности обнаруживаемых в поверхностных водах химических веществ, их количество и др. Кратко охарактеризованы результативность и доступность используемых оценок на основе учета комплексности загрязненности воды в створах, пунктах наблюдений, отмечены возможные перспективы повышения чувствительности, точности коэффициентов комплексности загрязнения химическими веществами.

Разработана, апробирована и предложена к практическому использованию технология установления единой категории загрязненности воды по комплексности загрязнения одновременно с учетом трех критериальных уровней (ПДК, ВЗ и ЭВЗ), позволяющая однозначно и оперативно охарактеризовать за-

грязненность воды с учетом комплекса обнаруживаемых загрязняющих веществ с качественно различимыми уровнями загрязнения.

Разработан новый, очень простой, однако достаточно чувствительный оценочный коэффициент «показатель изменчивости ($\Pi_{и}$)», позволяющий однозначно и обоснованно оценить межгодовые и многолетние колебания загрязненности воды разного уровня как относительно допустимого, так и высокого, а также экстремально высокого видов загрязнения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Емельянова В.П. Методология и методы комплексной оценки загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. г. Ростов-на-Дону, 2006. 25 с.
2. Справочник по гидрохимии. Справочник специалиста / под ред. А.М. Никанорова. Л.: Гидрометеиздат, 1989. С. 241–250.
3. Никаноров А.М. Научные основы мониторинга качества вод. СПб.: Гидрометеиздат, 2009. 576 с.
4. Никаноров А.М., Емельянова В.П. Комплексная оценка качества поверхностных вод суши // Водные ресурсы. 2005. Т. 32. № 1. С. 61–69.
5. Емельянова В.П., Данилова Г.Н. Опыт предварительной оценки степени загрязнения водных объектов по величине условного коэффициента комплексности // Мат-лы Всесоюзной конф., Харьков, 1979. С. 126–128.
6. Найто М. Упорядочение индексов, характеризующих состояние окружающей среды // Канкё канри. Токио. Япония. 1983. № 7. С. 2–17.
7. Bilgrami K.S., Kumar Sheo, Sahay S.S. Use of quantitative and qualitative indices for evaluating water quality of the Ganga // *Proceeding of the Indian National Science Academy*. В. 1993. Vol. 59. No.1. P. 59–65.
8. Deininger R.A. Newsome D.H. Water quality indices – a Comparison of Experts' Opinions // *Water Science Technology York*, 1984. Vol. 16. No. 5–7. P. 499–510.
9. Dojlodo I., Woyciechowska Y., Stojda A. Index jakosci wodi a dotychczas stosowana metoda // *Cospodarcka wodna*. 1986. Vol. 46. No. 1. P. 23–25.
10. House Margaret A. A water quality index vor river management // *Institute water and environmental management*, 1989. Vol. 3. No. 14. P. 336–344.
11. House M., Ellis I.B. Water quality index: An additional management tool? // *Water Ski and Technology*, 1981. Vol. 13. No. 17. P. 414–423.
12. Lascombe C., Cardot D. Connaissance et cartographie de la pollution de eaux corantes // *Bulleten Ecology*, 1984. Vol. 15. No. 1. P. 39–45.
13. Lohani B.N., Mustapha N. Stochastic water quality index // *Environmental Technology Letters*, 1982. Vol. 3. No. 11. P. 521–528.
14. Sharifi Mozafar / Assessment of surface quality by an index system in Anzall basin // *YAHS Publ*. 1990. No. 197. P. 63–171.
15. Simonyi Peter. A new cartographical method for mapping running waters/ // 14th Wald Conf. Inf. Cartogr. Assoc. Budapest, 17–24 Aug., 1989: Abstr. Budapest, 1989. 279 pp.
16. Smith David G. A new form of water quality index for rivers and streams // *Water Science And Technologies*, 1989. Vol. 21. No. 2. P. 123–127.

REFERENCES

1. Yemelyanova V.P. Methodology and methods of integrated assessment of surface water pollution rate by the hydro/chemical indicators. Abstract of the candidate of geographical science thesis. Rostov-na-Donu, 2006. 25 p. (In Russ.).
2. Reference book on hydro/chemistry. Expert's reference book. Edited by. A.M. Nikanorov. L.: Gidrometeoizdat, 1989. Pp. 241–250 (In Russ.).
3. Nikanorov A.M. Scientific foundations of water quality monitoring. SPb.: Gidrometeoizdat. 2009. 576 p. (In Russ.).

4. Nikanorov A.M., Yemelyanova V.P. Integrated assessment of inland surface water quality. *Water resources*. 2005. Vol. 32. №1. P. 61–69 (In Russ.).
5. Yemelyanova V.P., Danilova G.N. Experience in tentative assessment of the water bodies' pollution rate according to the value of the complexity index. *Proceedings of the All-Union conference*. Kharkov, 1979. P. 126–128 (In Russ.).
6. Nayto M. Ordering of the indices that characterize the environment status. *Kankë kanri*. Tokio, Japan, 1983. № 7. P. 2–17 (In Russ.).
7. Bilgrami K.S., Kumar Sheo, Sahay S.S. Use of quantitative and qualitative indices for evaluating water quality of the Ganga. *Proceeding of the Indian National Science Academy*. B. 1993. 59. № 1. P. 59–65.
8. Deininger R.A., Newsome D.H. Water quality indices – a Comparison of Experts' Opinions". *Water Science and Technology*. York, 1984. 16. № 5–7. P. 499–510.
9. Dojlodo I., Woyciechowska Y., Stojda A. Index jakosci wodi a dotychczas stosowana metoda. *Cospodarcka wodna*. 1986. Vol. 46. № 1. P. 23–25.
10. House Margaret A. A water quality index vor river management. *Institute water and environmental management*, 1989. 3. № 14. P. 336–344.
11. House M., Ellis I.B. Water quality index: An additional management tool? *Water Science and Technology*. 1981. 13. № 17. P. 414–423.
12. Lascombe C., Cardot D. Connaissance et cartographie de la pollution de eaux corantes. *Bulletin of Ecology*. 1984. 15. N 1. P. 39–45.
13. Lohani B.N., Mustapha N. Stochastic water quality index. *Environmental Technology Letters*, 1982. 3. № 11. P. 521–528.
14. Sharifi Mozafar. Assessment of surface quality by an index system. *Anzall basin. YAHS Publ.* 1990. № 197. P. 63–171.
15. Simonyi Peter. A new cartographical method for mapping running waters. 14th Wald Conf. *Inf. Cartogr. Assoc.* Budapest, 17-24 Aug., 1989; Abstr. Budapest, 1989. P. 279.
16. Smith David G. A new form of water quality index for rivers and streams. *Water Science and Technology*. 1989. 21. № 2. P. 123–127.

Сведения об авторах:

Емельянова Валентина Петровна, канд. геогр. наук, старший научный сотрудник, лаборатория научно-методического руководства системой гидрохимических наблюдений и обобщения информации, ФГБУ «Гидрохимический институт», 344090, Россия, г. Ростов-на-Дону, пр-т Стачки, 198; ORCID: 0009-0004-3634-1445; e-mail: yemelyanova1945@mail.ru

Оленикова Наталия Николаевна, младший научный сотрудник, лаборатория научно-методического руководства системой гидрохимических наблюдений и обобщения информации, ФГБУ «Гидрохимический институт», 344090, Россия, г. Ростов-на-Дону, пр-т Стачки, 198; ORCID: 0009-0003-5504-5222; e-mail: listopadova-natalija@rambler.ru

About the authors:

Valentina P. Yemelyanova, Candidate of Geological Sciences, Senior Researcher, Laboratory of Scientific and Methodological Guidance of the System of Hydro/chemical Observations and Generalization of Information, "Hydro/chemical Institute", pr. Stachki, 198, Rostov-on-Don, 344090, Russia; ORCID: 0009-0004-3634-1445; e-mail: yemelyanova1945@mail.ru

Natalia N. Olennikova, Junior Researcher, Laboratory of Scientific and Methodological Guidance of the System of Hydro/chemical observations and Generalization of Information, "Hydrochemical Institute", pr. Stachki, 198, Rostov-on-Don, 344090, Russia; ORCID: 0009-0003-5504-5222; e-mail: listopadova-natalija@rambler.ru

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

Е.И. Громадская  , О.М. Таврыкина 

 elena.gromadskaya@yandex.ru

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

АННОТАЦИЯ

Актуальность. В настоящее время 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. **Методы.** Представлены разработанные критерии идентификации сильно измененных водных объектов применительно к Республике Беларусь на основе анализа международного опыта стран Европейского Союза, России, Казахстана, Армении, Азербайджана. **Результаты.** Сформулированы условия, при которых водный объект будет определен как кандидат для последующего включения в перечень сильно измененных водных объектов. Разработанные и научно обоснованные критерии выделения и классификации сильно измененных водных объектов позволят обосновать недостижение поверхностным водным объектом отличного или хорошего экологического состояния при возможности иметь хороший экологический потенциал.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: гидробиологические показатели, гидроморфологические характеристики, сильно измененный водный объект, экологическое состояние.

Для цитирования: Громадская Е.И., Таврыкина О.М. Критерии выделения категории сильно измененных поверхностных водных объектов в Республике Беларусь на основе анализа международного опыта // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2023. № 6. С. 21–32. DOI: 10.35567/19994508_2023_6_2.

Дата поступления 27.09.2023.

NORMS FOR IDENTIFYING A CATEGORY OF HEAVILY MODIFIED WATER BODIES IN BELARUS BASED ON THE ANALYSIS OF INTERNATIONAL EXPERIENCE

Alena I. Hramadskaya  , Aksana M. Taurykina 

 elena.gromadskaya@yandex.ru

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

ABSTRACT

Relevance. Currently, in the Republic of Belarus there is a need to define norms for the identification and classification of surface water bodies that are of natural origin, but which cannot be classified as natural, since they have constant and irreversible changes in hydromorphological

and, as a consequence, hydrological characteristics. In international practice, such water bodies are classified as heavily modified water bodies (HMWB). **Methods.** The article presents the developed criteria for identifying HMWB, in relation to the Republic of Belarus, based on an analysis of the international experience of the countries of the European Union, Russia, Kazakhstan, Armenia, Azerbaijan. **Results.** The conditions have been determined under which a water body will be identified as a candidate for HMWB. Developed and scientifically based criteria for the identification and classification of HMWB will make it possible to prove the impossibility of a surface water body to achieve excellent or good ecological status, while having good ecological potential.

Keywords: hydro/biological indicators, hydro/morphological characteristics, identification criteria, irreversible changes, heavily modified water body, physical transformations, ecological state.

For citation: Hrmadskaya A.I., Taurikina A.M. Norms for identifying a category of heavily modified water bodies in Belarus based on the analysis of international experience. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2023. No. 6. P. 21–32. DOI: 10.35567/19994508_2023_6_2.

Received 27.09.2023.

ВВЕДЕНИЕ

Согласно фондовым, справочным и энциклопедическим данным на территории Республики Беларусь находится более 20 000 водотоков и более 10 000 водоемов [1–3]. В настоящее время результаты исследований показывают наличие значительного количества поверхностных водных объектов, утративших свои природные гидроморфологические характеристики вследствие постоянных и необратимых физических модификаций (трансформаций), осуществленных для обеспечения определенной цели пользования (навигация, защита от затоплений, производство гидроэлектроэнергии, рыбоводство, регулирование увлажненности прилегающей территории, организация водотока-приемника сточных вод, рекреация). К таким трансформациям относятся канализование, спрямление, дноуглубление, берегоукрепление, строительство плотин [4].

Гидрографическая сеть населенных пунктов меняется вследствие заключения малых рек и ручьев в коллекторы, что имеет место во многих крупных городах, устройства стенок набережных с подсыпкой и градостроительным освоением прибрежных пойм. Водные режимы нарушаются на территориях городов при спрямлении естественных русел водотоков, устройстве каналов, каскадов водоемов [5].

На больших реках русловое регулирование выполняется преимущественно на отдельных участках (перекатах) с целью увеличения глубин воды (но не снижения уровней) за счет искусственного понижения отметок дна, спрямления отдельных излучин или строительства регуляционных сооружений. Такое регулирование неизбежно сопровождается изменением водного режима (уровенного, скоростного, водообменного). На малых и средних реках русловое регулирование, выполняемое с целью превращения рек в водоприемники, как правило, также вызывает изменение их водного режима [6].

В случае наличия постоянных, существенных и долгосрочных изменений морфологических характеристик водного объекта (площадь поверхности

воды, длина и ширина, длина береговой линии, средняя и максимальная глубины) по сравнению с природными, неизбежны изменения и гидрологических характеристик данных водных объектов (объем и уровень воды, скорость течения, расход воды за определенный период). В данном случае поверхностный водный объект уже невозможно отнести к естественному, однако и к искусственным они не относятся, т. к. изначально не были искусственно созданы, а были преобразованы из естественных. В данном случае однозначно классифицировать водный объект в соответствии с требованиями Водного кодекса Республики Беларусь¹ невозможно и, соответственно, невозможно определить для него адекватные природоохранные требования.

В международной практике в отношении водных объектов, имеющих естественное происхождение (реки, ручьи, озера), но в тоже время характеризующихся значительными физическими изменениями, используется понятие сильно измененный водный объект (СИВО). Идентификация СИВО обычно осуществляется на первом этапе разработки Планов управления речными бассейнами (ПУРБ) и Схем комплексного использования и охраны водных объектов (СКИОВО) по результатам делиниации водных объектов (водных тел)².

При этом Водная рамочная директива³, основной европейский документ, регламентирующий управление водными ресурсами стран Евросоюза, допускает понижение цели достижения хорошего экологического состояния (статуса) для данной категории поверхностных водных объектов. Согласно Водной рамочной директиве на поверхностные водные объекты, отнесенные к СИВО, не распространяются требования по достижению ими хорошего экологического состояния (статуса), а устанавливаются лишь требования по хорошему экологическому потенциалу, что предполагает более низкие экологические стандарты.

Проведенный анализ международного опыта выделения категории СИВО в странах Европейского Союза, в Российской Федерации, а также в Республике Казахстан, Республике Армения и Азербайджанской Республике показал, что подходы, применяемые в ЕС, в настоящее время законодательно закреплены только Водным кодексом Республики Армения. В Российской Федерации, Республике Казахстан, Азербайджанской Республике понятие «сильно измененные водные объекты» используется, однако законодательно ни критерии, ни принципы их применения и охраны не закреплены.

В Беларуси управление водными ресурсами осуществляется в соответствии с Водным кодексом Республики Беларусь на основе бассейнового прин-

¹ Водный кодекс Республики Беларусь от 30 апреля 2014 г., №149-З. Принят Палатой представителей 2 апреля 2014 г., одобрен Советом Республики 11 апреля 2014 г. // Эталон. Законодательство Республики Беларусь // Национальный центр правовой информации Республики Беларусь. 2022. Режим доступа: <https://etalonline.by/document/?regnum=hk1400149>.

² Охрана окружающей среды и природопользование. Гидросфера. Требования к разработке, составлению и оформлению проектов планов управления речными бассейнами. ТКП 17.06-14-2017 (33140).

³ Директива 2000/60/ЕС Европейского парламента и Совета (Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council establishing a framework for the Community action in the field of water policy): принята 23 октября 2000 г. Режим доступа: https://ec.europa.eu/environment/water/water-framework/index_en.html.

ципа. Результаты разработки Плана управления бассейном реки Припять (на территории Беларуси) свидетельствуют о том, что только 14,5 % речных водных объектов и 26 % озерных водных объектов близки к своему природному состоянию. Остальные поверхностные водные объекты были изменены в связи с проведением различных инженерных мероприятий⁴.

В Республике Беларусь в 1960–1970 годы проведена масштабная мелиорация, в результате которой значительное количество водотоков было спрямлено, канализовано, углублено [7]. Большое количество искусственных и сильно измененных водных объектов обусловлено наличием в бассейне р. Припяти 735 действующих дренажных систем для мелиорации земель, в основном – для сельскохозяйственных целей. В этом контексте преобладающими гидроморфологическими изменениями являются выпрямление и углубление русел и каналов, регулирование речного стока гидротехническими сооружениями, такими как плотины, дамбы, шлюзы, польдерные системы, в т. ч. для защиты от наводнений [8].

Результаты проводимой в Беларуси инвентаризации поверхностных водных объектов⁵, в т. ч. в ходе полевых работ на местности, свидетельствуют о наличии участков водотоков (в основном для малых рек и ручьев), имеющих пересохшее русло [9]. Зачастую, особенно в бассейне Припяти, в южной части страны, водный объект (ручей) вовсе отсутствует на местности. Помимо последствий влияния изменения климата причиной этого могут быть значительные физические преобразования морфологических характеристик водотока.

В Беларуси в настоящее время законодательно не закреплено понятие «сильно измененный водный объект». Однако Законом Республики Беларусь «Об охране окружающей среды»⁶ определены понятия «природный объект», «природно-антропогенный объект» и «антропогенный объект», что может служить основой для определения понятия СИВО.

Таким образом, для Республики Беларусь назрела необходимость внесения изменений в действующее законодательство в водной сфере в части выделения категории СИВО при классификации поверхностных водных объектов, а также разработки и научного обоснования критериев идентификации таких объектов и принципов их дальнейшего использования с целью предотвращения истощения и улучшения экологического состояния.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящее время в Беларуси в рамках государственной научно-технической программы разработаны и научно обоснованы критерии выделения и идентификации СИВО на основе международного опыта применительно к

⁴ План управления бассейном реки Припять. 2022 г. Режим доступа: http://www.cricuwr.by/plan_pr/.

⁵ О порядке инвентаризации поверхностных водных объектов: Постановление Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь от 28 октября 2022 № 53. Режим доступа: <https://minpriroda.gov.by/ru/news-ru/view/utverzhdjen-porjadok-inventarizatsii-poverxnostnyx-vodnyx-objektov-4533/>.

⁶ Об охране окружающей среды: Закон Республики Беларусь от 29 ноября 1992 г. № 1982-XI: в редакции Закона от 18 декабря 2019 г. № 272-З.

Республике Беларусь⁷ [11]. Данные критерии основаны на анализе руководящих документов к стратегии реализации Водной рамочной Директивы, технических нормативно-правовых актов разработки Планов управления речными бассейнами и Схем комплексного использования и охраны водных объектов, а также Водных кодексов Республики Беларусь, Российской Федерации, Республики Армения, Республики Казахстан, Азербайджанской Республики.

Основными критериями отнесения поверхностного водного объекта к СИВО являются:

- критерий 1 – «естественное происхождение водного объекта»;
- критерий 2 – «наличие определенной цели пользования»;
- критерий 3 – «наличие постоянных и необратимых изменений гидроморфологических характеристик водного объекта»;
- критерий 4 – «нарушение непрерывности течения»;
- критерий 5 – «невозможность достижения определенной цели пользования, для которой используется СИВО, иными средствами».

Потенциальными СИВО являются объекты, где изменения гидроморфологических характеристик являются прямым или косвенным следствием физических изменений, которые были произведены с водным объектом для обеспечения определенной цели пользования. В случае, когда определенная цель пользования привела к модификации водного объекта (строительство плотины в русле реки, канализование русла), а восстановление его природных характеристик повлечет прекращение осуществления необходимой цели пользования – водный объект следует рассматривать как потенциальный СИВО. Если водный объект модифицирован вследствие влияния иного фактора (климат), но при этом восстановление водного объекта затрагивает его действующее использование (требуется прекратить использование/выполнить не в полном объеме) – водный объект также следует рассматривать как потенциальный СИВО. При временных или периодически существенных гидрологических изменениях водный объект не определяется как СИВО.

Нарушение непрерывности течения воды обусловлено размещением подпорных гидротехнических сооружений в руслах водотоков (плотины русловых водохранилищ и прудов, судоходных шлюзов, шлюзов-регуляторов, труб-регуляторов, водосбросов) и оказывает непосредственное влияние на ограничение ареала обитания водной флоры и фауны, а также вызывает нарушение природного гидрологического режима⁸. Нарушение непрерывности течения реки вследствие строительства плотины, перегораживающей реку, обусловлено определенной целью водопользования – гидроэнергетика, рыбоводство. Антропогенная нагрузка препятствует естественному функционированию водного объекта (водотока или водоема), изменяет биологические, физические и гидрологические характеристики. Оценка степени антропоген-

⁷ Разработать и научно обосновать критерии для выделения категории сильно измененных (СИВО) и искусственных (ИВО) водных объектов с учетом международной практики // Отчет о НИОКР. РУП «ЦНИИКИВР, рук. Е.И. Громадская, Минск, 2023.

⁸ Делиниация поверхностных водных объектов в бассейне реки Припять на территории Беларуси // Заключительный технический отчет. РУП «ЦНИИКИВР». Минск. 26 с.

ной нагрузки не является основным критерием для представления водного объекта (его части) в претенденты на СИВО, однако может учитываться при комплексной оценке степени антропогенной измененности водного объекта по совокупности разработанных критериев. При этом производится оценка водопользования (объем изъятной воды из поверхностного водного объекта, объем сброса сточных вод, цель использования).

Поверхностные водные объекты, относящиеся к потенциальным СИВО, обычно испытывают антропогенную нагрузку по причине изменения режима водного объекта (изъятие значительного объема поверхностных вод, сброс сточных вод). В случае, когда объем изымаемой воды вызывает значительное изменение гидрологических характеристик (уменьшается уровень воды, расход воды в единицу времени), такой водный объект должен быть оценен и по другим критериям как потенциальный СИВО.

В Республике Беларусь в рамках расчета и предоставления данных по показателю ЦУР 6.4.2 оценивается интенсивность использования запасов пресной воды (водный стресс) [10]. Для идентификации СИВО данный показатель будет применяться в случае, когда расход воды существенно изменен (уменьшен) за счет интенсивности водопользования.

Основной причиной, по которой Водная рамочная директива ЕС допускает недостижение хорошего и отличного экологического состояния СИВО, является невозможность достижения отличного экологического статуса [11]. Причиной недостижения отличного экологического статуса водного объекта по гидроморфологическим показателям могут быть:

- техническая неосуществимость, т. е. невозможность вернуть водный объект в естественное состояние;
- несоразмерность затрат на преобразование водного объекта (потенциальный экономический ущерб).

Основные мероприятия по восстановлению гидроморфологических характеристик водного объекта могут быть направлены:

- на восстановление меандра (для водотоков);
- восстановление связи водного объекта и его поймы (удаление дамб, берегоукреплений);
- восстановление непрерывности течения (удаление плотин);
- восстановление берега и водной среды.

Если меры по восстановлению водного объекта, необходимые для достижения им хорошего или отличного экологического состояния (по гидрохимическим, гидробиологическим, гидроморфологическим показателям), окажут существенное негативное влияние на определенную цель использования (в т. ч. если понадобится прекратить данную цель использования), эти водные объекты можно отнести к категории СИВО: т. к. одна из составляющих экологического статуса не может быть обеспечена на отлично, такой водный объект никогда не сможет достичь отличного экологического состояния. Основная природоохранная цель для него – хороший экологический потенциал.

Для идентификации всех потенциальных СИВО на территории Республики Беларусь при помощи средств географических информационных систем на

основе данных космоснимков, данных дистанционного зондирования Земли БелПСХАГИ⁹ будет проведена работа по их выделению в соответствии с разработанными критериями с представлением результатов в виде пространственных данных (shape-файлов), а также атрибутивных данных в формате Microsoft Excel.

Основными источниками информации для оценки водных объектов по определенным выше критериям будут данные Национальной системы мониторинга в Республике Беларусь¹⁰, полученные на гидрологических постах, в результате исследований гидроморфологических характеристик водных объектов, результаты ранее проведенных исследований (разработка Планов управления речными бассейнами, анализ водопользования, инвентаризация поверхностных водных объектов), а также материалы проведенных полевых экспедиционных исследований.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Таким образом, на основе анализа действующих в Республике Беларусь нормативных правовых актов в области оценки экологического состояния водных объектов по совокупности гидроморфологических, гидробиологических и гидрохимических показателей^{11,12,13} определены следующие условия (не обязательно присутствие всех, достаточно наличия одного из нижеперечисленных условий), при которых водный объект будет определен как кандидат для включения в перечень СИВО:

- более 35 % водотока имеет изменение конфигурации (извилистости) русла (спрямление, углубление);
- более 35 % водотока имеет изменение в продольном или поперечном профиле (регулирование, дноуглубление, дноукрепление, наличие водопускных труб);
- более 15 % водного объекта заняты искусственными донными отложениями (бетонные укрепления, габионовые сетки, валуны);
- более 50 % водного объекта характеризуется присутствием внутрирусловых особенностей (пороги, острова, мелководья, откосы, образованные изъятием гравия ямы, дренаж);

⁹ Георесурс данных дистанционного зондирования Земли (БелПСХАГИ). Режим доступа: <https://beldzz.by/uslugi/georesurs-dannykh-dzz.php>.

¹⁰ Национальная система мониторинга в Республике Беларусь. Режим доступа: <https://www.nsmos.by/content/150.html>.

¹¹ Охрана окружающей среды и природопользование. Аналитический контроль и мониторинг. Руководство по оценке гидроморфологических показателей состояния рек: СТБ 17.13.04-02-2013/EN 15843:2010. Минск: Госстандарт, 2012. 28 с.

¹² Охрана окружающей среды и природопользование. Аналитический контроль и мониторинг. Руководство по определению степени изменения гидроморфологических показателей состояния рек: СТБ 17.13.04-01-2012/EN 14614:2004. Минск: Госстандарт, 2012. 19 с.

¹³ Охрана окружающей среды и природопользование. Отбор проб и проведение измерений, мониторинг. Порядок отнесения поверхностных водных объектов (их частей) к классам экологического состояния (статуса). 17.13-24-2021 (33140). Утв. и введ. Постановлением Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь от 24 декабря 2021 г. № 18-Т. Минск: Минприроды, 2021. 36 с.

- характер течения водотока сильно изменен (наличие плотин, мостов, бродов, водозаборов);
- расход воды водотока существенно изменен за счет интенсивности водопользования (водный стресс), уменьшение на 30 % и более¹⁴;
- присутствуют искусственные сооружения (не применяется к естественным барьерам, таким как озера), препятствующие миграции всех видов биоты и транспорта наносов;
- более 35 % берега подвержено жесткому берегоукреплению искусственными материалами;
- более 35 % береговой зоны (полоса растительности, примыкающая к руслу) имеет неестественный почвенно-растительный покров;
- свыше 75 % неестественного почвенно-растительного покрова за пределами береговой зоны, в т. ч. наличие искусственных водных объектов;
- неспособность русла водотока к естественному перемещению в пределах поймы (свыше 35 % участка имеет препятствия к меандрированию).

Таким образом к СИВО можно отнести сильно измененные естественные водотоки (реки, ручьи), а также сильно измененные озера, русловые водохранилища, водохранилища озерного типа образования, а также русловые пруды. Наливные пруды и наливные водохранилища не относятся к сильно измененным водным объектам, т. к. они изначально имеют искусственное происхождение и относятся к ИВО. Основным критерием искусственного поверхностного водного объекта является его искусственное происхождение, ИВО создан в результате деятельности человека (на территории, где ранее отсутствовал какой-либо водный объект), но не преобразован из естественного.

В Беларуси результаты ранее проведенных исследований описывают конкретный пример сильно измененного водного объекта – р. Мильча (суббассейна р. Уза, бассейн Днепра). Результаты проведенных в 2019–2020 гг. исследований¹⁵ подтверждают, что р. Мильча испытывает значительную антропогенную нагрузку вследствие следующих факторов:

- отведения производственных и поверхностных сточных вод КПУП «Гомельводоканал», ОАО «Гомельский химический завод» и Государственного предприятия «ГорСАП»;
- увеличения расхода воды по каналу Мильчанский на 4,0 м³/с за счет приема очищенных сточных вод от очистных сооружений КПУП «Гомельводоканал»;
- изменения трассы Мильчанского канала от места приема очищенных сточных вод до впадения в р. Уза;
- заключения участка водотока в подземный дождевой коллектор в черте г. Гомеля.

Наличие значительной антропогенной нагрузки на водоток приводит к существенному изменению гидроморфологических, гидрохимических и,

¹⁴ Методика расчета показателя 6.4.2. Интенсивность использования запасов пресной воды (водный стресс). Показатели ЦУР 6 // Государственный водный кадастр. Официальный сайт РУП «ЦНИИКИВР». Режим доступа: <http://195.50.7.216:8081/task/level4/>.

¹⁵ План управления суббассейном реки Уза // Отчет о НИР. РУП «ЦНИИКИВР», рук. К.С. Титов. Минск, 2021.

соответственно, гидробиологических показателей реки. В результате р. Мильча (водохозяйственная система «Мильчанская») разделена на участки, каждый из которых имеет различную классификацию (рисунок):

- участок 1: р. Мильча (верхняя часть) – поверхностный водный объект, река малая – естественный водный объект;
- участок 2: подземный дождевой коллектор «Мильчанский», гидротехническое сооружение – ИВО;
- участок 3: р. Мильча (нижняя часть) – поверхностный водный объект, река малая – естественный водный объект;
- участок 4: канал «Мильчанский» – поверхностный водный объект, СИВО.



Рисунок. Разделение р. Мильча на участки (классификация).
 Figure. Division of the Milcha River into sections (classification).

Результаты проведенного исследования представляют интерес с точки зрения понимания того, какое количество естественных водотоков и озер в настоящее время утратили свои природные гидроморфологические и гидрологические характеристики и, следовательно, определения основных принципов их дальнейшего использования и оздоровления. Разработанные и научно обоснованные критерии выделения и классификации СИВО и ИВО позволят обосновать возможность недостижения поверхностным водным объектом отличного или хорошего экологического состояния, но иметь хороший экологический потенциал.

Концепция отнесения водного объекта к СИВО обеспечивает и обосновывает необходимые цели использования водного объекта, направленные на решение социально-экономических задач. В то же время, отнесение к СИВО не освобождает от требований сохранения и предотвращения ухудшения экологического состояния водного объекта, ведь, несмотря на приближение характеристик водного объекта к искусственным, не предлагается относить его к ИВО.

Необходимо провести выделение сильно измененных водных объектов (определение перечня СИВО на территории Республики Беларусь) и обоснование невозможности достижения такими объектами отличного и хорошего экологического состояния, т. к. в соответствии с Национальной стратегией управления водными ресурсами в условиях изменения климата на период до 2030 года¹⁶, ожидаемыми результатами являются достижение доли поверхностных водных объектов, которым присвоен хороший и выше экологический статус – не менее 75 % к 2025 г., 85 % – к 2030 г., что соответствует также индикатору 6.3.2. «Доля водоемов с хорошим качеством воды» ЦУР 6 «Обеспечение наличия и рационального использования водных ресурсов и санитарии для всех».

Отнесение водного объекта к СИВО или ИВО позволит избежать предъявления недостижимых требований по улучшению экологического состояния поверхностных водных объектов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С целью охраны и рационального использования водных ресурсов законодательством Республики Беларусь выдвигаются требования по охране и восстановлению рек, особенно малых водотоков, до их естественного состояния. Для этого необходима процедура выявления участков рек с различной степенью нарушений их естественного состояния: подверженных изменениям и нуждающихся в охране; требующих восстановления; не подлежащих восстановлению, что и будет определено по результатам выполнения исследования.

В ходе дальнейших исследований по выделению на территории Республики Беларусь сильно измененных и искусственных водных объектов планируется провести предварительную оценку поверхностных водных объектов Беларуси по всем разработанным критериям. В рамках данного исследования будет дана оценка эффективности применения критериев, проведено их ранжирование по степени вклада в определение поверхностного объекта, признанного СИВО, с разработкой методики и предложений в проект совершенствования действующих нормативно-правовых актов в части изменений в классификации поверхностных водных объектов Республики Беларусь.

Разработанные и научно обоснованные критерии отнесения поверхностных водных объектов к СИВО и, как следствие, основные принципы их использования обеспечат предотвращение возможного ухудшения экологического состояния водных объектов, будут способствовать установлению адекватных требований по их сохранению, устойчивому и долгосрочному использованию с учетом цели пользования, для которой физические изменения были проведены.

Основные принципы использования СИВО призваны способствовать достижению, как минимум, хорошего экологического потенциала водных объектов, улучшению экологического состояния водосборной территории (в т. ч.

¹⁶ О Национальной стратегии управления водными ресурсами в условиях изменения климата на период до 2030 года. Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 22 февраля 2022 г. № 91. Национальный центр правовой информации Республики Беларусь. 2023. Режим доступа: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C22200091&p1=1>.

в условиях изменения климата), предотвращению неблагоприятных гидрометеорологических явлений (наводнения, ливневые паводки, засухи) [12]. В свою очередь устойчивое и долгосрочное осуществление необходимой цели пользования водными объектами будет способствовать экономическому развитию страны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ресурсы поверхностных вод СССР. Гидрологическая изученность. Т. 5. Белоруссия и верхнее Поднепровье / под ред. Н.Д. Шека. Л.: ГИМИЗ, 1963. 304 с.
2. Блакітная кніга Беларусі: Энцикл. / Беларус. Энцикл.; Рэдкал.: Н.А. Дзісько і інш. Мн.: БелЭн, 1994. 415 с.
3. Скарбы прыроды Беларусі: Тэрыторыі, якія маюць міжнароднае значэнне для захавання біялагічнай разнастайнасці / пад агульн. рэд. А.В. Казуліна. Мн.: Беларусь, 2002. 160 с.
4. Якушко О.Ф., Марына Л.В., Емельянов Ю.Н. Геоморфология Беларуси: уч. пособие для студентов географического факультета. Мн.: БГУ, 1999. 173 с.
5. Курочкина В.А. Водные объекты как основа организации открытых общественных пространств и инструмент трансформации урбосистем // Вестник Евразийской науки. 2020. №5. Т. 12. 24 с.
6. Пеньковская А.М., Попова Е.Н., Булак И.А. Влияние гидроморфологических изменений в речной сети на экологический статус водных объектов бассейна реки Западный Буг // Вестник Брестского государственного технического университета. 2016. № 2. С. 24–29.
7. Волчек А.А., Калинин М.Ю. Современное состояние водных ресурсов Белорусского Полесья / Природнае асяроддзе Палесся: сучасны стан і яго змены. Мат-лы Польско-Украинско-Белорусской Межд. научн. конф. Люблин-Шацк-Брест, 17–21 июня 2002 г. Ч. 1. С. 62–67.
8. Лиштван И.И., Азява Г.В., Ярошевич Л.М. Проблемы наводнений в Полесье и мероприятия по противопаводковой защите населенных пунктов и сельскохозяйственных земель // Природные ресурсы. 1999. № 2. С. 49 – 58.
9. Волчек А.А., Калинин М.Ю. Водные ресурсы Брестской области. Мн.: Изд. центр БГУ, 2002. 436 с.
10. Дубенок С.А., Кулаков А.Ю. Имплементация показателей целей устойчивого развития, связанных с водой: опыт Республики Беларусь. Мн.: Четыре четверти, 2020. 126 с.
11. Мониторинг, использование и управление водными ресурсами бассейна р. Припять / под общ. ред. М.Ю. Калинина и А.Г. Ободовского. Мн.: Белсэкс, 2003. 269 с.
12. Климат Беларуси / под ред. В.Ф. Логинова. Мн.: Институт геологических наук НАН Беларуси, 1996. 234 с.

REFERENCES

1. Surface water resources of the USSR. Hydrological knowledge. Vol. 5. Belarus and the upper Dnieper region. Ed. N.D. Shek. Leningrad, 1963. 304 p. (In Russ.).
2. Blue book of Belarus: Encyclopedia. Belarus. Encycl.; Ed. N.A. Dzisko. Mn.: BelEn, 1994. 415 p.
3. Treasures of the nature of Belarus: Things that may be of international significance for the acquisition of biological diversity. Ed. A.V. Kazulin. Mn.: Belarus, 2002.
4. Geomorphology of Belarus: Textbook for students of the Faculty of Geography / O.F. Yakushko, L.V. Maryina, Yu.N. Emelyanov. Ed. O.F. Yakushko. Mn.: BSU, 2000 (In Russ.).
5. V.A. Kurochkina. Water bodies as the basis for organizing open public spaces and a tool for transforming urban systems / *The Edrasian Scientific Journal*, Moscow, 2020 (In Russ.).
6. Penkovskaya A.M., Popova E.N., Bulak I.A. The influence of hydromorphological changes in the river network on the ecological status of water bodies in the Western Bug River basin. *Bulletin of the Brest State Technical University*. 2016. No. 2. P. 24–29 (In Russ.).
7. Volchek A.A., Kalinin M.Yu. The current state of water resources in Belarusian Polesie. *Materials of the Polish-Ukrainian-Belarusian International. scientific conf. Lublin-Shatsk-Brest, June 17-21, 2002 Part 1. Brest, 2002. P. 62–67 (In Russ.).*

8. Lishtvan I.I., Azyava G.V., Yaroshevich L.M. Problems of floods in Polesie and measures for flood protection of settlements and agricultural lands. *Natural Resources*. 1999. No. 2. P. 49–58. (In Russ.).
9. Volchek A.A., Kalinin M. Yu. Water resources of the Brest region. Mn.: Publishing Center of BSU, 2002. 436 p. (In Russ.).
10. Dubenok S.A. Implementation of indicators of sustainable development goals related to water: experience of the Republic of Belarus. Minsk: Four Quarters, 2020. 126 p. (In Russ.).
11. Monitoring, use and management of water resources in the river basin. Pripyat. Ed. M.Yu. Kalinin and A.G. Obodovsky. Mn.: Belsens, 2003. 269 p. (In Russ.).
12. Climate of Belarus. Ed. V.F. Loginova. Mn.: Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Belarus, 1996. 234 p. (In Russ.).

Сведения об авторах:

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

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

About the authors:

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

Aksana M. Tavyrykina, Assistant professor, Candidate of Sciences in Agriculture, Head of hydrology and water protection areas department of the Central Research Institute for Complex Use of Water Resources, ul. Slavinskogo, 1/2, Minsk, 220086, Belarus; ORCID 0009-0008-4662-0690; e-mail: tavyrykina@mail.ru

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

О.М. Розенталь¹  , В.Х. Федотов² 

 fvh@inbox.ru

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. **Методы.** Исследованы показатели качества речных вод с помощью технологии искусственных нейронных сетей, позволяющей строить регрессии, описываемые не только аналитической формой, доступной стандартным методам. Суть методики сводится к построению, с помощью пакета программ Statistica Neural Networks, искусственной нейросети достаточно хорошо аппроксимирующей экспериментально наблюдаемые зависимости, связанные с влиянием расхода воды, сезона и концентраций взвесей на концентрацию соединений железа и цветных металлов – меди, цинка, никеля. **Результаты.** Выполненные с использованием нейросетевых методик экологические исследования показали, что ряд динамических и химических характеристик воды р. Исеть в окрестностях Екатеринбурга взаимно скоррелированы. Наибольшие нейрокорреляции выявлены между концентрацией взвешенных частиц, а также расходом воды и соединениями металлов. Обнаруженные высокие веса нейросвязей исследованных показателей и значительные в ряде случаев множественные коэффициенты нейрокорреляции позволяют допустить влияние пульсаций скорости турбулентного речного потока на распределение загрязняющих воду веществ, характеризующееся, как известно, высокой вариабельностью. Предположительно такая вариабельность обусловлена сочетанием физико-химических процессов микроструктурной самоорганизации и турбулентности. Полученная информация может быть полезна для понимания природы вариабельности показателей состава и свойств воды и в дальнейшем для повышения эффективности прогноза качества водных ресурсов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: качество воды, производственные сбросы, гидрохимический створ, искусственные нейронные сети, нейросетевой анализ, р. Исеть.

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН Институт водных проблем РАН (тема FMWZ-2022-0002).

Для цитирования: Розенталь О.М., Федотов В.Х. Исследование закономерностей вариации показателей качества воды реки Исеть с использованием нейросетевых методик // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2023. № 6. С. 33–43. DOI: 10.35567/19994508_2023_6_3.

Дата поступления 14.08.2023.

INVESTIGATION OF PATTERNS OF VARIATION IN WATER QUALITY INDICATORS OF THE ISET RIVER WITH THE USE OF NEURONET METHODS

Oleg M. Rosenthal¹  , Vladislav K. Fedotov² 

 fvh@inbox.ru

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

² *I.N. Ulyanov Chuvash State University, 428015 Cheboksary, Russia*

ABSTRACT

Relevance. Improving the efficiency of management decisions using modern artificial intelligence methods is relevant due to the increased interest in information technologies in the national economy and environmental protection. **Methods.** The article examines the quality indicators of river waters using the technology of artificial neural networks of the Statistica Neural Network software package. **Results.** Water-ecological studies performed using neural network techniques have shown that a number of dynamic and chemical characteristics of the water of the Iset River in the vicinity of Yekaterinburg are mutually correlated. The detected high weights of the neural connections of the studied indicators and, in some cases, increased multiple coefficients of neurocorrelation allow us to assume the influence of pulsations of the turbulent river flow velocity on the distribution of water pollutants, characterized, as is known, by high variability. It is assumed that such variability is due to a combination of physicochemical processes of microstructural self-organization and turbulence. In particular, the features of hydrochemical dynamics in this case may be due to forward and reverse energy cascades in a two-dimensional turbulent water flow in combination with micro-delamination of pollutants. The information obtained can be useful for understanding the nature of variability in the composition and properties of water, and in the future to improve the efficiency of forecasting the quality of water resources.

Keywords: water quality, industrial discharges, hydro/chemical gate, artificial neural networks, neural network analysis, weights of neural network connections.

Financing: The work has been done within the framework of governmental assignment of the Russian Academy of Sciences Institute of Water Problems (FMWZ-2022-0002).

For citation: Rosenthal O.M., Fedotov V.K. Investigation of patterns of variation in water quality indicators of the Iset River with the use of neuronet methods. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2023. No. 6. P. 33–43. DOI: 10.35567/19994508_2023_6_3. Received 14.08.2023.

ВВЕДЕНИЕ

Оценка и прогноз качества речных вод демонстрируют, как правило, высокую вариабельность контролируемых показателей. Непрерывное перераспределение растворенных в природной воде веществ происходит под воздействием внешних сил и массообмена [1–5]. Однако часто только этими причинами не удается объяснить неизменно высокий коэффициент вариации состава речных вод. Высказываются предположения о значимости при этом сложных, неизвестных ранее, динамических процессах формирования гидрохимических показателей [6–9]. Среди доводов в пользу подобных утверждений отметим значительную изменчивость контролируемых показателей в пунктах наблюдения, расположенных ниже створов «полного смешения»¹ [10], т. е. там, где она должна бы снижаться.

¹ Руководящий документ РД 52.24.309-2016. Организация и проведение режимных наблюдений за состоянием и загрязнением поверхностных вод суши. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/495872993> (дата обращения 12.03.2023).

В данной работе для исследования этих дискуссионных вопросов рассмотрена возможность и результативность использования неклассических по сравнению с обычной статистикой нейросетевых методик анализа, позволяющих учитывать как явные, так и неявные (неучтенные) факторы, способные оказывать влияние на исследуемые процессы, причем без априорного задания точного (формульного) вида этих зависимостей. Для эксперимента был выбран участок р. Исеть, крупного левого притока Тобола, в окрестностях г. Екатеринбурга. Территория водосбора данного участка реки отличается развитием металлургической промышленности, сказывающейся на качестве речной воды, вследствие чего Исеть относится к наиболее загрязненным рекам не только в бассейне Оби, но и в целом по России. Характерными загрязняющими веществами являются соединения металлов, поэтому в рамках проведенного исследования рассматривалось возможное влияние на них внутренних, ранее не учитываемых факторов.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проанализированы результаты ежемесячного мониторинга, выполненного Уральским управлением Росгидромета в 1990–2010 гг. на постах: на 5,2 км выше Екатеринбурга (пост 1), в черте города (2), на 7 км ниже (3), на 19,1 км ниже (пост 4). На каждом посту для каждого показателя учитывалось 240 значений. Полный массив данных составил 1680 значений.

Повсеместно наблюдалось хаотическое поведение контролируемых показателей, как это иллюстрирует рисунок, где приведен лишь малый фрагмент использованных данных. Очевидно, что на всех постах рассматриваемой промышленной зоны концентрация соединений меди превышает предельно допустимую в разы или в десятки раз (см. рисунок).

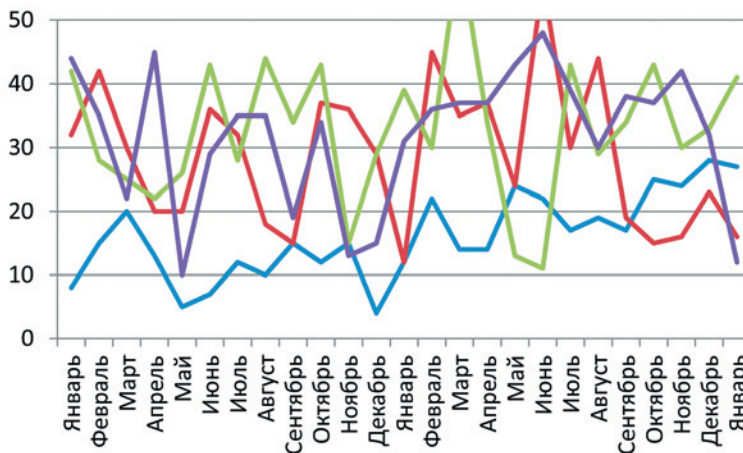


Рисунок. Результаты ежемесячного мониторинга меди (мкг/дм^3) в окрестностях Екатеринбурга на гидрохимических постах 1 (синяя линия), 2 (красная), 3 (зеленая), 4 (коричневая) в 2007–2009 гг.
 Figure. The results of monthly monitoring of copper, mkg/dm^3 , in the vicinity of Yekaterinburg at hydro/chemical posts 1 (blue line), 2 (red), 3 (green), 4 (brown) in 2007–2009.

Для решения поставленной задачи использованы методы искусственного интеллекта, позволяющие учитывать широкий диапазон влияющих факторов (в т. ч. неучтенных) без явного задания вида этих зависимостей. Основу этих методов составляют искусственные нейронные сети (ИНС), способные обучаться на примерах («обучение с учителем») и улавливать скрытые зависимости в экспериментальных данных [11–13]. Выбор структуры сети определяется экспертно, а критерием качества сети являются ошибки обучения и тестирования [12].

Перед обучением нейросети все множество исходных данных (образцов) разбивается на три подмножества: основное обучающее (*Training*) 50–70 %; проверочное (*Verifcation*) 20–30 %; тестовое (*Test*) 10–20 %². Затем производится разделение показателей на типы – входные (*Input*) и выходные (*Output*). Процесс обучения состоит в численной оценке влияния входных показателей (причин) на выходные (следствия) и осуществляется с помощью линейных (*Linear*) и нелинейных методов оптимизации (обратного распространения ошибки, *Back Propagation*), псевдо-обратных (*Psevido Invert*) и др. Обобщающими показателями, позволяющими судить о качестве обучения ИНС, являются коэффициенты корреляции и значения ее весовых коэффициентов. Эти показатели рассчитываются численно по критерию минимальной невязки между исходными и расчетными данными и характеризуют уровень влияния входных показателей на выходные.

Использование технологий искусственных нейронных сетей позволило строить регрессии, описываемые не только аналитическими зависимостями, доступными стандартным методам. Это обеспечило решение поставленной гидродинамической задачи при неизвестных закономерностях и устойчивость результата к шумам во входных данных.

В данной работе методы ИНС с применением пакета программ Statistica Neural Networks (SNN) [13] использованы для анализа влияния трех входных показателей (потенциально влияющие факторы) – расхода воды ($\text{м}^3/\text{с}$), сезона (летне-осенняя или зимне-весенняя межень (месяцы) и концентрации взвесей ($\text{мг}/\text{дм}^3$) на четыре выходных показателя (зависимые факторы) – концентрацию соединений железа ($\text{мг}/\text{дм}^3$) и цветных металлов – меди, цинка, никеля ($\text{мкг}/\text{дм}^3$). Анализировали веса связей нейросетей и статистику нейрорегрессий (характеристики их точности – множественные коэффициенты корреляции Пирсона и др.). По каждому створу исследовали и сравнивали различные подходящие для решения задач регрессии реализации архитектур нейросетей: линейные (*Linear*); нелинейные (*MLP* – многослойный перцептрон); *RBf*-сети с радиально-базисной функцией. Число нейронов на входе и в промежуточном слое сети варьировало, число нейронов на выходе сети было постоянным (*Output*=4). Параметры обучения принимались стандартными.

² В данной работе использованы различные варианты разбиений, статистика которых различалась незначительно.

Для детального исследования выбирались несколько лучших сетей, с минимальными ошибками обучения, проверки и тестирования (табл. 1). По результатам исследования многочисленных типов и архитектур сетей для дальнейшего детального анализа была выбрана линейная сеть, т. к. получаемые с ее помощью результаты наиболее стабильны и информативны. В качестве примера регрессионная статистика для последнего (нижнего) створа 4 приведена в табл. 2.

Таблица 1. Исследованные нейросети (фрагмент)
Table 1. The studied neural networks (a fragment)

Type	Inputs	Output	TError	VError	TeError	TPerf	VPerf	TePerf	Training
RBF	3	4	1.3746	2.5012	27.1149	0.25869	2.28172	0.283	KM, KN, PI
MLP	3	4	1447.8	16.483	1.37230	0.53488	0.47147	1.604	QN, PI, BP
Linear	3	4	304.851	11.6175	0.5919	0.5348	0.4714	1.604	PI

Примечание: Type – тип архитектуры сети (Linear – линейная, MLP – многослойный перцептрон и RBF – радиальная); Inputs – число нейронов на входе сети; Hidden – число нейронов в промежуточном (Hidden – скрытом) слое сети; Output – число нейронов на выходе сети; TError, VError, TeError – ошибки на обучающем, проверочном и тестовом (ошибка прогнозирования) множествах соответственно (среднеквадратичные значения ошибок в каждом отдельном случае). Ошибка обучения (TError) имеет мало значения как показатель способности модели делать прогнозы с учетом новых данных. Ошибка проверки (VError) важна при выборе сетей. Ошибка теста (TeError) дает окончательную перекрестную проверку прогнозирующих качеств сети: если цифры сильно расходятся, это может указывать на проблемы с исходными данными. Во-первых, возможно, что неправильно распределены наблюдения между тремя подмножествами, и в этом случае сеть, вряд ли, будет хорошо обобщать новые наблюдения, а кажущаяся производительность будет ненадежной. Во-вторых, может оказаться слишком мало случаев, чтобы результаты сети были надежными. Напротив, если цифры ошибок проверки и теста очень близки, то это убедительное эмпирическое свидетельство того, что сеть научилась надежно обобщать. TPerf, VPerf, TePerf измеряют производительность (меру) сети, которая указывает на ошибку предсказания. В сети с несколькими выходными переменными (как в нашем случае) показатель производительности относится только к первой выходной переменной. Training – примененные алгоритмы обучения (QN – Quasi Nuton, PI – Psevdo Invert, BP – Back Propagation и др.).

В табл. 2 относительная ошибка нейрорегрессии (S.D. Ratio) для обучающего и проверочного множеств меньше единицы (кроме Zn), т. е. стандартные отклонения по металлам существенно меньше стандартных отклонений в исходных данных. Коэффициенты корреляции (Correlation) достаточно высоки по всем металлам (кроме тестового по Fe), т. е. линейная нейросеть архитектуры «3–4» неплохо воспроизводит все исходные данные, включая те, которые не учитывались при обучении и проверке (тестовые).

Таблица 2. Статистика нейрорегрессии для сети «Linear 3-4» на створе 4
 Table 2. Neuroregression statistics for the "Linear 3-4" network on slot 4

	Tr. FE	Ve. FE	Te. FE	Tr. CU	Ve. CU	Te. CU	Tr. Zn	Ve. Zn	Te. Zn	Tr. Ni	Ve. Ni	Te. Ni
Data Mean	0.823	2.523	0.296	51.455	75.625	28.666	140.895	130.35	69.666	17.21	24.8	18.333
Data S.D.	2.666	12.330	0.220	162.718	225.953	26.102	549.935	203.036	59.045	41.491	66.553	2.886
Error Mean	0.004	-1.032	0.058	0.783	15.147	-4.704	2.875	137.895	-23.302	0.532	2.4361	-7.645
Error S.D.	1.426	5.813	0.354	87.395	176.77	25.592	319.665	1209.092	50.040	25.443	31.141	3.799
Abs E. Mean	0.667	1.332	0.252	40.266	53.460	19.843	148.269	288.843	39.716	13.658	13.455	7.645
S.D. Ratio	0.534	0.471	1.604	0.537	0.782	0.980	0.5812	5.955	0.847	0.613	0.467	1.316
Correlation	0.844	0.998	0.276	0.843	0.992	0.536	0.813	0.4816	0.998	0.789	0.987	0.904

Примечание: Data Mean – среднее значение концентрации на створе, Data Standard Deviation (S.D.) – стандартное отклонение (от среднего значения Data Mean) концентрации на створе, Error Mean – средняя ошибка (средняя остаточная разность между измеренными и расчетными (по нейросети) концентрациями на створе, Error S.D. – стандартное отклонения исходных данных от расчетных по нейросети, Abs E. Mean – абсолютная средняя ошибка (среднее арифметическое модулей разностей между исходным и расчетным значениями на створе), S.D. Ratio = Error S.D./Data S.D. относительная ошибка нейрорегрессии, Correlation – коэффициент множественной корреляции.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По имеющимся экспериментальным данным для исследованных гидрохимических постов было обнаружено:

- линейные и нелинейные нейросети при использовании различных алгоритмов обучения примерно одинаково точно улавливали возможные взаимосвязи между элементами сети для постов 1–3. Для поста 4 нелинейные нейросети показали большую по сравнению с линейными сетями точность при использовании различных алгоритмов обучения;

- не было зафиксировано заметного влияния сезонности на концентрацию металлов;

- существенное влияние на концентрации всех металлов оказывает содержание в воде взвешенных частиц, наиболее высокий вес связей нейросети при этом наблюдается для концентрации железа;

- коэффициент нейрорегрессии, характеризующий влияние расхода воды на металлы редко превышает 0,3, хотя, возможно, он оказался бы значительно выше, если бы отсутствовал эффект размывания такой зависимости из-за плохо регулируемых сбросов сточных вод многочисленными предприятиями региона.

В табл. 3 приведены усредненные значения весов связей линейной нейросети, рассчитанные для исследованных створов при разбиении входных данных на обучающее (200 строк), контрольное (40 строк) и тестовое (3 строки) множества.

Таблица 3. Веса связей нейросети «Linear 3–4»

Table 3. Weights of connections of the neural network «Linear 3–4»

	Fe	Cu	Zn	Ni
Threshold	-0.0078	-0.0131	-0.0103	-0.0215
Расход	0.33	0.228	0.20	0.28
Сезонность	0.0074	0.0052	0.0011	0.0024
Концентрация взвешенных частиц	0.85	0.82	0.83	0.83

Примечание: Threshold – веса неявных связей, соединяющих «пороговые» нейроны с соответствующим выходным нейроном, отражающие влияние неучтенных факторов на створе.

Из табл. 3 следует, что значения Threshold малы, это указывает на незначительность влияния неучтенных факторов. Под неучтенными факторами здесь понимаются любые, кроме тех, которые использовались как входные в явной форме (отметим, что это только наш, возможно, дискуссионный взгляд на интерпретацию неявных или скрытых элементов нейросети, который ранее в литературе не встречался). Влияния сезонности в рамках использованных экспериментальных данных также не выявлено. При этом проявляется положительное влияние расхода и особенно влияние концентрации взвеси на содержание металлов. Это влияние примерно одинаково, но существенно выше, чем влияние расхода воды.

Достоверность данных статистических выводов определяется репрезентативностью выборки, которую можно оценить по формуле:

$$N > W/\varepsilon,$$

где N – объем выборки,

W – число связей в сети;

ε – доля допустимых в ходе тестирования ошибок [12].

В данном случае $W=12$, $\varepsilon=0,2$ (20 %), поэтому достоверность считается удовлетворительной при $N > 60$. Последнее неравенство безусловно выполнено для использованного в работе объема выборки $N \approx 240$ по каждому створу и каждому металлу.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данные, полученные с использованием ИНС, свидетельствуют о существовании зависимостей между формированием распределений металлов и расходом воды, а также (более отчетливо) – с содержанием взвешенных частиц. На постах 2–4, расположенных в зонах интенсивных промышленных сбросов на водосборную площадь, это влияние заметно слабее, чем на посту 1, где такое загрязнение понижено. В то же время во всех случаях обнаруженные корреляции статистически значимы (не случайно отличаются от нуля).

Нетрудно объяснить высокую корреляцию концентраций металлов и взвешенных частиц процессами адсорбции. Этот результат значим для практических целей, прежде всего, при выборе метода подготовки (доочистки) речной воды. Сложнее понять природу не слишком высокой, но достоверной нейрокорреляции расхода воды с вариабельной концентрацией растворенных металлов – зависимости, неожиданно обнаруженной, но устойчиво повторяющейся в более чем полуторатысячном массиве гидрометеорологических данных. Предположения, возможные по этому поводу, вынесены в дискуссию.

ДИСКУССИЯ

Нейрокорреляция учетных вариабельных динамических и химических показателей обнаружена на всех четырех постах наблюдения. Влияние расхода воды на концентрацию металлов в зонах интенсивных промышленных сбросов заметно слабее, чем там, где такое загрязнение понижено. В то же время во всех случаях такая связь статистически значима (не случайно отличается от нуля).

Неочевидна природа данного явления. Из общих представлений о процессах в речном потоке можно предположить, что данный эффект инициирован микропульсациями речного потока в сочетании с флуктуациями структуры слабого водного электролита, каковым является природная вода [14]. Известно, что благодаря упругости сетки водородных связей воды происходит выталкивание частиц примеси к местам дефектов структуры [15]. Эти и подобные ионно-молекулярные процессы, которые «быстро нарастают ...и, в отличие от равновесных процессов, изучаемых классической термодинамикой, определяют всю дальнейшую судьбу нелинейной системы», считают ведущие ученые-физики [16]. Такой нелинейной системой является речная вода, в кото-

рой причиной указанного «быстрого нарастания» (увеличения масштаба ионно-молекулярных отклонений) могут быть прямой и обратный каскады энергии в квазидвумерной турбулентной среде [17]. Возможны, конечно, и другие причины обнаруженной связи, пополняющие ряд пока что невыясненных эффектов гидрологии [18]. Можно, например, предположить, что таков результат структурной самоорганизации в области генерации турбулентности и в поле многих сил: центробежной, Кариолиса, Эйлера и т. д. Их совокупность, как известно, создает неожиданные физические эффекты [19], среди которых парадоксы Грея, Даламбера, Эйнштейна (парадокс «чайного листа»). Возможно, что и формирование показателей качества воды в речных струях подвержено подобным явлениям, а также взаимодействиям между совокупностями примесей в соответствии с известным эффектом взаимной синхронизации слабосвязанных систем [20]. Во всяком случае, маловероятно, чтобы без участия влияющих факторов непрерывный случайный процесс повышения/понижения концентрации металлов (рисунок) мог бы быть заметно синхронизирован с переменным расходом воды. В связи с этим стоит обратить внимание на исследования полной системы уравнений механики движения жидкости [21], где показана возможность влияния на разброс примеси пульсаций, волн и вихрей речного потока.

Таким образом, необходимо принять, что обнаруженная нейрокорреляция исследованных переменных показателей обусловлена сочетанием малоизученных в настоящее время механических, физических и химических процессов, описанных в работах [16–22] и определяющих устойчивость и хаос, колебания и волны в нелинейной динамической среде, каковой является речной поток. Учет роли указанных процессов, а также развитие методов воздействия на них будут способствовать совершенствованию подходов к водохозяйственному управлению.

Авторы благодарны д-ру геогр. наук С.Д. Беляеву за ценные замечания, позволившие повысить качество работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bowes M.J., E.J. Palmer-Felgat, et al. High-frequency phosphorus monitoring of the River Kennet, UK: are ecological problems due to intermittent sewage treatment works failures? *Journal of Environmental Monitoring*. 2012. Vol. 14. No. 12. P. 3137–3145.
2. Cohen M.J., Heffernan J.B. et al. Inference of riverine nitrogen processing from longitudinal and diel variation in dual nitrate isotopes // *Journal of Geophysical Research, Biogeosciences*. 2012. Vol. 117. G01021 1 of 17. DOI: 10.1029/2011JG001715.
3. Bieroza M., Heathwaite A.L. et al. Understanding nutrient biogeochemistry in agricultural catchments: the challenge of appropriate monitoring frequencies // *Environmental Science: Processes & Impacts*. 2014. Vol. 16. No. 7. P. 1676–1691.
4. Loucks P., Eelco V.B. *Water Quality Modeling and Prediction* // *Water Resource Systems Planning and Management*. N.Y.: Springer, 2017. P. 417–467. DOI: 10.1007/978-3-319-44234-1_10.
5. Gossweiler B., Wesström I. et al. Spatial and temporal variations in water quality and land use in a semi-arid catchment in Bolivia // *Water*. 2019. Vol. 11. No. 11. P. 2227–2232. DOI: 10.3390/w11112227.
6. Wilby R., Gilbert J. *Hydrological and hydrochemical dynamics* // Petts, G.E., Amoros, C. (eds). *The Fluvial Hydro/systems*, Chapman & Hall Ltd, Springer, Dordrecht, Netherlands, 1996. 322 p. DOI: 10.1007/978-94-009-1491-9_3.

7. Kirchner J.W., Feng X.H. et al. The fine structure of water-quality dynamics: the (high-frequency) wave of the future // *Hydrological Processes*. 2004. Vol. 18. P. 1353–1359. DOI: 10.1002/hyp.5537.
8. Macintosh K.A., Jordan P. et al. Low flow water quality in rivers; septic tank systems and high-resolution phosphorus signals. *Science of the Total Environment*. 2011. Vol. 412. P. 58–65. DOI:10.1016/j.scitotenv.2011.10.012.
9. Halliday S.J., Skeffington R.A. et al. Upland stream water nitrate dynamics across decadal to sub-daily timescales: A case study of Plynlimon. // *Wales. Biogeosciences*. 2013. Vol. 10. P. 8013–8038. DOI: 10.5194/bg-10-8013-2013.
10. Данилов-Данильян В.И., Розенталь О.М. Методология достоверной оценки качества воды. III. Оценка качества пресной воды в условиях непостоянства контролируемых показателей // *Экология и промышленность России*. 2022. Т. 26. № 5. С. 44–49. DOI: 10.18412/1816-0395-2022-5-44-49.
11. Anthony M., Bartlett P. *Neural Network Learning: Theoretical Foundations*. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 2002. 504 p.
12. Каллан Р. Основные концепции нейронных сетей. Москва, Санкт-Петербург, Киев: Изд. Дом «Вильямс», 2001. 161 с.
13. Боровиков В.П. *Нейронные сети Statistica Neural Networks: Методология и технология современного анализа данных*. М: StatSoft, 2015. 354 с.
14. Волошин В.П., Желиговская Е.А. и др. Структуры сеток водородных связей и динамика молекул воды в конденсированных водных системах // *Российский химический журнал*. 2001. Т. 45. № 3. С. 31–37.
15. Родникова М.Н. Об упругости пространственной сетки водородных связей в жидкостях и растворах. Структурная самоорганизация в растворах и на границе фаз. М.: Изд-во АКИ, 2008. С. 151–198.
16. Капица С.П., Курдюмов С.П., Малинецкий Г.Г. *Синергетика и прогнозы будущего*. М.: УРСС, 2019. 286 с.
17. Boffetta G., Ecke R.E. Two-dimensional turbulence. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 2012. Vol. 44. P. 427–451.
18. Бетяев С.К. *Гидродинамика: проблемы и парадоксы* // *Успехи физических наук*. 1995. Т. 165. № 3. С. 299–330.
19. Eckstein M., Horodecki P. The Experiment Paradox in Physics // *Foundations of Science*. 2022. Vol. 27. No. 12. P. 1–15. DOI: 10.1007/s10699-020-09711-y.
20. Пиковский А., Розенблюм М., Куртс Ю. *Синхронизация. Фундаментальное нелинейное явление*. Москва: Техносфера, 2003. 496 с.
21. Chashechkin Yu.D., Rosental O.M. River Flow Structure and its Effect on Pollutant Distribution // *Water Resources*. Vol. 46. No. 6. P. 910–918. DOI: 10.1134/S0097807819060022.

REFERENCES

1. Bowes M.J., E.J. Palmer-Felgat, et al. High-frequency phosphorus monitoring of the River Kennet, UK: are ecological problems due to intermittent sewage treatment works failures? *Journal of Environmental Monitoring*. 2012. Vol. 14. No. 12. P. 3137–3145.
2. Cohen M.J., Heffernan J.B. et al. Inference of riverine nitrogen processing from longitudinal and diel variation in dual nitrate isotopes. *Journal of Geophysical Research, Biogeosciences*. 2012. Vol. 117. G01021 1 of 17. DOI: 10.1029/2011JG001715.
3. Bierzoza M., Heathwaite A.L. et al. Understanding nutrient biogeochemistry in agricultural catchments: the challenge of appropriate monitoring frequencies. *Environmental Science: Processes & Impacts*. 2014. Vol. 16. No. 7. P. 1676–1691.
4. Loucks P., Eelco V.B. *Water Quality Modeling and Prediction. Water Resource Systems Planning and Management*. N.Y.: Springer, 2017. P. 417–467. DOI: 10.1007/978-3-319-44234-1_10.
5. Gossweiler B., Wesström I. et al. Spatial and temporal variations in water quality and land use in a semi-arid catchment in Bolivia. *Water*. 2019. Vol. 11. No. 11. P. 2227–2232. DOI: 10.3390/w11112227.
6. Wilby R., Gilbert J. *Hydrological and hydrochemical dynamics*. Petts, G.E., Amoros, C. (eds). *The Fluvial Hydrosystems*, Chapman & Hall Ltd, Springer, Dordrecht, Netherlands, 1996. 322 p. DOI: 10.1007/978-94-009-1491-9_3.

7. Kirchner J.W., Feng X.H. et al. The fine structure of water-quality dynamics: the (high-frequency) wave of the future. *Hydrological Processes*. 2004. Vol. 18. P. 1353–1359. DOI: 10.1002/hyp.5537.
8. Macintosh K.A., Jordan P. et al. Low flow water quality in rivers; septic tank systems and high-resolution phosphorus signals. *Science of the Total Environment*. 2011. Vol. 412. P. 58–65. DOI:10.1016/j.scitotenv.2011.10.012.
9. Halliday S.J., Skeffington R.A. et al. Upland streamwater nitrate dynamics across decadal to sub-daily timescales: A case study of Plynlimon. *Wales. Biogeosciences*. 2013. Vol. 10. P. 8013–8038. DOI: 10.5194/bg-10-8013-2013.
10. Danilov-Danilyan V.I., Rosenthal O.M. Methodology of reliable assessment of water quality. III. Assessment of fresh water quality in conditions of variability of controlled indicators. *Ecology and industry of Russia*. 2022. Vol. 26. No. 5. C. 44–49. DOI: 10.18412/1816-0395-2022-5-44-49 (In Russ.).
11. Anthony M., Bartlett P. *Neural Network Learning: Theoretical Foundations*. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 2002. 504 p.
12. Callan R. Basic concepts of neural networks. Moscow, St. Petersburg, Kiev: Ed. Williams House, 2001. 161 p. (In Russ.).
13. Borovikov V.P. *Neural networks Statistica Neural Networks: Methodology and technology of modern data analysis*. M: StatSoft, 2015. 354 p. (In Russ.).
14. Voloshin V.P., Zheligovskaya E.A. et al. Structures of hydrogen bond grids and dynamics of water molecules in condensed water systems. *Russian Journal General Chemistry*. 2001. Vol. 45. No. 3. P. 31–37 (In Russ.).
15. Rodnikova M.N. *On the elasticity of the spatial grid of hydrogen bonds in liquids and solutions. Structural self-organization in solutions and at the phase boundary*. Moscow: LKI Publishing House, 2008. P. 151–198. (In Russ.).
16. Kapitsa S.P., Kurdyumov S.P., Malinetsky G.G. *Synergetics and forecasts of the future*. Moscow: URSS, 2019. 286 p.
17. Boffetta G., Ecke R.E. Two-dimensional turbulence. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 2012. Vol. 44. P. 427–451.
18. Betyaev S. K. Hydro/dynamics: problems and paradoxes. *Successes of physical sciences*. 1995. Vol. 165. No. 3. C. 299–330 (In Russ.).
19. Eckstein M., Horodecki P. The Experiment Paradox in Physics. *Foundations of Science*. 2022. Vol. 27. No. 12. P. 1–15. DOI:10.1007/s10699-020-09711-y.
20. Pikovsky A., Rosenblum M., Kurts Yu. *Synchronization. A fundamental nonlinear phenomenon*. Moscow: Technosphere, 2003. 496 p. (In Russ.).
21. Chashechkin Y.D., Rosental O.M. River Flow Structure and its Effect on Pollutant Distribution. *Water Resources*. Vol. 46. No. 6. P. 910–918. DOI: 10.1134/S0097807819060022.

Сведения об авторах:

Розенталь Олег Моисеевич, д-р техн. наук, главный научный сотрудник, ФГБУН «Институт водных проблем Российской академии наук», Россия, 119333, Москва, ул. Губкина, д. 3; ORCID: 0000-0001-6261-6060; e-mail: omro3@yandex.ru

Федотов Владислав Харитонович, канд. хим. наук, доцент кафедры информационных систем, ФБОУ «Чувашский госуниверситет им. И.Н. Ульянова», Россия, 428015, Чебоксары, Московский просп., д. 15; ORCID: 0000-0001-8395-6849; e-mail: fvh@inbox.ru

About the authors:

Rozental Oleg Moiseevich, Dr. Tech. Sci., Chief Researcher, Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences, ul. Gubkina, 3, Moscow, 119333, Russia; ORCID: 0000-0001-6261-6060; e-mail: omro3@yandex.ru

Fedotov Vladislav Kharitonovich, Ph.D. Chem. Sci., Associate Professor of the Department of Information Systems, Chuvash State University named after I.N. Ulyanov, pr. Moskovskiy, 15, Cheboksary, 428015, Russia; ORCID: 0000-0001-8395-6849; e-mail: fvh@inbox.ru

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

М.В. Георгиевский¹  , Н.И. Горошкова¹ , А.О. Еремеева¹,
Г.Л. Гладков² , А.В. Стриженок¹ , Д.А. Семенова¹ 

 mgeorgievsky@hotmail.com

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. Предложенная методика проста в использовании и имеет хорошие перспективы дальнейшего применения. **Методы.** Оценка возникновения риска прерывания судоходства (навигации) базируется на вероятностном анализе многолетних данных о ежедневных уровнях воды периода открытого русла и продолжительности ледовых явлений, а также тенденций их изменения во времени путем сравнения полученных за последующие временные интервалы значений с предыдущими. **Результаты.** Выполнена ретроспективная оценка вероятности возникновения неблагоприятных условий для навигации в бассейнах нижней Волги и Дона, связанных с изменением характеристик уровенного и ледового режимов. Полученные результаты демонстрируют, что в исследуемых бассейнах в последние десятилетия уменьшается вероятность неблагоприятных гидрологических явлений, связанных с продолжительностью ледостава. Вероятности, обусловленные изменением режима уровней воды в период открытого русла, имеют разнонаправленные тенденции: в бассейне нижней Волги наблюдается период повышенной водности, в бассейне Дона водность понижается.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: водный транспорт, навигация, судоходство, оценка вероятности опасных гидрологических явлений, минимальный уровень воды, ледовые явления, р. Волга, р. Дон.

Для цитирования: Георгиевский М.В., Горошкова Н.И., Еремеева А.О., Гладков Г.Л., Стриженок А.В., Семенова Д.А. Оценка вероятности возникновения опасных для судоходства гидрологических явлений на нижней Волге и Дону // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2023. № 6. С. 44–56. DOI: 10.35567/19994508_2023_6_4.

Дата поступления 26.06.2023.

**ASSESSMENT OF DANGEROUS HYDROLOGICAL EVENTS PROBABILITY
FOR NAVIGATION ON THE LOWER VOLGA AND DON BASED
ON WATER LEVELS AND ICE PHENOMENA DATA**

Mikhail V. Georgievsky¹  , Natalia I. Goroshkova¹ , Anna O. Ereemeeva¹,
Gennady L. Gladkov² , Anastasia V. Strizhenok¹ , Daria A. Semenova¹ 

 mgeorgievsky@hotmail.com

¹ State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia

² Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russia

ABSTRACT

Relevance. The article outlines the basic principles of a dangerous hydrological events probability assessment methodology for navigation on inland waterways based on water levels and ice events data. The proposed method is easy to use and has good prospects for further application. **Methods.** Assessment of probability of occurrence of the navigation interruption is based on probabilistic analysis of many-year data on daily water level of the open water channel and duration of ice phenomena, as well as on the trends of their changes in time through the comparison of the obtained subsequent values with the corresponding previous values. **Results.** A retrospective assessment of the probability of occurrence of unfavorable conditions for navigation in the Lower Volga and Don basins, associated with changes in the characteristics of water level and ice regimes, has been performed. The obtained results demonstrate that in both studied basins the risks associated with ice events have been decreasing in recent decades. The probabilities associated with a change in the level regime during the open channel period have multidirectional trends: the probability is decreasing in the Lower Volga basin and increasing in the Don basin.

Keywords: inland water transport, navigation, assessment of dangerous hydrological events probability, lowest water levels, ice phenomena, Lower Volga, Don

For citation: Georgievsky M.V., Goroshkova N.I., Ereemeeva A.O., Gladkov G.L., Strizhenok A.V., Semenova D.A. Assessment of dangerous hydrological events probability for navigation on the Lower Volga and Don based on water levels and ice phenomena data. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2023. No. 6. P. 44–56. DOI: 10.35567/19994508_2023_6_4.

Received 26.06.2023.

ВВЕДЕНИЕ

Управление рисками является обязательным для любой современной транспортно-логистической цепочки, включая перевозки по внутренним водным путям (ВВП). Внутренний водный транспорт (ВВТ) – важнейший вид транспорта, поскольку позволяет перевозить большие объемы грузов и в сочетании с ценовыми преимуществами более рентабелен по сравнению с железнодорожными или автомобильными перевозками. Однако водный и ледовый режимы на большинстве судоходных российских рек являются одними из основных риск-факторов для навигации [1, 2].

Согласно [3–6], риск определяется как произведение вероятности возникновения негативного события и его последствий:

$$\text{Риск } (R) = \text{Вероятность } (P) \times \text{Последствия } (C). \quad (1)$$

Таким образом, вероятность, наряду с последствиями – одна из двух основных составляющих, определяющих риски. Из этих двух составляющих именно вероятность поддается объективной научно обоснованной оценке. Оценка

последствий применительно к рискам для судоходства на внутренних водных путях – задача субъективная и трудная, прежде всего, из-за отсутствия утвержденной методики.

Согласно «Методическим рекомендациям по оценке климатических рисков», утвержденным 13 мая 2021 г. Приказом Минэкономразвития России № 267, оценка должна включать ретроспективную оценку риска на основе данных за истекший временной период, превышающий 30 лет¹. При оценке чувствительности (работоспособности) объекта воздействия рекомендуется применять пороговые (критические) значения характеристик климатического воздействия (интенсивности и продолжительности), превышение которых с высокой степенью вероятности (более 90 %) приведет к потере работоспособности (прекращению нормального функционирования) либо ликвидации объекта воздействия.

Представленная в данной статье методика основана на ретроспективном подходе оценки вероятностей возникновения опасных гидрологических явлений. Методика базируется на данных за временной период, превышающий 70 лет. В проведенных исследованиях использованы последние утвержденные значения проектных уровней.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

За исходную информацию взяты данные о ежедневных уровнях воды периода открытого русла и ледовых явлениях в течение зимнего периода с начала 1950-х годов по настоящее время. Для оценки вероятностей, связанных с возникновением опасных гидрологических явлений в бассейне нижней Волги, использовали данные по четырем гидрологическим постам: г. Волгоград, с. Черный Яр, с. Енотаевка и г. Астрахань.

Для анализа характеристик ледовых явлений в бассейне р. Дон использовали данные наблюдений по шести гидрологическим створам: г. Калач-на-Дону, х. Красноярский, ст. Ложки, пгт Нижний Чир, х. Суворовский, Цимлянская ГЭС (верхний бьеф), а анализ уровней воды осуществлялся на основе данных по замыкающему створу р. Дон – ст. Раздорская. Вся исходная информация получена из базы данных, подготовленной в лаборатории гидрофизики Государственного гидрологического института.

Методика оценки вероятности возникновения опасных гидрологических явлений для судоходства

Методика оценки вероятности возникновения опасных гидрологических явлений для судоходства, используемая в данной статье, основана на представленных в работах [7, 8] подходах. В частности, в работе [7] предложено использовать вероятности, связанные с глубиной реки и ледовыми явлениями, как один из видов инфраструктурных рисков в базовой структуре управления рисками в цепочках внутреннего водного транспорта.

¹ Приказ Минэкономразвития России от 13 мая 2021 г. № 267 «Об утверждении методических рекомендаций и показателей по вопросам адаптации к изменениям климата», раздел 3.1, стр. 3. https://www.economy.gov.ru/material/dokumenty/prikaz_minekonomrazvitiya_rossii_ot_13_maya_2021_g_267.html.

Оценка вероятности возникновения рисков, таких как прерывание судоходства (навигации), базируется на вероятностном анализе многолетних данных о ежедневных уровнях воды периода открытого русла и продолжительности ледовых явлений, а также тенденций их изменения во времени. Оценка вероятностей осуществлялась по соотношению значений вероятности появления исследуемых величин (x) ниже/меньше, чем некоторые критические значения ($X_{\text{крит}}$).

В случае с уровнями воды оценивались значения вероятностей наблюдения уровня ниже критического значения, т. е. значения проектного уровня для конкретного створа (проектные уровни – это расчетные уровни воды заданной обеспеченности, по отношению к которым устанавливают гарантированные габариты судового хода), а в случае количества дней с ледовыми явлениями оценивались значения вероятностей выше значений минимального количества дней с ледовыми явлениями в году за весь период наблюдений. Математически для уровней воды это можно представить формулой:

$$F(X_{\text{крит}}) = P(x \leq X_{\text{крит}}), \quad (2)$$

которая является актуальной для ледовых явлений, но только с обратным знаком равенства (аналогично для формул (3) и (4)).

Далее вероятности риска рассчитываются за какой-либо период наблюдений ($P_{\text{период}}$) по отношению к предыдущему периоду ($P_{\text{пред. период}}$). Они представлены либо в численном виде (как показано ниже на графиках):

$$R_{\text{период}} = P_{\text{период}}(x \leq X_{\text{крит}}) / P_{\text{пред. период}}(x \leq X_{\text{крит}}) - 1 \quad (3)$$

либо в процентах (как представлено в дальнейшем в таблицах):

$$R_{\text{период}} = (P_{\text{период}}(x \leq X_{\text{крит}}) / P_{\text{пред. период}}(x \leq X_{\text{крит}}) - 1) \times 100. \quad (4)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 1 приведены значения вероятности наблюдения годовых минимальных уровней воды ниже проектных уровней (ПУ) для трех основных гидрологических створов нижней Волги (с. Черный Яр, с. Енотаевка и г. Астрахань), рассчитанные на основе нормального закона распределения, а также сравнение значений вероятности последующего подпериода с предыдущим, выраженное в процентах.

Исследование рисков по уровням выполнялось на основе данных по минимальным уровням воды открытого русла за период 1956–2019 гг. Чтобы проследить изменение вероятности наблюдения минимального уровня воды в конкретном створе ниже проектного уровня, анализируемый период был разбит на три приблизительно одинаковых подпериода: 1952 (1956)–1977, 1978–1999, 2000–2019 гг. Таким образом, проводился анализ изменения вероятности по времени на основе рассчитанных значений в наблюдаемых сегментах.

Как следует из полученных результатов (табл. 1), вероятность наблюдения уровней воды ниже значений проектных уровней имеет тенденцию к уменьшению для каждого из трех анализируемых створов. Наименьшая вероятность отмечается в период 1978–1999 гг. Для створа с. Черный Яр она сохраняется и в последующий период 2000–2019 гг. В створе г. Астрахани вероятность

Таблица 1. Значения вероятности формирования уровней воды ниже проектных уровней для основных гидростворов нижней Волги
 Table 1. Probability values of water levels formation below the design levels for the main hydrological gauging stations of the lower Volga

Река – пост	Параметр вероятности	Период		
		1956–1977 гг.	1978–1999 гг.	2000–2019 гг.
		T1	T2	T3
р. Волга – с. Черный Яр ПУ (мБС): –19,96	$P(X < ПУ)^*$ $(T_i/T_{i-1})^*100^{**}, \%$	0,1476	0,0088	0,0006
			–94	–93
р. Волга – с. Енотаевка ПУ (мБС): –24,03	$P(X < ПУ)$ $(T_i/T_{i-1})^*100, \%$	0,5036	0,0877	0,0218
			–83	–75
р. Волга – г. Астрахань ПУ (мБС): –25,69	$P(X < ПУ)$ $(T_i/T_{i-1})^*100, \%$	0,2871	0,1305	0,1239
			–55	–5

Примечание: * – вероятность наблюдения уровня воды ниже значений проектных уровней в долях от единицы; ** – сравнение значений вероятности периода по отношению к предыдущему периоду в %.

формирования минимальных уровней наиболее высокая в 2000–2019 гг. по сравнению с предыдущим периодом. В целом, результаты расчетов демонстрируют уменьшение рисков для навигации в периоды открытого русла в исследуемом бассейне, т. к. с уменьшением вероятности наблюдения уровней ниже проектных значений уменьшаются и риски.

В табл. 2 представлены значения вероятности количества наблюдавшихся в году дней с ледовыми явлениями, не превышающих вероятность минимального количества таких же дней в году за весь период наблюдений (по кривой распределения) для каждого из четырех гидрологических створов нижней Волги (г. Волгоград, с. Черный Яр, с. Енотаевка и г. Астрахань), а также, аналогично табл. 1, сравнение значений вероятности последующего подпериода с предыдущим, выраженное в процентах. Данные по ледовым явлениям анализировали за период 1959–2019 гг., соответственно, подпериоды для ледовых явлений незначительно отличались от подпериодов, используемых для анализа минимальных уровней: 1959–1979, 1980–1999 и 2000–2019 гг.

Анализ полученных значений вероятности позволяет сделать вывод об увеличении вероятности наблюдения минимального за весь рассматриваемый период количества дней с ледовыми явлениями на каждом из исследуемых гидрологических постов. Особенно ярко это проявляется при сравнении периода T2 с периодом T1. За период 2000–2019 гг. по сравнению с предыдущим подпериодом рост рассматриваемой вероятности увеличивается. Наиболее интенсивно эта тенденция отмечается в створе г. Астрахани. Исключение составляет створ с. Черный Яр, где рост вероятности уменьшения числа дней с ледовыми явлениями несколько снижается. Полученные результаты свидетельствуют о том, что риски для судоходства на нижней Волге, связанные с ледовыми явлениями, уменьшаются.

Таблица 2. Значения вероятности количества дней с ледовыми явлениями в году за отдельные периоды и разница между значениями периодов в процентах
Table 2. Probability of the number of days with ice events and the difference between values of periods (per cent)

Река – пост	Минимальное количество дней с ледовыми явлениями	Параметр вероятности	Период		
			1959–1979 гг.	1980–1999 гг.	2000–2019 гг.
			T1	T2	T3
р. Волга – г. Волгоград	20	$P(X < \text{МКДсЛЯ}^*)$ $(T_i/T_{i-1}) * 100, \%$	0,0012	0,0025 102	0,0067 168
р. Волга – с. Черный Яр	52	$P(X < \text{МКДсЛЯ})$ $(T_i/T_{i-1}) * 100, \%$	0,0008	0,0058 582	0,0137 136
р. Волга – с. Енотаевка	59	$P(X < \text{МКДсЛЯ})$ $(T_i/T_{i-1}) * 100, \%$	0,0011	0,0042 294	0,0244 475
р. Волга – г. Астрахань	44	$P(X < \text{МКДсЛЯ})$ $(T_i/T_{i-1}) * 100, \%$	0,0028	0,0024 -14	0,0373 1478

Примечание: * – минимальное количество дней в году с ледовыми явлениями за весь период наблюдений для конкретного створа (МКДсЛЯ).

Для большей наглядности информация из табл. 1 и табл. 2 была обобщена и представлена в графическом виде на рис. 1, где отмечены тенденции изменения рисков, связанных с изменением минимальных уровней воды в реке и продолжительностью ледовых явлений на основных гидрологических постах нижней Волги за отдельные периоды по сравнению с предыдущими периодами.

Анализируя данные рис. 1, можно сделать вывод об уменьшении в исследуемом бассейне вероятности рисков, связанных как с уровнями воды (минимальными уровнями открытого русла), так и с ледовыми явлениями. Отметим, что наиболее существенное изменение (уменьшение) вероятности рисков за последние десятилетия наблюдается для ледовых явлений подпериода 2000–2019 гг. по сравнению с 1980–1999 гг., особенно на г/п у г. Астрахани.

На рис. 2 представлены результаты анализа вероятностей рисков продолжительности ледовых явлений для Цимлянского водохранилища, аналогичные выполненным для нижней Волги (табл. 2, рис. 1). При этом для Цимлянского водохранилища использовали данные о продолжительности периода свободной ото льда акватории (дни) вместо продолжительности ледовых явлений. На основе данных о продолжительности ледостава на водохранилище рассчитывали вероятности возможных климатических рисков. Данные по Цимлянскому водохранилищу были доступны за период 1952–2010 гг., поэтому анализируемые подпериоды имеют следующие градации: 1952–1970, 1971–1990 и 1991–2010 годы.

Как следует из рис. 2, для Цимлянского водохранилища наблюдается аналогичная ситуация с продолжительностью ледовых явлений, что и на гидрологических постах нижней Волги: вероятности связанных с ледовыми явлениями рисков интенсивно уменьшаются в последнее десятилетие.

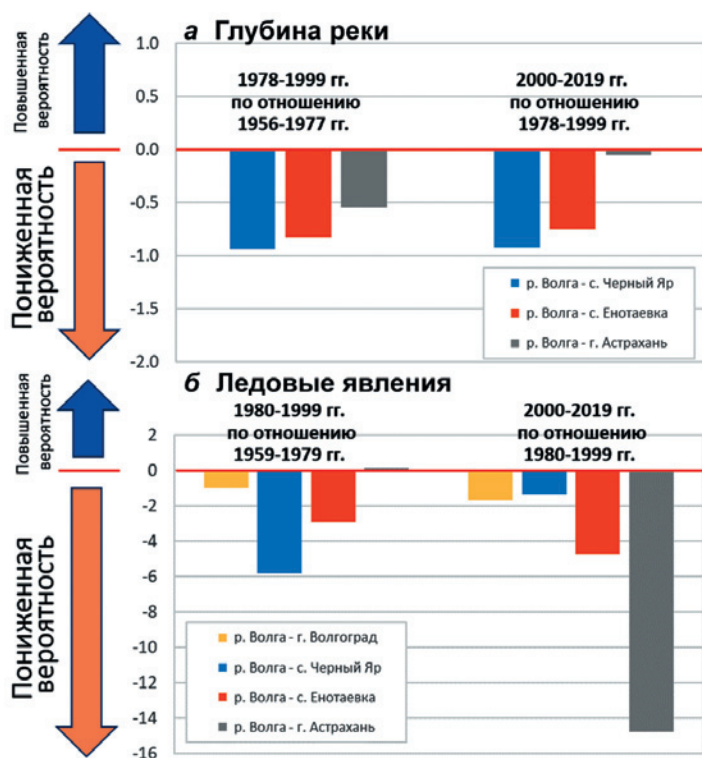


Рис. 1. Изменение вероятностей, связанных с многолетними колебаниями минимальных уровней воды и характеристик ледовых явлений в бассейне нижней Волги.

Fig. 1. Changes in the probabilities associated with long-term fluctuations in the minimum water levels and characteristics of ice phenomena in the lower Volga basin for certain periods compared with previous periods.

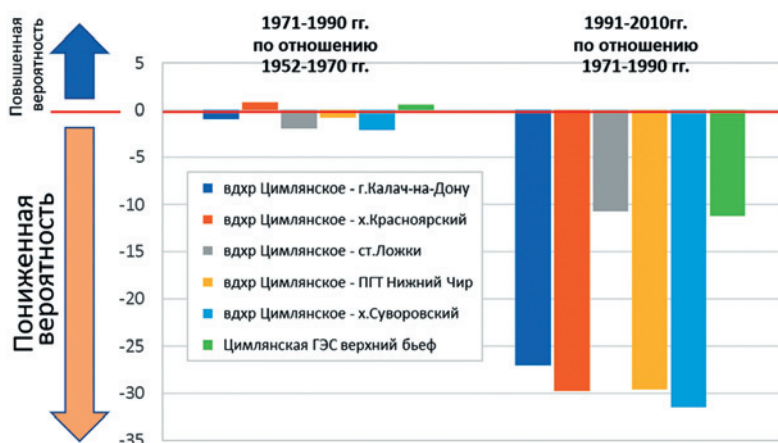


Рис. 2. Изменение вероятностей формирования продолжительности свободного ото льда периода для Цимлянского водохранилища.

Fig. 2. Change in the probabilities of formation of the duration of the ice-free period for the Tsimlyansk reservoir for individual periods compared to previous periods.

Необходимо отметить, что представленный на рис. 1 и в табл. 1 анализ климатических рисков, связанных с уровнями воды (значений минимальных суточных уровней в году ниже величин проектных уровней), не является в полной мере объективным, т. к. основан на анализе ряда минимальных значений уровней воды в течение периода открытого русла, т. е. на выборке единственного значения за год. Для судоходства, прежде всего, интерес представляет количество дней и продолжительность периодов, когда уровни воды находятся ниже определенных критических значений. Согласно перечню опасных явлений (ОЯ), составленному Росгидрометом, опасное гидрологическое явление – «низкая межень» – это понижение уровня воды ниже проектных отметок водозаборных сооружений и навигационных уровней на судоходных реках в конкретных пунктах, которые должны наблюдаться в течение не менее 10 дней.

Для оценки таких рисков (вероятности наблюдения уровня воды ниже определенной критической отметки в течение периода или периодов времени) были выполнены дополнительные исследования, представленные в табл. 3 и на рис. 4.

В табл. 3 приведена характеристика рисков, связанных с количеством дней и продолжительностью периодов, в течение которых наблюдались уровни воды ниже значений проектных. Анализ проведен для трех гидрологических створов: двух в бассейне нижней Волги (с. Черный Яр и с. Енотаевка) и в бассейне р. Дон (ст. Раздорская). Использовали данные по ежедневным уровням воды за период 1952–2020 гг., который был разбит на три приблизительно одинаковых подпериода: 1952–1972 гг. для р. Дон, 1956–1972 гг. для Волги, для обоих бассейнов – 1973–1996 гг. и 1997–2020 гг.

Как следует из представленных в табл. 3 данных, в бассейне нижней Волги риски, связанные с изменениями уровней, уменьшаются, что подтверждают приведенные в табл. 1 результаты. Совершенно противоположной выглядит ситуация в бассейне р. Дон, где отмечается увеличение рисков для судоходства, связанных с уменьшением уровней воды. Особенно сильно это проявляется в последнее десятилетие, когда наблюдается максимальное количество дней с уровнями ниже проектных: в 2015 г. – 230 дней, три периода с опасными явлениями; 2016 г. – 135 дней, четыре периода с опасными явлениями; в 2020 г. – 301 день, пять периодов с опасными явлениями. Результаты дополнительного анализа, позволяющего оценить динамику изменения вероятности рисков во внутригодовом распределении в исследуемых бассейнах за период открытого русла, представлены на рис. 3.

На рис. 3 показано соотношение вероятности наблюдения уровней воды ниже значений проектных уровней для трех вышеуказанных створов за периоды 1986–2020 гг. и 1950–1985 гг. Уровни рассчитаны за каждый день открытого русла (25.IV – 10.IX для нижней Волги, 10.IV – 20.IX для р. Дон) при условии отсутствия пропусков (допускался один пропуск за период) в многолетних рядах. Чем больше разница между значениями вероятности, тем, со-

Таблица 3. Характеристики рисков, связанных с негативными последствиями для навигации на ВВП нижней Волги на основе информации по количеству дней и периодов с наблюдаемыми уровнями ниже значений проектных уровней (ПУ)

Table 3. Characteristics of risks associated with negative consequences for navigation on the inland waterways of the lower Volga based on information on the number of days and periods with observed levels below the values of the design levels

Гидрологический пост/ период	Общее количество дней с уровнями воды ниже ПУ	Количество периодов наблюдения уровней ниже ПУ	Максимальный период (кол-во дней)	Количество периодов более одного дня	Количество периодов ≥ 10 дней опасных явлений	Риски для судоходства в последние десятилетия
р. Волга – с. Черный Яр						
1956–1972	347	49	57	21	9	Уменьшаются
1973–1996	169	21	44	8	4	
1997–2020	4	4	1	0	0	
р. Волга – с. Енотаевка						
1956–1972	370	39	88	23	8	Уменьшаются
1973–1996	383	35	118	21	6	
1997–2020	16	12	4	2	0	
р. Дон – ст. Раздорская						
1952–1972	71	16	25	8	2	Увеличиваются
1973–1996	35	16	5	9	0	
1997–2020	844	148	141	89	13	

Примечание: жирным шрифтом выделены наибольшие за все три периода значения.

ответственно, больше/меньше рисков. Применение в данном анализе двух периодов вместо трех объясняется тем, что при использовании двух периодов статистический анализ осуществляется по более длинным рядам и полученные значения статистически надежнее.

Анализ данных рис. 3 показывает, что вероятность наблюдения уровней воды ниже проектных значений в бассейне нижней Волги в течение мая минимальна в каждом из исследуемых периодов, т. е. существенных изменений рисков не наблюдается. В остальные месяцы значения вероятностей за период 1956–1985 гг. превышают аналогичные значения за 1986–2020 гг., что свидетельствует о уменьшении рисков и подтверждает выводы, сделанные на основе анализа табл. 3. Наибольшие расхождения между вероятностями (наиболее существенное уменьшение рисков) отмечаются во второй половине июня – начале июля, а также в конце августа – начале сентября.

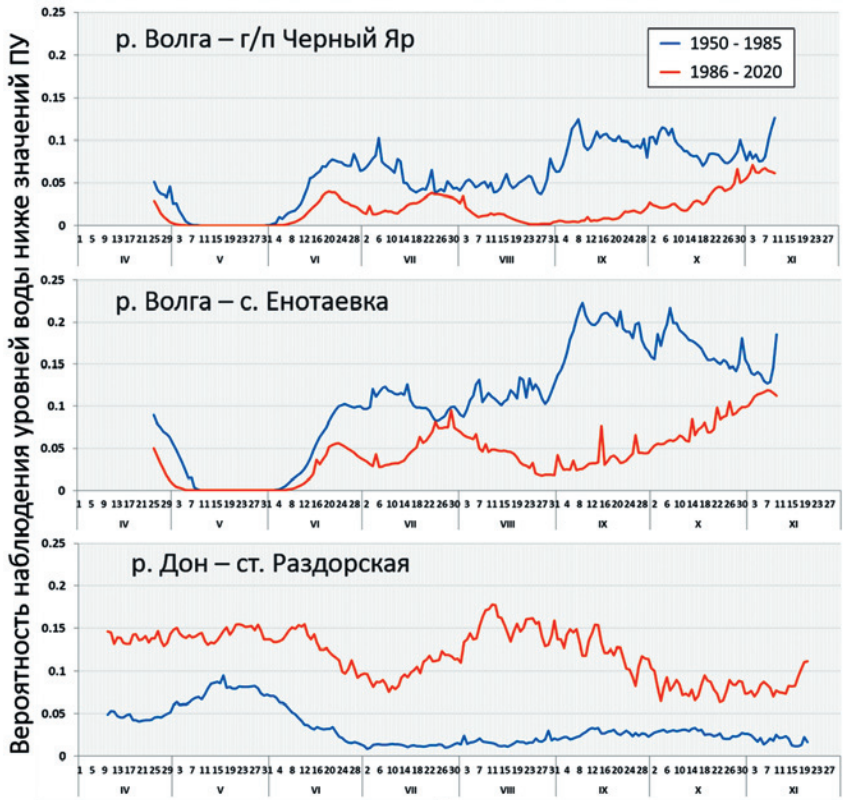


Рис. 3. Вероятность наблюдения уровней воды ниже значений проектных уровней на ВВП нижней Волги и Дона за период 1986–2020 гг. по сравнению с предшествующим многолетним периодом.

Fig. 3. The probability of water levels formation is lower than the values of the design levels on the inland waterways of the lower Volga and the Don for the period 1986–2020 compared to the previous period of 1950–1985.

Результаты, полученные для р. Дон, несмотря на то что анализ выполнен только по одному гидрологическому посту, можно считать достаточно объективными, т. к. расчеты проведены по основному замыкающему створу. Полученное внутригодовое распределение вероятности за два периода наглядно демонстрирует существенное увеличение для судоходства рисков в течение всего периода открытого русла, с максимальными значениями в августе.

Необходимо отметить, что основной и хорошо известной проблемой крупнейшей реки европейской части России – Дона в последние десятилетия является маловодье [9–12]. Бассейн Дона – один из наиболее проблемных в Российской Федерации с точки зрения обеспеченности водными ресурсами [10]. Согласно прогнозным оценкам вероятных будущих изменений речного стока в этом бассейне, выполненным в [13–15], ожидается уменьшение возобновляемых водных ресурсов, которое со временем будет увеличиваться (до 10 % на перспективу 2050 г.).

²Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. 2014 г. // Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). Москва, 2014. С. 30.

ВЫВОДЫ

Изменение климата, происходящее на территории Российской Федерации в последние десятилетия, а также увеличение числа экстремальных гидрологических явлений приводят к множеству негативных последствий. Однако с точки зрения надежности навигации на внутренних водных путях в направлении Каспий–Азов через Волго-Донской судоходный канал доля положительных последствий для нижней Волги на данный момент превышает долю отрицательных. Изменения в бассейне р. Дон носят негативный характер и требуют дополнительных исследований.

Обобщая полученные в ходе выполненных исследований результаты, можно сделать следующие основные выводы:

- в бассейнах нижней Волги и Дона в последние десятилетия происходит уменьшение вероятности опасных для судоходства ситуаций, связанных с продолжительностью ледовых явлений, что, в первую очередь, вызвано изменением климата – ростом температуры воздуха в течение холодного периода;
- в бассейне нижней Волги также наблюдается уменьшение вероятности опасных для судоходства ситуаций, связанных с изменением уровней воды;
- анализ вероятностей, связанных с уровнями воды р. Дон, выполненный с использованием данных о ежедневных уровнях воды в период открытого русла по гидрологическому посту р. Дон–ст. Раздорская, продемонстрировал существенный их рост в последние десятилетия.

В статье приведен альтернативный метод оценки изменения гидрологических характеристик во времени, основанный на взаимосравнении вероятностей возникновения критических значений гидрологических характеристик (в большинстве случаев такие критические значения относятся к опасным гидрологическим явлениям) за отдельные периоды. Принимая во внимание тот факт, что результатом произведения вероятности и последствий являются риски, при определенной доработке методике можно адаптировать для оценки гидрологических рисков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горошкова Н.И., Дрегваль М.С., Сикан А.В. Влияние изменений климата на продолжительность навигационного периода на реке лене и ее притоках // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов. Труды VIII Всеросс. научно-практ. конф. Пермь, 2021. С. 61–67.
2. Дрегваль М.С., Сикан А.В. Влияние климатических изменений на водность навигационного периода Северной Двины // Современные проблемы гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды на пространстве СНГ. 2020. С. 343–344.
3. Kaplan S. The words of risk analysis // Risk Analysis. 1997. Vol. 17. No. 4. P. 407–417.
4. Jüttner U., Peck H., Christopher M. Supply chain risk management: outlining an agenda for future research // International Journal of Logistics: Research & Applications. 2003. Vol. 6. No. 4. P. 197–210.
5. Norrman A., Lindroth R. Categorization of Supply Chain Risk and Risk Management // Supply chain risk / Ed. Brindley C. Ashgate Publishing Limited, 2004. P. 14–27.
6. Sulaiman O., Kader A.S.A., Saharuddin A.H. Collision Aversion Model for Inland Water Transportation: Cost Benefit Analysis Model // International Journal of Trade, Economics and Finance. 2011. Vol. 2. No. 1. P. 24–31.

7. Backalic T., Maslaric M. Navigation conditions and the risk management in inland waterway transport on the middle Danube // *Transport Problems*. 2012. No. 4. P. 13–24.
8. Backalic T., Maslaric M., Georgijevic V., Bojic S Analysis of Possible Draught Size of Container Vessels on the Lower Danube. *World Academy of Science // Engineering and Technology*. 2015. No. 9. No. 7. P. 1174–1179.
9. Научно-прикладной справочник: Основные гидрологические характеристики водных объектов бассейна реки Дон / под ред. В.Ю. Георгиевского. СПб.: Свое издательство, 2020. 262 с.
10. Georgievsky M. Water resources of the Russian rivers and their changes // *Proceedings of International Association of Hydrological Sciences*. 2016. 374. P.75–77. DOI: 10.5194/piahs-374-75-2016.
11. Гладков Г.Л., Чалов Р.С., Беркович К.М. Гидроморфология русел судоходных рек. СПб: Лань, 2022. 432 с.
12. Георгиевский В.Ю., Коронкевич Н.И., Алексеевский Н.И. Водные ресурсы и гидрологический режим рек РФ в условиях изменения климата // *Пленарные доклады VII Всероссийского гидрологического съезда, 19–21 ноября 2013 г.* СПб: ГГИ, 2014. С. 79–102.
13. Георгиевский М.В., Голованов О.Ф. Прогнозные оценки изменений водных ресурсов крупнейших рек Российской Федерации на основе данных по речному стоку проекта CMIP5 // *Вестник СПбГУ. Науки о Земле*. 2019. № 64. С. 206–219. DOI: 10.21638/spbu07.2019.203.
14. Georgievsky M., Golovanov, O., Balonishnikova Z., Timofeeva L. Changes in river water resources of the Russian Federation's economic regions forecasted based on the CMIP5 runoff data // *Eco/hydrology & Hydrobiology*. 2021. Vol. 21. No. 4. P. 669–682, DOI: 10.1016/j.ecohyd.2021.06.004.

REFERENCES

1. Goroshkova N.I., Dregval M.S., Sikan A.V. Influence of climate change on the duration of the navigation period on the Lena River and its tributaries. *Modern problems of reservoirs and their watersheds. Proceedings of the VIII All-Russian scientific-practical conference with international participation*. Perm'. 2021. P. 61–67 (In Russ.).
2. Dregval M.S., Sikan A.V. Influence of climatic changes on the water content of the navigation period of the Northern Dvina. *Modern problems of hydrometeorology and environmental monitoring in the CIS*. 2020. P. 343–344 (In Russ.).
3. Kaplan S. The words of risk analysis. *Risk Analysis*. 1997. Vol. 17. N. 4. P. 407–417.
4. Jüttner U., Peck H., Christopher M. Supply chain risk management: outlining an agenda for future research. *International Journal of Logistics: Research & Applications*. 2003. Vol. 6. N. 4. P. 197–210.
5. Norrman A., Lindroth R. Categorization of Supply Chain Risk and Risk Management. *Supply chain risk* / Ed. Brindley C. Ashgate Publishing Limited, 2004. P. 14–27.
6. Sulaiman O., Kader A.S.A., Saharuddin A.H. Collision Aversion Model for Inland Water Transportation: Cost Benefit Analysis Model. *International Journal of Trade, Economics and Finance*. 2011. Vol. 2. № 1. P. 24–31.
7. Backalic T., Maslaric M. Navigation conditions and the risk management in inland waterway transport on the middle Danube. *Transport Problems*. 2012. № 7, 4. P. 13–24.
8. Backalic T., Maslaric M., Georgijevic V., Bojic S Analysis of Possible Draught Size of Container Vessels on the Lower Danube. *World Academy of Science. Engineering and Technology*. 2015. № 9, 7. P. 1174–1179.
9. Scientific and Applied reference book: Basic hydrological characteristics of water bodies of the Don River basin. Ed. V.Y. Georgievsky, 2020 St. Petersburg: Own publishing house. 262 p. (In Russ.).
10. Georgievsky M. Water resources of the Russian rivers and their changes. *Proceedings of International Association of Hydrological Sciences*. 2016. 374. P.75–77. DOI:10.5194/piahs-374-75-2016.
11. Gladkov G. L. Hydro/morphology of the channels of navigable rivers: monograph / Ed. G. L. Gladkov, R.S. Chalov, K. M. Berkovich. 3rd edition. St. Petersburg: Lan. 2022. P. 432 (In Russ.).
12. Georgievsky V.Yu., Koronkevich N.I., Alekseevsky N.I. Water resources and hydrological regime of the russian rivers in the conditions of climate change. *Plenary reports of the VII All-Russian Hydrological Congress, November 19–21. 2013*. St. Petersburg: SHI. 2014. P. 79–102 (In Russ.).

13. Georgievsky M.V., Golovanov O. F., 2019. Forecasting changes in river water resources of Russian Federation based on CMIP5 runoff data. *Bulletin of Saint Petersburg University. Earth Sciences*. 2019. № 64(2). P. 206–218. DOI: 10.21638/spbu07.2019.203 (In Russ.).
14. Georgievsky M., Golovanov, O., Balonishnikova Z., Timofeeva L. Changes in river water resources of the Russian Federation's economic regions forecasted based on the CMIP5 runoff data. *Ecology & Hydrobiology*. 2021. Vol. 21. I. 4. P. 669-682, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2021.06.004>.

Сведения об авторах:

Георгиевский Михаил Владимирович, канд. геогр. наук, ведущий научный сотрудник, ФГБУ «Государственный гидрологический институт», Россия, 199053, Санкт-Петербург, 2-ая линия В.О., д. 23; ORCID: 0000-0001-5654-7476; e-mail: mgeorgievsky@hotmail.com

Горошкова Наталия Ивановна, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, ФГБУ «Государственный гидрологический институт», Россия, 199053, Санкт-Петербург, 2-ая линия В.О., д. 23; ORCID: 0000-0002-7488-4852; e-mail: goroshnat@yandex.ru

Еремеева Анна Олеговна, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, ФГБУ «Государственный гидрологический институт», Россия, 199053, Санкт-Петербург, 2-ая линия В.О., д. 23; e-mail: eranol@mail.ru

Гладков Геннадий Леонидович, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова», Россия, 198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7; ORCID: 0000-0002-4497-5905; e-mail: gladkovgl@mail.ru.

Стриженок Анастасия Владимировна, младший научный сотрудник, ФГБУ «Государственный гидрологический институт», Россия, 199053, Санкт-Петербург, 2-ая линия В.О., д. 23; ORCID: 0009-0005-1278-8725; e-mail: anastasiastrizhenok@mail.ru

Семенова Дарья Артемиевна, ведущий инженер, ФГБУ «Государственный гидрологический институт», Россия, 199053, г. Санкт-Петербург, 2-ая линия В.О., д. 23; ORCID: 0009-0007-2358-2524; e-mail: anastasiastrizhenok@mail.ru

About the authors:

Mikhail V. Georgievsky, Candidate of Geographical Sciences, Leading Researcher, State Hydrological Institute, Vasilyevsky Island, 2nd line, 23, St. Petersburg, 199053, Russia, e-mail: mgeorgievsky@hotmail.com

Natalia I. Gorshkova, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, State Hydrological Institute, Vasilyevsky Island, 2nd line, 23, St. Petersburg, 199053, Russia, e-mail: goroshnat@yandex.ru

Anna O. Eremeeva, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, State Hydrological Institute, Vasilyevsky Island, 2nd line, 23, St. Petersburg, 199053, Russia, e-mail: eranol@mail.ru

Gennady L. Gladkov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 5/7 Dvinskaya street, St. Petersburg, 199053, Russia, e-mail: gladkovgl@mail.ru

Anastasia V. Strizhenok, Junior Researcher, State Hydrological Institute, Vasilyevsky Island, 2nd line, 23, St. Petersburg, 199053, Russia, e-mail: anastasiastrizhenok@mail.ru

Daria A. Semenova, Leading Engineer, State Hydrological Institute, Vasilyevsky Island, 2nd line, 23, St. Petersburg, 199053, Russia, e-mail: anastasiastrizhenok@mail.ru

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

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

 lgg-iwep@yandex.ru

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. Оценка его изменения вследствие возможного антропогенного вмешательства крайне важна. **Методы.** В рамках одномерного вертикального приближения описывается поведение растворенного кислорода по классической и модифицированной А.В. Готовцевым модели Стриттера–Фелпса. Результаты моделирования сравниваются с натурными данными. **Результаты.** Построена и апробирована путем численных расчетов математическая 1DV-модель поведения растворенного кислорода в Телецком озере. Выполнены модельные расчеты содержания растворенного кислорода для экстремальных сценариев, которые демонстрируют лучшую реалистичность модифицированной модели.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Телецкое озеро, кислородный режим, компьютерное моделирование, модифицированная модель Стриттера–Фелпса.

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания ИВЭП СО РАН.

Для цитирования: Зиновьев А.Т., Кошелев К.Б., Дьяченко А.А. Анализ результатов моделирования и натуральных данных содержания растворенного кислорода в Телецком озере // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2023. № 6. С. 57–69. DOI: 10.35567/19994508_2023_6_5.

Дата поступления 28.09.2023.

MODELING AND OBSERVATIONS OF DISSOLVED OXYGEN CONTENT IN THE LAKE TELETSKOYE

Aleksandr T. Zinoviev  , Konstantin B. Koshelev , Aleksandr V. Dyachenko 

 lgg-iwep@yandex.ru

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

ABSTRACT

Relevance. The Lake Teletskoye is a unique water body in Western Siberia. The oxygen regime of Lake Teletskoye is an indicator characterizing the state of the reservoir. Assessing its changes due to possible anthropogenic intervention is extremely important. **Methods.** Within the framework of a one-dimensional vertical approximation, the behavior of dissolved oxygen is described according to the classical and modified by A.V. Gotovtsev. Strittr–Phelps models. The simulation results are compared with field data. **Results.** Model calculations of extreme situations demonstrate better realism of the modified model.

© Зиновьев А.Т., Кошелев К.Б., Дьяченко А.В., 2023

Keywords: Lake Teletskoye, oxygen regime, computer modeling, modified Streeter–Phelps model.

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

For citation: Zinovyev A.T., Koshelev K.B., Dyachenko A.A. Modeling and observations of dissolved oxygen content in the Lake Teletskoye. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2023. No. 6. P. 57–69. DOI: 10.35567/19994508_2023_6_5.

Received 28.09.2023.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из важнейших компонентов водной среды является растворенный кислород, активно влияющий на интенсивность всех физико-химических и биохимических процессов в природных водах. В работе [1] отмечается, что «кислородный режим – чуткий показатель уровня загрязнения природных вод». Оценки и прогнозы кислородного режима озер и водохранилищ необходимы для мониторинга и рационального использования их водных ресурсов. Истощение запасов кислорода в водоемах, снижение его концентрации ниже допустимых значений отрицательно сказывается на ихтиофауне, приводит к возникновению заморных явлений, в результате этого уменьшается рыбопродуктивность водных объектов.

Для прогнозирования содержания растворенного кислорода в воде озер и водохранилищ часто используются методы математического моделирования или статистического анализа [2–5]. Опыт применения моделей показал важность учета основных гидрофизических факторов, которые, к примеру, полностью определяют поток кислорода на границе раздела «вода – атмосфера».

В настоящее время для прогнозирования содержания растворенного кислорода применяются модели трех типов: физические, машинное обучение (например, регрессионные модели) и глубокое обучение с использованием многослойных нейронных сетей. Физические модели рассчитывают физические и химические процессы для получения растворенного кислорода. К ним относятся, например, такие популярные модели, как TOMCAT [6] и WASP [7]. Модели, основанные на машинном обучении, используют аппарат марковских процессов, дерева принятых решений и др. В последние годы большинство работ, посвященных моделированию растворенного кислорода, применяют нейронные сети. Обзор использования глубокого обучения для прогнозирования содержания растворенного кислорода приведен в [8].

Для прогнозирования концентраций растворенного кислорода могут применяться простые модели типа «полностью перемешанного реактора». Однако для описания глубоких водоемов следует использовать модели, учитывающие формирование вертикальной плотностной стратификации. Наличие термоклина в глубоких озерах и водохранилищах во многом определяет их газовый режим и протекающие в водоемах гидрохимические и гидробиологические процессы. Слой температурного скачка ведет к плотностному расслоению водных масс, которое препятствует их перемещению по вертикали и во многом формирует условия для стратификации растворенных газов. Поэтому наличие

вертикальной температурной стратификации в глубоких водоемах требует, по меньшей мере, использования одномерных вертикальных (1DV) моделей для описания и прогнозирования содержания в воде растворенного кислорода.

В общем случае математическая модель для растворенного кислорода должна описывать биохимическое окисление растворенного органического вещества, осаждение и гидролиз органического взвешенного вещества в глубоком водоеме, при этом необходимо учитывать конвективно-диффузионный перенос рассматриваемых субстанций (растворенного кислорода, растворенного лабильного органического вещества и органического вещества во взвешенной форме). В отдельных случаях, когда важно принимать во внимание взаимодействия на границе раздела вода–дно, следует учитывать окисление и захоронение органического вещества донных отложений. Все вышеперечисленные процессы учитываются в модели Стритера–Фелпса [9].

В работе [10] модель Стритера–Фелпса была адаптирована для описания растворенного кислорода в глубоком стратифицированном водоеме в рамках 1DV приближения на примере Телецкого озера. Результаты моделирования растворенного кислорода в Телецком озере показали хорошее соответствие с натурными данными, однако ее использование для прогнозирования содержания растворенного кислорода в проектируемых водных объектах для случаев экстремальных ситуаций требует дополнительных исследований.

В исследованиях А.В. Готовцева отмечалось, что уравнения Стритера–Фелпса имеют определенные ограничения по применению и был предложен модифицированный вариант модели Стритера–Фелпса [11]. В настоящей работе на основе ранее построенной 1DV модели Телецкого озера [10] реализована модель его кислородного режима с использованием модифицированной модели Стритера–Фелпса [11].

Объект исследования

Уникальность Телецкого озера как объекта исследования заключается в том, что это самый глубокий пресноводный водоем Западной Сибири. Озеро расположено в истоке одной из крупнейших рек мира – Оби. В настоящее время Телецкое озеро и его водосборный бассейн включены ЮНЕСКО в список объектов мирового наследия. По ряду критериев Телецкое озеро является водоемом-аналогом действующих и проектируемых глубоких сибирских водохранилищ. Результаты комплексного изучения гидродотермического и газового режимов Телецкого озера с использованием математических методов и натурных наблюдений являются хорошей основой для оценки точности разрабатываемых моделей гидрологических процессов в проектируемых водохранилищах на реках Сибири.

Телецкое озеро представляет собой глубокий проточный водоем вытянутой формы. Длина озера 77,8 км, максимальная ширина – 5,2 км, максимальная глубина – 323 м, объем – 41,1 км³ [12, 13]. В озеро впадают около 70 постоянных притоков и 150 временных. Основная часть стока поступает в Телецкое озеро через речную систему р. Чулышман (70–75 %) в южной ее оконечности, из противоположной северной части озера вытекает р. Бия. Сложный гидро-

логический режим этого горного озера обусловлен сочетанием ряда факторов: сезонным формированием и разрушением вертикальной температурной стратификации, наличием плотностных течений, ледоставом (полным и неполным) в зимний период. По принятой гидрологической классификации Телецкое озеро относится к водоемам димиктического типа.

Содержание растворенного кислорода в воде Телецкого озера меняется в пределах от 8 до 13 мг/л, среднегодовое насыщение составляет 87 %, в летне-осенний период в верхних слоях наблюдается перенасыщение кислородом 101–112 % [12]. Ситуацию по кислороду в целом определяет бедность водоема органическими веществами, что влечет слабую выраженность процессов фотосинтеза и окисления. Это подтверждает относительно малое среднегодовое значение содержания углекислоты CO_2 в воде озера – 3,9 мг/л.

Математическая модель кислородного режима Телецкого озера

При описании процессов переноса растворенного кислорода в Телецком озере в качестве гидрофизической основы использована гидротермическая 1DV модель. Математическая (1DV) модель поведения растворенного кислорода в Телецком озере с использованием стандартных уравнений Стритера–Фелпса описана в [10]. Модифицированные уравнения модели Стритера–Фелпса [11] для расчетов глубоких водоемов имеют следующий вид:

$$\frac{\partial(SC)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z}(QC) = \frac{\partial}{\partial z}(SK_C \frac{\partial C}{\partial z}) + q_{in} C_{in} - q_{out} C - Sk_1 L,$$

$$\frac{\partial(SL)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z}(QL) = \frac{\partial}{\partial z}(SK_L \frac{\partial L}{\partial z}) + q_{in} L_{in} - q_{out} L - Sk_1 L,$$

где C – концентрация растворенного кислорода;

L – лабильное органическое вещество;

z – пространственная вертикальная переменная (высота);

t – время;

$S = S(z)$ – площадь горизонтального сечения водоема в зависимости от высоты z ;

$Q(z, t)$ – вертикальный расход воды;

$q_{in}(z, t)$ – удельный (на единицу высоты) расход втекающей воды;

$q_{out}(z, t)$ – удельный (на единицу высоты) расход вытекающей воды;

K_C, K_L – коэффициенты эффективной диффузии;

C_{in} – концентрация растворенного кислорода во втекающей воде;

L_{in} – лабильное органическое вещество во втекающей воде;

$k_1 = k_L (1 - \frac{C_s - C}{C_s})$ – скорость окисления согласно [11];

k_L – постоянная скорости окисления лабильного органического вещества;

$C_s = 14,62 - 0,4042 \cdot T + 0,0084 \cdot T^2 - 0,00009 \cdot T^3$ – концентрация насыщения растворенного кислорода, вычисляемая как функция от температуры воды T .

Граничные условия:

На дне ($z = 0$): $K_C \frac{\partial C}{\partial z} = 0$; $K_L \frac{\partial L}{\partial z} = 0$.

На поверхности воды ($z = H$): $K_C \frac{\partial C}{\partial z} = k_r (C_s - C)$; $K_L \frac{\partial L}{\partial z} = 0$.

Здесь k_r – скорость обмена кислородом через границу «воздух–вода». Для определения коэффициента k_r используется стандартная формула Р.Б. Бэнкса [14].

Турбулентное число Прандтля и турбулентное число Шмидта, применяемые при расчете эффективных коэффициентов диффузии, задавались с использованием подходов [15, 16].

При постановке задачи описания переноса растворенного кислорода в замерзающих водоемах учитывается формирование ледяного покрова в зимний период. Наличие или отсутствие ледяного покрова принимается во внимание при вычислении потока кислорода через границу воздух–вода (при наличии ледяного покрова предполагается $K_c \frac{\partial C}{\partial z} = 0$).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Начально-краевая задача сводится к полуунейвной системе конечно-разностных уравнений с использованием метода конечных объемов [17–19]. Количество узлов сетки задавалось равным 1400, использовался шаг по времени 300 с, гарантирующий устойчивость расчетов по числу Куранта. Система алгебраических уравнений решается методом прогонки.

Для проведения измерений вертикальных распределений гидрофизических характеристик Телецкого озера в 2010–2022 гг. использовались глубоководные профилографы SeaCat SBE 19plus V2 (2010–2015 гг.) и SBE 25plus Sealogger CTD (2016–2022 гг.) фирмы Sea-Bird Electronics, Inc. (США). Растворенный кислород в 2010–2022 гг. измеряли датчиком SBE43 производства этой же фирмы.

Определенной проблемой является корректный процесс сравнения натуральных и расчетных данных. В настоящее время не имеется полного набора входной информации, необходимого для проведения расчетов в течение безледоставного периода для конкретного года. Однако такие данные можно сформировать для сценарного года с использованием результатов натуральных наблюдений за разные годы. Поскольку в летние месяцы гидрометеорологическая информация для различных лет различается незначительно, считаем корректным сравнивать данные расчетов для сценарного года с соответствующими результатами измерений для конкретных лет.

Другой вопрос заключается в том, что поскольку рассматриваемая модель построена путем осреднения исходных трехмерных уравнений по горизонтальным сечениям, то более корректно было бы выполнить соответствующее осреднение натуральных данных наблюдений перед сопоставлением результатов расчетов и наблюдений. Однако, с одной стороны, частота измерений вертикальных распределений исследуемых параметров Телецкого озера не позволяет качественно выполнить такое осреднение. С другой стороны, наблюдения показали относительную однородность данных параметров по горизонтальным направлениям в период между состояниями весенней и осенней гомотермии озера.

Известно, что в Телецком озере с начала июня по середину июля происходит формирование и движение фронтов весенне-летнего термобара в сторону глубоководной части водоема [20]. Вследствие этого возникают горизонтальные градиенты всех характеристик водной массы (в первую очередь, температуры) и применение 1DV моделей будет не столь обосновано. После прохождения

фронтов термобара до участка в районе устья р. Корбу температура воды Телецкого озера становится практически однородной во всех слоях водной толщи. Такая ситуация сохраняется вплоть до начала осеннего охлаждения озера.

Измерения характеристик воды Телецкого озера на станциях, положение которых показано на рис. 1, выполнены 28 июля 2021 г.

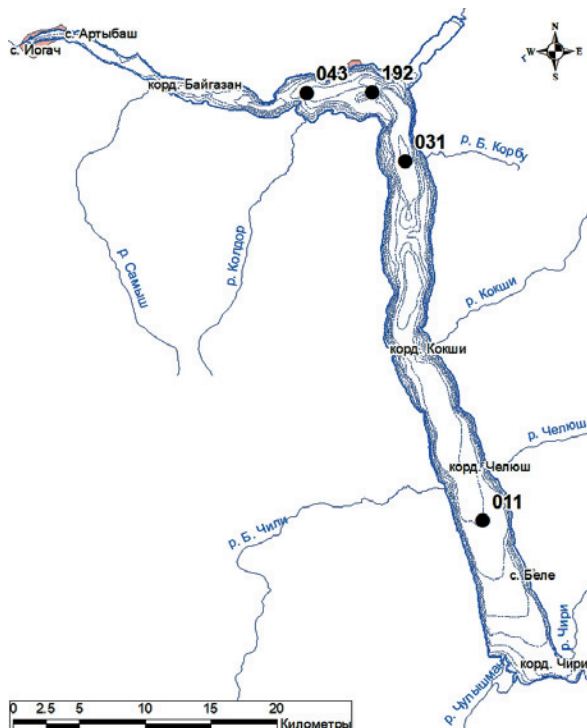


Рис. 1. Телецкое озеро, точки измерений, 28 июля 2021 г.
Fig. 1. The Lake Teletskoye, measurement points, July 28, 2021.

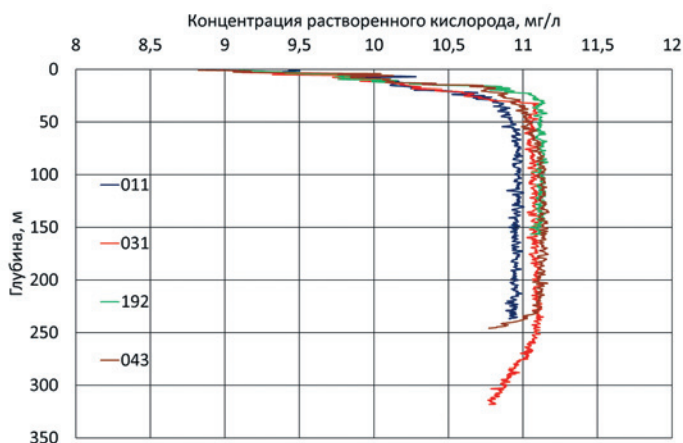


Рис. 2. Профили измеренной концентрации растворенного кислорода в воде Телецкого озера на 28 июля 2021 г. в различных типичных точках.
Fig. 2. Profiles of measured dissolved oxygen concentrations on July 28, 2021 at various representative locations.

На рис. 2 приведены вертикальные распределения концентрации растворенного кислорода на станциях, которые подобны между собой. Это позволяет принять в качестве осредненного распределения по глубине измеренные профили в наиболее глубоком месте Телецкого озера – вблизи устья р. Корбу.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В рамках проведенного исследования выполнены расчеты процесса переноса растворенного кислорода в Телецком озере в летний период по обеим 1DV моделям [9, 11]. Результаты расчетов температуры воды и концентрации растворенного кислорода на отдельные даты модельного года представлены на рис. 3. Также на рис. 3 приведены данные натурных измерений на соответствующие даты разных лет. Отметим, что расчетные данные концентрации растворенного кислорода по обеим моделям оказались очень близки и их профили совпадают с графической точностью. Все результаты свидетельствуют о благополучном состоянии кислородного режима Телецкого озера со значениями концентраций растворенного кислорода близкими к концентрации насыщения.

Несмотря на то что измерения проводились в разные годы, натурные профили температуры воды количественно хорошо соответствуют расчетным данным. Измеренные профили концентрации растворенного кислорода качественно соответствуют расчетным, хотя и в количественном отношении разница между расчетными и натурными данными не превышает 10 %. На глубинах более 100 м наблюдаемое хорошее согласие профилей температуры воды можно объяснить прямым способом измерения температуры. Концентрация растворенного кислорода измеряется косвенным методом и существенно зависит от качества калибровки датчика растворенного кислорода. Можно предположить, что использованный в измерениях датчик растворенного кислорода, откалиброванный не для условий воды Телецкого озера, имеет более значительные погрешности при температуре воды менее 5 °С.

Выполнены вариантные расчеты для экстремальных ситуаций. Первый случай – Телецкое озеро на начало расчетного периода имеет насыщение кислородом с концентрацией, близкой к равновесной, а вода притоков крайне обеднена растворенным кислородом, в то время как значение БПК₅ значительное. Второй случай – Телецкое озеро на начало расчетного периода обеднено кислородом, а вода притоков им насыщена.

Результаты расчетов данных сценариев показали заметную разницу использования классической и модифицированной моделей кислородного режима. Так, для первого случая (рис. 4 и рис. 5) минимальная концентрация кислорода различалась более чем на 1 мг/л. Для второго случая (рис. 6 и рис. 7) разница между моделями еще более увеличилась. Классическая модель вышла за диапазон своего применения и показала в конечном итоге практически полное исчезновение растворенного кислорода с приповерхностных слоев, в то время как модифицированная модель дала более адекватные результаты и показала некоторое восстановление кислородного режима.

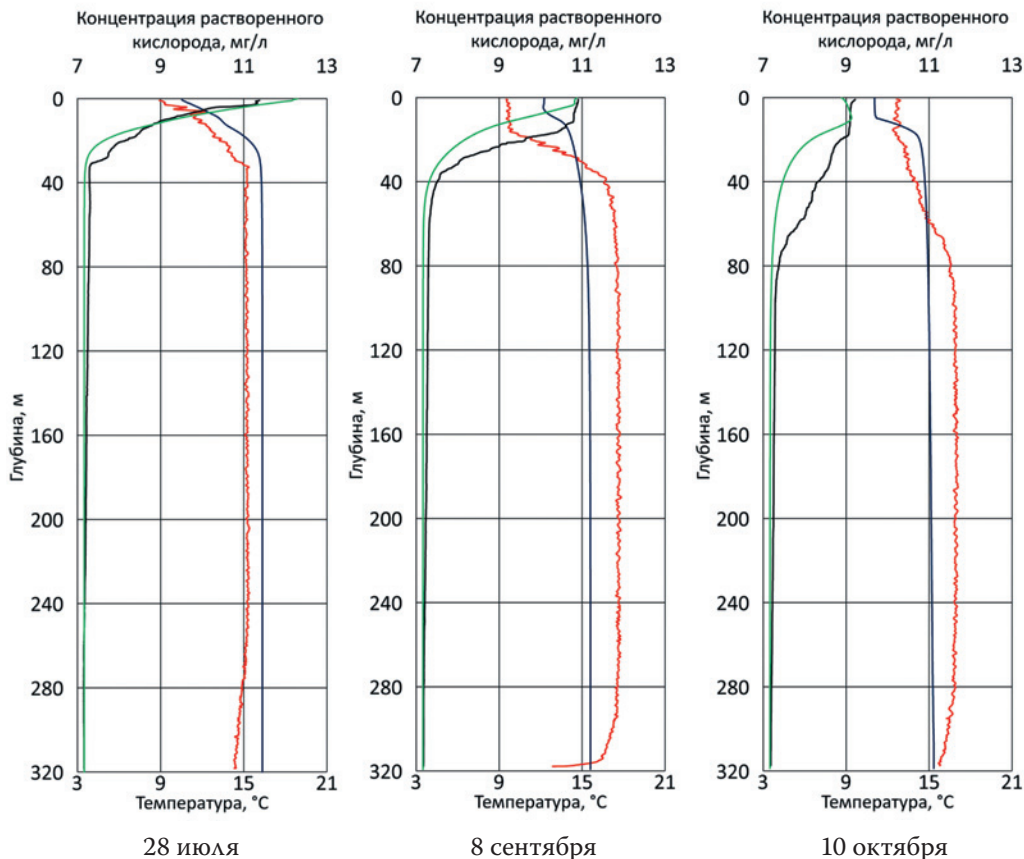


Рис. 3. Расчетные и натурные данные: профиль измеренной концентрации растворенного кислорода – красный цвет; профиль рассчитанной концентрации – синий цвет; профиль измеренной температуры – черный цвет; профиль рассчитанной температуры – зеленая линия; профиль дефицита измеренного растворенного кислорода – коричневый цвет; профиль дефицита рассчитанного растворенного кислорода – голубой.

Fig. 3. Calculated and natural data: The profile of the measured DO concentration is shown in red. The profile of the calculated DO concentration is shown in dark blue. The measured temperature profile is shown in black. The calculated temperature profile is shown in green. The profile of the measured DO deficit is shown in brown. The profile of the calculated DO deficit is shown in blue.

В итоге обе модели продемонстрировали, что за летний период параметры воды Телецкого озера на глубине более 30 м практически не меняются, несмотря на их сильные колебания у поверхности. Такие данные согласуются с расчетами по 3D термогидродинамической модели, итоги которых показывают, что за летний период вода основного притока р. Чулышман почти не распространяется на глубины более 30 м.

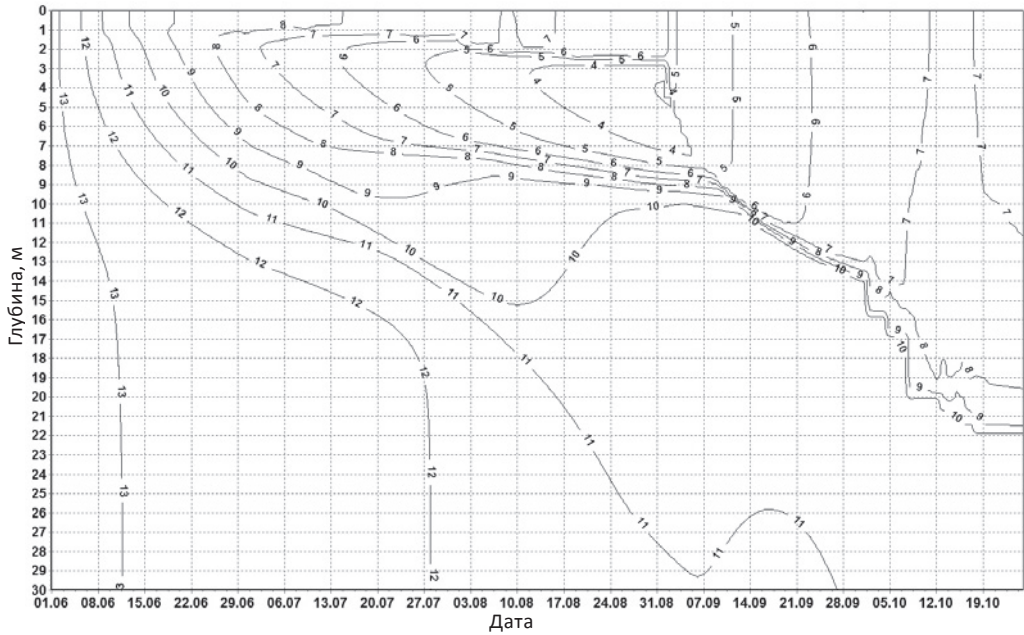


Рис. 4. Осредненная концентрация растворенного кислорода, рассчитанная по классической модели [9]. Сценарий обедненных кислородом притоков.
 Fig. 4. Average concentration of dissolved oxygen, calculated using the classical RK model [9]. Scenario of oxygen-depleted tributaries.

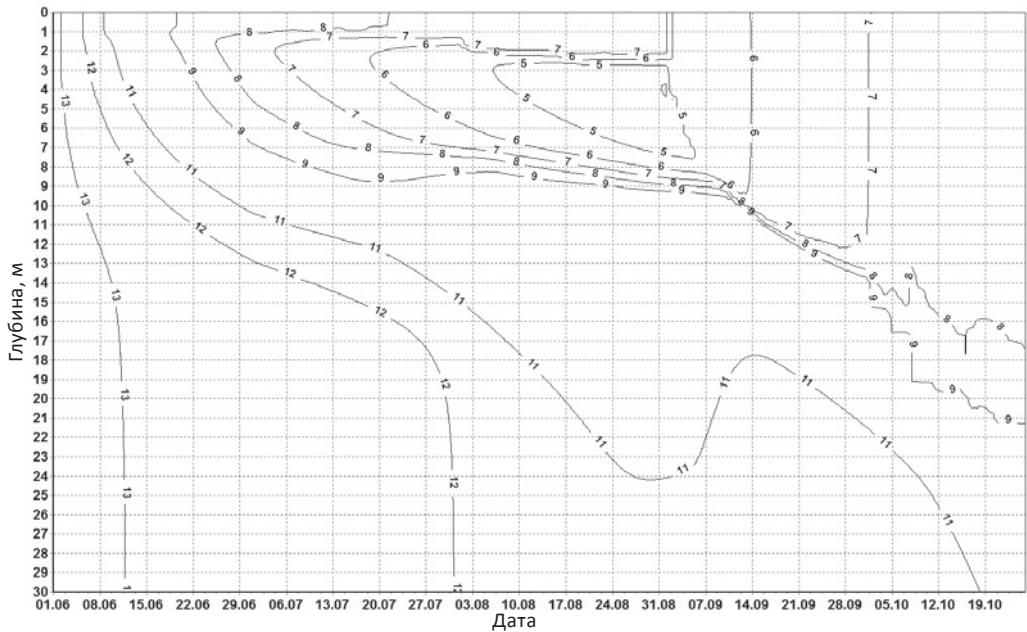


Рис. 5. Осредненная концентрация растворенного кислорода, рассчитанная по модифицированной модели [11]. Сценарий обедненных кислородом притоков.
 Fig. 5. Average concentration of dissolved oxygen, calculated using a modified model [11]. Scenario of oxygen-depleted tributaries.

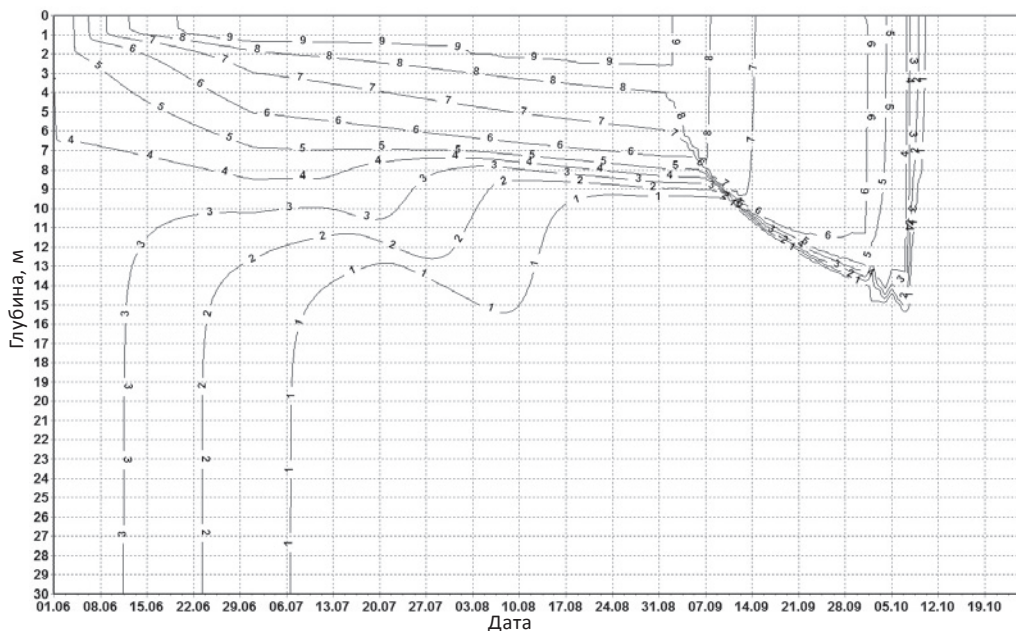


Рис. 6. Осредненная концентрация растворенного кислорода, рассчитанная по классической модели [9]. Сценарий начального состояния Телецкого озера, обедненного кислородом.

Fig. 6. Average concentration of dissolved oxygen, calculated using the classical model [9]. Scenario of the initial state of Lake Teletskoye, depleted of oxygen.

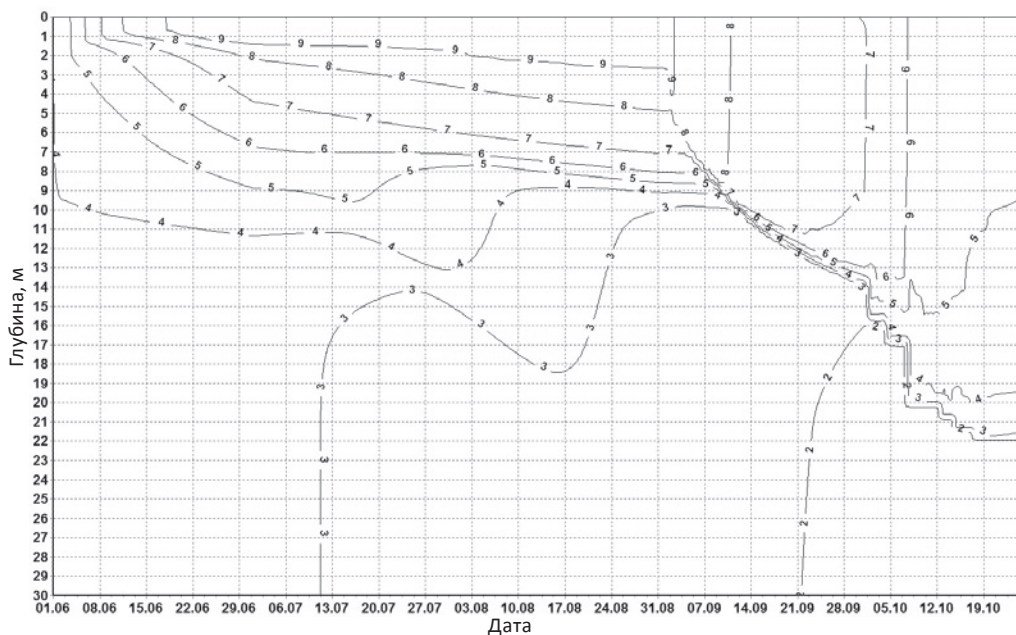


Рис. 7. Осредненная концентрация растворенного кислорода, рассчитанная по модифицированной модели [11]. Сценарий начального состояния Телецкого озера, обедненного кислородом.

Fig. 7. Average concentration of dissolved oxygen, calculated using a modified model [11]. Scenario of the initial state of Lake Teletskoye, depleted of oxygen.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены натурные исследования содержания растворенного кислорода в уникальном водном объекте – Телецком озере. На основе результатов наблюдений показано, что для описания процессов переноса кислорода можно использовать математические модели в одномерном вертикальном приближении. Выполнены расчеты кислородного режима Телецкого озера на основе модели Стритера–Фелпса. Результаты расчетов хорошо согласуются с данными наблюдений.

Известно, что классическая модель Стритера–Фелпса имеет определенные ограничения по диапазону рассчитываемых концентраций растворенного кислорода. Для устранения данных ограничений А.В. Готовцевым предложена модификация модели, которая в рамках представленной работы впервые применена для расчетов характеристик реального водного объекта – Телецкого озера. Сравнительные вычисления показали, что для Телецкого озера в бытовых условиях результаты расчетов содержания растворенного кислорода по обеим моделям близки. Однако сценарные расчеты возможных экстремальных ситуаций продемонстрировали преимущество использования модели Стритера–Фелпса в модификации А.В. Готовцева для описания и прогнозирования содержания растворенного кислорода в природных водоемах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бреховских В.Ф. Гидрофизические факторы формирования кислородного режима водоемов. М.: Наука, 1988. 168 с.
2. Веницианов Е.В, Лепихин А.П., Кирпичникова Н.В. Разработка гидродинамической модели и модели формирования загрязнений равнинного водохранилища (на примере Клязьминского водохранилища) // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2013. № 2. С. 96–107.
3. Богомолов А. В., Лепихин А. П., Ляхин Ю. С., Белобородов А.В., Тиунов А.А. К вопросу оценки качества воды Аргазинского водохранилища // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2021. № 1. С. 6–23. DOI: 10.35567/1999-4508-2021-1-1.
4. Тимченко В.М. Экологическая гидрология водоемов Украины. Киев: Наукова думка, 2006. 384 с.
5. Хендерсон-Селлерс Б. Инженерная лимнология. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. 336 с.
6. Cox V.A. A Review of Currently Available In-Stream Water-Quality Models and Their Applicability for Simulating Dissolved Oxygen in Lowland Rivers. // The Science of the Total Environment. 2003. Vol. 314. P. 335–377. DOI: 10.1016/S0048-9697(03)00063-9.
7. Tim Wool, Robert B. Ambrose Jr., James L. Martin and Alex Comer. WASP 8: The Next Generation in the 50-year Evolution of USEPA's Water Quality Model // Water. 2020. Vol. 12. No. 5. P. 1398. DOI: 10.3390/w12051398.
8. Fang Y., Liu H. A spatiotemporal dissolved oxygen prediction model based on graph attention networks suitable for missing data // Environmental Science and Pollution Research. 2023. Vol. 30. P. 82818–82833. DOI: 10.1007/s11356-023-28030-w.
9. Streeter H. W., Phelps E. B. A Study of the pollution and natural purification of the Ohio river// Public Health Bulletin. 1925. No. 146. P. 1–75.
10. Зиновьев А.Т., Кириллов В.В., Марусин К.В., Андреева А.Ю. Прогноз качества воды глубоких водохранилищ для решения задач управления // Ползуновский вестник. 2005. № 4. Ч. 2. С. 101–106.
11. Готовцев А.В. Модификация системы Стритера-Фелпса с целью учета обратной связи между концентрацией растворенного кислорода и скоростью окисления органического вещества // Водные ресурсы. 2010. Т. 37. № 2. С. 250–256.

12. Селегей В.В., Селегей Т.С. Телецкое озеро. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 142 с.
13. Selegei V., Dehandschutter B., Klerks J., Vysotsky A. Physical and geological environment of Lake Teletskoye // *Annales Sciences Geologiques*. 2001. Vol. 105. P. 1–310.
14. Banks R.B. Some features of wind action on shallow lakes // *Proceedings of American Society of Civil Engineers, Journal of Environmental Engineering*. 1975. Vol. 101. P. 813–827.
15. Гладских Д.С., Соустова И.А., Троицкая Ю.И., Мортиков Е.В. О влиянии стратификации и сдвига на турбулентное перемешивание во внутренних водоемах // *Процессы в геосредах*. 2019. № 4 (22). С. 459–465.
16. Соустова И.А., Троицкая Ю.И., Гладских Д.С., Мортиков Е.В. Простое описание турбулентного переноса в стратифицированном сдвиговом потоке применительно к описанию термогидродинамики внутренних водоемов // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2020. Т. 56. № 6. С. 689–699. DOI 10.31857/S0002351520060103.
17. Зиновьев А.Т. Моделирование температурной стратификации Телецкого озера // Основные закономерности глобальных и региональных изменений климата и природной среды в позднем кайнозое Сибири / Институт археологии и этнографии Сибирского отделения РАН. Т. 1. Новосибирск, 2002. С. 212–216.
18. Зиновьев А. Т., Копылов Ю. Н., Кузьмин А. А. Одномерная вертикальная модель процесса седиментации в глубоком водохранилище // *Водные ресурсы*. 1995. Т. 22. № 6. С. 676–683.
19. Васильев О. Ф., Зиновьев А. Т., Иванов П. В., Сухенко С. А. Математическая модель миграции растворенной примеси в системе водохранилище – затопленные почвы // *Водные ресурсы*. 1993. Т. 20. № 6. С. 701–706.
20. Зиновьев А.Т., Кошелев К.Б., Дьяченко А.В., Марусин К.В. Численное моделирование и натурные исследования термобара в Телецком озере // *Метеорология и гидрология*. 2021. № 5. С. 86–94. DOI: 10.52002/0130-2906-2021-5-86-94.

REFERENCES

1. Brekhovskikh V.F. Hydro/physical factors of oxygen regime formation. M.: Nauka, 1988. 168 p. (In Russ.).
2. Venitsianov E. V., Lepikhin A. P., Kirpichnikova N. V. Development of a hydrodynamic model and a model for the formation of pollution in a lowland reservoir (using the example of the Klyazma reservoir). *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2013. No. 2. P. 96–107. (In Russ.).
3. Bogomolov A.V., Lepikhin A.P., Lyakhin Yu. S., Beloborodov A.V., Tiunov A.A. Assessment of water quality of argazin reservoir and peculiarities of bottom sediments impact on it. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2021. No. 1. P. 6–23. DOI: 10.35567/1999-4508-2021-1-1 (In Russ.).
4. Timchenko V.M. Ecological hydrology of Ukrainian reservoirs. Kyiv: Naukova Duma, 2006. 384 p. (In Russ.).
5. Henderson-Sellers B. *Engineering Limnology*. Pitman Advanced Pub. Program, 1984. 356 p.
6. Cox B.A. A Review of Currently Available In-Stream Water-Quality Models and Their Applicability for Simulating Dissolved Oxygen in Lowland Rivers. *The Science of the Total Environment*. 2003. Vol. 314. P. 335–377. DOI: 10.1016/S0048-9697(03)00063-9
7. Tim Wool, Robert B. Ambrose Jr., James L. Martin and Alex Comer. WASP 8: The Next Generation in the 50-year Evolution of USEPA's Water Quality Model. *Water*. 2020. Vol. 12. No. 5. P. 1398; DOI: 10.3390/w12051398.
8. Fang Y., Liu H. A spatiotemporal dissolved oxygen prediction model based on graph attention networks suitable for missing data. *Environmental Science and Pollution Research*. 2023. Vol. 30. P. 82818–82833; DOI: 10.1007/s11356-023-28030-w.
9. Streeter H. W., Phelps E. B. A Study of the pollution and natural purification of the Ohio river. *Public Health Bulletin*. 1925. No. 146. P. 1–75.
10. Zinoviev A.T., Kirillov V.V., Marusin K.V., Andreeva A.Yu. Forecast of water quality in deep reservoirs for solving management problems. *Polzunovsky Bulletin*. 2005a. No. 4/2. P. 101–106 (In Russ.).
11. Gotovtsev A. V. Modification of the Streeter-Phelps system with the aim to account for the feedback between dissolved oxygen concentration and organic matter oxidation rate. *Water Resources*. 2010. Vol. 37. No. 2. P. 245–251. DOI 10.1134/S0097807810020120.

12. Selegei V., Selegei T. Lake Teletskoye. L.: Gidrometeoizdat, 1978. 142 p. (In Russ.).
13. Selegei V., Dehandschutter B., Klerks J., Vysotsky A. Physical and geological environment of Lake Teletskoye. *Annales Sciences Geologiques*. 2001. Vol. 105. P. 1–310.
14. Banks R.B. Some features of wind action on shallow lakes. *Proceedings of American Society of Civil Engineers, Journal of Environmental Engineering* 1975. Vol. 101. P. 813–827.
15. Gladskikh D.S., Soustova I.A., Troitskaya Yu.I., Mortikov E.V. On the Influence of Stratification and Shear on the Inland Waters Turbulent Mixing. *Processes in GeoMedia*. 2019. No. 4(22). P. 459–465 (In Russ.).
16. Soustova I.A., Troitskaya Yu.I., Gladskikh D.S., Mortikov E.V. A Simple Description of the Turbulent Transport in a Stratified Shear Flow as Applied to the Description of Thermo/hydrodynamics of Inland Water Bodies. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2020. Vol. 56. No. 6. P. 603–612. DOI 10.1134/S0001433820060109 (In Russ.).
17. Zinoviev A.T. Modeling the temperature stratification of Lake Teletskoye. *Basic patterns of global and regional changes in climate and natural environment in the Late Cenozoic of Siberia: collection of articles*. Institute of Archeology and Ethnography of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. Vol. 1. Novosibirsk: Institute of Archeology and Ethnography of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2002. P. 212–216 (In Russ.).
18. Zinoviev A. T., Kopylov Yu. N., Kuzmin A. A. One-dimensional vertical model of the sedimentation process in a deep reservoir. *Water Resources*. 1995. Vol. 22. No. 6. P. 676–683. (In Russ.).
19. Vasiliev O.E., Zinoviev A.T., Ivanov P.V., Sukhenko S.A. Mathematical model of migration of dissolved impurities in the reservoir – flooded soils system. *Water Resources*. 1993. Vol. 20. No. 6. P. 701–706. (In Russ.).
20. Zinoviev A.T., Koshelev K.B., Dyachenko A.V., Marusin K.V. Numerical modeling and field studies of the thermal bar in Lake Teletskoye. *Meteorology and Hydrology*. 2021. No. 5. P. 86–94. DOI: 10.52002/0130-2906-2021-5-86-94. (In Russ.).

Сведения об авторах:

Зинovieв Александр Тимофеевич, д-р техн. наук, директор Института водных и экологических проблем СО РАН, Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, д. 1; ORCID: 0000-0003-4973-2803; e-mail: zinoviev@iwep.ru

Кошелев Константин Борисович, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Институт водных и экологических проблем СО РАН, Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, д. 1; ORCID: 0000-0002-7124-3945; e-mail: koshelev@iwep.ru

Дьяченко Александр Владимирович, научный сотрудник, Институт водных и экологических проблем СО РАН, Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, д. 1; ORCID: 0000-0003-4178-8415; e-mail: dychenko@iwep.ru

About the authors:


Aleksandr T. Zinoviev, Doctor of Technical Sciences, Director of the Institute for Water and Environmental Problems SB RAS (IWEP SB RAS). 1, Molodezhnaya St., 656038 Barnaul, Russia; ORCID: 0000-0003-4973-2803; e-mail: zinoviev@iwep.ru

Konstantin B. Koshelev, Candidate of Physical/Mathematical Sciences, Senior Researcher, Institute for Water and Environmental Problems SB RAS. 1, Molodezhnaya St., 656038 Barnaul, Russia; ORCID: 0000-0002-7124-3945; e-mail: koshelev@iwep.ru

Aleksandr V. Dyachenko, Researcher, Institute for Water and Environmental Problems SB RAS. 1, Molodezhnaya St., 656038 Barnaul, Russia; ORCID: 0000-0003-4178-8415; e-mail: dychenko@iwep.ru

Мониторинг естественных радионуклидов ряда U-238 в родниках Екатеринбурга

В.С. Семенищев  , Ю.И. Насонова, С.М. Титова ,
А.В. Воронина , Е.И. Денисов

 vovius82@mail.ru

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

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Источники нецентрализованного водоснабжения – скважины и родники – до сих пор пользуются популярностью у населения даже в крупных городах. Однако вода таких источников может содержать значительные концентрации загрязняющих веществ, в т. ч. природные радионуклиды. В работе 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. **Методы.** Удельные активности радона в пробах воды измеряли непосредственно на гамма-спектрометре. В анализе Ra-226 проводили предварительное сорбционное концентрирование радия на сорбенте Т-5 с последующим выделением радия на тонкослойном плоском сорбенте MnO_2 -ПЭ. Анализ удельной активности Pb-210 выполняли в соответствии с методикой, разработанной компанией TrisKem International (Франция), основанной на селективном выделении свинца-210 на экстракционно-хроматографической смоле на основе краун-эфира. **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.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: родники, радон-222, радий-226, уран-238, свинец-210, мониторинг.


Финансирование: Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках базовой части госзадания, проект № FEUZ-2023-0013.

Для цитирования: Семенищев В.С., Насонова Ю.И., Титова С.М., Воронина А.В., Денисов Е.И. Мониторинг естественных радионуклидов ряда U-238 в родниках Екатеринбурга // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2023. № 6. С. 70–81. DOI: 10.35567/19994508_2023_6_6.

Дата поступления 21.07.2023.

MONITORING OF U-238 SERIES NATURAL RADIONUCLIDES IN SPRINGS NEAR EKATERINBURG

Vladimir S. Semenishchev  , Yulia I. Nasonova, Svetlana M. Titova ,
Anna V. Voronina , Eugeny I. Denisov

 vovius82@mail.ru

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

© Семенищев В.С., Насонова Ю.И., Титова С.М., Воронина А.В., Денисов Е.И., 2023

ABSTRACT

Relevance. Sources of non-centralized water supply such as wells and springs are still popular even in large cities. At the same time, water from these sources may contain significant concentrations of pollutants including natural radionuclides. The article presents the results of a 1.5-year monitoring of Rn-222 activity concentrations in seven springs near Ekaterinburg as well as activity concentrations of U-238, Ra-226 and Pb-210 in water of these springs. **Methods.** Activity concentrations of Rn-222 were determined via gamma spectrometry, U-238 was determined by ICP-MS; both analyses were performed without sample pretreatment. Ra-226 and Pb-210 were analyzed in accordance with radiochemical methods including a radionuclide preconcentration from 5 – 10 L water sample, purification, source preparation and measurement. We have performed analysis of the Pb-210 specific activity according to the methods developed by TrisKem International (France) based on selective isolation of Pb-210 at extraction/chromatographic resin based on crown-ether. **Results.** It was calculated that the contribution of Rn-222 to the annual internal dose exposures was 98.3 – 99.8%. Thus, radon monitoring is a priority for evaluation of radiation safety of underground drinking water sources.

Key words: springs, radon-222, radium-226, uranium-238, lead-210, monitoring.

Financing: The work was partially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (through the basic part of the government mandate, Project No. FEUZ-2023-0013).

For citation: Semenishchev V.S., Nasonova Y.I., Titova S.M., Voronina A.V., Denisov E.I. Monitoring of U-238 series natural radionuclides in springs near Ekaterinburg. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2023. No. 6. P. 70–81. DOI: 10.35567/19994508_2023_6_6.

Received 21.07.2023.

ВВЕДЕНИЕ

Источники нецентрализованного питьевого водоснабжения, такие как родники, скважины и колодцы, востребованы не только в сельской местности, но и в крупных городах. Несмотря на распространенное мнение о заведомой чистоте воды из таких источников («чем дальше родник от дороги, тем чище вода», «чем глубже скважина, тем чище в ней вода» и т. д.) и на то, что вода многих родников действительно удовлетворяет всем санитарно-гигиеническим требованиям [1], она зачастую может быть загрязнена как за счет хозяйственной деятельности человека, так и в результате естественных причин [2]. Среди загрязнителей, наиболее часто присутствующих в воде родников и скважин, можно выделить химические – тяжелые металлы [3–5], нефтепродукты [6, 7], ионные формы азота [8], патогенные микроорганизмы [9] и радиоактивные вещества [10–14]. Среди естественных радионуклидов, присутствующих в природных водах, наибольшую дозовую нагрузку вносят радионуклиды рядов U-238 (Ra-226, Rn-222, Pb-210 и Po-210) и Th-232 (Ra-228, Ra-224 и Th-228) [15]. В большинстве случаев наличие в родниковых водах этих радионуклидов обусловлено естественными процессами их выщелачивания из почв и горных пород, содержащих повышенные уровни урана или тория [16, 17].

Радон-222 является наиболее распространенным природным радионуклидом, присутствующим в подземных водах, благодаря его легкой миграции из урансодержащих минералов, инертности и относительно высокой растворимости в воде. В процессе использования радонсодержащей воды радон-222

может переходить в воздух, вызывая внутреннее облучение легочной ткани человека за счет ингаляции радона и его дочерних продуктов распада, что является второй по распространенности после курения причиной рака легких [18, 19]. Поэтому практически во всем мире контроль содержания радона является обязательным при использовании природных подземных вод, и значительное число публикаций посвящено мониторингу радона в подземных водах [20]. Помимо этого, повышенная активность радона в воде однозначно свидетельствует о повышенных концентрациях материнского урана в составе горных пород, через которые протекала вода, обогащаясь радоном. Следовательно, высокая активность радона в подземной воде может быть индикатором наличия в ней и других долгоживущих радионуклидов из ряда урана-238: обладающих высокой радиотоксичностью Ra-226, Pb-210 и Po-210.

Целью данного исследования является определение степени опасности содержания природных радионуклидов ряда урана-238 в воде родников, используемых населением г. Екатеринбурга в качестве нецентрализованных источников питьевого водоснабжения.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В 2020 г. при анализе родников Свердловской области, используемых населением в качестве нецентрализованных источников питьевого водоснабжения, было обнаружено семь родников с превышением уровня вмешательства по радону-222 [21], составляющему 60 Бк/л¹. В данном исследовании в этих семи родниках проводился мониторинг сезонных колебаний удельной активности радона, а также анализ содержания природных радионуклидов из ряда U-238: U-238, Ra-226 и Pb-210. Карта расположения родников представлена на рис. 1.

Для мониторинга Rn-222 пробы воды из родников отбирали с сентября 2020 г. по июнь 2022 г. с периодичностью раз в месяц в герметичные пластиковые бутылки емкостью 1,5–2 л. Перед измерением выдерживали в течение минимум 3–5 ч (как правило, 12–20 ч) для установления радиоактивного равновесия радона с короткоживущими дочерними радионуклидами (Po-218, At-218, Pb-214 и Bi-214). Активность радона в пробах измеряли на сцинтиляционном гамма-бета-спектрометре «Атомтех МКС-1315 АТ» (Атомтех, Беларусь) по линии равновесного дочернего гамма-излучающего изотопа Bi-214 (E = 609 кэВ) в стандартной геометрии Маринелли (1 л). Активности радона пересчитывали на момент отбора по формуле:

$$A = A_0 \times e^{-\lambda t}, \quad (1)$$

где A и A_0 – удельные активности Rn-222 в пробе (Бк/л) на момент измерения и на момент отбора, соответственно;

t – время между отбором и измерением, ч;

λ – постоянная распада Rn-222, 0,01089 1/ч²;

¹ СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009)». М.: Энергоатомиздат, 2010. 222 с.

² МАГАТЭ – интерактивная карта нуклидов / IAEA Live Chart of Nuclides. Режим доступа: <https://www-nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html>.

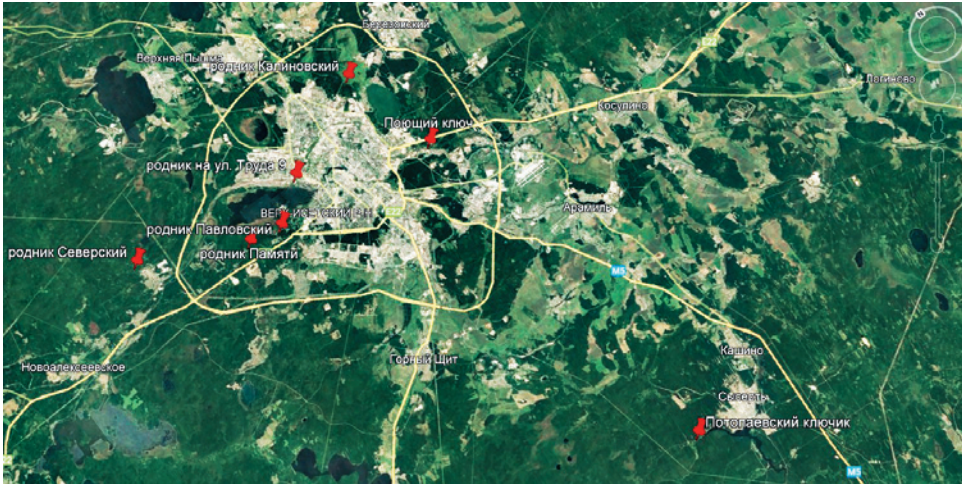


Рис. 1. Карта расположения родников в окрестностях Екатеринбурга, в которых было установлено превышение уровня вмешательства по Rn-222 (получено с помощью программы Google Earth).

Fig. 1. A map with location of seven springs with an elevated content of Rn-222 (obtained using the Google Earth software).

Концентрацию урана в воде родников определяли без предварительной подготовки на масс-спектрометре NexION 350 (Perkin Elmer, США) из проб, отобранных для определения радона. Обработку первичных результатов анализа осуществляли с помощью прикладного программного пакета TotalQuant. Активность U-238 в воде вычисляли, исходя из концентрации по формуле:

$$A = \frac{m}{M} \times N_A \times \frac{\ln 2}{T_{1/2}}, \quad (2)$$

где m – масса радионуклида, г;
 M – молярная масса, г/моль;
 N_A – число Авогадро, моль⁻¹;
 $T_{1/2}$ – период полураспада, с.

Для определения удельных активностей Ra-226 и Pb-210 отбирали пробы воды объемом 10 л. Для анализа Ra-226 проводили предварительное сорбционное концентрирование радия в динамических условиях на сорбенте Т-5 (гидратированный диоксид титана), после чего радий десорбировали 1М раствором соляной кислоты. Полученный концентрат нейтрализовали до pH = 5,5–6,5 гидроксидом натрия, после чего проводили сорбцию радия на тонкослойном плоском сорбенте MnO₂-ПЭ и измеряли сорбент на альфа-спектрометре Мультирад-АС (НТЦ «Амплитуда», Россия) [22]. Анализ удельной активности Pb-210 выполняли в соответствии с методикой, разработанной компанией TrisKem International (Франция). Предварительное концентрирование свинца осуществляли путем соосаждения с гидроксидом железа (III). Селективное выделение Pb-210 проходило на экстракционно-хроматографической смоле SR Resin (TrisKem International, Франция), состоящей из 4,4'(5')-ди-трет-бутилциклогексил-18-краун-6, разбавленного н-октанолом

и нанесенного на инертный носитель [23]. Из полученного концентрата добавлением концентрированной серной кислоты осаждали сульфат свинца, фильтровали полученный осадок через полипропиленовый фильтр с диаметром пор 0,45 мм, выдерживали полученный источник в течение 3–4 недель для установления радиоактивного равновесия с дочерним Bi-210 , после чего измеряли на низкофоновом альфа-бета-радиометре УМФ-2000 (Доза, Россия) с полупроводниковым детектором в течение 10 000 с.

Оценку доз внутреннего облучения за счет потребления радионуклидов с питьевой водой (D_i) рассчитывали в соответствии с уравнением:

$$D_i = A_i \times V \times \varepsilon_i, \quad (3)$$

где A_i – удельная активность радионуклида, Бк/л;

V – годовое потребление воды (2 л/сут = 730 л/год);

ε_i – дозовый коэффициент для данного радионуклида при пероральном потреблении взрослыми людьми: 10^{-8} Зв/Бк для Rn-222 , $4,5 \times 10^{-8}$ Зв/Бк для U-238 , $2,8 \times 10^{-7}$ Зв/Бк для Ra-226 и $6,9 \times 10^{-7}$ Зв/Бк для Pb-210 [24].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные экспериментальные данные по мониторингу содержания радона в воде родников приведены на рис. 2. Родники Северский и на ул. Труда 9 замерзали и не функционировали в конце зимы (февраль-март), остальные родники действовали на протяжении всего года.

По полученным результатам можно сделать вывод, что для большинства родников сезонность существенно влияла на активность радона. Для четырех родников (Потопаевский, Поющий, Памяти и на ул. Труда 9) наблюдалось заметное повышение удельной активности радона в зимне-весенний период, в среднем с января по март 2021 г. Это можно объяснить увеличением растворимости радона в воде при понижении температуры. Кроме того, для данных родников отмечено снижение дебета скважины в холодный период, тогда как скорость распада радионуклидов уранового ряда, а, следовательно, и скорость поставки радона не меняется со временем. Таким образом, удельная активность радона в воде может повышаться за счет снижения количества воды, в которой растворяется в среднем одинаковое количество радона.

Наиболее сильные колебания активности радона наблюдались в роднике Северский – от 50 до 154 Бк/л, т. е. разница между максимальным и минимальным значениями составила 3,06 раза. Вероятно, это связано с особенностями данного родника: он имеет достаточно низкий дебет, а также представляет собой проточный колодец, в отличие от остальных родников, изливающихся через смонтированные металлические или пластиковые трубы. За счет застойной зоны при сильном снижении дебета существенная часть радона успевает перейти в воздух. Аналогичным образом для родника Памяти такое соотношение составило 3,0.

Сильные вариации удельной активности радона в родниках Калиновский и Северский наглядно показывают практический смысл мониторинга природной радиоактивности в родниковых водах. В ряде периодов удельная активность радона в воде этих родников была ниже уровня вмешательства, однако



Рис. 2. Сезонные колебания удельной активности Rn-222 в родниках:
УВ – уровень вмешательства по радону-222 (60 Бк/л).

Fig. 2. Seasonal variations of Rn-222 activity concentrations in the springs:
УВ is the maximum allowed limit of Rn-222 in water (60 Bq/L).

она превышала его в остальные периоды. Таким образом, для более аргументированного принятия решения о пригодности использования того или иного родника для питьевых целей целесообразно проводить хотя бы несколько измерений в различное время года.

Удельные активности естественных радионуклидов ряда U-238 в воде родников г. Екатеринбурга представлены в табл. 1. Для Rn-222 приведено среднее значение активности по данным мониторинга в 2020–2022 гг. Результаты показали, что в отличие от радона для остальных радионуклидов ни в одном случае не было зафиксировано превышение уровня вмешательства. Наиболее низкие активности отмечены для Ra-226 – не более 0,9 мБк/л, при этом

только в трех пробах из семи удельная активность статистически достоверно отличалась от нуля. Удельные активности U-238 находились в пределах от 0,2 до 33 мБк/л, а удельные активности Pb-210 – от 2 до 19 мБк/л. Отметим, что значительных корреляций между активностями изученных четырех радионуклидов в родниковых водах не обнаружено. Скорее всего, это свидетельствует о том, что вода родников не имеет непосредственного контакта с урансодержащими горными породами, а радон поступает в воду через поры и трещины в породах из нижележащих слоев.

Таблица 1. Удельные активности естественных радионуклидов ряда U-238 в воде родников г. Екатеринбурга

Table 1. Activity concentrations of U-238 series natural radionuclides in water from the springs near Ekaterinburg

Родник	Удельные активности радионуклидов			
	U-238, мБк/л	Ra-226, мБк/л	Pb-210, мБк/л	Rn-222 (средн), Бк/л
Поющий ключ	19,78±0,14	не обнаружен	4,1 ± 2,8	81,3
Павловский	5,62±0,15	0,62 ± 0,27	5,6 ± 5,0	70,9
Памяти	2,21±0,11	не обнаружен	19 ± 14	76,0
На ул. Труда 9	32,6±0,5	не обнаружен	11 ± 12	108,9
Потопаевский ключик	3,06±0,04	0,87 ± 0,28	4 ± 16	169,9
Северский	0,20±0,04	не обнаружен	9 ± 3	129,3
Калиновский	5,89±0,04	0,72 ± 0,43	2 ± 5	60,5
Уровень вмешательства по радионуклиду	3000 мБк/л	490 мБк/л	200 мБк/л	60 Бк/л

Таблица 2. Годовые дозы внутреннего облучения за счет поступления естественных радионуклидов ряда U-238 с питьевой водой из родников г. Екатеринбурга

Table 2. Annual internal dose exposure due to U-238 series natural radionuclides in water from the springs near Ekaterinburg

Родник	Годовая доза внутреннего облучения за счет поступления радионуклида с питьевой водой, мкЗв/год					Вклад Rn-222 в годовую дозу облучения, %
	U-238	Ra-226	Pb-210	Сумма U-238 + Ra-226 + Pb-210	Rn-222	
Поющий ключ	0,65	–	2,07	2,72	593	99,5
Павловский	0,18	0,13	4,66	4,97	517	99,0
Памяти	0,07	–	9,80	9,87	555	98,3
На ул. Труда 9	1,07	–	5,37	6,44	795	99,2
Потопаевский ключик	0,10	0,18	2,83	3,11	1240	99,7
Северский	0,01	–	1,94	1,95	944	99,8
Калиновский	0,19	0,15	1,16	1,51	442	99,7

Таким образом, в отличие от Rn-222, удельные активности остальных радионуклидов ряда U-238 были незначительными. Между тем, более адекватную оценку риска для здоровья дает сравнение годовых доз внутреннего облучения за счет поступления радионуклидов с питьевой водой, которые были рассчитаны для измеренных активностей радионуклидов (см. табл. 2).

В соответствии с рекомендациями Международной комиссии по радиационной защите (МКРЗ) годовая доза внутреннего облучения за счет поступления радионуклидов с питьевой водой не должна превышать 100 мкЗв. По данным табл. 2, в случае радона наблюдается кратное превышение рекомендованной дозы (до 12 раз), тогда как дозовая нагрузка урана, радия и свинца находилась в пределах 10 мкЗв. Среди радионуклидов ряда U-238 вклад Rn-222 в годовую дозу облучения составил от 98,3 % до 99,7 %. Таким образом, Rn-222 является дозообразующим радионуклидом среди изученных.

Следует отметить, что даже если вода формально удовлетворяет требованиям российского санитарного законодательства по радону (не более 60 Бк/л), годовая доза внутреннего облучения может существенно превышать уровень, рекомендованный МКРЗ. Рассчитано, что годовой дозе внутреннего облучения 100 мкЗв соответствует удельная активность радона 14 Бк/л, поэтому потенциально есть смысл пересмотреть норматив по радону в сторону ужесточения. Опыт других стран в этой сфере [25] показывает высокую вариативность подходов: наиболее жесткие ограничения (11,1 Бк/л) установлены в США, в большинстве стран (страны ЕС, Австралия и др.) предельно допустимая активность составляет 100 Бк/л, тогда как в ряде стран допускается 500 Бк/л (Ирландия, Португалия, Испания) и даже 1000 Бк/л (Финляндия).

Среди прочих естественных радионуклидов ряда U-238 самый существенный вклад в годовую дозу внутреннего облучения дает Pb-210, что связано с его высокой радиотоксичностью за счет медленного выведения, большого периода полураспада (22 года) и накопления в организме дочерних изотопов – высокоэнергетического бета-излучателя Bi-210 и альфа-излучателя Po-210. Таким образом, при анализе природной воды следует особое внимание уделять определению содержания Rn-222 и в меньшей степени Pb-210.

ВЫВОДЫ

В рамках проведенного исследования осуществлен мониторинг содержания радона-222, а также определены удельные активности урана-238, радия-226 и свинца-210 в семи родниках в окрестностях г. Екатеринбурга. В результате мониторинга установлено, что во всех родниках наблюдаются значительные сезонные колебания удельной активности радона-222, при этом в воде родников Северский и Памяти разница между наибольшим и наименьшим значениями удельной активности составляла около трех раз. Такой значительный разброс этого показателя качества воды свидетельствует о необходимости организации регулярного мониторинга (хотя бы посезонно четыре раза в год) даже в родниках, в воде которых удельная активность радона на основании однократного измерения оказалась несколько ниже уровня вмешательства.

Удельные активности урана-238, радия-226 и свинца-210 во всех случаях не превышали уровней вмешательства, составляя до $32,6 \pm 0,5$ мБк/л для U-238, до $0,87 \pm 0,28$ мБк/л для Ra-226 и до 19 ± 14 мБк/л для Pb-210. При этом, несмотря на значительно более высокую радиотоксичность этих радионуклидов по сравнению с Rn-222, их вклад в годовую дозу внутреннего облучения при употреблении родниковой воды составит не более 0,65, 0,18 и 9,8 мкЗв/год при максимально допустимой дозе облучения за счет поступления радионуклидов с питьевой водой, рекомендованной МКРЗ, 100 мкЗв/год. В то же время, годовые дозы облучения, рассчитанные по среднему содержанию радона в воде родников, составят от 442 до 1240 мкЗв, что в разы превышает рекомендованный уровень.

Таким образом, среди радионуклидов ряда урана-238 вклад радона-222 в годовую дозу облучения при употреблении родниковой воды составляет более 98 %, что подтверждает приоритетность мониторинга радона-222 для оценки пригодности по радиационному фактору природных питьевых вод подземного происхождения. Продолжение работ будет нацелено на расширение мониторинга естественной радиоактивности в природных источниках питьевой воды в Свердловской области.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Закиева Э.Ф., Махмутов А.Р. Мониторинг отдельных показателей воды родников Бураевского района республики Башкортостан // Безопасность жизнедеятельности. 2020. № 12 (240). С. 56–59.
2. Пасечник Е.Ю., Льготин В.А., Савичев О.Г., Чилингер Л.Н., Хвощевская А.А., Чжоу Д. Химический состав родников как индикатор природно-техногенной эволюции городской экосистемы (на примере города Томска, юго-восток Западной Сибири) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333. № 7. С. 195–206.
3. Жинжакова Л.З., Воробьева Т.И., Чередник Е.А. Состав родниковых вод Кабардино-Балкарской республики // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2019. № 5. С. 40–48. DOI: 10.35567/1999-4508-2019-5-3.
4. Ulniković V.P., Kurilić S.M. Heavy metal and metalloid contamination and health risk assessment in spring water on the territory of Belgrade City, Serbia // Environmental Geochemistry and Health. 2020. Vol. 42, Iss. 11. P. 3731–3751.
5. Ghobadi A., Cheraghi M., Sobhanardakani S., Lorestani B., Merrikhpour H. Hydrogeochemical characteristics, temporal, and spatial variations for evaluation of groundwater quality of Hamedan–Bahar Plain as a major agricultural region, West of Iran // Environmental Earth Science. 2020. Vol. 79. Iss. 18. 428 p.
6. Тарасенко И.А., Зиньков А.В. Оценка техногенного загрязнения подземного водного бассейна в районе ликвидированной шахты (Липовецкое каменноугольное месторождение, Приморский край) // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. 2013. № 2 (168). С. 106–115.
7. Козлова В.А., Сивохиц Ж.Т. Оценка динамики качества воды трансграничного бассейна реки Урал // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2022. № 6. С. 107–119. DOI: 10.35567/19994508_2022_6_7.
8. Capraro F., Bizzotto A., Masiol M., Pavoni B. Chemical analyses of spring waters and factor analysis to monitor the functioning of a karstic system. The role of precipitations regimen and anthropic pressures // Journal of Environmental Monitoring. 2011. Vol. 13. Iss. 9. P. 2543–2549.
9. Iličić D., Palijan G. Persistence of coliform bacteria in spring water microcosms // Hrvatske Vode. 2019. Vol. 27. Iss. 109. P. 193–200.

10. Bem H., Olszewski M., Kaczmarek A. Concentration of selected natural radionuclides in the thermal groundwater of Uniejo'w, Poland // *Nukleonika*. 2004. No. 49 (1). P. 1–5.
11. Erden P.E., Dirican A., Seferinoğlu M., Yeltepe E., Şahin N.K. ^{238}U , ^{234}U and ^{226}Ra concentrations in mineral waters and their contribution to the annual committed effective dose in Turkey // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2014. Vol. 301. P. 159–166.
12. Chau N.D., Michalec B. Natural radioactivity in bottled natural spring, mineral and therapeutic waters in Poland // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2009. Vol. 279. P. 121–129.
13. Singla A.K., Kansal S., Mehra R. Quantification of radon contamination in drinking water of Rajasthan, India // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2021. Vol. 327. P. 1149–1157.
14. Girault F., Perrier F., Przylibski T.A. Radon-222 and radium-226 occurrence in water: a review // *Geological Society, London, Special Publications*. 2016. No. 451(1). P. 131–154.
15. Vasile M., Loots H., Jacobs K., Verheyen L., Sneyers L., Verrezen F., Bruggeman M. Determination of ^{210}Pb , ^{210}Po , ^{226}Ra , ^{228}Ra and uranium isotopes in drinking water in order to comply with the requirements of the EU 'Drinking Water Directive' // *Applied Radiation and Isotopes*. 2016. No. 109. P. 465–469.
16. Крячюнас В.В., Кузнецова И.А., Игловский С.А., Баженов А.В., Дружинин С.В., Котова Е.И. Пространственное распределение естественных и техногенных радионуклидов в арктических почвах побережья залива Моллера, архипелаг Новая Земля // *Теоретическая и прикладная экология*. 2021. № 1. С. 147–153.
17. Семенищев В.С., Воронина А.В., Томашова Л.А., Насонова Ю.И. Анализ содержания радона и радия в родниках города Екатеринбурга и его окрестностей // *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. 2021. № 5. С. 84–96.
18. Vogeltanz-Holm N., Schwartz G. G. Radon and lung cancer: What does the public really know? // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2018. Vol. 192. P. 26–31.
19. Pacella D., Loffredo F., Quarto M. Knowledge, risk perception and awareness of radon risks: A Campania region survey // *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*. 2023. Vol. 16, Iss. 4. P. 100721.
20. Nayak T., Basak S., Deb A., Dhal P. K. A systematic review on groundwater radon distribution with human health consequences and probable mitigation strategy // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2022. Vol. 247. P. 106852.
21. Semenishchev V.S., Voronina A.V., Titova S.M., Tomashova L.A., Nasonova Y.I. Natural radioactivity in springs of Sverdlovsk region, middle Urals, Russia // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2021. T. 329. No. 2. С. 857–863.
22. Семенищев В.С., Бетенеков Н.Д., Томашова Л.А. Определение ^{224}Ra и ^{226}Ra в питьевых водах // *Вода: химия и экология*. 2017. № 8 (110). С. 72–79.
23. Horwitz P., Chiarizia R., Dietz M. Acid dependency of the extraction of selected metal ions by a strontium-selective extraction chromatographic resin: calculated vs. experimental curves // *Solvent Extraction and Ion Exchange*, 1992. Vol. 10. P. 337–361. DOI: 10.1080/07366299208918108.
24. ICRP Compendium of dose coefficients based on ICRP Publication 60 ICRP Publication 119, Ann. ICRP, 41, Elsevier (2012)
25. Jobbágy V., Altitzoglou T., Malo P., Tanner V., Hult M. A brief overview on radon measurements in drinking water // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2017. Vol. 173. P. 18–24. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2016.09.019.

REFERENCES

1. Zakieva E.F., Makhmutov A.R. Monitoring of individual indicators of water in the springs of the Buraevsky district of the Republic of Bashkortostan. *Life Safety*. 2020. № 12 (240). P. 56-59 (In Russ.).
2. Pasechnik E.Yu., Lgotin V.A., Savichev O.G., Chilingier L.N., Khvashevskaya A.A., Zhou D. Chemical composition of springs as an indicator of natural-technogenic evolution of the urban ecosystem (on the example of Tomsk city, south-east of Western Siberia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Engineering of geo/resources*. 2022. Vol. 333. № 7. С. 195-206. DOI: 10.18799/24131830/2022/7/3534 (In Russ.).
3. Zhinzhakova L.Z., Vorobieva T.I., Cherednik E.A. The composition of spring waters of the Kabardino-Balkarian Republic. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2019. № 5. P. 40–48. DOI: 10.35567/1999-4508-2019-5-3 (In Russ.).

4. Ulniković V.P., Kurilić S.M. Heavy metal and metalloid contamination and health risk assessment in spring water on the territory of Belgrade City, Serbia. *Environmental Geochemistry and Health*. 2020. Vol. 42, Issue 11. P. 3731-3751. DOI: 10.1007/s10653-020-00617-z.
5. Ghobadi A., Cheraghi M., Sobhanardakani S., Lorestani B., Merrikhpour H. Hydrogeochemical characteristics, temporal, and spatial variations for evaluation of groundwater quality of Hamedan–Bahar Plain as a major agricultural region, *West of Iran. Environmental Earth Science*. 2020. Vol. 79, Issue 18. P. 428. DOI: 10.1007/s12665-020-09177-y.
6. Tarasenko I.A., Zinkov A.V. Assessment of technogenic pollution of the underground water basin in the area of the liquidated mine (Lipovetskoye coal deposit, Primorsky Krai). *Bulletin of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences*. 2013. № 2 (168). P. 106–115 (In Russ.).
7. Kozlova V.A., Sivokhip Zh.T. Evaluation of the dynamics of water quality in the transboundary basin of the Ural River. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2022. No. 6. P. 107–119 (In Russ.).
8. Capraro F., Bizzotto A., Masiol M., Pavoni B. Chemical analyses of spring waters and factor analysis to monitor the functioning of a karstic system. The role of precipitations regimen and anthropic pressures. *Journal of Environmental Monitoring*. 2011. Vol. 13. Issue 9. P. 2543-2549. DOI: 10.1039/c1em10317b.
9. Iličić D., Palijan G. Persistence of coliform bacteria in spring water microcosms. *Hrvatske Vode*. 2019. Vol. 27. Iss. 109. P. 193–200.
10. Bem H., Olszewski M., Kaczmarek A. Concentration of selected natural radionuclides in the thermal groundwater of Uniejo´w, Poland. *Nukleonika*. 2004. № 49(1). P. 1–5.
11. Erden P.E., Dirican A., Seferinoğlu M., Yeltepe E., Şahin N.K. ²³⁸U, ²³⁴U and ²²⁶Ra concentrations in mineral waters and their contribution to the annual committed effective dose in Turkey. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2014. Vol. 301. 159–166. DOI: 10.1007/s10967-014-3105-2.
12. Chau N.D., Michalec B. Natural radioactivity in bottled natural spring, mineral and therapeutic waters in Poland. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2009. Vol. 279. P. 121–129. doi: 10.1007/s10967-007-7276-6.
13. Singla A.K., Kansal S., Mehra R. Quantification of radon contamination in drinking water of Rajasthan, India. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2021. Vol. 327. P. 1149–1157. DOI: 10.1007/s10967-021-07599-x
14. Girault F., Perrier F., Przylibski T.A. Radon-222 and radium-226 occurrence in water: a review. *Geological Society, London, Special Publications*. 2016. № 451(1). P. 131-154. doi: 10.1144/SP451.3.
15. Vasile M., Loots H., Jacobs K., Verheyen L., Sneyers L., Verrezen F., Bruggeman M. Determination of ²¹⁰Pb, ²¹⁰Po, ²²⁶Ra, ²²⁸Ra and uranium isotopes in drinking water in order to comply with the requirements of the EU 'Drinking Water Directive'. *Applied Radiation and Isotopes*. 2016. № 109. P. 465–469. DOI: 10.1016/j.apradiso.2015.11.076
16. Kriauciunas V.V., Kuznetsova I.A., Iglovsky S.A., Bazhenov A.V., Druzhinin S.V., Kotova E.I. Spatial distribution of natural and technogenic radionuclides in arctic soils of the Moller gulf, Novaya Zemlya archipelago. *Theoretical and Applied Ecology*. 2021. № 1. P. 147-153. DOI: 10.25750/1995-4301-2021-1-147-153.
17. Semenishchev V.S., Voronina A.V., Tomashova L.A., Nasonova Yu.I., Analysis of the content of radon and radium in the springs of the city of Yekaterinburg and its environs. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2021. No. 5. P. 84–96 (In Russ.).
18. Vogeltanz-Holm N., Schwartz G. G. Radon and lung cancer: What does the public really know? *Journal of Environmental Radioactivity*. 2018. Vol. 192. P. 26–31. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2018.05.017.
19. Pacella D., Loffredo F., Quarto M. Knowledge, risk perception and awareness of radon risks: A Campania region survey. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*. 2023. Vol. 16. Iss. 4. P. 100721. DOI: 10.1016/j.jrras.2023.100721.
20. Nayak T., Basak S., Deb A., Dhal P. K. A systematic review on groundwater radon distribution with human health consequences and probable mitigation strategy. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2022. Vol. 247. P. 106852. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2022.106852.
21. Semenishchev V.S., Voronina A.V., Titova S.M., Tomashova L.A., Nasonova Y.I. Natural radioactivity in springs of Sverdlovsk region, middle Urals, Russia. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2021. T. 329. № 2. P. 857–863. DOI: 10.1007/s10967-021-07847-0 (In Russ.).

22. Semenishchev V.S., Betenekov N.D., Tomashova L.A. Determination of ^{224}Ra and ^{226}Ra in drinking water. *Water: Chemistry and Ecology*. 2017. № 8 (110). P. 72–79 (In Russ.).
23. Horwitz P., Chiarizia R., Dietz M. Acid dependency of the extraction of selected metal ions by a strontium-selective extraction chromatographic resin: calculated vs. experimental curves. *Solvent Extraction and Ion Exchange*. 1992. Vol. 10. P. 337–361. DOI: 10.1080/07366299208918108.
24. ICRP Compendium of dose coefficients based on ICRP Publication 60 ICRP Publication 119, Ann. ICRP, 41, Elsevier (2012).
25. Jobbágy V., Altitzoglou T., Malo P., Tanner V., Hult M. A brief overview on radon measurements in drinking water. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2017. Vol. 173. P. 18–24. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2016.09.019.

Сведения об авторах:

Семенищев Владимир Сергеевич, канд. хим. наук, доцент, кафедра радиохимии и прикладной экологии, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н.Ельцина», Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19; ORCID:0000-0002-5269-2294; e-mail: vovius82@mail.ru

Насонова Юлия Игоревна, магистрант, кафедра радиохимии и прикладной экологии, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н.Ельцина», Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19; e-mail: july.nasonova@yandex.ru

Титова Светлана Михайловна, канд. техн. наук, доцент, кафедра редких металлов и наноматериалов, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н.Ельцина», Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19; ORCID: 0000-0002-7100-0249; e-mail: avotitms@mail.ru

Воронина Анна Владимировна, канд. хим. наук, заведующий кафедрой, кафедра радиохимии и прикладной экологии, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19; ORCID:0000-0002-1116-6335; e-mail: av.voronina@mail.ru

Денисов Евгений Иванович, д-р техн. наук, профессор, кафедра радиохимии и прикладной экологии, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19; e-mail: e.i.denisov@urfu.ru

About the authors:

Vladimir S. Semenishchev, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Ural Federal University Chair of Radiochemistry and Applied Ecology, ul. Mira, 19, Ekaterinburg, 620002, Russia; ORCID: 0000-0002-5269-2294; e-mail: vovius82@mail.ru

Yulia I. Nasonova, Master Student, Ural Federal University Chair of Radiochemistry and Applied Ecology, ul. Mira, 19, Ekaterinburg, 620002, Russia; e-mail: july.nasonova@yandex.ru

Svetlana M. Titova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Ural Federal University Chair of Rare Metals and Nano/materials, ul. Mira, 19, Ekaterinburg, 620002, Russia; ORCID: 0000-0002-7100-0249; e-mail: avotitms@mail.ru

Anna V. Voronina, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Head of Ural Federal University Chair of Radiochemistry and Applied Ecology, ul. Mira, 19, Ekaterinburg, 620002, Russia; ORCID: 0000-0002-1116-6335; e-mail: av.voronina@mail.ru

Eugeniy I. Denisov, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Ural Federal University Chair of Radiochemistry and Applied Ecology, ul. Mira, 19, Ekaterinburg, 620002, Russia; e-mail: e.i.denisov@urfu.ru

Использование метода нанофильтрации для очистки фугата установок обезвоживания осадков станций водоподготовки

Д.В. Спицов  , А.Г. Первов , Тет Зо Аунг 

 SpitsovDV@mgsu.ru

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. **Методы.** Проведены эксперименты по очистке фугата (иловой воды) после обезвоживания осадка на станции водоподготовки с применением обратноосмотических и нанофильтрационных мембран. Очищенная с применением мембран вода (пермеат) смешивалась с питьевой водой, а концентрат, содержащий все задержанные мембранами загрязнения, возвращался в отстойник-уплотнитель осадка. Соотношение расходов пермеата и концентрата в установке обратного осмоса подбиралось на основе расчета материального баланса так, чтобы количество загрязнений в воде осадка после осадкоуплотнителя равнялось количеству загрязнений, содержащихся в обезвоженном осадке. **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. Представлены экспериментальные кривые, позволяющие проводить подбор мембран на каждой ступени и прогнозировать состав очищенной воды. По результатам обработки экспериментальных данных разработана балансовая схема процесса обезвоживания осадка с очисткой фугата на мембранной установке.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: водоподготовка, метод нанофильтрации, фугат, установка обезвоживания, мембранная установка.

Для цитирования: Спицов Д.В., Первов А.Г., Тет Зо Аунг Использование метода нанофильтрации для очистки фугата установок обезвоживания осадков станций водоподготовки // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2023. № 6. С. 82–94. DOI: 10.35567/19994508_2023_6_7.

Дата поступления 07.11.2022.

APPLICATION OF THE NANOFILTRATION METHOD FOR FUGAT PURIFICATION OF THE SLUDGE DEWATERING UNITS OF THE WATER TREATMENT STATIONS

Dmitriy V. Spitsov  , Aleksey G. Pervov , Htet Zo Aung 

 SpitsovDV@mgsu.ru

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

ABSTRACT

Relevance. Recently, an interest to nanofiltration as a method of surface sources originated drinking water treatment increased significantly due to the high effectiveness of organic substances retention by diaphragms. The article presents a study of possibility to use diaphragm techniques for the fugat (silt water) treatment and the diaphragm plant concentrate utilization. **Methods.** We have conducted experiments on the fugat (silt water) purification after dewatering of the sludge at the water treatment station with the use of reverse osmosis and nanofiltration diaphragms. The water treated with diaphragms (permeate) was mixed with drinking water while the concentrate containing all pollutants retained by the diaphragms was returned back to the settling tank. Proportion of flows of permeate and concentrate in the reverse osmosis plant was selected on the basis of material balance in such a way that the amount of pollutants in the sludge water after sludge concentrator equaled the amount of pollutants present in the dewatered sludge. **Results.** We have demonstrated that application of the diaphragm plant enables to obtain purified water and provide effective decrease of such indicators as COD, aluminum concentration, and oxidation below normative requirements to drinking water. We present experimental curves that enable to select diaphragms at every stage and predict the treated water chemical composition. In accordance with the experimental data processing, we have developed a balance scheme of the process of dewatering of the sludge with the fugat purification at the diaphragm plant.

Key words: water treatment, nanofiltration method, fugat, dewatering plant, diaphragm unit.

For citation: Spitsov D.V., Pervov A.G., Htet Zo Aung. Application of the nanofiltration method for fugat purification of the sludge dewatering units of the water treatment stations. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2023. No. 6. P. 82–94. DOI: 10.35567/19994508_2023_6_7.

Received 07.11.2022.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время на станциях подготовки питьевой воды активно ведутся работы по применению современных методов обезвоживания осадков, образующихся в результате коагуляции загрязнений и их отстаивания [1]. Для обезвоживания осадков и доведения их показателей влажности до значений 75–80 % используются различные виды оборудования – центрифуги и фильтр-прессы. Однако, как показывает опыт внедрения технологий обезвоживания осадков [1], фугаты все равно продолжают сбрасываться в городскую канализацию. Это связано со сложностью очистки воды, содержащей до 180 мг/л взвешенных веществ, с цветностью 30–210 градусов ПКШ, при этом значение содержания алюминия может достигать до 63 мг/л, а перманганатной окисляемости – до 32 мг/л. Кроме того, фугат содержит токсические вещества – мышьяк, никель, ртуть, свинец, что затрудняет возможность его эффективной очистки традиционными методами коагуляции и флокуляции и возврата в исходную воду [1].

В статье представлен новый подход к очистке фугата станций обезвоживания осадка, основанный на применении мембранного метода обратного

осмоса с получением очищенной воды и концентрата, который утилизируется вместе с обезвоженным осадком. Утилизация концентрата достигается с помощью многократного концентрирования фугата в установке обратного осмоса, смешивания концентрата с влажным осадком и последующим обезвоживанием этой смеси. Необходимые для расчета системы обратного осмоса значения параметров ее работы определяются, исходя из соображений массового баланса: количество растворенных загрязнений, удаляемых вместе с осадком, равно количеству растворенных загрязнений, поступающему в осадкоуплотнитель вместе с влажным осадком.

Применение мембранных технологий обратного осмоса для очистки природных и сточных вод ведется на протяжении 40 лет [2]. В последние годы возрос интерес к нанофильтрации как к методу подготовки питьевой воды из поверхностных водоисточников [3–6], благодаря высокой эффективности задержания мембранами органических веществ, образующих цветность воды [7, 8].

Цель работы – исследование возможности применения мембранных технологий для очистки фугата и утилизации концентрата мембранной установки.

За счет «универсальности» мембран в задержании органических веществ различной природы и молекулярного веса (119,38 г/моль для хлороформа, 221 г/моль для пестицидов, 1500–600 000 г/моль для гуминовых и фульвокислот), обратноосмотические и нанофильтрационные мембраны широко применяются в процессах доочистки бытовых сточных вод для целей их повторного использования [2–8]. С учетом различной селективности мембран (эффективности задержания) по одновалентным и многовалентным ионам, а также органических веществ, в процессах очистки производственных сточных вод используется разделение растворов и выделение различных компонентов [7–23]. Благодаря разработке нанофильтрационных мембран стало возможным глубокое многократное концентрирование минерализованных стоков установок ионного обмена и обратного осмоса для их дальнейшей утилизации [19–21]. В частности, в литературных источниках представлено много информации по применению нанофильтрации для очистки фугатов после обезвоживания минерализованных осадков природных и сточных вод [9–20].

Авторами данной статьи уже проводились исследования по применению технологий обратного осмоса и нанофильтрации не только для очистки фугатов (иловых вод), обезвоживания осадков сточных вод и очистки фильтратов полигонов ТБО [24], но и для утилизации концентратов мембранных установок и удаления всех задержанных мембранами загрязнений вместе с обезвоженным осадком [25, 26].

Разработка новой технологии направлена на создание оборотной системы очистки и утилизации фугатов установок обезвоживания осадков на водопроводных станциях, что позволит исключить их сброс в городскую канализацию. Поскольку обработка фугата методом обратного осмоса предполагает многократное концентрирование фугата и одновременную эффективную очистку его от ионов солей и растворенных органических соедине-

ний, технологическая схема обработки фугата использует три различных ступени мембранных аппаратов (рис. 1).

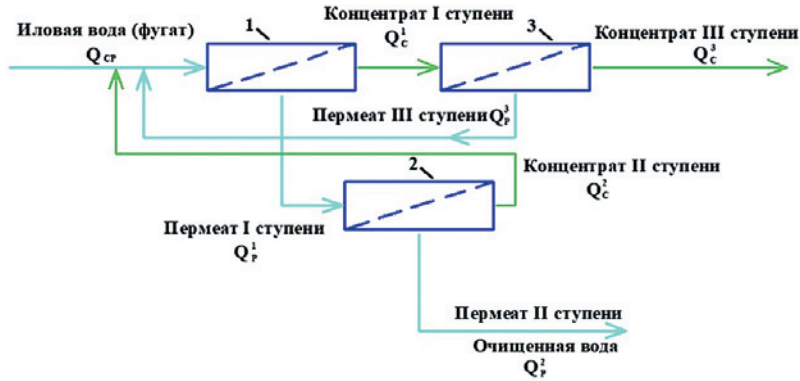


Рис. 1. Схема подключения мембранных аппаратов и направления основных потоков пермеатов и концентратов: 1– мембранный аппарат с нанофильтрационными мембранами 1 ступени; 2 – мембранный аппарат с обратноосмотическими мембранами 2 ступени; 3 – мембранный аппарат-концентратор 3 ступени с нанофильтрационными мембранами.

Fig. 1. Block diagram the diaphragm plants' connection and the main flows of permeates and concentrates directions: 1 is a diaphragm plant with the 1st stage nanofiltration diaphragms; 2 is a diaphragm plant with the 2nd stage reverse osmosis diaphragms; 3 is a 3rd stage concentrating diaphragm plant with nanofiltration diaphragms.

Установка на основе мембран обратного осмоса и нанофильтрации (рис. 2) для очистки фугата после обезвоживания осадка на центрифуге работает по двухступенчатой схеме [24, 25]. На рис. 1 показана схема подключения мембранных аппаратов и направления основных потоков пермеатов и концентратов. Каскадное подключение нанофильтрационных аппаратов на первой ступени позволяет добиться высоких значений кратности концентрирования K мембранной установкой и минимального значения расхода концентрата [26]. Применение мембранных аппаратов обратного осмоса на второй ступени очистки сокращает концентрацию органических веществ в обрабатываемой воде и повышает производительность по очищенной воде [24].

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель экспериментов – исследование очистки фугата и получение чистой воды и концентрата, содержащего все удаленные загрязнения.

Экспериментальная установка представлена на рис. 2. Объемы воды (фугата и пермеата) составляли по 20 л. Исходная вода помещалась в бак исходной воды 1, откуда насосом 2 подавалась в мембранный аппарат 3, в котором разделялась на пермеат (очищенную воду) и концентрат. Концентрат возвращался в бак 1, а пермеат направлялся в бак 4. Использовался роторный насос Procon (180–200 л в час при давлении 16 Бар). Эксперименты проводили с применением серийных мембранных элементов стандарта 1812 модели производства корейской компании CSM с обратноосмотическими мембранами модели BLN

(значением селективности по солям 95–96 %) и нанофильтрационными элементами модели с мембранами типа 70 NE селективностью 70 %. Площадь мембран в мембранном аппарате стандарта 1812 (диаметр 1,8 дюйма, длина 12 дюймов) составляла 0,5 м². По мере накопления пермеата в баке 4 объем исходной воды в баке 1 уменьшался, при этом концентрации загрязнений – растворенных солей и органических веществ, обобщенно оцениваемые показателем ХПК, – повышались, а производительность мембранного аппарата по очищенной воде снижалась. Эксперименты позволили определить эффективность задержания мембранами различных загрязнений и производительность мембран для разработки установки, в частности, для одновалентных ионов (хлориды, бикарбонаты, аммоний) селективность составила 65–75 %, а для многовалентных ионов (кальций, сульфаты, алюминий) – 90 % и выше.

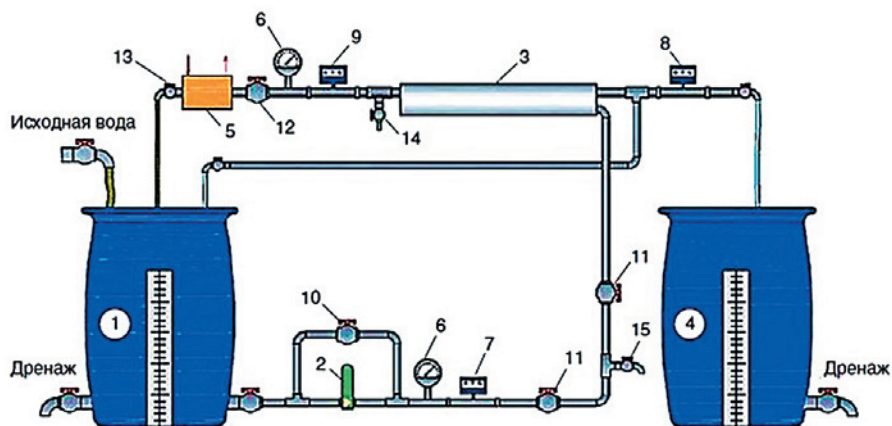


Рис. 2. Экспериментальная установка для определения параметров работы мембран при разделении фильтрата ТКО: 1 – бак исходной воды; 2 – насос; 3 – мембранный элемент в напорном корпусе; 4 – бак фильтрата; 5 – теплообменник; 6 – манометр; 7–9 – расходомеры; 10 – кран байпаса; 11 – вентиль регулировки расхода исходной воды; 12 – вентиль регулировки рабочего давления и расхода концентрата; 13 – кран регулировки расхода охлаждающей воды; 14, 15 – пробоотборники.

Fig. 2. An experimental plant for determination of the diaphragms operative parameters in division of the TKO filtrate: 1 is an initial water tank; 2 is a pump; 3 is a diaphragm element in a pressure housing; 4 is a filtrate tank; 5 is a heat exchanger; 5 is a manometer; 7-9 are flow gages; 10 is a bypass valve; 11 is control valve for initial water discharge; 12 is an operative pressure and concentrate consumption control; 13 is control valve for cooling water consumption; 14, 15 are sampling devices.

В циркуляционном режиме на экспериментальной установке моделировалась работа мембранных аппаратов на первой и на второй ступени. При этом определялись показатели селективностей мембран по различным загрязнениям и их производительности в зависимости от величины выхода фильтрата установки на каждой ступени (отношение расхода пермеата к расходу исходной воды, поступающей в мембранные аппараты Q_p/Q_i). Определяли зависимости эффективности очистки воды по различным загрязнениям от величины K , которая представляет собой отношение объема исходной воды

к объему концентрата в баке в конце эксперимента и названа коэффициентом концентрирования или коэффициентом уменьшения объема исходной воды в мембранной установке. Величина K соответствует показателю величины выхода пермеата установки, которая равна отношению расхода пермеата к расходу исходной воды Q_p/Q_i , соотношение $Q_p/Q_i = 1-1/K$.

На первой стадии моделировали работу аппаратов первой ступени мембранной установки, при этом в процессе эксперимента объем исходной воды снижался с 20 л до 0,5 л. На второй ступени пермеат первой ступени (объемом 16 л) помещался в бак 1 и эксперимент повторяли, используя мембранный аппарат с низконапорными обратноосмотическими мембранами.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты экспериментов представлены в таблице, на рис. 3 и рис. 4, где показаны значения концентраций загрязнений в пермеатах и концентратах установок 1 и 2 ступеней, а также зависимости селективностей мембран (рис. 5) от K , позволяющие вести расчет установок. На рис. 6 представлено изменение производительности нанофильтрационных и обратноосмотических мембран за время эксперимента в зависимости от величины K . В зависимости от состава фугата можно определить качество очищенной воды.

Таблица. Результаты определения концентраций различных загрязнений в исходной воде, пермеатах и концентратах мембран на разных ступенях очистки
Table. Results of determination of concentrations of various pollutants in the initial water, permeates, and diaphragms concentrates at different stages of purification

Показатель (раствор)	ХПК, мг/л	Al ³⁺ , мг/л	SO ₄ ²⁻ , мг/л	Cl ⁻ , мг/л	Перманганатная окисляемость, мг/л
Исходный фугат	158	8	75	90	21
Пермеат I ступени	19,8	0,42	9,0	65	6,7
Пермеат II ступени	13,5	0,016	0,475	9,7	3,1
Концентрат	650	18,1	702	480	49

На основании полученных результатов могут быть определены типы мембран и параметры установки. Обработка результатов позволила установить зависимости селективностей мембран по различным ионам и загрязнениям. Как отражено на рис. 5, зависимости величины селективности мембраны 70NE от величины K имеют вид натуральной логарифмической функции, что облегчает расчеты по прогнозу качества очищенной воды на разных ступенях очистки [26].

Составленная по результатам эксперимента балансовая схема технологии представлена на рис. 7. На основании балансового расчета определены требуемый расход фильтрата и концентрата установки, а также концентрация солей в концентрате установки, возвращаемом в приемный резервуар уплотнителя осадка при величине выхода фильтрата установки 0,95. Очищенная вода может быть добавлена в очищенную питьевую воду или использоваться в качестве тех-

нической (в котельных и т. д.). Предварительные технико-экономические расчеты показывают, что для случая применения разработанной мембранной установки в цехе обезвоживания осадка Восточной станции водоподготовки, расположенной в Москве, при расходе фугата 20 м^3 в час применение разработанной технологии при стоимости $140\,000 \text{ руб/м}^3$ в час позволяет полностью утилизировать стоки водопроводной станции и получить высокий экономический эффект. При принятой стоимости сброса одного кубометра воды в среднем $28,8 \text{ руб.}$, годовые затраты на сброс в канализацию 20 м^3 в час фугата составят $4\,032\,000 \text{ руб.}$ Стоимость мембранной установки производительностью $20 \text{ м}^3/\text{час}$ составляет $2\,800\,000 \text{ руб.}$ Следует при этом учитывать, что мембранная установка не только сокращает сброс в канализацию, но и увеличивает на 20 м^3 воды в час производительность станции подготовки питьевой воды, поэтому экономический эффект от внедрения такой станции увеличивается в два раза.

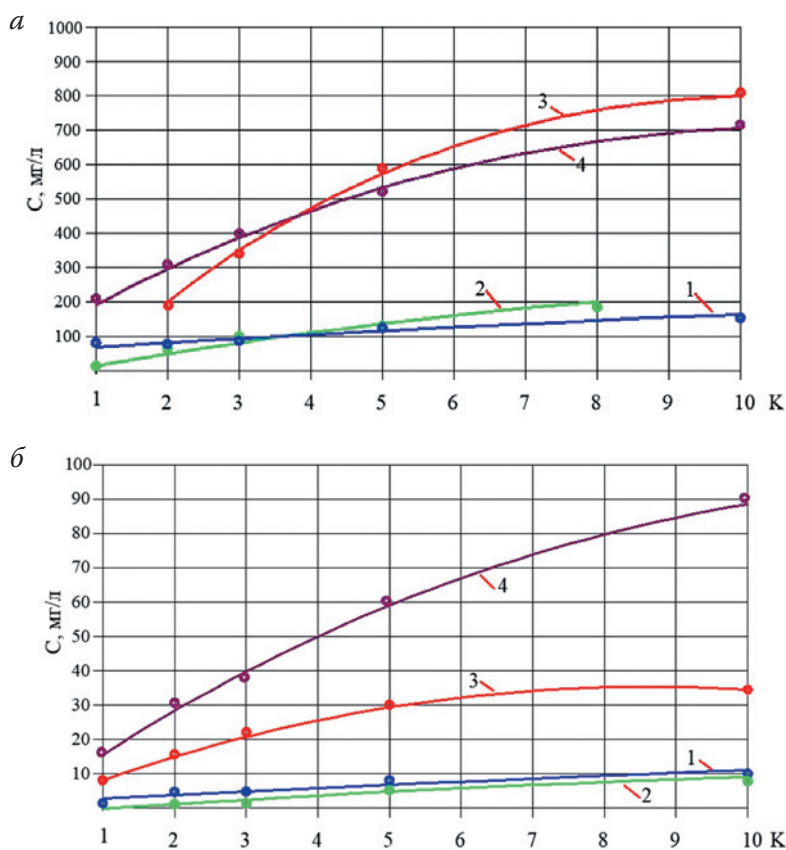


Рис. 3. Зависимости концентраций ионов алюминия, кальция, хлоридов и сульфатов, а также значений ХПК от К в концентрате (а) и пермеате (б) первой ступени установки с нанофильтрационными мембранами:

1 – алюминий; 2 – хлориды; 3 – сульфаты; 4 – ХПК.

Fig. 3. Dependence of the aluminum, calcium, chlorides, sulfates ions concentration and COD value on the K value in concentrate (a) and permeate (b) of the first stage of the nanofiltration diaphragms: 1 is aluminum; 2 is chlorides; 3 is sulfates; 4 is COD.

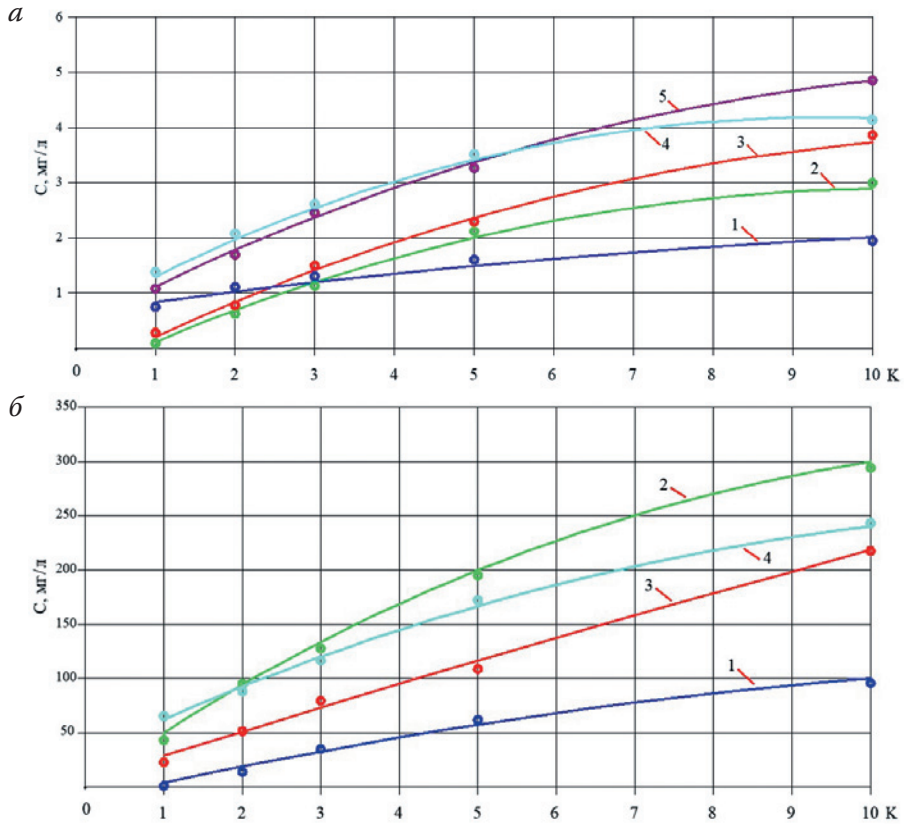


Рис. 4. Зависимости концентраций ионов алюминия, кальция, хлоридов, сульфатов, ХПК от значения К в пермеате (а) и концентрате (б) второй ступени мембранной установки с обратноосмотическими мембранами: 1 – хлориды; 2 – сульфаты; 3 – ХПК; 4 – алюминий; 5 – кальций.

Fig. 4. Dependence of the aluminum, calcium, chlorides, sulfates ions and COD concentration on the K value in permeate (a) and concentrate (b) of the second stage of the diaphragm unit with reverse osmosis diaphragms: 1 is chlorides; 2 is sulfates; 3 is COD; 4 is aluminum; 5 is calcium.

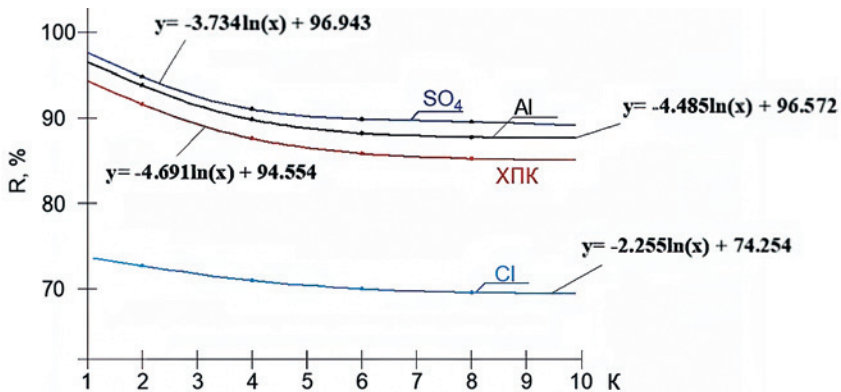


Рис. 5. Зависимости величины селективности R по ионам алюминия, хлорид-ионам, сульфат-ионам и по величине ХПК от К.

Fig. 5. Dependence of the selectivity value R in terms of aluminum ions, chloride-ions, sulphate-ions and COD value on K.

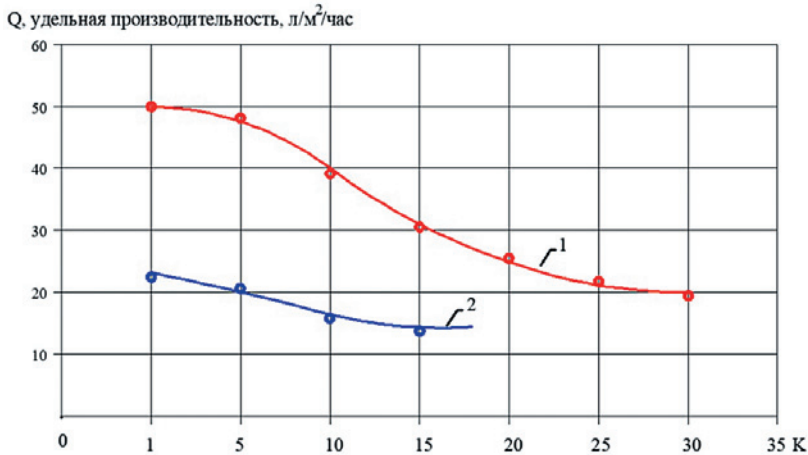


Рис. 6. Изменение величины удельной производительности нанофильтрационных и обратноосмотических мембран в зависимости от величины коэффициента снижения объема К: 1 – нанофильтрационные мембраны на 1 и 3 ступенях; 2 – обратноосмотические мембраны на 2 ступени.

Fig. 6. Changing of the specific capacity value of the nanofiltration and reverse osmosis diaphragms depending on the value of the volume decrease index К: 1 is nanofiltration diaphragms at the 1st and 3rd steps; 2 is reverse osmosis diaphragms at the 2nd step.

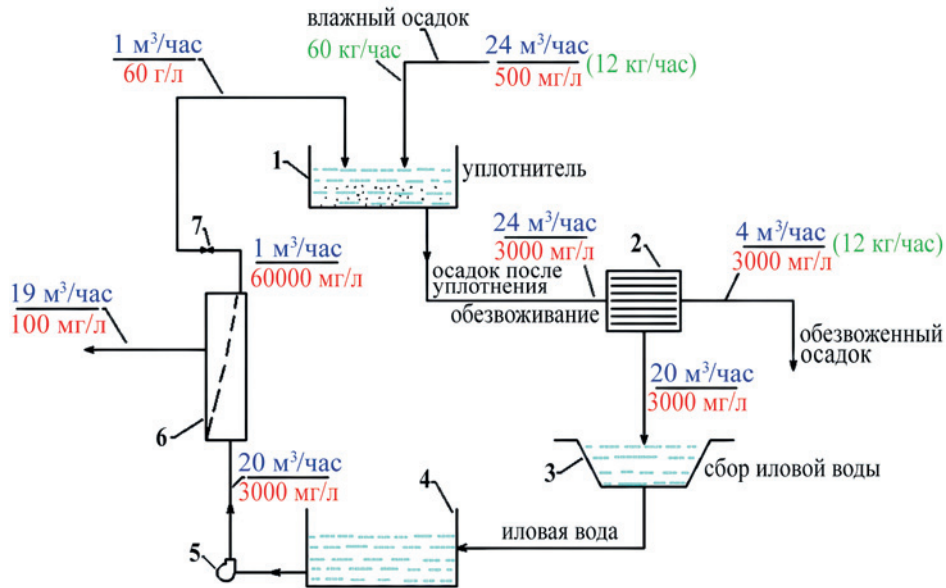


Рис. 7. Балансовая схема обработки осадка и очистки фугата: 1 – уплотнитель осадка, 2 – центрифуга; 3 – бак сбора иловой воды (фугата); 4 – промежуточный резервуар-накопитель фугата; 5 – рабочий насос установки обратного осмоса; 6 – мембранная установка; 7 – регулирующий давление вентиль.

Fig. 7. Balance scheme of the sediment processing and fugate purification: 1 is a sediment concentrator; 2 is a centrifuge; 3 is a tank for silt water (fugate) collection; 4 is an intermediate fugate accumulation tank; 5 is an operative pump of the reverse osmosis plant; 6 is a diaphragm unit; 7 is a pressure control valve.

ВЫВОДЫ

В рамках проведенного исследования предложена технология очистки фугата после обезвоживания осадка станций очистки природных вод, основанная на применении метода обратного осмоса. Технология позволяет не только получить очищенную воду высокого качества, но и удалять все задержанные загрязнения вместе с обезвоженным осадком. Для очистки фугата после обезвоживания осадка методом обратного осмоса может быть эффективно применена двухступенчатая схема, позволяющая одновременно добиться снижения концентраций основных загрязнений в очищенной воде на 90–96 % и многократного сокращения расхода концентрата, благодаря чему все содержащиеся в концентрате задержанные мембранами загрязнения выводятся вместе с обезвоженным осадком.

Анализ стоимости сброса сточных вод в канализацию показывает, что применение технологии очистки окупается менее, чем за один год. С учетом того, что рекомендуемая мембранная технология не только сокращает сброс в канализацию, но и позволяет одновременно получить такое же количество очищенной воды, срок окупаемости значительно сокращается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козлов М.Н., Благова О.Е., Подковыров В.П., Арутюнова И.Ю., Ягунков С.Ю. Повторное использование сливной воды, образующейся при обработке водопроводного осадка // Водоснабжение и санитарная техника. 2010. № 10. С. 20–26.
2. Wilf M. The guidebook to membrane for wastewater reclamation. Balaban Desalination Publishing, 2010. 788 p.
3. Yinping Zheng, Sanchuan Yu, Shi Shuai, Qing Zhou, Qibo Cheng, Meihong Liu, Congjie Gao. Color removal and COD reduction of biologically treated textile effluent through submerged filtration using hollow fiber nanofiltration membrane. *Desalination*. 2013. Vol. 314. P. 89–95.
4. Watson B.M., Hornburg C.D. Low-energy membrane nanofiltration for removal of color, organics and hardness from drinking water supplies // *Desalination*, 1989, Vol. 72. P. 11–22.
5. Lopes Cristiane N., Petrus José Carlos C., Riella Humberto G. Color and COD retention by nanofiltration membranes // *Desalination*. 2005. Vol. 172. Iss. 1. P. 77–83.
6. Rosa Maria Ribeiro, Rosângela Bergamasco, Marcelino Luiz Gimenes. Membranes synthesis study for colour removal of a textile effluent // *Desalination*, 2002. Vol. 145. Iss. 1–3, P. 61–63.
7. Koyuncu I., Yalcin F., Ozturk I. Color removal of high strength paper and fermentation industry effluents with membrane technology // *Water Science and Technology*. 1999. Vol. 40. Iss. 11–12. P. 241–248.
8. Quist-Jensen C.A., Sørensen J.M., Svenstrup A., Scarpa L., Carlsen T.S., Jensen H.C., Wybrandt L., Christensen M.L. Membrane crystallization for phosphorus recovery and ammonia stripping from reject water from sludge dewatering process // *Desalination*. 2018. Vol. 440. P. 156–160.
9. Jouni Havukainen, Ali Saud, Thomas Fruergaard Astrup, Petteri Peltola, Mika Horttanainen. Environmental performance of dewatered sewage sludge digestate utilization based on life cycle assessment // *Waste Management*. 2022. Vol. 137. P. 210–221.
10. Roscoe F. Ward, Billy Huston. Wastewater sludge dewatering for Champion-Hamilton treatment facility // *Water Science and Technology*. 1999. Vol. 40. Iss. 11–12. P. 155–162.
11. Claire Gourdet, Romain Girault, Sarah Berthault, Marion Richard, Julian Tosoni, Marily Pradel. In quest of environmental hotspots of sewage sludge treatment combining anaerobic digestion and mechanical dewatering: A life cycle assessment approach // *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 143. P.1123–1136.
12. Dalong Hu, Zhen Zhou, Tianhao Niu, Haijuan Wei, Weixiao Dou, Lu-Man Jiang, Yan Lv. Co-treatment of reject water from sludge dewatering and supernatant from sludge lime stabilization

- process for nutrient removal: A cost-effective approach // Separation and Purification Technology. 2016. Vol. 172. P. 357–365.
13. Podstawczyk D., Witek-Krowiaka A., Dawiec-Liśniewska A., Chrobot P., Skrzypczak D. Removal of ammonium and orthophosphates from reject water generated during dewatering of digested sewage sludge in municipal wastewater treatment plant using adsorption and membrane contactor system // Journal of Cleaner Production. 2017. Vol. 161. P. 277–287.
 14. KołECKA K., Gajewska M., Obarska-Pempkowiak H., Dariusz R. Integrated dewatering and stabilization system as an environmentally friendly technology in sewage sludge management in Poland // Ecological Engineering. 2017. Vol. 98. P.346–353.
 15. Koskue V., Freguia S., Ledezma P., Kokko M. Efficient nitrogen removal and recovery from real digested sewage sludge reject water through electroconcentration // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2021. Vol. 9. Iss. 5. 106286. pp.
 16. Xavier Flores-Alsina, Elham Ramin, David Ikumi, Theo Harding, Damien Batstone, Chris Brouckaert, Sven Sotemann, Krist V.Gernaey. Assessment of sludge management strategies in wastewater treatment systems using a plant-wide approach // Water Research. 2021. Vol. 190. P. 116714.
 17. Dong Xu, Jun Liu, Ting Ma, Yongqing Gao, Shujun Zhang, Jun Li. Rapid granulation of aerobic sludge in a continuous-flow reactor with a two-zone sedimentation tank by the addition of dewatered sludge // Journal of Water Process Engineering. 2021. Vol. 41. P. 101941.
 18. Wan-JunDuan, Jing-Feng Gao, Wen-Zhi Zhang, Yu-Wei Wang, Jie Liu. Elimination of antibiotic resistance genes in waste activated sludge by persulfate treatment during the process of sludge dewatering // Bioresource Technology. 2020. Vol. 311. P. 123509.
 19. Maria Elisa Magri, Joceli Gorrezen Zaguini Francisco, Pablo Heleno Sezerino, Luiz Sérgio Philippi. Constructed wetlands for sludge dewatering with high solids loading rate and effluent recirculation: Characteristics of effluent produced and accumulated sludge // Ecological Engineering. 2016. Vol. 95. P. 316–323.
 20. S.V. Jadhav, S.S.Haramkar, A.R.Kamble, B.N.Thorat. Insights into dewatering and characterization of the waste activated sludge // Journal of the Taiwan Institute of Chemical. 2019. Vol. 94. P. 81–87.
 21. Samuel Bunani, ErenYörükoğlu, Gökhan Sert, Ümran Yüksel, MithatYüksel, Nalan Kabay. Application of nanofiltration for reuse of municipal wastewater and quality analysis of product water // Desalination. 2013. Vol. 315. P. 33–36.
 22. Nguyen S.T., Roddick F.A. Pre-treatments for removing colour from secondary effluent: Effectiveness and influence on membrane fouling in subsequent microfiltration // Separation and Purification Technology. 2013. Vol. 103. P. 313–320.
 23. Maria Cristina Collivignarelli, Alessandro Abbà, Marco Carnevale Miino, Silvestro Damiania. Treatments for color removal from wastewater: State of the art // Journal of Environmental Management. 2019. Vol. 236. P. 727–745.
 24. Pervov A.G., Shirkova T.N., Tikhonov V.A. Design of reverse osmosis and nanofiltration membrane facilities to treat landfill leachates and increase recoveries // Membranes and Membrane Technologies. 2020. Vol. 2. No. 5. P. 296–309.
 25. Первов А.Г., Ширкова Т.Н., Спицов Д.В. Экономические аспекты очистки фильтратов полигонов хранения твердых коммунальных отходов с применением мембран // Вестник МГСУ. 2021. № 6. С. 698–719.
 26. Первов А.Г., Ширкова Т.Н. Сокращение расходов концентратов установок обратного осмоса, используемых для очистки сточных вод, содержащих органические загрязнения // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2021. № 4 (132). С. 36–50.

REFERENCES

1. Kozlov M.N., Blagova O.E., Podkovyrov V.P., Arutyunova I.Yu., Yagunkov S.Yu. Reuse of drain water formed during the treatment of tap sludge. *Water supply and sanitary engineering*. 2010. No. 10. P. 20–26 (In Russ.).
2. Wilf M. The guidebook to membrane for wastewater reclamation. Balaban Desalination Publishing, 2010. 788 p.

3. Yinping Zheng, Sanchuan Yu, Shi Shuai, Qing Zhou, Qibo Cheng, Meihong Liu, Congjie Gao. Color removal and COD reduction of biologically treated textile effluent through submerged filtration using hollow fiber nanofiltration membrane. *Desalination*. 2013. Vol. 314. P. 89–95.
4. Watson B.M., Hornburg C.D. Low-energy membrane nanofiltration for removal of color, organics and hardness from drinking water supplies. *Desalination*. 1989. Vol. 72. P. 11–22.
5. Lopes Cristiane N., Petrus José Carlos C., Riella Humberto G.. Color and COD retention by nanofiltration membranes. *Desalination*. 2005. Vol. 172. Iss. 1. p. 77–83.
6. Rosa Maria Ribeiro, Rosângela Bergamasco, Marcelino Luiz Gimenes. Membranes synthesis study for color removal of a textile effluent. *Desalination*. 2002. Vol.145. Iss. 1–3, P. 61–63.
7. Koyuncu I., Yalcin F., Ozturk I. Color removal of high strength paper and fermentation industry effluents with membrane technology. *Water Science and Technology*. 1999. Vol. 40. Iss. 11–12. P. 241–248.
8. Quist-Jensen C.A., Sørensen J.M., Svenstrup A., Scarpa L., Carlsen T.S., Jensen H.C., Wybrandt L., Christensen M.L. Membrane crystallization for phosphorus recovery and ammonia stripping from reject water from sludge dewatering process. *Desalination*. 2018. Vol. 440. P. 156–160.
9. Jouni Havukainen, Ali Saud, Thomas Fruergaard Astrup, Petteri Peltola, Mika Horttanainen. Environmental performance of dewatered sludge digest utilization based on life cycle assessment. *Waste Management*. 2022. Vol. 137. P. 210–221.
10. Roscoe F. Ward, Billy Huston. Wastewater sludge dewatering for Champion-Hamilton treatment facility. *Water Science and Technology*. 1999. Vol. 40. Iss. 11–12. P. 155–162.
11. Claire Gourdet, Romain Girault, Sarah Berthault, Marion Richard, Julian Tosoni, Marilys Pradel. In quest of environmental hotspots of sewage sludge treatment combining anaerobic digestion and mechanical dewatering: A life cycle assessment approach. *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 143. P. 1123–1136.
12. Dalong Hu, Zhen Zhou, Tianhao Niu, Haijuan Wei, Weixiao Dou, Lu-Man Jiang, Yan Lv. Co-treatment of reject water from sludge dewatering and supernatant from sludge lime stabilization process for nutrient removal: A cost-effective approach. *Separation and Purification Technology*. 2016. Vol. 172. P. 357–365.
13. Daria Podstawczyk, Anna Witek-Krowiaka, Anna Dawiec-Liśniewska, Przemysław Chrobot, Dawid Skrzypczak. Removal of ammonium and orthophosphates from reject water generated during dewatering of digested sewage sludge in municipal wastewater treatment plant using adsorption and membrane contactor system. *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 161. P. 277–287.
14. Katarzyna Kolečka, Magdalena Gajewska, Hanna Obarska-Pempkowiak, Dariusz Rohde. Integrated dewatering and stabilization system as an environmentally friendly technology in sewage sludge management in Poland. *Ecological Engineering*. 2017. Vol. 98. P. 346–353.
15. Veera Koskue, Stefano Freguia, Pablo Ledezma, Marika Kokko. Efficient nitrogen removal and recovery from real digested sewage sludge reject water through electroconcentration. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2021. Vol. 9. Iss. 5. 106286. P. 106286.
16. Xavier Flores-Alsina, Elham Ramin, David Ikumi, Theo Harding, Damien Batstone, Chris Brouckert, Sven Sotemann, Krist V.Gernaey. Assessment of sludge management strategies in wastewater treatment systems using a plant-wide approach. *Water Research*. 2021. Vol. 190. P. 116714.
17. Dong Xu, Jun Liu, Ting Ma, Yongqing Gao, Shujun Zhang, Jun Li. Rapid granulation of aerobic sludge in a continuous-flow reactor with a two-zone sedimentation tank by the addition of dewatered sludge. *Journal of Water Process Engineering*. 2021. Vol. 41. P. 101941.
18. Wan-JunDuan, Jing-Feng Gao, Wen-Zhi Zhang, Yu-Wei Wang, Jie Liu. Elimination of antibiotic resistance genes in waste activated sludge by persulfate treatment rapid during the process of sludge dewatering. *Bioresource Technology*. 2020. Vol. 311. pp. 123509
19. Maria Elisa Magri, Joceli Gorrezen Zaguini Francisco, Pablo Heleno Sezerino, Luiz Sérgio Philippi. Constructed wetlands for sludge dewatering with high solids loading rate and effluent recirculation: Characteristics of effluent produced and accumulated sludge. *Ecological Engineering*. 2016. Vol. 95. P. 316–323.
20. Jadhav S.V., Haramkar S.S., Kamble A.R., Thora B.N.. Insights into dewatering and characterization of the waste activated sludge. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical*. 2019. Vol. 94. P. 81–87.

21. Samuel Bunani, ErenYörükoğlu, Gökhan Sert, Ümran Yüksel, MithatYüksel, Nalan Kabay. Application of nanofiltration for reuse of municipal wastewater and quality analysis of product water. *Desalination*. 2013. Vol. 315. P. 33–36.
22. Nguyen S.T., Roddick F.A.. Pre-treatments for removing colour from secondary effluent: Effectiveness and influence on membrane fouling in subsequent microfiltration. *Separation and Purification Technology*. 2013. Vol.103. P. 313–320.
23. Maria Cristina Collivignarelli, Alessandro Abbà, Marco Carnevale Miino, Silvestro Damiana. Treatments for color removal from wastewater: State of the art. *Journal of Environmental Management*. 2019. Vol. 236. P.727–745.
24. Pervov A.G., Shirkova T.N., Tikhonov V.A. Design of reverse osmosis and nanofiltration membrane facilities to treat landfill leachates and increase recoveries. *Membranes and Membrane Technologies*. 2020. Vol. 2. No. 5. P. 296–309.
25. Pervov A.G., Shirkova T.N., Spitsov D.V. Economic aspects of cleaning filtrates of landfills of solid municipal waste storage with the use of membranes. *Bulletin of MGSU*. 2021. No. 6. P. 698–719 (In Russ.).
26. Pervov A.G., Shirkova T.N. Cost reduction of reverse osmosis plant concentrates used for wastewater treatment containing organic pollutants. *Problems of collecting, preparing and transporting oil and petroleum products*. 2021. No. 4 (132). P. 36–50 (In Russ.).

Сведения об авторах:

Первов Алексей Германович, д-р техн. наук, профессор, кафедра «Водоснабжение и водоотведение», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ORCID: 0000-0002-7518-2342; e-mail: PervovAG@mgsu.ru

Спицов Дмитрий Владимирович, канд. техн. наук, доцент, кафедра «Водоснабжение и водоотведение», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ORCID: 0000-0001-6252-9485; e-mail: SpitsovDV@mgsu.ru

Тет Зо Аунг, аспирант, кафедра «Водоснабжение и водоотведение», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ORCID: 0000-0002-5982-8983; e-mail: newmoon68109@gmail.com

About the authors

Aleksey G. Pervov, Candidate of Technical Sciences, Professor, Department of “Water Supply and Sanitation”, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Yaroslavskoye shosse, 26, Moscow, 129337, Russia; ORCID: 0000-0002-7518-2342; e-mail: PervovAG@mgsu.ru

Dmitriy V. Spitsov, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Department of “Water Supply and Sanitation”, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Yaroslavskoye shosse, 26, Moscow, 129337, Russia. ORCID: 0000-0001-6252-9485; e-mail: SpitsovDV@mgsu.ru

Htet Zo Aung, Postgraduate student of the Department of “Water Supply and Sanitation”, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Yaroslavskoye shosse, 26, Moscow, 129337, Russia; ORCID: 0000-0002-5982-8983; e-mail: newmoon68109@gmail.com

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Manuscripts are reviewed and edited in RosNIIVKh editorial office.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Редакторы: Т.М. Принцева, Н.А. Валек

Подписано в печать 08.12.2023. Дата выхода в свет 22.12.2023.

Формат 70x100^{1/16}. Усл. печ. л. 6. Тираж 200 экз. Цена свободная.

Отпечатано в типографии ООО «ДжиЛайм»,

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

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

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

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

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

Станции метро: Академическая, Профсоюзная

Телефон: 8 (499) 125-52-79

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

ФГБУ РОССИЙСКИЙ НИИ КОМПЛЕКСНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ И ОХРАНЫ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

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

В структуру института входят филиалы в 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

