

## Массовое содержание загрязняющих веществ в воде верхневолжских водохранилищ в годы разной водности

Е.А. Кашутина<sup>1</sup>  , С.В. Ясинский<sup>1</sup> , Е.С. Гришанцева<sup>1</sup> ,  
А.М. Расулова<sup>2</sup> , М.А. Фасахов<sup>3</sup> , А.А. Шайдулина<sup>3</sup> 

 kashutina@igras.ru

<sup>1</sup> Институт географии Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт озераедения РАН – СПб ФИЦ РАН, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Пермский государственный национальный исследовательский университет,  
г. Пермь, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Актуальность.** Массы веществ, содержащихся в воде водохранилищ, – интегральный показатель, необходимый для расчета потоков веществ на региональном и глобальном уровнях, выявления основных факторов, влияющих на поступление и депонирование веществ в водохранилищах и контроля их расчетных балансов. Последнее особенно актуально при оценке эффективности мероприятий, реализуемых в рамках программы «Оздоровление Волги». **Методы.** Для трех лет разной водности (маловодного, многоводного и среднего по водности года) оценены массы веществ, содержащихся в Ивановском, Угличском, Рыбинском, Горьковском и Чебоксарском водохранилищах. В основу расчетов легли данные бассейновых водных управлений Федерального агентства водных ресурсов: информация мониторинга восемнадцати гидрохимических показателей качества воды, вносящих основной вклад в загрязнение водохранилищ Верхневолжского каскада. Водность лет оценивалась по притоку воды к водохранилищам. Для анализа полученных результатов использованы методы визуализации, простейшей статистики, сравнения. **Результаты.** Установлено, что среднегодовое количество воды в водохранилищах Верхней Волги достаточно стабильно и составляет около 30 млрд т. Этот объем определяется не водностью года, а регулированием Верхневолжского каскада. Межгодовая изменчивость объемов воды составляет около 3 %. Разница между среднегодовыми массами химических веществ в годы разной водности более значительна, достигает десятков, сотен и более процентов. Для ряда показателей (медь, двухвалентный марганец, никель, цинк, сульфаты и хлориды, нефтепродукты и т. д.) выявлено уменьшение их массы в Верхневолжском каскаде в многоводный год. Внутригодовые изменения содержания загрязняющих веществ в водохранилищах значительно превышают межгодовую изменчивость. Все рассмотренные гидрохимические показатели принадлежат к двум группам, характеризующим пространственное распределение масс вещества в каскаде в зависимости от водности года. К первой группе относятся вещества с квазипостоянным распределением масс по водохранилищам, подобно распределению объемов воды в каскаде. Это – растворенный кислород, органические соединения, минеральные соединения азота и фосфора, общее железо, сульфаты, хлориды, марганец и медь. Вторую группу составляют вещества, распределение которых между водохранилищами значительно отклоняется от распределения масс воды по каскаду и меняется год от года: это нефтепродукты, фенолы, цинк, свинец, никель и взвешенные вещества.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** Иваньковское, Угличское, Рыбинское, Горьковское и Чебоксарское водохранилища, приток, биогенные вещества, органические вещества, металлы, взвешенные вещества, межгодовая, внутригодовая и пространственная изменчивость.

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках гранта РФФ 22-17-00224 «Формирование гидролого-геохимических процессов на водосборах каскадов Верхне-Волжских и Камских водохранилищ при различных сценариях землепользования и изменениях климата на их территориях».

**Для цитирования:** Кашутина Е.А., Ясинский С.В., Гришанцева Е.С., Расулова А.М., Фасахов М.А., Шайдулина А.А. Массовое содержание загрязняющих веществ в воде верхневолжских водохранилищ в годы разной водности // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 6. С. 38–60. <https://doi.org/10.35567/19994508-2024-6-38-60>.

## MASS CONCENTRATION OF POLLUTANTS IN THE WATER OF UPPER VOLGA RESERVOIRS DURING YEARS OF VARYING WATER FLOW

Ekaterina A. Kashutina<sup>1</sup>  , Sergey V. Yasinsky<sup>1</sup> , Elena S. Grishantseva<sup>1</sup> , Anna M. Rasulova<sup>2</sup> , Mikhail A. Fasakhov<sup>3</sup> , Adeliya A. Shaydulina<sup>3</sup> 

 kashutina@igras.ru

<sup>1</sup>*Russian Academy of Sciences Institute of Geography, Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*Russian Academy of Sciences Institute of Limnology – St. Petersburg FIC, St. Petersburg, Russia*

<sup>3</sup>*Perm State National Research University, Perm, Russia*

### ABSTRACT

**Relevance.** The masses of substances contained in reservoir water serve as an integral indicator necessary for calculating substance fluxes at regional and global levels. This is crucial for identifying the main factors influencing the input and deposition of substances in reservoirs and for monitoring the calculated substance balances in reservoirs. This is particularly relevant for future assessments of the effectiveness of measures aimed at improving the condition of reservoirs under the “Volga Rehabilitation” program. **Methods.** For three years with different water availability (low, high, and average), the masses of substances contained in the Ivankovo, Uglich, Rybinsk, Gorky, and Cheboksary reservoirs were evaluated. The calculations were based on data from the basin water management departments of the Federal Agency for Water Resources of the Russian Federation: monitoring information on eighteen hydro/chemical indicators of water quality, which contribute significantly to the pollution of the Upper Volga Cascade reservoirs. The water availability of the years was assessed based on the inflow of water to the reservoirs. Methods of visualization, basic statistics, and comparison were used to analyze the obtained results. **Results.** It was found that the average annual water volume in the Upper Volga reservoirs is relatively stable, amounting to approximately 30 billion tons, and is determined not by the hydrological conditions of the year but by the regulation of the Cascade. The interannual variability of water volumes across the entire Cascade is about 3 %. In contrast, the differences in average annual masses of chemical substances during years of varying water availability are more pronounced, reaching tens, hundreds, or even more percent.

**Keywords:** Ivankovo, Uglich, Rybinsk, Gorky, and Cheboksary reservoirs; inflow to the reservoirs; biogenic substances; indicators of organic matter content; metals; suspended solids; major ions; organic compounds; masses; interannual, intra-annual and spatial variability.

**Financing:** The work was carried out within the framework of the RSF grant 22-17-00224 “Hydrological and geochemical processes formation in the catchments of the cascade of the Upper Volga and Kama reservoirs under different land use and climate changes scenarios in their territories.”

**For citation:** Kashutina E.A., Yasinsky S.V., Grishantseva E.S., Rasulova A.M., Fasakhov M.A., Shaydulina A.A. Mass concentration of pollutants in the water of Upper Volga reservoirs during years of varying water flow. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2024. No. 6. P. 38–60. <https://doi.org/10.35567/19994508-2024-6-38-60>.

## ВВЕДЕНИЕ

Содержание химических веществ в воде водохранилищ определяется унаследованными особенностями водных объектов, на которых они сооружены. К таким особенностям относится геологическое и геоморфологическое строение водосбора водного объекта, присущие ему виды почвенно-растительного покрова, характерные климатический и гидрологический режимы, особенности гидродинамики (ширина и глубина, шероховатость русел и пойм, скорости водных потоков) и пр. Из антропогенных факторов загрязнения водных объектов, помимо непосредственных сбросов в гидрографическую сеть загрязняющих веществ предприятиями промышленности и ЖКХ, значительна роль различных видов антропогенного освоения их водосборов. Это включает распашку земель, введение севооборота, выращивание сельскохозяйственных культур и животноводство, сведение лесов, создание искусственных насаждений, строительство гидромелиоративных сооружений для обводнения или осушения территорий, урбанизацию, добычу полезных ископаемых и т. д. В совокупности эти процессы являясь факторами формирования диффузного загрязнения водных объектов.

Исследования по программе «Оздоровление Волги» показали, что вклад диффузных источников в загрязнение водных объектов бассейна Волги составляет более 60 %, а на некоторых участках водосборов может превышать 90 % [1]. Диффузное загрязнение является причиной отсутствия заметных улучшений качества воды в каскаде волжских водохранилищ, несмотря на продолжающееся с 1990-х годов снижение промышленного производства и, соответственно, уменьшение точечных сбросов в бассейне Волги.

После строительства гидроузлов и создания водохранилищ происходят кардинальные трансформации процессов формирования водного, термического и вещественного режима водных объектов. Меняются морфометрические характеристики водного объекта, увеличиваются глубина и ширина потока, резко падает скорость течения, затапливаются и подтапливаются прибрежные территории, при этом гибнет наземная растительность. Почвенный покров затопленных территорий начинает трансформироваться в донные отложения. Ускоренно развиваются процессы абразии, что приводит к интенсивному поступлению продуктов разрушения берегов в водные объекты.

Суммарный речной сток уменьшается за счет роста испарения с поверхности созданных водохранилищ и увеличения водопотребления [2], в результате сокращается возможность разбавления поступающих загрязнений [3]. В случае строительства на реке каскадов водохранилищ сезонного и особенно многолетнего регулирования водный и вещественный режимы каждого водохранилища в каскаде начинают в значительной степени определяться режимами попусков на вышележащем гидроузле и сбросов через плотину водохранилища. Водоохранилища с низким водообменом по своему режиму приближаются к слабопроточным озерам, в которых содержание веществ определяется не только их поступлением с водосбора, но и в значительной степени внутриводоемными процессами [4]. Создание водохранилищ приводит к замещению речных экосистем аквальными экосистемами озерного типа. Замедление процессов обмена и рост поступления биогенных веществ с водосборов вызывают эвтрофикацию водоемов и развитие «цветения» воды с последующей гибелью биоты, что в итоге может приводить к заморным явлениям в водоеме.

Часть продукции водных экосистем под действием силы тяжести осаждается и депонируется в донных отложениях водохранилища. Это, с одной стороны, уменьшает содержание ряда веществ в воде, но, с другой, приводит к угрозе вторичного загрязнения с залповым выходом накопленных загрязняющих веществ из донных отложений при изменении термодинамических характеристик водной среды – например, при ветровом взмучивании, изменении водности, проведении дноуглубительных работ [5–7]. Увеличение времени водообмена обеспечивает возможность полного протекания окислительно-восстановительных реакций в зависимости от условий среды и способствует процессам перехода одних химических форм в другие. Так, аммонийный азот окисляется до нитритов, а затем и до нитратов [8]. При недостатке кислорода в придонных слоях могут происходить и обратные процессы: нитраты по цепочке постепенно восстанавливаются до газообразного азота и улетучиваются. Таким образом, создание водохранилищ и тем более их каскадов приводит к значительной трансформации химического режима водного объекта.

Различные показатели качества воды, отражающие содержание веществ в концентрациях, предназначены для оценки пригодности воды для использования в различных целях. В отличие от них, массовое содержание вещества в водохранилищах – интегральный показатель, необходимый для расчетов потоков вещества на региональном уровне, выявления основных факторов, влияющих на поступление и депонирование веществ в водохранилища, оценки регионального и глобального круговорота веществ и прогнозирования состояния водохранилищ. Однако большинство исследователей гидроэкологического состояния водных объектов обычно изучают именно показатели качества воды. Значительно реже даются оценки интегральных масс вещества, содержащихся в водохранилищах в тот или иной период. Например, в работе [9], используя опубликованные данные о содержании фосфора в 272 озерах и

201 водохранилище мира, дана оценка общей массы находящегося в них фосфора в 1,54 млн т. Однако, по мнению В.С. Савенко и А.В. Савенко [10], эта оценка является заниженной.

Оценка масс веществ, содержащихся в воде водохранилищ, необходима и для контроля при расчете баланса антропогенно измененных участков рек. Подобные работы проводятся редко. Например, в бассейне Волги балансы фосфора оценивались ранее для Учинского, Можайского, Истринского и Ивановского водохранилищ [11–13], для Рыбинского водохранилища составлены балансы биогенных элементов [14–16] и взвешенных веществ [5].

Взаимодействие гидрологических, геохимических, гидробиологических и антропогенных процессов в искусственно созданных природно-технических водных объектах и на их водосборах обуславливает специфический режим функционирования каждого водохранилища и всего каскада, в который они входят. Величина объема воды в водохранилище в текущий момент времени в том случае, конечно, если вода чистая – важный фактор, способствующий разбавлению поступающих в водохранилище загрязняющих веществ и улучшению экологической ситуации [3]. Изменение объема водных масс обусловлено особенностями притока и сброса воды из водохранилищ, которые зависят от климатических трендов и флуктуаций, погодных условий и режима эксплуатации [17]. Однако зависимость содержания веществ в воде и качества воды волжских водохранилищ от водности года может не проявляться [18].

Целью данной работы является анализ современной межгодовой изменчивости масс веществ, содержащихся в воде водохранилищ Верхневолжского каскада, в зависимости от водности года (от масс воды, притекающих к водохранилищам) и накопления воды в чашах водохранилищ. Рассмотрены как отдельные водохранилища, так и весь каскад. Масштаб межгодовой изменчивости содержания веществ в водохранилищах оценивался для наиболее характерных загрязняющих веществ, отнесенных к шести группам показателей качества воды. Актуальность поставленной задачи и выбор объектов исследования связаны, в том числе, с прицельным вниманием науки и общества к реализации масштабной государственной программы «Оздоровление Волги», осуществляемой с 2018 г. Для определения успешности запланированных и реализованных в рамках программы мероприятий необходимы оценки баланса веществ в водохранилищах Волги в динамике – до и после проведения мероприятий.

### ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе рассмотрен Верхневолжский каскад, который формируют Ивановское, Угличское, Рыбинское, Горьковское и Чебоксарское водохранилища. Бассейн Волги – один из наиболее густонаселенных и промышленно развитых регионов страны, со значительной антропогенной нагрузкой на водоемы [19]. По оценкам, в зависимости от загрязняющего вещества от 20 до 80 % от всего сброса по России попадает в бассейн Волги [20].

Водохозяйственные и гидроэкологические параметры пяти верховолжских водохранилищ, ландшафтная структура и антропогенное использование их водосборов различны [21]. Самым большим по объему является Рыбинское водохранилище, осуществляющее многолетнее регулирование стока. Остальные водохранилища имеют сезонное регулирование [22].

Гидрологические и гидрохимические особенности водных масс водохранилищ зависят от процессов, происходящих как в самих водных объектах, так и на их местных водосборах, а также определяются поступлением веществ из расположенных выше по течению водохранилищ.

Материалами для исследования послужили данные государственного мониторинга, осуществляемого сертифицированными лабораториями организаций, подведомственных бассейновым водным управлениям Федерального агентства водных ресурсов (Росводресурсов) на всех крупных водохранилищах страны. На верховолжских водохранилищах мониторинг включает отбор и анализ проб воды и грунтовых отложений зимой, весной, летом и осенью от 5 до 11 раз в год в нескольких (до 12–15) створах по длине водохранилища. В разных водохранилищах определялись от 22 до 40 гидрохимических показателей. Информация мониторинга официально предоставлена Верхне-Волжским бассейновым водным управлением Росводресурсов. Данные включали информацию о гидрохимических показателях Ивановского и Горьковского водохранилищ за период 2005–2022 гг., Угличского за 2009–2022 гг., Рыбинского за 2010–2022 гг., Чебоксарского за 2004–2022 гг. Оценка водности лет определялась по эмпирическим кривым обеспеченности годового притока воды к отдельным водохранилищам. Данные о притоке воды к водохранилищам получены на сайте Центра Регистра и Кадастра<sup>1</sup>.

Предполагалось, что маловодные годы соответствуют притоку обеспеченностью более 66,7 %, многоводные – притоку менее 33,3 % обеспеченности, а средние по водности – от 33,3 % до 66,7 % включительно.

Массы веществ, растворенные в воде, оценивались как произведение соответствующих концентраций на объем воды водохранилища:

$$M_{i,j} = C_{i,j} \times W_j, \quad (1)$$

где  $M_{i,j}$  – масса того или иного вещества  $i$  в водохранилище в момент времени  $j$ ;  
 $C_{i,j}$  – средние концентрации гидрохимического показателя  $i$  на дату съемки  $j$ ;  
 $W_j$  – объем воды в водохранилище на дату  $j$ .

Средние концентрации  $i$ -го гидрохимического показателя рассчитывали как средние по всем створам водохранилища на определенную дату. Отметим, что при осреднении не учитывались пространственные внутриводоемные различия водных масс. Анализ проведен по 18 гидрохимическим показателям, принадлежащим к шести группам, которые определялись для большинства водохранилищ (табл. 1). Для этой же даты определяли объем воды по интерполяционной таблице объемов Правил использования водных ресурсов

<sup>1</sup> Центр Регистра и Кадастра. URL: <http://gis.vodinfo.ru/> (дата обращения: 10.09.2024).

водохранилищ<sup>2,3,4,5</sup>. Далее для выбранных маловодных, многоводных и средних по водности лет осреднением рассчитывали значения среднегодовых масс химических веществ в водохранилищах, а также определяли экстремальные показатели в течение года.

Большинство исследуемых показателей непосредственно отражают величину содержания вещества в воде. Однако два показателя – ХПК (химическое потребление кислорода) и БПК<sub>5</sub> (биохимическое потребление кислорода за 5 сут) – это косвенные показатели содержания в воде всех органических веществ и легкоокисляемых органических веществ (ЛОВ) соответственно. Оба показателя выражаются в миллиграммах кислорода (или другого окислителя в пересчете на кислород), затраченного на окисление органических веществ в процессе анализа. Чем больше расходуется при реакции окисления кислорода, тем, соответственно, больше органического вещества содержится в пробе. В первом приближении, считая, что в реакциях окисления органического вещества участвует только углерод (с образованием в результате реакции углекислого газа), массу затраченного на окисление кислорода через переходный коэффициент 0,375 можно пересчитать в массу углерода.

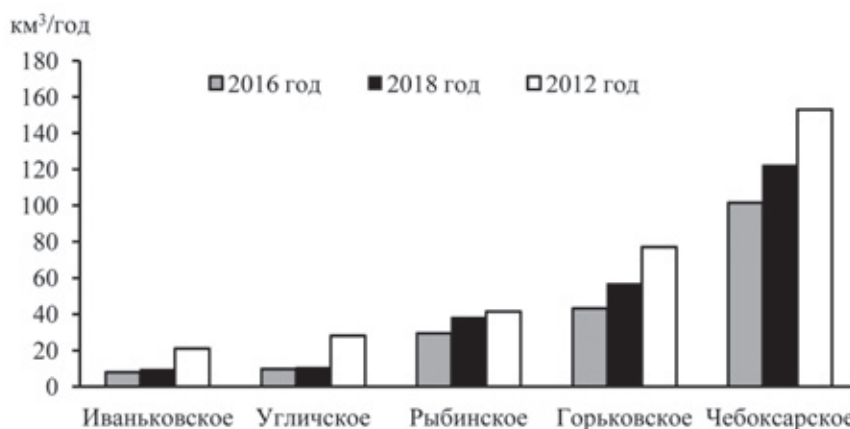
**Таблица 1.** Гидрохимические показатели оценки состояния качества воды на большинстве водохранилищ Верхневолжского и Камского каскадов  
Table 1. Hydro/chemical indicators of the water quality assessment in the majority of the Upper Volga and Kama cascades' reservoirs

| Группа показателей                                            | Показатель, соединение/элемент                                                         |
|---------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 группа: <b>биогенные вещества</b>                           | 1. аммоний-ион, 2. нитрат-ион, 3. нитрит-ион, 4. фосфаты                               |
| 2 группа: <b>показатели содержания органического вещества</b> | 5. ХПК, 6. БПК <sub>5</sub> , 7. растворенный кислород                                 |
| 3 группа: <b>металлы</b>                                      | 8. железо общее, 9. марганец двухвалентный, 10. медь, 11. никель, 12. свинец, 13. цинк |
| 4 группа: <b>взвешенные вещества</b>                          | 14. взвешенные вещества                                                                |
| 5 группа: <b>главные ионы</b>                                 | 15. сульфаты, 16. хлориды                                                              |
| 6 группа: <b>органические соединения</b>                      | 17. нефтепродукты, 18. фенолы                                                          |

<sup>2</sup> Временные основные правила использования водных ресурсов Чебоксарского водохранилища на р. Волге (на период начальной эксплуатации). М., 1982. (РВ-249-82).  
<sup>3</sup> Основные правила использования водных ресурсов Рыбинского и Горьковского водохранилища на реке Волге. М., 1983. (РВ-258-83).  
<sup>4</sup> Правила использования водных ресурсов Ивановского водохранилища на р. Волге. Утв. приказом Федерального агентства водных ресурсов от 31 мая 2019 г. № 125. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/72504336/#1000>.  
<sup>5</sup> Правила использования водных ресурсов Угличского водохранилища на р. Волге. Утв. приказом Федерального агентства водных ресурсов от 26 января 2022 г. № 15 URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/405248299/>.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для водохранилищ Верхневолжского каскада в качестве характерных лет выбраны многоводный 2012 г., маловодный 2016 г. и средний по водности 2018 г., характеризующиеся различными значениями притока воды к водохранилищам (рис. 1).



**Рис. 1.** Годовой приток воды к водохранилищам Верхней Волги, км³/год: 2016 г. – маловодный, 2018 г. – средний по водности, 2012 г. – многоводный.

Fig. 1. Annual water inflow to the Upper Volga reservoirs, km³/year.

2016 – low-water, 2018 – average water content, 2012 – high-water years.

### Изменения масс веществ в водохранилищах Верхневолжского каскада в разные по водности притока годы

*Среднегодовое содержание веществ.* В Верхневолжском каскаде водохранилищ из всех веществ одномоментно больше всего, что очевидно, содержится воды – свыше 30 млрд т. Среди других рассмотренных химических соединений в воде Верхневолжского каскада представлено более всего сульфатов – около 1 млн т, а также органических веществ (при оценке по ХПК), для окисления которых потребовалось бы примерно 1 млн 200 тыс. т кислорода, что в первом приближении соответствует 450 тыс. т углерода. Хлоридов и растворенного кислорода в воде каскада содержится по 300–350 тыс. т, взвешенных веществ – примерно 80–90 тыс. т. Для окисления легкоокисляемых органических веществ (по анализу на БПК<sub>5</sub>) потребовалось бы около 60–90 тыс. т кислорода (или в пересчете 22–34 тыс. т углерода). В воде водохранилищ Верхневолжского каскада присутствуют от 40 до 60 тыс. т нитратов, 15–25 тыс. т железа общего, около 5 тыс. т фосфатов, по 1,3–2,7 тыс. т нитритов и марганца, 310–470 т нефтепродуктов, 170–290 т цинка, 120–220 т меди, 70–120 т никеля, около 50 т свинца, примерно 5–15 т фенолов (табл. 2).

Объемы воды в водохранилищах год от года меняются незначительно и определяются регулированием Верхневолжского каскада, максимальная разница между объемами водохранилищ в разные годы не превышает 13 % (Иваньковское водохранилище) (табл. 2). При этом динамика среднегодовых объемов воды в водохранилищах не повторяет динамику притока воды к ним.

В годы высокой водности количество воды в Ивановском, Угличском и Рыбинском водохранилищах и во всем Верхневолжском каскаде было несколько ниже, чем в годы низкой и средней водности притока. В Горьковском водохранилище объемы воды наблюдались наибольшими в год средней водности и были практически одинаковы в годы высокого и низкого притока. Напротив, в Чебоксарском водохранилище ниже всего объемы воды отмечены в год среднего притока.

В отличие от объемов воды в водохранилищах, разница между среднегодовыми массами веществ в воде в годы разной водности достигает десятков и сотен процентов. В отдельных случаях, требующих проверки и дополнительных исследований, зафиксирована разница в несколько тысяч процентов (для фенолов и взвешенных наносов).

Для ряда показателей отмечается интересный факт: минимальные значения масс веществ в Верхневолжском каскаде отмечались в многоводный 2012 г.: в два раза по сравнению с маловодным 2016 г. уменьшилась масса взвешенных веществ за счет ее сокращения в Рыбинском, Горьковском и Чебоксарском водохранилищах. В многоводном 2012 г. более чем на 30 % по сравнению со средним по водности 2018 г. уменьшилось содержание легкоокисляемых органических веществ по БПК<sub>5</sub>. Это в основном произошло за счет значительного сокращения ЛОВ в Рыбинском водохранилище. Массы нефтепродуктов и фенолов в Верхневолжском каскаде в многоводный 2012 г. уменьшились по сравнению со средним по водности 2018 г. и с маловодным 2016 г. В 2012 г. сокращение нефтепродуктов произошло за счет значительного их снижения в Горьковском водохранилище, а сокращение фенолов – за счет сокращения в двух верхних – Ивановском и Угличском, но главным образом из-за уменьшения в Рыбинском водохранилище. Аналогичная закономерность – значимое уменьшение массы вещества в Верхневолжском каскаде в многоводный 2012 г. прослеживалось для ряда металлов – меди, двухвалентного марганца, никеля, цинка, а также для сульфатов и хлоридов. Сокращение содержания ряда веществ в водохранилищах Верхневолжского каскада в многоводный год может быть связано с тем, что металлы, сульфаты и хлориды, а также нефтепродукты и фенолы в бассейне Верхней Волги по своему происхождению связаны, в основном, либо с подземными и болотными водами, либо с точечными источниками сбросов.

В многоводные годы, обычно в период таяния снега, в водохранилища Верхневолжского каскада поступает большое количество поверхностного склонового стока и внутриводоемного стока с незначительным содержанием перечисленных веществ [4]. При этом активизируются процессы разбавления и сброса веществ в нижележащие водохранилища, что уменьшает их массу в каскаде. Однако разбавлением «чистым» поверхностным склоновым стоком нельзя объяснить значительное уменьшение масс взвешенных веществ в Рыбинском, Горьковском и Чебоксарском водохранилищах в многоводные годы. Напротив, в многоводные годы с ростом поверхностного склонового стока эрозия на водосборах интенсифицируется [23–26]. Реки-притоки выносят зна-

чительное количество взвешенного вещества в водохранилища или реки-приемники [27]. Явление уменьшения массы взвешенных веществ в многоводные годы, отмеченное в трех нижних водохранилищах Верхневолжского каскада, как и другие выявленные закономерности, требует проверки и дальнейшего изучения на большем числе лет.

Связь масс азота, фосфора и водности года для разных соединений неоднозначна. Для всех водохранилищ (кроме Чебоксарского, где не за все годы есть данные) в многоводный год почти в два раза увеличивалось содержание аммоний-иона, что, возможно, связано с интенсификацией в многоводный год поверхностного смыва удобрений с сельскохозяйственных полей и отходов животноводческих ферм. Нитритов в воде Верхневолжского каскада больше в маловодный год за счет увеличения их в Рыбинском и Чебоксарском водохранилищах. Вклад водности года в объемы содержания фосфатов и нитратов неочевиден.

Для большинства показателей (10 из 18) максимальное содержание (массы) веществ в Верхневолжском каскаде фиксировалось в год средней водности: это взвешенные вещества, никель и цинк, марганец двухвалентный, общее железо, нитраты, растворенный кислород, фенолы, ХПК и БПК<sub>5</sub>. Причем этот максимум не может быть объяснен только несколько увеличенным (на 3 %) среднегодовым объемом водохранилищ в 2018 г. по сравнению с двумя другими годами. Относительные отклонения в массах вещества в средний по водности год, в основном, значительно больше 3 %.

*Внутригодовые изменения масс химических веществ в воде водохранилищ* охватывают значительно больший диапазон значений, чем межгодовые изменения (табл. 3). В качестве показателя изменчивости принято отношение разности максимального и минимального значений показателя в течение года к минимальному значению показателя в течение года. Менее всего в течение выбранных лет изменялись массы растворенного кислорода (в среднем в 0,9 раза, до 4,8 раз в 2012 г. в Ивановском водохранилище). Примерно в 2 раза в течение года изменялись показатели БПК<sub>5</sub> и ХПК, массы хлоридов и сульфатов (кроме Чебоксарского водохранилища, где внутригодовые изменения этих показателей достигали 8–9 раз). В 3–4 раза изменялись массы общего железа, нитритов и аммоний-иона, до 5–9 и более раз – содержание фосфатов и нитратов. В 6–7 раз в среднем менялись массы фенолов и нефтепродуктов. Максимальная изменчивость нефтепродуктов (более чем в 50 раз) отмечалась в 2016 г. в воде Рыбинского водохранилища.

Среди металлов более всего были изменчивы массы цинка. Наибольшие вариации (в 270 раз) отмечены в маловодном 2016 г. в Ивановском водохранилище. За исключением этого случая, внутригодовая изменчивость масс цинка в Ивановском и Угличском водохранилищах превышала 40 раз, в Рыбинском, Горьковском и Чебоксарском – 4,5 раза. Внутригодовая изменчивость меди достигала 105 раз (в 2016 г. в Угличском водохранилище), в среднем в водохранилищах – 13 раз.

**Таблица 2.** Массы вещества в водохранилищах Верхневолжского каскада в разные по водности притока годы: 2012 г. – многоводный, 2018 г. – средний по водности, 2016 г. – маловодный, т  
 Table 2. Matter masses in the Upper Volga cascade reservoirs over the years varying in terms of the flow water content: 2012 as high water, 2018 medium, 2016 as low water

| Год                       | Водохранилище |           |           |             |              |                        |
|---------------------------|---------------|-----------|-----------|-------------|--------------|------------------------|
|                           | Иваньков-ское | Угличское | Рыбинское | Горьковское | Чебоксарское | Верхневолж-ский каскад |
| Вода, млрд т              |               |           |           |             |              |                        |
| 2016                      | 0,88          | 1,13      | 19,80     | 7,93        | 4,75         | 34,49                  |
| 2018                      | 0,87          | 1,08      | 19,92     | 8,77        | 4,67         | 35,29                  |
| 2012                      | 0,78          | 1,04      | 19,65     | 7,97        | 4,78         | 34,22                  |
| Аммоний-ион, т            |               |           |           |             |              |                        |
| 2016                      | 356           | 382       | 9 243     | 2 281       |              |                        |
| 2018                      | 397           | 447       | 13 134    | 3 242       |              |                        |
| 2012                      | 632           | 834       | 16 129    | 4 703       | 2 034        | 24 332                 |
| БПК <sub>5</sub> , т      |               |           |           |             |              |                        |
| 2016                      | 1985          | 2 288     | 44 380    | 14 724      | 8 557        | 71 934                 |
| 2018                      | 2299          | 2 523     | 50 055    | 21 170      | 9 863        | 85 910                 |
| 2012                      | 1474          | 2 741     | 27 619    | 16 359      | 10 575       | 58 768                 |
| Взвешенные вещества, т    |               |           |           |             |              |                        |
| 2016                      | 3531          | 4 661     | 25 394    | 17 975      | 29 215       | 80 777                 |
| 2018                      | 7355          | 4 543     | 34 155    | 17 420      | 26 327       | 89 800                 |
| 2012                      | 7802          | 5 159     | 489       | 7901        | 19 509       | 40 861                 |
| Железо общее, т           |               |           |           |             |              |                        |
| 2016                      | 261           | 375       | 9 710     | 3 210       | 1 741        | 15 297                 |
| 2018                      | 147           | 465       | 13 954    | 6 240       | 2 422        | 23 226                 |
| 2012                      | 292           | 582       | 11 263    | 4 284       | 1 645        | 18 067                 |
| Марганец двухвалентный, т |               |           |           |             |              |                        |
| 2016                      | 143           | 118       | 978       | 399         | 366          | 2 004                  |
| 2018                      | 112           | 140       | 1 383     | 665         | 425          | 2 724                  |
| 2012                      | 154           | 104       | 535       | 232         | 436          | 1 461                  |
| Медь, т                   |               |           |           |             |              |                        |
| 2016                      | 0,089         | 3,38      | 144       | 59,09       | 15,62        | 222                    |
| 2018                      | 0,515         | 3,13      | 81,99     | 51,50       | 16,31        | 153                    |
| 2012                      | 0,113         | 3,10      | 73,94     | 28,00       | 14,58        | 120                    |
| Нефтепродукты, т          |               |           |           |             |              |                        |
| 2016                      | 62,8          | 66,2      | 1,2       | 175         | 169          | 473                    |
| 2018                      | 43,4          | 31,2      | 0,2       | 194         | 108          | 376                    |
| 2012                      | 55,9          | 48,4      | 0,2       | 95,7        | 110          | 310                    |
| Никель, т                 |               |           |           |             |              |                        |
| 2016                      | 0,34          | 3,13      | 99,69     | 6,27        | 7,47         | 117                    |
| 2018                      | 0,49          | 3,63      | 99,92     | 5,67        | 11,23        | 121                    |
| 2012                      | 0,58          | 0,40      | 40,15     | 14,67       | 11,73        | 68                     |

## Продолжение таблицы 2.

| Год                      | Водохранилище     |           |           |             |              |                            |
|--------------------------|-------------------|-----------|-----------|-------------|--------------|----------------------------|
|                          | Иваньков-<br>ское | Угличское | Рыбинское | Горьковское | Чебоксарское | Верхневолж-<br>ский каскад |
| Нитраты, т               |                   |           |           |             |              |                            |
| 2016                     | 1 784             | 2 756     | 18 263    | 8 890       | 11 333       | 43 027                     |
| 2018                     | 1 538             | 1 586     | 33 871    | 14 296      | 11 533       | 62 824                     |
| 2012                     | 1 984             | 2 039     | 28 608    | 11 183      | 10 508       | 54 322                     |
| Нитриты, т               |                   |           |           |             |              |                            |
| 2016                     | 26,0              | 53,3      | 1 167     | 356         | 485          | 2 088                      |
| 2018                     | 35,8              | 35,9      | 775       | 258         | 244          | 1 348                      |
| 2012                     | 26,1              | 54,1      | 829       | 343         | 265          | 1 517                      |
| Растворенный кислород, т |                   |           |           |             |              |                            |
| 2016                     | 7 165             | 10 715    | 173 906   | 74 797      | 41 104       | 307 686                    |
| 2018                     | 7 215             | 7 965     | 189 338   | 81 957      | 38 836       | 325 312                    |
| 2012                     | 5 981             | 11 442    | 164 185   | 75 718      | 43 616       | 300 942                    |
| Свинец, т                |                   |           |           |             |              |                            |
| 2016                     | 0,17              | 1,25      | 39,88     | 1,73        | 2,46         | 45                         |
| 2018                     | 0,23              | 1,26      | 39,97     | 3,33        | 11,32        | 56                         |
| 2012                     | 0,20              | 0,19      |           | 3,33        | 4,03         |                            |
| Сульфаты, т              |                   |           |           |             |              |                            |
| 2016                     | 18 769            | 29 356    | 608 762   | 231 637     | 206 727      | 1 095 250                  |
| 2018                     | 18 460            | 23 308    | 471 997   | 161 314     | 183 835      | 858 914                    |
| 2012                     | 24 897            | 33 002    | 398 029   | 139 751     | 190 120      | 785 798                    |
| Фенолы, т                |                   |           |           |             |              |                            |
| 2016                     | 0,50              | 0,78      | 9,97      | 0,46        | 0,75         | 12                         |
| 2018                     | 1,99              | 1,66      | 9,99      | 0,17        | 0,24         | 14                         |
| 2012                     | 0,49              | 0,052     | 0,78      | 1,33        | 1,98         | 5                          |
| Фосфаты, т               |                   |           |           |             |              |                            |
| 2016                     | 117               | 247       | 3 153     | 847         | 734          | 5 098                      |
| 2018                     | 94,2              | 167       | 3 155     | 974         | 390          | 4 780                      |
| 2012                     | 125               | 207       |           | 899*        |              |                            |
| Хлориды, т               |                   |           |           |             |              |                            |
| 2016                     | 7 192             | 11 022    | 204 425   | 70 705      | 58 164       | 351 507                    |
| 2018                     | 8 078             | 9 834     | 209 745   | 62 861      | 59 199       | 349 718                    |
| 2012                     | 5 458             | 10 001    | 149 570   | 54 686      | 47 274       | 266 989                    |
| ХПК, т                   |                   |           |           |             |              |                            |
| 2016                     | 32 897            | 45 961    | 781 216   | 261 361     | 145 675      | 1 267 110                  |
| 2018                     | 23 158            | 32 171    | 712 829   | 344 453     | 166 914      | 1 279 526                  |
| 2012                     | 27 037            | 46 907    | 642 672   | 288 500     | 152 041      | 1 157 157                  |
| Цинк, т                  |                   |           |           |             |              |                            |
| 2016                     | 2,306             | 3,131     | 99,7      | 79,0        | 98,2         | 282                        |
| 2018                     | 0,967             | 3,957     | 99,9      | 88,3        | 94,8         | 288                        |
| 2012                     | 0,974             | 2,590     | 29,4      | 77,2        | 63,4         | 174                        |

Примечание: \* – пересчитаны по данным о фосфоре фосфатов.

**Таблица 3.** Внутригодовая изменчивость показателей содержания веществ в водохранилищах Верхневолжского каскада  
 Table 3. Inter-year variability of the matters content indicators in the Upper Volga cascade reservoirs' water

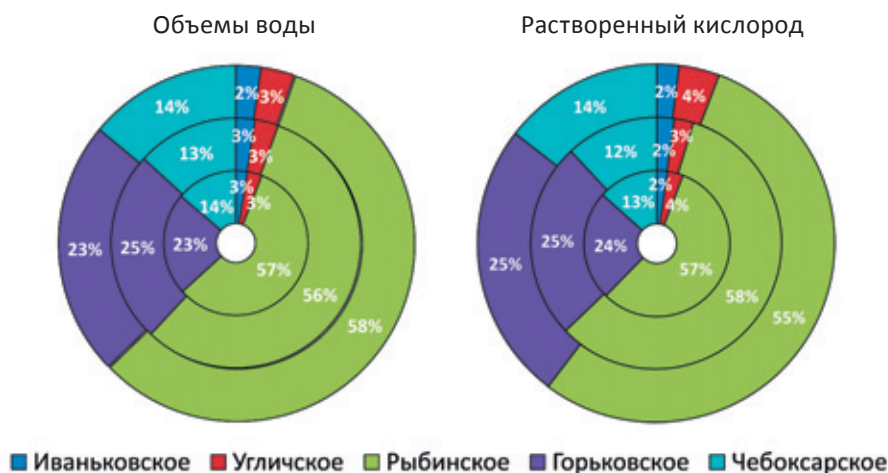
| Показатель             | Внутригодовая изменчивость содержания вещества |              |         |
|------------------------|------------------------------------------------|--------------|---------|
|                        | Минимальная                                    | Максимальная | Средняя |
| Аммоний-ион            | 0,8                                            | 11,6         | 3,4     |
| БПК <sub>5</sub>       | 0,4                                            | 4,1          | 1,9     |
| Взвешенные вещества    | 2,0                                            | 60,6         | 9,6     |
| Железо общее           | 0,8                                            | 9,9          | 3,6     |
| Марганец двухвалентный | 0,9                                            | 15,9         | 5,7     |
| Медь                   | 0,8                                            | 105,4        | 13,2    |
| Нефтепродукты          | 1,1                                            | 52,2         | 6,8     |
| Никель                 | 0,4                                            | 48,9         | 15,1    |
| Нитраты                | 1,5                                            | 27,0         | 9,4     |
| Нитриты                | 0,3                                            | 8,0          | 3,0     |
| Растворенный кислород  | 0,1                                            | 4,8          | 0,9     |
| Свинец                 | 0,4                                            | 48,4         | 11,8    |
| Сульфаты               | 0,5                                            | 9,4          | 2,4     |
| Фенолы                 | 0,0                                            | 20,5         | 6,5     |
| Фосфаты                | 1,0                                            | 26,3         | 5,0     |
| Хлориды                | 0,3                                            | 8,1          | 1,7     |
| ХПК                    | 0,3                                            | 7,5          | 1,7     |
| Цинк                   | 0,4                                            | 271,4        | 37,3    |

Внутригодовая изменчивость массы никеля в отдельные годы в Угличском и Чебоксарском водохранилищах достигала 45–49 раз (в среднем для водохранилищ Верхневолжского каскада до 15 раз), свинца – до 48 раз в 2012 г. в Угличском водохранилище (в среднем для водохранилищ в разные годы до 12 раз), двухвалентного марганца – до 16 раз в Рыбинском водохранилище (в среднем в водохранилищах по всем годам до 6 раз). Внутригодовая изменчивость содержания взвешенных веществ в водохранилищах достигала 10 раз, а в Угличском водохранилище в 2012 г. – до 60 раз.

#### **Распределение масс вещества между водохранилищами Верхневолжского каскада в годы разной водности**

Отмечалась межгодовая устойчивость в распределении объемов воды между водохранилищами. Во все рассмотренные годы 56–58 % воды Верхневолжского каскада было сосредоточено в Рыбинском водохранилище, 23–25 % – в Горьковском, 13–14 % – в Чебоксарском, около 3 % – в Ивань-

ковском и Угличском водохранилищах (рис. 2). Близкие к этому показатели и у распределения между водохранилищами количества растворенного кислорода (рис. 2). Содержание (концентрация) растворенного кислорода в воде определяется температурой окружающей среды (чем выше температура воды, тем, при прочих равных, меньше растворимость кислорода воздуха в воде); жизнедеятельностью водной биоты (фотосинтез, дыхание); наличием органических и неорганических веществ, поступающих с водосборов (аллохтонное загрязнение) или образующихся внутри водохранилищ (автохтонное загрязнение), на окисление которых тратится кислород [28].



**Рис. 2.** Распределение объемов воды и растворенного кислорода в водохранилищах Верхневолжского каскада: внешний круг – многоводный год, ближе к центру – средний по водности, в центре – маловодный год.

Fig. 2. Upper Volga Cascade. Distribution of water volumes and dissolved oxygen in reservoirs. The outer circle is a high-water year, closer to the center is an average water year, in the center is a low-water year.

Выявленное распределение кислорода между водохранилищами подобно распределению объемов воды и, по-видимому, определяется двумя главными факторами: во-первых, все водохранилища расположены в одной климатической зоне и имеют близкий термодинамический режим, определяющий растворимость кислорода воздуха в воде (зональный фактор); во-вторых, водохранилища образованы в пределах одного гидрологического объекта с единой биосистемой, функционирующей достаточно единообразно в пределах рассматриваемой территории. Эти два фактора обеспечивают устойчивость распределения массы кислорода в воде водохранилищ и компенсируют при выбранном пространственно-временном уровне осреднения (водохранилище в целом, год) прочие факторы (например, поступление аллохтонного загрязнения, вторичного загрязнения от донных отложений, влияние подземных вод). Однако отметим, что на локальном уровне и на коротких временных промежутках воздействие внешних факторов может значительно изменять местный гидрохимический режим [29].

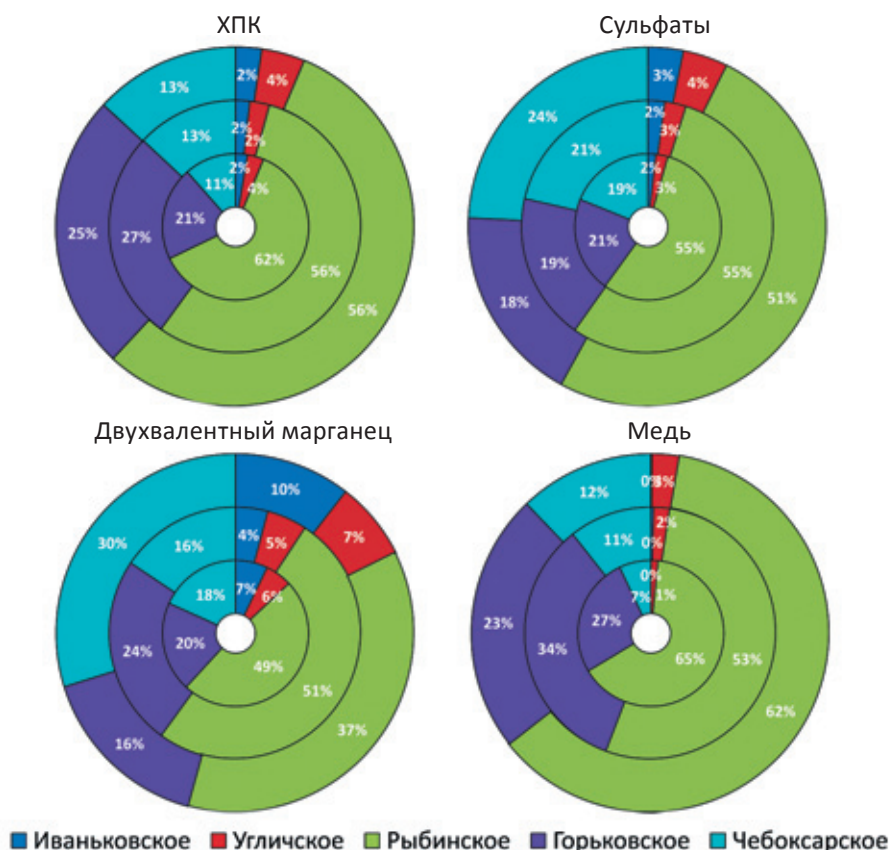
Примем как гипотезу, что возможное отклонение в распределении масс вещества в каскаде водохранилищ от распределения масс воды может свидетельствовать о влиянии местных факторов – геологического строения, структуры ландшафтов, антропогенного воздействия. Чем выше отклонение – тем сильнее влияние на содержание веществ в водохранилище местных природных особенностей и антропогенных факторов.

Все рассматриваемые гидрохимические показатели сгруппированы в две группы в зависимости от водности года. В первой группе распределение веществ по водохранилищам оставалось постоянным вне зависимости от года (рис. 3). Есть некоторые отклонения от года к году, что характерно для распределения легкоокисляемых органических соединений (при оценке их по БПК<sub>5</sub>), двухвалентного марганца и меди, но в целом отличия между годами разной водности незначительны. При этом для ряда веществ в этой группе зафиксированы устойчивые отличия в их распределении между водохранилищами от распределения масс воды и масс кислорода вне зависимости от водности года, что, скорее всего, свидетельствует о наличии постоянно действующих природных, локальных (на уровне водосбора водохранилища) факторов.

Ближе всего повторяет распределение масс воды между водохранилищами распределение масс органических соединений (при оценке их по ХПК) и хлоридов. В распределении масс сульфатов вклад Чебоксарского водохранилища выше, чем Горьковского, что связано с особенностями геологического строения водосбора Чебоксарского водохранилища (широкое распространение сульфатных пород – гипса) [30, 31]. До 60–64 % увеличивается доля Рыбинского водохранилища в суммарной массе общего железа в Верхневолжском каскаде за счет сокращения вклада Чебоксарского водохранилища до 9–11 %. Уменьшение концентраций железа общего от Рыбинского к Чебоксарскому водохранилищу отмечено и в работе [32], что авторы связывали, в основном, с зональными ландшафтными особенностями (наличие/отсутствие болот на водосборах).

Похожее распределение в Верхневолжском каскаде у масс аммоний-иона и фосфатов: увеличивается вклад Рыбинского водохранилища и уменьшается доля Горьковского и Чебоксарского водохранилищ. Для нитритов и нитратов отмечено увеличение вклада Чебоксарского водохранилища до 17–26 % за счет доли Горьковского (нитриты) и Рыбинского (нитраты) водохранилищ. Между массами кислорода, легкоокисляемых органических веществ и минеральных форм фосфора и азота выявлены значимые коэффициенты детерминации (около 0,9 и более). По-видимому, это является следствием поступления соединений азота и фосфора с водосборов водохранилищ. В результате развивается водная растительность, активизируются внутриводоемные физико-химические и биохимические продукционно-деструкционные процессы, сопровождающиеся выделением и/или поглощением кислорода в результате фотосинтеза, дыхания и окисления мертвой биомассы [33].

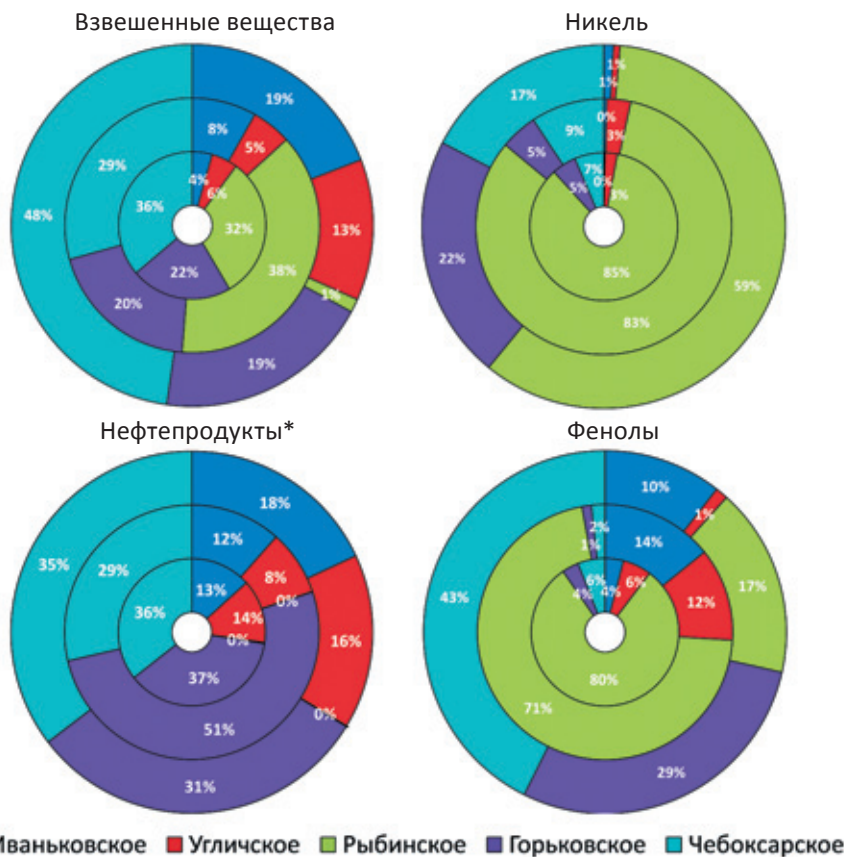
Ко второй группе веществ относятся те, у которых распределение вещества между водохранилищами значительно отклоняется от распределения



**Рис. 3.** Распределение масс веществ по водохранилищам Верхневолжского каскада: внешний круг – многоводный год, ближе к центру – средний по водности, в центре – маловодный год. Случаи квазипостоянного распределения.

Fig. 3. Upper Volga Cascade. Distribution of masses of substances in reservoirs. The outer circle is a high-water year, closer to the center is an average year in terms of water content, and in the center is a low-water year. Cases of quasi-constant distribution.

масс воды по каскаду и существенно меняется год от года (рис. 4). К этим показателям относятся массы взвешенных веществ, нефтепродуктов, фенолов, цинка, свинца, никеля. Причины подобных отклонений, очевидно, связаны с антропогенным происхождением этих веществ в воде водохранилищ. Исключение – взвешенные наносы, имеющие природное происхождение, хотя косвенно этот показатель тоже связан с антропогенным воздействием – распашкой водосборов. Показатели этой группы характеризуются наибольшей межгодовой и/или внутригодовой изменчивостью в воде водохранилищ (см. табл. 2 и табл. 3). Соответственно, их источники значительно дифференцированы во времени и в пространстве на водосборах Верхневолжского каскада и могут быть связаны с дискретными процессами (например, со снеготаянием, ливневыми осадками, формирующими поверхностный склоновый сток, и пр.).



**Рис. 4.** Распределение масс веществ по водохранилищам Верхневолжского каскада: внешний круг – многоводный год, ближе к центру – средний по водности, в центре – маловодный год. Случаи нарушения распределения.

Нефтепродукты в Рыбинском водохранилище имеют минимальные показатели, не отражающиеся в масштабе рисунка.

Fig. 4. Upper Volga cascade. Distribution of masses of substances by reservoirs. The outer circle is a high-water year, closer to the center is an average year in terms of water content, in the center is a low-water year. Cases of distribution disturbance. Petroleum products in the Rybinsk reservoir have minimal indicators, which are not reflected in the scale of the figure.

Следует подчеркнуть, что выявленные в работе закономерности в распределении масс веществ между верхневолжскими водохранилищами и их соответствие или несоответствие распределению масс воды и кислорода необходимо проверить на большем числе лет. При подтверждении закономерностей можно увереннее судить об источниках загрязнения воды верхневолжских водохранилищ. Для веществ из первой группы, с устойчивым межгодовым распределением масс вещества между водохранилищами, в случае пропусков наблюдений, их можно восстановить по установленным соотношениям. Кроме того, возможное внезапное изменение выявленных закономерностей при последующем мониторинге может свидетельствовать о появлении новых значимых факторов, скорее всего, мощных источников загрязнения антропогенного происхождения.

## ВЫВОДЫ

По результатам проведенного исследования установлено, что из всех веществ больше всего в Верхневолжском каскаде водохранилищ содержится воды – свыше 30 млрд т. Среди рассмотренных показателей загрязнения в воде водохранилищ более всего обнаружено органических веществ (по ХПК) – примерно 1 млн 200 тыс. т кислорода, в пересчете на углерод – 450 тыс. т; сульфатов – около 1 млн т; примерно одинаковое количество по массе хлоридов и растворенного кислорода – около 300–350 тыс. т; взвешенных веществ – примерно 80–90 тыс. т; легкоокисляемых органических веществ (по БПК<sub>5</sub>) соответствует примерно 60–90 тыс. т кислорода или 22034 тыс. т углерода; нитратов 40–60 тыс. т; железа общего 15–25 тыс. т; около 5 тыс. т фосфатов; от 1,3 до 2,7 тыс. т нитритов и марганца; 310–470 т нефтепродуктов; 170–290 т цинка, 120–220 т меди; 70–120 т никеля; около 50 т свинца и примерно 5–15 т фенолов.

Среднегодовое распределение масс воды в водохранилищах Верхневолжского каскада определяется искусственным регулированием, из года в год достаточно постоянно, и не определяется притоком текущего года. Максимальная межгодовая изменчивость объемов воды отмечена для Иваньковского водохранилища (13 %), при этом для всего каскада – всего 3 %.

В отличие от объемов воды в водохранилищах, разница между среднегодовыми массами химических веществ в воде водохранилищ в годы с разной водностью притока достигает десятков и сотен процентов, а для фенолов и взвешенных веществ – тысяч процентов. Для ряда показателей (медь, двухвалентный марганец, никель, цинк, сульфаты и хлориды, нефтепродукты и фенолы, взвешенные вещества, легкоокисляемые органические вещества по БПК<sub>5</sub>, нитриты) выявлено уменьшение их массы в Верхневолжском каскаде в многоводный по притоку воды 2012 г.

Внутригодовые изменения содержания загрязняющих веществ в водохранилищах значительно превышают межгодовую изменчивость. Менее всего в течение года изменяется содержание растворенного кислорода, показатели БПК<sub>5</sub> и ХПК, массы хлоридов и сульфатов (в среднем до 2 раз). Значительно более изменяется содержание взвешенных веществ (в среднем в 10 раз в течение года), металлов (в среднем для цинка и меди 13–37 раз, а в отдельные годы почти на порядок больше).

Все рассмотренные гидрохимические показатели относятся к двум группам. В первой группе распределение масс веществ по водохранилищам Верхневолжского каскада остается постоянным вне зависимости от водности года и примерно соответствует распределению масс воды по водохранилищам. Это растворенный кислород, легкоокисляемые органические соединения и все органические соединения (при их оценке соответственно по БПК<sub>5</sub> и ХПК), минеральные соединения азота и фосфора, общее железо, сульфаты, хлориды, двухвалентный марганец и медь. Ко второй группе веществ относятся те, у которых распределение вещества между водохранилищами значительно отклоняется от распределения масс воды по каскаду и меняется год от года, что,

по-видимому, связано со значительной пространственно-временной дискретностью их генезиса и в большинстве случаев с антропогенным фактором. К этим показателям относятся массы нефтепродуктов, фенолов, цинка, свинца, никеля, а также взвешенных веществ.

Необходима проверка выявленных закономерностей по данным более длительного периода лет, а также исследование формирования масс веществ в водохранилищах Верхневолжского каскада не только на уровне года, но и по гидрологическим сезонам.

**Благодарности:** *Выражаем большую благодарность руководителю Верхне-Волжского бассейнового водного управления Росводресурсов А.Н. Барину и сотрудникам управления за предоставленные материалы.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Диффузное загрязнение водных объектов: проблемы и решения / под ред. В.И. Данилова-Данильяна. М.: РАН, 2020. 512 с.
2. Водные ресурсы России и их использование / под ред. И.А. Шикломанова. СПб.: ГГИ, 2008. 600 с.
3. Антропогенные воздействия на водные ресурсы России и сопредельных государств в конце XX столетия / под ред. Н.И. Коронкевича, И.С. Зайцевой. М.: Наука, 2003. 367 с.
4. Эдельштейн К.К. Водохранилища России: экологические проблемы, пути их решения. М.: ГЕОС, 1998. 277 с.
5. Буторин Н.В., Зиминова Н.А., Курдин В.П. Донные отложения верхневолжских водохранилищ. Л.: Наука, 1975. 158 с.
6. Законнов В.В., Законнова А.В., Цветков А.И., Шерышева Н.Г. Гидродинамические процессы и их роль в формировании донных осадков водохранилищ Волжско-Камского каскада // Труды Института биологии внутренних вод РАН. 2018. Вып. 81 (84). С. 33–45. <https://doi.org/10.24411/0320-3557-2018-1-0004>.
7. Закруткин В.Е., Гибков Е.В., Решетняк О.С., Решетняк В.Н. Донные отложения как индикатор первичного и источник вторичного загрязнения речных вод углепромышленных территорий Восточного Донбасса // Известия Российской академии наук. Сер. географическая. 2020. 84 (2). С. 259–271. <https://doi.org/10.31857/S2587556620020168>.
8. Келлер И.А., Китаев А.Б. Динамика биогенных веществ в Воткинском водохранилище // Географический вестник. 2011. № 3. С. 27–35.
9. Эдельштейн К.К., Даценко Ю.С. Водоёмы суши и их роль в трансформации стока фосфора // Водные ресурсы. 1998. Т. 25. № 5. С. 581–588.
10. Савенко В.С., Савенко А.В. Геохимия фосфора в глобальном гидрологическом цикле. М.: ГЕОС, 2007. 248 с.
11. Даценко Ю.С. Гидрохимический режим Учинского водохранилища // Водные ресурсы. № 2. 1984. С. 136–142.
12. Даценко Ю.С., Пуклаков В.В. Баланс фосфора в водохранилищах сезонного и многолетнего регулирования // Вестник Московского университета. Сер. 5. География. 2023. № 1. С. 137–142. DOI 10.55959/MSU0579-9414.5.78.1.12.
13. Даценко Ю.С., Пуклаков В.В., Эдельштейн К.К. Оценка структуры баланса минерального фосфора в Можайском водохранилище по результатам модельных расчетов // Труды Карельского научного центра РАН. 2020. № 9. С. 123–132. <https://doi.org/10.17076/lim1206>.
14. Трифонова Н.А. О накоплении соединений азота в Рыбинском водохранилище в вегетационный период // Мат-лы к совещанию по прогнозированию содержания биогенных элементов и органического вещества в водохранилищах. Рыбинск, 1969. С. 8–15.
15. Разгулин С.М., Гапеева М.В., Литвинов А.С. Баланс биогенных элементов и ионов в Рыбинском водохранилище в 1980 году // Гидрохимические исследования волжских водохранилищ. Рыбинск: Типография № 2, 1982. С. 81–91.

16. Степанова И.Э. История изучения биогенных элементов в Рыбинском водохранилище // Труды Института биологии внутренних вод РАН. Вып. 75 (78). 2016. С. 53–71.
17. Ясинский С.В., Соболев И.С., Хохлов Д.Н., Фасахов М.А., Шайдулина А.А. Оценка энергетической эффективности функционирования водохранилищ Верхневолжского и Камского каскадов в начале XXI столетия // Известия Российской академии наук. Сер. географическая. 2023. Т. 87. № 6. С. 835–846. <https://doi.org/10.31857/S2587556623060146>.
18. Болгов М.В., Кочарян А.Г., Лебедева И.П., Шашков С.Н. Качество природных вод в каскаде волжских водохранилищ // Аридные экосистемы. 2008. Т.14. № 35–36. С. 68–82.
19. Демин А.П. Водопотребление и водоотведение в бассейне реки Волги, их влияние на качество воды // Известия Российской академии наук. Сер. географическая. 2023. Т. 87. № 6. С. 847–861. <https://doi.org/10.31857/S2587556623060055>.
20. Селезнева А.В. Оценка техногенной нагрузки на водные экосистемы // Антропогенное влияние на водные организмы и экосистемы: сб. материалов VII Всеросс. конф. по водной экотоксикологии. Ярославль: Филигрань, 2020. С. 166–169.
21. Волга и ее жизнь. Л.: Наука, 1978. 348 с.
22. Измайлова А.В., Дубровская К.А., Фуксова Т.В. Многолетние изменения основных составляющих водного баланса крупнейших водохранилищ Европейской территории России // Вопросы географии. Сб. 157. Водные проблемы и их решение / В.М. Котляков и др. М.: Медиа-ПРЕСС, 2023. С.191–213.
23. Бобровицкая Н.Н. Исследование и расчет смыва почвы со склонов // Сборник работ по гидрологии. № 12. Л.: Гидрометеиздат, 1977. С. 93–99.
24. Бобровицкая Н.Н. Водноэрозийные процессы на склонах и сток наносов рек в современных условиях // Труды VI Всероссийского гидрологического съезда. Метеоагентство Росгидромета, 2008. С. 228–233.
25. Лисецкий Ф.Н., Черный С.Г., Светличный А.А. Современные проблемы эрозиоведения. Белгород: «Константа», 2012. 456 с. <https://doi.org/10.13140/2.1.1029.9682>.
26. Пространственно-временные закономерности развития современных процессов природно-антропогенной эрозии на Русской равнине / под ред. В.Н. Голосова, О.П. Ермолаева. Казань: Изд-во АН РТ, 2019. 372 с.
27. Чалов С.Р. Речные наносы в эрозионно-русловых системах: автореф. дисс. ... д-ра наук. 25.00.27 Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия. Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 2021. 358 с.
28. Басова А.З. Мониторинг содержания растворенного кислорода в реках Северо-Восточного района Республики Татарстан // Вестник Казанского технологического университета. 2014. № 11. С. 115–118.
29. Лазарева В.И., Степанова И.Э., Цветков А.И., Пряничникова Е.Г., Перова С.Н. Кислородный режим водохранилищ Волги и Камы в период потепления климата: последствия для зоопланктона и зообентоса // Труды Института биологии внутренних вод РАН. 2018. Вып. 81 (84). Гидрология, гидрохимия и растительные пигменты водохранилищ Волжского каскада. С. 46–83. <https://doi.org/10.24411/0320-3557-2018-1-0005>.
30. Горбунова К.А. Карст гипса СССР. Изд. Пермского ун-та, 1977. 84 с.
31. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 10. Верхне-Волжский район. Кн. 1 / под ред. Ю.Е. Яблокова. М.: Гидрометеиздат, 1973. 477 с.
32. Цельмович О.Л., Отыкова Н.Г. Содержание железа и главных компонентов солевого состава в воде волжских водохранилищ в период открытой воды 2015 года // Труды Института биологии внутренних вод РАН, 2018. Вып. 81(84). С. 5–15. <https://doi.org/10.24411/0320-3557-2018-1-0001>.
33. Даценко Ю.С. Формирование и трансформация качества воды в системах источников водоснабжения города Москвы: автореф. дисс. ... д-ра геогр. наук. М.: Формат, 2015. 49 с.

## REFERENCES

1. Diffuse Pollution of Water Bodies: Problems and Solutions. Collective monograph under the direction of V.I. Danilov – Danilyan. Moscow: RAN. 2020. 512 p. (In Russ.).
2. Water resources of Russia and their use. Edited by prof. I. Shiklomanov. St. Petersburg: GGI Publications. 2008. 600 p. (In Russ.).

3. Koronkevich N.I., Zaitseva I.S., Chernogaeva G.M. *et al.* Anthropogenic impacts on water resources of Russia and neighboring countries at the end of the 20th century: Monograph. Moscow: Nauka Publications, 2003. 367 p. (In Russ.).
4. Edelshtein K.K. Reservoirs of Russia: environmental problems, ways to solve them. Moscow: GEOS Publications, 1998. 277 p. (In Russ.).
5. Butorin, N., Ziminova, N., Kurdin, V. Bottom sediments of the Upper Volga reservoirs. Leningrad: Nauka Publications, 1975. 158 p. (In Russ.).
6. Zakonnov, V., Zakonnova, A., Tsvetkov, A., Sherysheva, N. Hydrodynamic processes and their role in the formation of bottom sediments of the reservoirs of the Volga-Kama cascade. *Proceedings of the Institute of Biology of Inland Waters of the Russian Academy of Sciences*. 2018, issue 81(84). P. 33–45. <https://doi.org/10.24411/0320-3557-2018-1-0004>. (In Russ.).
7. Zakrutkin, V., Gibkov, E., Reshetnyak, O., Reshetnyak, V. Bottom sediments as an indicator of primary and a source of secondary pollution of river waters of coal mining areas of the Eastern Donbass. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geographical Series*. 2020; 84(2). P. 259–271 <https://doi.org/10.31857/S2587556620020168>. (In Russ.).
8. Keller, I. and Kitaev, A. Dynamics of biogenic substances in the Votkinskoe Reservoir. *Geographical Bulletin*. No. 3, 2011. P. 27–35. (In Russ.).
9. Edelshtein, K., and Datsenko, Yu. Land water bodies and their role in the transformation of phosphorus runoff. *Water resources*. 1998. Vol. 25. No. 5. P. 581–588. (In Russ.).
10. Savenko, V., and Savenko, A. Geochemistry of phosphorus in the global hydrological cycle. Moscow: GEOS Publications. 2007. 248 p. (In Russ.).
11. Datsenko, Y. Hydro/chemical regime of the Uchinskoye reservoir. *Water resources*. 1984. No. 2. P. 136–142. (In Russ.).
12. Datsenko, Y. and Puklakov, V. Phosphorus balance in reservoirs of seasonal and long-term regulation. *Bulletin of Moscow University. Ser. 5. Geography*. 2023. (1). P. 137–142. <https://doi.org/10.55959/MSU0579-9414.5.78.1.12>. (In Russ.).
13. Datsenko Y., Puklakov, V., Edelshtein, K. Assessment of the structure of the mineral phosphorus balance in the Mozhaisk Reservoir based on the results of model calculations. *Proceedings of the Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences*. 2020. No. 9. P. 123–132. <https://doi.org/10.17076/lim1206>. (In Russ.).
14. Trifonova N. On the accumulation of nitrogen compounds in the Rybinsk Reservoir during the growing season. *Materials for the conference on forecasting the content of biogenic elements and organic matter in reservoirs. Rybinsk*. 1969. P. 8–15 (In Russ.).
15. Razgulin S., Gapeeva M., Litvinov A. Balance of biogenic elements and ions in the Rybinsk Reservoir in 1980. *Hydro/chemical studies of the Volga reservoirs*. Rybinsk: Printing House. 1982. № 2. P. 81–91 (In Russ.).
16. Stepanova I. History of the study of biogenic elements in the Rybinsk Reservoir. *Proceedings of the Institute of Biology and Inland Waters of the Russian Academy of Sciences*. 2016. Iss. 75(78). P. 53–71 (In Russ.).
17. Yasinsky S., Sobol I., Khokhlov D., Fasakhov M., Shaydulina A. Assessment of the energy efficiency of energy storage facilities of the Upper Volga and Kama cascades at the beginning of the 21st century. *Newsletter of the Russian Academy of Sciences. Geographical series*. 2023. Vol. 87. No. 6. P. 835–846. <https://doi.org/10.31857/S2587556623060146> (In Russ.).
18. Bolgov M., Kocheryan A., Lebedeva I., Shashkov S. Quality of natural waters in the cascade of Volga reservoirs. *Arid ecosystems*. 2008. Vol.14. № 35-36. P. 68–82 (In Russ.).
19. Demin A. Water consumption and water disposal in the Volga River basin, their impact on water quality. *Newsletter of the Russian Academy of Sciences. Geographical series*. 2023. Vol. 87. No. 6. P. 847–861. <https://doi.org/10.31857/S2587556623060055> (In Russ.).
20. Selezneva A. Assessment of technogenic load on aquatic ecosystems. Anthropogenic impact on aquatic organisms and ecosystems: collection of materials from the VII All-Russian conference on aquatic ecotoxicology. Yaroslavl: Filigree Publ., 2020. P. 166–169 (In Russ.).
21. Volga and its life. Leningrad: Nauka Publications. 1978. 348 p. (In Russ.).
22. Izmailova A., Dubrovskaya K., Fuksova T. Long-term changes in the main components of the water balance of the largest reservoirs of the European territory of Russia. *Issues of geography*. 157. *Water problems and their solution*. Moscow: Media-PRESS, 2023. P. 191–213 (In Russ.).

23. Bobrovitskaya, N. Research and calculation of soil erosion from slopes. *Collection of works on hydrology*. 1977. No. 12. P. 93–99 (In Russ.).
24. Bobrovitskaya, N. Water erosion processes on slopes and river sediment runoff under modern conditions. *Proceedings of the VI All-Russian Hydrological Congress*. 2008. P. 228–233 (In Russ.).
25. Lisetsky F.N., Cherny S.G., Svetlichny A.A. Modern problems of erosion studies. Belgorod: Konstanta Publications., 2012. 456 p. <https://doi.org/10.13140/2.1.1029.9682> (In Russ.).
26. Spatio-temporal patterns of development of modern processes of natural and anthropogenic erosion on the Russian Plain. Edited by V.N. Golosov, O.P. Ermolaev. Kazan: Publishing house of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, 2019. 372 p. (In Russ.).
27. Chalov S.R. River sediments in erosion-channel systems: abstract of the thesis for Doctor of Sciences degree. Moscow State University. 2021. 358 p. (In Russ.).
28. Basova, L. Monitoring of dissolved oxygen content in the rivers of the Northeastern region of the Republic of Tatarstan. *Bulletin of the Kazan Technological University*. 2014. No. 11. P. 115–118 (In Russ.).
29. Lazareva, V., Stepanova, I., Tsvetkov, A., Pryanichnikova, E., Perova, S. Oxygen regime of the Volga and Kama reservoirs during climate warming: consequences for zooplankton and zoobenthos. *Proceedings of the Institute of Biology of Inland Waters of the Russian Academy of Sciences*. 2018. Iss. 81(84). P. 46–83. <https://doi.org/10.24411/0320-3557-2018-1-0005> (In Russ.).
30. Gorbunova K.A. Gypsum karst of the USSR. Perm: Perm University Publ. 1977. 84 p. (In Russ.).
31. Surface water resources of the USSR. Volume 10. Upper Volga region. Book 1. Edited by Y.E. Yablokov. Moscow: Gidrometeoizdat Publ., 1973. 477 p. (In Russ.).
32. Tselmovich, O., and Otyukova, N. Content of iron and main components of salt composition in the water of the Volga reservoirs during the open water period of 2015. *Proceedings of the Institute of Biology of Inland Waters of the Russian Academy of Sciences*. 2018. Iss. 81(84). P. 5–15. <https://doi.org/10.24411/0320-3557-2018-1-0001>. (In Russ.).
33. Datsenko, Y. Formation and transformation of water quality in the water supply systems of the city of Moscow: author's abstract. diss. for the degree of Doctor of Geographical Sciences. Moscow: Printing house "Format". 2015. 49 p. (In Russ.).

#### Сведения об авторах:

**Кашутина Екатерина Александровна**, канд. геогр. наук, старший научный сотрудник, заведующая лабораторией гидрологии, Институт географии РАН, Россия, 119017, Москва, Старомонетный переулок, д. 29, стр. 4; ORCID: 0000-0003-0181-5036; e-mail: kashutina@igras.ru

**Ясинский Сергей Владимирович**, д-р геогр. наук, ведущий научный сотрудник, Института географии РАН, Россия, 119017, Москва, Старомонетный переулок, д. 29, стр. 4; ORCID: 0000-0002-2478-8256; e-mail: yasisergej@yandex.ru

**Гришанцева Елена Сергеевна**, кандидат геол.-минерал. наук, научный сотрудник, Института географии РАН, Россия, 119017 Москва, Старомонетный переулок, д. 29, стр. 4; научный сотрудник кафедры геохимии геологического факультета Московского государственного университета им. М.В.Ломоносова, Россия, 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы; ORCID: 0000-0003-1563-5933; e-mail: shes99@mail.ru

**Расулова Анна Мурадовна**, канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник, Институт озероведения РАН – СПб ФИЦ РАН, Россия, 196105, Санкт-Петербург, ул. Севастьянова, д. 9; ORCID: 0000-0003-4400-2000; e-mail: arasulova@limno.ru

**Фасахов Михаил Александрович**, ассистент кафедры гидрологии и охраны водных ресурсов, Пермский государственный национальный исследовательский университет, Россия, 614068, г. Пермь, ул. Букирева, 15; ORCID: 0000-0001-7334-4646; e-mail: komrad.fasakhov2017@yandex.ru

**Шайдулина Аделия Александровна**, канд. геогр. наук, доцент кафедры гидрологии и охраны водных ресурсов, Пермский государственный национальный исследовательский университет, Россия, 614068, г. Пермь, ул. Букирева, 15; ORCID: 0000-0003-2439-908X; e-mail: adelinash89@mail.ru

**About the authors:**

**Ekaterina A. Kashutina**, Candidate of Geographical Sciences, Senior Researcher, Head of the Hydrology Laboratory, Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences; 119017, Russia, Moscow, Staromonetny lane, 29, building 4. ORCID: 0000-0003-0181-5036; e-mail: kashutina@igras.ru

**Sergey V. Yasinsky**, Doctor of Geographical Sciences, Senior Researcher, Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences; 119017, Russia, Moscow, Staromonetny lane, 29, building 4. ORCID: 0000-0002-2478-8256; e-mail: yasisergej@yandex.ru

**Elena S. Grishantseva**, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Research Fellow at the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences; 119017, Russia, Moscow, Staromonetny lane, 29, building 4. Research Fellow at the Department of Geochemistry, Geological Faculty, Moscow State University; 119991, Russia, Moscow, GSP-1, Leninskie Gory, Moscow State University. ORCID: 0000-0003-1563-5933; e-mail: shes99@mail.ru

**Anna M. Rasulova**, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Researcher at the Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences – St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences; 196105, Russia, St. Petersburg, st. Sevastyanova, 9. ORCID: 0000-0003-4400-2000; e-mail: arasulova@limno.ru

**Mikhail A. Fasakhov**, Assistant of Department of Hydrology and Water Resources Protection of the Perm State University; 614990, Russia, Perm, st. Bukireva, 15; ORCID: 0000-0001-7334-4646; e-mail: komrad.fasakhov2017@yandex.ru

**Adeliya A. Shaydulina**, Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor at the Department of Hydrology and Water Resources Protection of the Perm State University; 614990, Russia, Perm, st. Bukireva, 15; ORCID: 0000-0003-2439-908X; e-mail: adelinash89@mail.ru

**Поступила в редакцию / Received 09.10.2024.**

**Поступила после рецензирования / Revised 21.10.2024.**

**Принята к публикации / Accepted 11.11.2024.**