

УДК 504.064.2.001.18

ОЦЕНКА ГИДРОХИМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РЫБИНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА ЭКВИВАЛЕНТНОГО УРОВНЯ

А. С. Нартов*, М. А. Лаврухина

Государственный университет по землеустройству (ул. Казакова, 15, Москва, Россия, 105064), *nartovalexander@gmail.com

Рассмотрен авторский метод эквивалентного уровня, разработанный для оценки качества воды Рыбинского водохранилища, а также применимый к прогнозированию негативных экологических последствий, которые с высокой вероятностью следует ожидать в случае реализации проектов по восстановлению земель, утраченных при создании водохранилища. Показано, что зависимости концентраций ряда неорганических ионов и нефтепродуктов в водоеме от уровня его заполнения близки к убывающей экспоненциальной регрессии. Для 12 гидрохимических показателей графически определены коэффициенты регрессий, статистическая значимость которых подтверждена путем расчета критериев Фишера и Стьюдента. Выявленные зависимости использованы для расчета предельных эквивалентных уровней, ниже которых наступают экологические последствия, сравнимые с превышением ПДК. Показано, что при изучении динамики гидрохимических параметров водоема важную роль играет скорость изменения концентрации химических веществ вследствие изменения уровня воды. Проведены расчеты скорости возрастания концентрации 12 гидрохимических показателей при прохождении отметки нормального подпорного уровня (НПУ) Рыбинского вдхр. (101,81 м БС). Максимальное значение наблюдается для катионов Mn^{2+} (единственный из показателей, для которого скорость превышает 1 ПДК/м). Прогнозирование изменения качества воды Рыбинского вдхр., выполненное на основе разработанной методики, дает основания полагать, что реализация проектов по частичному осушению затопленных земель посредством снижения НПУ водоема до отметки 98 м БС приведет к превышению рыбохозяйственных ПДК по девяти из 12 веществ, тогда как в течение 2018–2024 гг. нормы превышали только четыре показателя, что указывает на нецелесообразность воплощения подобных проектов. Отдельно рассмотрены процессы поступления в водоем Mn^{2+} и $Fe_{общ}$, поскольку, согласно имеющимся исследованиям, превышение по этим элементам фиксируется и в других водохранилищах, но зачастую связано с особенностями региональной геохимии. Рассмотрен сценарий, при котором уровень водоема будет зафиксирован на постоянной отметке в течение длительного времени. Сделаны предположения, что в этом случае будет стабильно наблюдаться пониженное качество воды.

Ключевые слова: Рыбинское водохранилище; качество воды; эквивалентный уровень; тяжелые металлы; анионы; восстановление земель

Для цитирования: Нартов А. С., Лаврухина М. А. Оценка гидрохимических показателей Рыбинского водохранилища с применением метода эквивалентного уровня // Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 4. С. 111–124. doi: 10.17076/lim2300

A. S. Nartov*, M. A. Lavrukhina. ASSESSMENT OF HYDROCHEMICAL INDICATORS OF THE RYBINSK RESERVOIR USING THE EQUIVALENT LEVEL METHOD

State University of Land Use Planning (15 Kazakova St., 105064 Moscow, Russia),
*nartovalexander@gmail.com

The article discusses the original equivalent level method developed for assessing the water quality of the Rybinsk Reservoir, and its application to forecasting the negative environmental impacts that are highly likely to occur if the projects to restore the land lost to impoundment are implemented. It is shown that the dependencies of the concentrations of certain inorganic ions and petroleum products in the reservoir on its water level are closely modeled by the decreasing exponential regression. For 12 hydrochemical indicators, the regression coefficients were graphically determined, and their statistical significance was verified by the Fisher's and Student's tests. The resultant relationships were used to calculate the maximum equivalent levels, below which the environmental impacts can be compared with exceeding the maximum allowable concentrations (MAC). It is shown that an important role in the study of the dynamics of the reservoir's hydrochemical parameters belongs to the rate of change in the concentration of chemicals due to changes in the water level. The rates of increase in the concentration of 12 hydrochemical indicators upon crossing the Rybinsk Reservoir's normal retention level (101.81 m BHS) were estimated. The highest rate is demonstrated by Mn^{2+} cations (the only indicator for which the rate exceeds 1 MAC/m). Considering the changes in the Rybinsk Reservoir water quality predicted by using the proposed methodology, there is reason to believe that the implementation of projects for partial drainage of the flooded land by lowering the reservoir's normal retention level to 98 m BHS will cause 9 out of 12 substances to rise above the MACs for fishery reservoirs, while during 2018–2024, only 4 indicators exceeded their MACs. Thus, implementing such projects is unadvisable. We have particularly studied the processes of Mn^{2+} and Fe_{tot} influx into the reservoir, since other authors have reported these elements to have exceeded the permissible levels in other reservoirs, but this was often associated with the region-specific geochemistry. A scenario is considered in which the reservoir's level will be fixed at a constant elevation over a long period of time. The supposition is that the water quality in this case will be consistently affected.

Keywords: Rybinsk Reservoir; water quality; equivalent level; heavy metals; anions; land restoration

For citation: Nartov A. S., Lavrukhina M. A. Assessment of hydrochemical indicators of the Rybinsk Reservoir using the equivalent level method. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2026. No. 4. P. 111–124. doi: 10.17076/lim2300

Введение

Рыбинское водохранилище и прилегающие к нему территории находятся на северо-западе Ярославской области, часть акватории водоема расположена в Тверской и Вологодской областях (58°22'30" с. ш. 38°25'04" в. д.). Водохранилище создано на месте Молого-Шекснинской равнины, образовавшейся после высыхания ледникового озера, располагавшегося здесь незадолго до начала эпохи голоцена [Кузин, 1972]. Согласно постановлению ЦК партии и советского правительства «О строительстве гидроузлов в районе Углича и Рыбинска» (1935 г.), проект был призван решить две ключевые задачи: улучшение судоходства на верхнем участке Волги и энергоснабжение региона за счет строительства двух новых ГЭС. Изначально

планировалось затопление 2500 км² суши до отметки 98 м БС [Мальшев, Мальцев, 1967].

К 1937 г. инженерами «Гидростройпроекта» было обосновано и принято решение о затоплении территорий до 102 м БС. Это позволило повысить мощность ГЭС до 330 МВт, т. е. на 65 % относительно первоначального проекта, но увеличивало площадь затопления почти вдвое, а новый проект подразумевал затопление Молого-Шекснинского междуречья, включая г. Мологу [Баранова, 2022]. Заполнение водохранилища началось в апреле 1941 г. Интенсивные работы, проводившиеся с применением передовых для того времени технологий, не прекращавшиеся даже в первые месяцы Великой Отечественной войны, позволили уже в 1941 г. ввести в эксплуатацию отдельные узлы Рыбинского гидроузла. Рыбинское водхр., ставшее крупнейшим

по площади искусственным водоемом в мире, в военные годы играло важнейшую роль как для обеспечения судоходства, так и для выработки столь необходимой электроэнергии, даже с учетом приостановки строительно-монтажных работ из-за тяжелого положения на фронте [Малышев, Мальцев, 1967; Каримов, 2018; Рыбинское..., 2020; Баранова, 2022]. Почти сразу после окончания военных действий работы по заполнению продолжились, к маю 1947 г. был достигнут нормальный подпорный уровень, все узлы гидротехнического комплекса вышли на запланированные проектные мощности [Малышев, Мальцев, 1967; Рыбинское..., 2020].

Рыбинское вдхр. относится к водоемам котловинного типа, сформированным среди аккумулятивных озерно-аллювиальных террас. На сегодняшний день общая длина его береговой линии составляет 2150 км, из них около 12 % приходится на аккумулятивные берега, столько же – на абразионные и около 1 % – на аккумулятивно-абразионные участки. За первые 70 лет существования водоема площадь земель, утраченных из-за абразионных процессов, оценивалась почти в 33,5 км², хотя исследователи отмечают снижение скорости эрозии береговой зоны [Широкова и др., 2013].

Нормальный подпорный уровень (НПУ) Рыбинского вдхр. установлен на отметке 101,81 м БС; форсированный подпорный уровень (ФПУ), до которого технически может быть заполнен водоем, составляет 103,81 м БС. Уровень мертвого объема (УМО) равен 96,91 м БС, а реальный уровень водоема в течение февраля 2026 г. варьировался в пределах 99,67–99,81 м БС (на 27.02.2026 УМО составлял 99,67 м БС) [Рыбинское...; Уровни...].

В Рыбинском вдхр. выделяются зоны: постоянного затопления (площадь до 2385 км²); периодического затопления (площадь до 2165 км², делится на зону ежегодного и зону полноводного, или паводкового затопления) [Васильев и др., 2016]. Общая площадь затопления при достижении НПУ составляет 4550 км², а при заполнении до ФПУ возрастает до 5400 км² [Об утверждении..., 2025]. Зона периодического затопления характеризуется развитой гидрологической сетью, разнообразием типов ландшафта и биотопов [Васильев и др., 2016]. Некоторые из них (например, торфяные острова) являются частью сложных мини-биосистем с достаточно богатым биоразнообразием, в том числе со множеством промысловых видов [Герасимов, 2015]. Более половины затопленных земель относились к лесным массивам, около 40 % – к с/х угодьям (408 колхозов). Правительство страны перенесло с затопленных террито-

рий ряд объектов промышленной и социальной инфраструктуры, переселило из затопленных деревень и домовладений несколько тысяч жителей [Шкардюк, 2013; Законнов и др., 2015].

В настоящее время Рыбинское вдхр. продолжает выполнять ряд важных функций в самых разных секторах народного хозяйства. Среди них: энергетическая функция; функция регулирования водного режима р. Волги; транспортная и навигационная функция (в т. ч. лесосплав); водообеспечение прилегающих населенных пунктов; использование биологических ресурсов водоема (в т. ч. рыбный промысел); рекреационная функция [Николаев, 1956; Матлин и др., 1971; Шкардюк, 2013; Ложкина и др., 2020; Рыбинское..., 2020; Об утверждении..., 2025].

К северо-западному побережью водохранилища примыкает Дарвинский государственный заповедник – основное учреждение, осуществляющее природоохранную деятельность на акватории водоема [Калецкая и др., 1988]. Близлежащие объекты инфраструктуры в основном связаны с вышеперечисленными функциями водохранилища и включают объекты энергетики, гидроузлы, плотины, элементы транспортной инфраструктуры и т. д. [Иванова, 2016].

На тепловой баланс и химический состав водохранилища существенное влияние оказывают донные отложения. Процессы их формирования, накопления и трансформации достаточно сложны и до конца не изучены. Однако исследователями отмечаются выраженные тенденции сокращения илистых и торфяных участков дна с замещением их песчаными наносами. Поскольку торфянистые образования способны сорбировать ряд загрязняющих соединений, их разрушение приводит к высвобождению последних из донных отложений в поверхностные воды, изменяя их химический состав. Кроме этого, отмечаются процессы гидроморфного почвообразования, что привело к сокращению площади акватории водохранилища примерно на 70 км² [Буторин и др., 1982; Законнов и др., 2015].

Начиная с периода перестройки в прессе, а позже даже в научной литературе стали появляться проекты, предусматривающие снижение уровня Рыбинского вдхр. Обоснование данных проектов сводится к возможности восстановления рельефа затопленных территорий, возрождения земель, изъятых из с/х фонда, но основной акцент авторы подобных работ делают на воссоздание исторического облика г. Мологи на основе данных исторических документов с учетом особенностей современного градостроительства [Гржибовская, 2012; Филатова, 2024; Шубенков, 2024].

Анализ мирового опыта по осуществлению подобных проектов затрудняется их малочисленностью. Одним из наиболее показательных примеров принципиальной технической возможности реализовать комплекс мероприятий по демонтажу гидротехнических систем может служить разборка плотин на р. Элва (США). В период с 2011 по 2014 год там был произведен демонтаж двух плотин, в результате чего снизился уровень водоема. Однако необходимо отметить, что демонтажные работы проводились на объекте с иными целями, нежели в проектах, связанных с Рыбинским водохранилищем, а именно – с целями выемки загрязненных донных отложений, восстановления гидрологического режима и улучшения условий обитания водной биоты, включая ценные промысловые виды [Ritchie et al., 2018].

В 2021 г. был снижен уровень оз. Лаго-ди-Резия, искусственного водоема, созданного на севере Италии в 1950 г., заполнение котловины которого привело к последствиям, схожим с последствиями заполнения Рыбинского вдхр. для г. Калязина. Но ключевое отличие гидротехнических мероприятий, проведенных на оз. Лаго-ди-Резия, от проектов по Рыбинскому вдхр. заключается в том, что первые носили временный характер. Проведенные в Италии исследования внесли важный вклад как в историческую науку (изучение сохранности фрагментов архитектурных сооружений), так и в агрохимию. Специалистами была выявлена потенциальная возможность применения донных отложений в сельском хозяйстве, поскольку за период существования озера они обогатились питательными соединениями [Филатова, 2024].

Но в проектах, посвященных восстановлению земель на акватории Рыбинского водохранилища, основное внимание уделяется культурно-историческому аспекту, а оценка экологических последствий их реализации зачастую остается не проработанной должным образом. Между тем необходимо подчеркнуть, что в случае с Рыбинским вдхр. речь идет не о полном его осушении, а сохранении примерно 60 % акватории. При этом авторы проектов, как правило, указывают на необходимость рекультивации земель, осушение которых предполагают их разработки, предлагают различные планы их мелиорации. Но этими исследователями почти не изучается вопрос об изменении качества воды в водоеме как неизбежном следствии снижения уровня его заполнения [Шубенков, 2024].

В данной статье представлена новая авторская методика, позволяющая осуществить прогноз изменения концентрации ряда химических веществ, связанного с колебаниями уровня

заполнения Рыбинского вдхр., или, напротив, при наличии соответствующих данных оценить уровень воды по значению гидрохимических показателей.

Методика основана на закономерностях, выявленных при анализе данных о качестве воды Рыбинского вдхр. по 12 показателям за период 2009–2024 гг., и использована для прогноза возможных экологических последствий реализации одного из планов по восстановлению земель, затопленных при создании этого водоема. Также применение методики дало возможность для каждого показателя поставить в соответствие величинам рыбохозяйственных ПДК_{рх} предельные уровни водохранилища, ниже которых с высокой вероятностью следует ожидать негативных экологических последствий, сопоставимых с превышением установленных нормативов, и осуществить прогноз изменения качества воды при понижении НПУ до отметки 98 м БС.

Материалы и методы

Данные о качестве воды Рыбинского вдхр. за 2009–2017 гг. взяты из исследования [Лагутина и др., 2019], в котором также приведены значения удельного комбинаторного индекса загрязнения воды (УКИЗВ), рассчитанного за указанный период для трех точек, расположенных в северной части водоема. Поскольку величины ПДК_{рх} являются установленными нормами и, очевидно, остаются неизменными и не зависящими от уровня водоема, то при увеличении концентрации с химических соединений в воде будут возрастать и отношения $c/\text{ПДК}_{рх}$. В работе [Лагутина и др., 2019] проанализировано, как будут повышаться отношения $c/\text{ПДК}_{рх}$ для ряда неорганических анионов, катионов NH_4^+ , щелочноземельных металлов, тяжелых металлов и нефтепродуктов (НП) в воде Рыбинского вдхр. при его заполнении до 13 разных уровней в диапазоне 90–102 м БС с шагом 1 м. Эти сведения использованы нами для определения графическим способом коэффициентов регрессии в уравнениях, описывающих зависимости 12 гидрохимических показателей от уровня заполнения водоема.

Для дальнейших расчетов использованы данные о качестве воды Рыбинского вдхр., полученные в 2018–2024 гг. в Центральной лаборатории водопровода ГП Ярославской области «Северный водоканал», в том числе при участии одного из авторов статьи в 2023–2024 гг. Методики и приборная база, использованные для измерения рассматриваемых в статье показателей, приведены в табл. 1. Средние значения результатов 30 измерений для каж-

дого года представлены в табл. 2. Систематическая составляющая неопределенности рассчитана на основе данных об относительных погрешностях, указанных в соответствующих методиках измерения [ПНД Ф 14.1:2:4.128-98; ГОСТ 31867-2012; ГОСТ 31869-2012; ГОСТ Р 57162-2016]. За случайную составляющую неопределенности принято среднее квадратическое отклонение (СКО) для серии из 30 измерений. Приведенные значения расширенных неопределенностей рассчитаны в соответствии с [ГОСТ 34100.3-2017] для доверительного интервала 95 % (коэффициент охвата $k_p = 1,96$).

Результаты и обсуждение

Расчеты, произведенные нами на основании данных [Лагутина и др., 2019], показывают, что

зависимость отношения концентрации загрязняющих веществ в водоеме к ПДК_{рх} от уровня водохранилища близка к обратной экспоненциальной (рис.) и может быть выражена соотношением общего вида (1):

$$c = a \cdot e^{-b \cdot h}, \quad (1)$$

где c – кратность превышения ПДК_{рх}; h – уровень водоема, м БС; a – безразмерный коэффициент регрессии; b – коэффициент регрессии, м⁻¹.

Убывающий характер регрессии согласуется с данными авторов предшествующих работ, которые отмечают снижение концентрации многих веществ в Рыбинском вдхр. в многоводные годы [Кашутина и др., 2024] и, напротив, ухудшение качества воды в Аргазинском вдхр. при понижении уровня, обусловленное меньшей кратностью разбавления [Орлова и др., 2025].

Таблица 1. Приборно-методическая база, использованная при оценке качества воды Рыбинского водохранилища

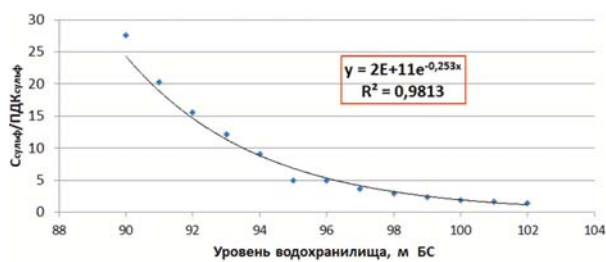
Table 1. Instrumental and methodological base used in assessing the water quality of the Rybinsk Reservoir

| Показатель Index | Методика Methodology | Средства измерения Measuring instruments |
|--|--|---|
| Анионы (SO ₄ ²⁻ , NO ₂ ⁻ , NO ₃ ⁻) Anions (SO ₄ ²⁻ , NO ₂ ⁻ , NO ₃ ⁻) | ГОСТ 31867-2012, п.4 GOST 31867-2012, p.4 | Ионный хроматограф «Dionex ics-5000» с кондуктометрическим детектором Dionex ICS-5000 Ion Chromatography System with conductometric detector |
| Катионы (Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , NH ₄ ⁺) Cations (Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , NH ₄ ⁺) | ГОСТ 31869-2012, п.5, п.6 GOST 31869-2012, p.5, p.6 | Система капиллярного электрофореза «Капель-205» Capel-205 Capillary Electrophoresis System |
| Тяжелые металлы (Fe _{общ} , Mn ²⁺ , Cu ²⁺ , Zn ²⁺) Heavy metals (Fe _{tot} , Mn ²⁺ , Cu ²⁺ , Zn ²⁺) | ГОСТ Р 57162-2016 GOST R 57162-2016 | Атомно-абсорбционный спектрометр с электро-термической ионизацией «Люмэкс МГА-1000» Lumex MGA-1000 Atomic Absorption Spectrometer with electrothermal ionization |
| Нефтепродукты (НП) Petroleum products | ПНД Ф 14.1:2:4.128-98 PND F 14.1:2:4.128-98 | Анализатор жидкости «Флюорат-02» Fluorat-02 Liquid Analyzer |

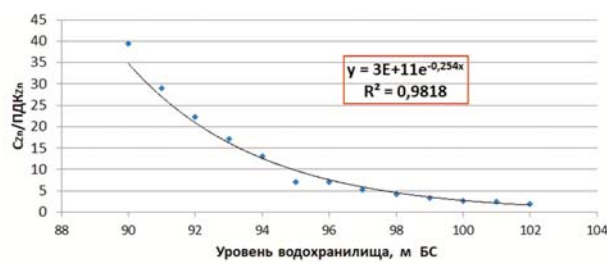
Таблица 2. Гидрохимические показатели Рыбинского водохранилища в 2018–2024 гг., мг/дм³, с указанием расширенной неопределенности [Отчет..., 2024]

Table 2. Hydrochemical indices of the Rybinsk Reservoir in 2018–2024, mg/dm³, with an indication of the expanded uncertainty [Report..., 2024]

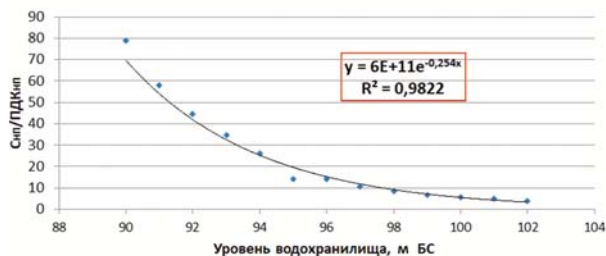
| Показатель Index | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 |
|--|-----------------|-----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| SO ₄ ²⁻ | 26,0 ± 7,4 | 23,0 ± 6,6 | 21,0 ± 6,1 | 22,0 ± 6,1 | 23,0 ± 6,1 | 23,0 ± 6,2 | 23,0 ± 6,6 |
| NH ₄ ⁺ | 0,75 ± 0,31 | 0,78 ± 0,32 | 0,69 ± 0,29 | 0,66 ± 0,28 | 0,58 ± 0,24 | 0,66 ± 0,27 | 0,48 ± 0,20 |
| NO ₂ ⁻ | 0,320 ± 0,065 | 0,270 ± 0,053 | 0,045 ± 0,009 | 0,057 ± 0,012 | 0,260 ± 0,054 | 0,203 ± 0,040 | 0,042 ± 0,008 |
| NO ₃ ⁻ | 3,16 ± 0,57 | 2,33 ± 0,45 | 2,68 ± 0,53 | 2,58 ± 0,52 | 3,22 ± 0,65 | 3,60 ± 0,72 | 2,70 ± 0,55 |
| Fe _{общ} Fe _{tot} | 0,63 ± 0,23 | 0,39 ± 0,14 | 0,61 ± 0,23 | 0,50 ± 0,18 | 0,40 ± 0,14 | 0,42 ± 0,15 | 0,42 ± 0,15 |
| Mn ²⁺ | 0,078 ± 0,031 | 0,061 ± 0,024 | 0,063 ± 0,024 | 0,064 ± 0,025 | 0,060 ± 0,023 | 0,067 ± 0,026 | 0,070 ± 0,026 |
| Cu ²⁺ | <0,002 | <0,002 | <0,002 | <0,002 | <0,002 | <0,002 | <0,002 |
| Zn ²⁺ | 0,048 ± 0,020 | 0,031 ± 0,013 | 0,028 ± 0,012 | 0,024 ± 0,010 | 0,023 ± 0,009 | 0,022 ± 0,009 | 0,015 ± 0,006 |
| НП Petroleum prod. | 0,0069 ± 0,0032 | 0,0054 ± 0,0026 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 |
| Ca ²⁺ | 33,0 ± 7,9 | 33,5 ± 7,7 | 27,2 ± 6,5 | 28,0 ± 6,7 | 29,0 ± 6,5 | 29,0 ± 6,6 | 34,0 ± 7,9 |
| Mg ²⁺ | 9,7 ± 2,3 | 10,9 ± 2,5 | 10,0 ± 2,2 | 9,6 ± 2,2 | 9,1 ± 2,1 | 9,3 ± 2,1 | 9,7 ± 2,2 |



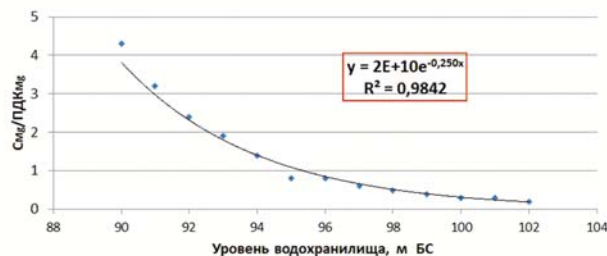
I



II



III



IV

Зависимость кратности превышения ПДК_{рх} в Рыбинском водохранилище от уровня водоема: I – SO₄²⁻; II – Zn²⁺; III – НП; IV – Mg²⁺ (по данным: [Лагутина и др., 2019])

The dependence of rate of excess of fishery maximum permissible concentration in the Rybinsk Reservoir on the water level of the reservoir: I – SO₄²⁻; II – Zn²⁺; III – petroleum products; IV – Mg²⁺ (according to data [Lagutina et al., 2019])

В табл. 3 приведены коэффициенты регрессии a и b в формуле (1), определенные графически для 12 гидрохимических показателей. Для каждого уравнения регрессии рассчитаны коэффициенты детерминации R^2 . С целью оценки надежности полученных уравнений вычислены критерии Фишера F , а для оценки значимости коэффициентов регрессии – критерии Стьюдента t_a и t_b при доверительном интервале 99 %. Расчеты производились с использованием онлайн-сервиса [Уравнение...] после предварительной линеаризации уравнения (1) путем логарифмирования обеих его частей. Результаты также представлены в табл. 3.

Уравнение парной регрессии, построенное по 13 точкам, при выбранном доверительном интервале 99 % считается статистически значимым, если критерий Фишера $F > 9,86$ (степени свободы $k_1 = 1, k_2 = 11$), а параметры модели (коэффициенты регрессии) значимы, если критерий Стьюдента $t > 3,11$ (число степеней свободы $k = 11$) [Левитес, 2024]. Как видно из табл. 3, для каждого из показателей выполняются данные условия, поэтому предлагаемые уравнения регрессии можно считать статистически надежными.

Уравнение (1) после определения коэффициентов регрессии для различных веществ может быть использовано с целью оценки динамики концентрации загрязнителей, связанной с понижением уровня Рыбинского вдхр.

Производная функции (1) позволяет оценить скорость роста концентрации химических веществ в водоеме при снижении уровня последнего:

$$c' = -a \cdot b \cdot e^{-b \cdot h}, \quad (2)$$

где c' – приращение концентрации загрязняющего вещества в водоеме при единичном понижении его уровня, м⁻¹; h – уровень водоема, м БС; a – безразмерный коэффициент регрессии; b – коэффициент регрессии, м⁻¹.

Из формулы (1) следует, что уровень Рыбинского вдхр. может быть оценен по значениям отношения концентрации загрязняющих веществ к ПДК_{рх} в водоеме по уравнению (3):

$$h = -\frac{1}{b} \cdot \ln \frac{c}{a}, \quad (3)$$

где c – кратность превышения ПДК_{рх}; h – уровень водоема, м БС; a – безразмерный коэффициент регрессии; b – коэффициент регрессии, м⁻¹.

На основании вышесказанного нами предлагается ввести термин *эквивалентный уровень по веществу*. Данная величина, рассчитанная по формуле (3) с использованием результатов гидрохимического анализа, позволит оценить, понижению/повышению до какой отметки водоема соответствует наблюдаемое значение того или иного показателя, т. е. с каким изменением уровня можно сравнить экологические последствия наблюдаемой гидрохимической картины.

Таблица 3. Параметры уравнений парной регрессии для гидрохимических показателей Рыбинского водохранилища

Table 3. Parameters of paired regression equations for hydrochemical indices of the Rybinsk Reservoir

| Показатель Index | Коэффициенты регрессии Regression coefficients | | Коэффициент детерминации Coefficient of determination R^2 | Критерий Фишера Fisher's criterion F | Критерий Стьюдента Student's t-test | |
|--|---|-------|---|--|--|-------|
| | a | b | | | t_a | t_b |
| SO ₄ ²⁻ | 2·10 ¹¹ | 0,253 | 0,9813 | 577,08 | 25,65 | 24,02 |
| PO ₄ ³⁻ | 1·10 ¹¹ | 0,253 | 0,9825 | 615,79 | 26,02 | 24,82 |
| NH ₄ ⁺ | 2·10 ¹¹ | 0,253 | 0,9820 | 599,27 | 26,08 | 24,48 |
| NO ₂ ⁻ | 7·10 ¹¹ | 0,254 | 0,9821 | 604,69 | 27,54 | 24,59 |
| NO ₃ ⁻ | 1·10 ⁸ | 0,207 | 0,8871 | 86,43 | 8,57 | 9,30 |
| Fe _{общ} Fe _{tot} | 6·10 ¹¹ | 0,254 | 0,9820 | 599,23 | 27,31 | 24,48 |
| Mn ²⁺ | 9·10 ¹¹ | 0,254 | 0,9821 | 605,09 | 27,73 | 24,60 |
| Cu ²⁺ | 3·10 ¹¹ | 0,254 | 0,9824 | 612,24 | 26,83 | 24,74 |
| Zn ²⁺ | 3·10 ¹¹ | 0,254 | 0,9818 | 593,91 | 26,38 | 24,37 |
| НП Petroleum prod. | 6·10 ¹¹ | 0,254 | 0,9822 | 605,44 | 27,33 | 24,61 |
| Ca ²⁺ | 3·10 ¹⁰ | 0,255 | 0,9732 | 399,69 | 19,65 | 19,99 |
| Mg ²⁺ | 2·10 ¹⁰ | 0,250 | 0,9842 | 684,12 | 25,96 | 26,16 |

Кроме того, если в зависимости (3) концентрацию загрязняющего вещества в водоеме принять равной ПДК_{рх} ($c = 1$), результат расчетов будет соответствовать предельному эквивалентному уровню. Он показывает пороговую величину, ниже которой экологический риск от уменьшения водной массы становится эквивалентен ущербу от превышения ПДК_{рх} по конкретному веществу.

В табл. 4 представлены предельные эквивалентные уровни Рыбинского водохр., рассчитанные

нами по формуле (3) с использованием ранее вычисленных коэффициентов регрессии, результаты расчета модуля скорости изменения каждого из 12 показателей для отметки НПУ, вычисленные по формуле (2), и кратность превышения ПДК_{рх}, спрогнозированные с применением зависимости (1) для наиболее распространенного из предполагаемых сценариев восстановления около 40 % затопленных земель, при котором планируется снижение уровня водохранилища до отметки 98 м БС [Филатова, 2024].

Таблица 4. Предельные эквивалентные уровни Рыбинского водохранилища для 12 гидрохимических показателей, скорости изменения этих показателей при изменении уровня и кратность их превышения при снижении НПУ до 98 м БС

Table 4. Maximum equivalent levels of the Rybinsk Reservoir for 12 hydrochemical indices, the rates of these indices change with a change in the level and the rate of their excess with a decrease in the normal backwater level to 98 m BS

| Показатель Index | ПДК _{рх} , мг/дм ³ [Об утверждении..., 2025] MAC, mg/dm ³ [On approval..., 2025] | Предельный эквивалентный уровень, м БС Maximum equivalent level, m BS | Модуль скорости изменения показателя для НПУ, м ⁻¹ The rate of change of the index module for the normal backwater level, m ⁻¹ | Кратность превышения ПДК _{рх} при снижении НПУ до 98 м БС Rate of excess of MAC with a decrease in the NBL to 98 m BS |
|--|--|--|---|---|
| SO ₄ ²⁻ | 100 | 102,9 | 0,314 | 3,41 |
| PO ₄ ³⁻ | 0,15 | 100,1 | 0,157 | 1,71 |
| NH ₄ ⁺ | 0,5 | 102,9 | 0,314 | 3,41 |
| NO ₂ ⁻ | 0,08 | 107,4 | 0,996 | 10,83 |
| NO ₃ ⁻ | 40 | 89,0 | 0,014 | 0,15 |
| Fe _{общ} Fe _{tot} | 0,1 | 106,8 | 0,854 | 9,28 |
| Mn ²⁺ | 0,01 | 108,4 | 1,280 | 13,92 |
| Cu ²⁺ | 0,001 | 104,0 | 0,427 | 4,64 |
| Zn ²⁺ | 0,01 | 104,0 | 0,427 | 4,64 |
| НП Petroleum prod. | 0,05 | 106,8 | 0,854 | 9,28 |
| Ca ²⁺ | 180 | 94,6 | 0,039 | 0,42 |
| Mg ²⁺ | 40 | 94,9 | 0,042 | 0,46 |

Как видно из табл. 4, минимальный предельный эквивалентный уровень соответствует ионам NO_3^- , хотя максимальные значения ПДК_{рх} из всех проанализированных показателей установлены для Ca^{2+} . Это связано с тем, что важную роль играет скорость изменения гидрохимических показателей при понижении уровня. Для Ca^{2+} она почти втрое выше скорости изменения концентрации ионов NO_3^- .

Наибольшие значения имеют предельные эквивалентные уровни для тяжелых металлов: Mn^{2+} , Cu^{2+} и Zn^{2+} . Это объясняется как наименьшими значениями ПДК_{рх} для этих показателей по сравнению с остальными, исследованными в данной работе (минимальное из 12 значений установлено для Cu^{2+}), так и, в случае Mn^{2+} , высокой скоростью изменения концентрации при снижении уровня водоема.

Максимальная скорость роста концентрации при прохождении отметки НПУ Рыбинского водохранилища отмечается для Mn^{2+} – единственного из 12 показателей, изменение которого на отметке НПУ превышает величину ПДК_{рх} (в расчете на изменение уровня на 1 м). Вероятно, это связано с высокой удерживающей способностью водоема по данному элементу, которая была отмечена для Mn^{2+} и $\text{Fe}_{\text{общ}}$ исследователями Можайского вдхр. [Даценко, Пуклаков, 2024]. Наши расчеты показывают, что скорость приращения показателя $\text{Fe}_{\text{общ}}$ также принимает достаточно высокое значение (0,854 ПДК_{рх}) при прохождении точки НПУ, что согласуется с утверждением авторов работ [Веницианов, Кирпичникова, 2020; Даценко, Пуклаков, 2024]

о сходстве механизмов трансформации указанных элементов в водохранилищах.

С целью дополнительной проверки выявленных зависимостей по формуле (3) произведены оценочные расчеты эквивалентных уровней Рыбинского вдхр. в 2018–2024 гг. по 11 показателям (расчет по иону PO_4^{3-} не производился из-за отсутствия экспериментальных данных), которые затем сравнивались с реальными значениями уровня за указанный период, с последующим расчетом относительной погрешности по формуле (4):

$$\delta = \frac{|h-h_0|}{h} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где δ – относительная погрешность при расчете эквивалентного уровня, %; h – реальный уровень вдхр., м БС; h_0 – эквивалентный уровень вдхр., м БС.

Результаты расчетов и усредненная оценка погрешности за 2018–2024 гг. приведены в табл. 5. Курсивом в таблице выделены уровни ниже эквивалентного, что соответствует превышению значения ПДК_{рх} по данному показателю.

Расчеты, выполненные для дополнительной проверки выявленных зависимостей, по 9 из 11 показателей дают результаты оценки уровня водоема с относительной погрешностью, не превышающей 5 %. Максимальная погрешность наблюдается при расчете по НП. Скорее всего, это связано с большим значением относительной расширенной неопределенности измерения для низких концентраций (50 %, согласно использованной методике [ПНД Ф 14.1:2:4.128-98]). Кроме того, одной

Таблица 5. Сравнение оценочных эквивалентных уровней Рыбинского водохранилища с реальными, м БС
Table 5. Comparison of the estimated equivalent levels of the Rybinsk Reservoir with the actual ones, m BS

| Показатель Index | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 | δ , % |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------------|
| SO_4^{2-} | 108,2 | 108,7 | 109,0 | 108,8 | 108,7 | 108,7 | 108,7 | 7,954 |
| NH_4^+ | 101,2 | 101,1 | 101,6 | 101,8 | 102,3 | 101,8 | 103,0 | 1,148 |
| NO_2^- | 101,9 | 102,6 | 109,6 | 108,7 | 102,7 | 103,8 | 109,9 | 4,919 |
| NO_3^- | 101,3 | 102,7 | 102,0 | 102,2 | 101,2 | 100,6 | 102,0 | 1,052 |
| $\text{Fe}_{\text{общ}}$ Fe_{tot} | 99,5 | 101,4 | 99,7 | 100,4 | 101,3 | 101,1 | 101,1 | 0,868 |
| Mn^{2+} | 100,3 | 101,2 | 101,1 | 101,1 | 101,3 | 100,9 | 100,7 | 0,453 |
| Cu^{2+} | <101,3 | <101,3 | <101,3 | <101,3 | <101,3 | <101,3 | <101,3 | 0,648 |
| Zn^{2+} | 97,9 | 99,6 | 100,0 | 100,6 | 100,8 | 100,9 | 102,4 | 1,157 |
| НП Petroleum prod. | 114,6 | 115,5 | <115,8 | <115,8 | <115,8 | <115,8 | <115,8 | 14,853 |
| Ca^{2+} | 101,3 | 101,2 | 102,0 | 101,9 | 101,8 | 101,8 | 101,1 | 0,910 |
| Mg^{2+} | 100,5 | 100,1 | 100,4 | 100,6 | 100,8 | 100,7 | 100,5 | 0,350 |
| Реальный уровень, м БС Actual level, m BS | 100,75 | 100,64 | 101,26 | 100,69 | 100,57 | 100,62 | 100,11 | |

Примечание. δ – относительная погрешность, рассчитанная по формуле (4).

Note. δ – relative error calculated using formula (4).

из вероятных причин могут быть особенности физико-химических свойств нефтепродуктов. По своей природе они принципиально отличаются от других веществ, исследованных в этой работе. Показатель НП включает в себя обширную категорию органических веществ, которые крайне неравномерно распределяются в толще воды, а в силу своих физико-химических свойств (низкая плотность, липофильность) концентрируются преимущественно на поверхности водоема. Это может приводить к значительным колебаниям данного показателя в течение года, что также отмечали авторы статьи [Кашутина и др., 2024].

На протяжении периода исследования (2018–2024 гг.) абсолютный уровень Рыбинского вдхр. оставался на отметке ниже НПУ. Эквивалентные уровни водоема в эти годы были ниже рассчитанных предельных значений по ряду приоритетных гидрохимических показателей: НП, анионы NO_2^- , катионы тяжелых металлов, NH_4^+ . Превышения по анионам SO_4^{2-} и NO_3^- , а также по катионам Ca^{2+} и Mg^{2+} на протяжении всех семи лет не наблюдалось.

Постоянное превышение по содержанию Mn^{2+} и $\text{Fe}_{\text{общ}}$ в течение всего периода исследования (табл. 2, 5) хорошо согласуется с данными, представленными в публикациях последних лет, связанных с изучением гидрохимического состава воды и донных отложений Рыбинского и других водохранилищ России и Казахстана [Григорьева, Кузовлев, 2021; Mamytova et al., 2022; Кравцова и др., 2023].

Но аналогичные результаты, описанные в предыдущих работах, интерпретируются их авторами по-разному. Некоторые исследователи объясняют высокие концентрации Mn^{2+} и $\text{Fe}_{\text{общ}}$ в гидрологической системе Рыбинского водохранилища и р. Мологи преимущественно естественными процессами, хотя указывают на некоторый вклад промышленных объектов в формирование химического состава отдельных притоков (напр., устье р. Кошта) [Фоменко, 2020; Кашутина и др., 2024]. В статье [Александрова и др., 2020] главным источником этих элементов в Нижнекамском вдхр. названы донные отложения и почвы бассейна водоема, где металлы образуют комплексы с органическими соединениями. К подобным выводам касательно Нижнекамского вдхр. приходят авторы исследования [Фашевская и др., 2023], связывая поступление Mn^{2+} и других металлов с их вымыванием из почвы и грунта и лишь незначительную долю отводя вкладу сточных вод (0,1–0,2 %). К основным причинам превышения Mn^{2+} в Цимлянском вдхр. отнесены особенности фракционного состава грунтов [Степаньян и др.,

2024], а наиболее интенсивное поступление Mn^{2+} , $\text{Fe}_{\text{общ}}$, Cu^{2+} и Zn^{2+} в Аргазинское вдхр. связывают с ливневыми осадками [Орлова и др., 2025]. В статье [Каменев и др., 2025] отмечаются заметные изменения концентрации Mn^{2+} и $\text{Fe}_{\text{общ}}$ на протяжении года в Воронежском вдхр., с максимумами в весенне-летний период. Авторы объясняют это тем, что создание гидротехнических сооружений привело к изменению количеств и скоростей перемещения этих элементов. С другой стороны, основываясь на фиксируемых независимо от года, сезона и створа высоких концентрациях Mn^{2+} , $\text{Fe}_{\text{общ}}$ и других металлов в Южноуральском вдхр., авторы статьи [Нохрин и др., 2021] приходят к выводу о смешанном природно-антропогенном характере их поступления в водоем.

Таким образом, чтобы достоверно установить причины наблюдаемого превышения относительно установленных на федеральном уровне ПДК_{рх}, требуется более детальное изучение геохимических процессов, протекающих в природно-антропогенном комплексе, включающем не только воду, но и донные отложения водохранилища, местные геологические структуры, объекты хозяйственной деятельности и т. д.

Как показано в работах [Липатникова и др., 2020; Толкачев и др., 2023], ряд более токсичных тяжелых металлов, включая Cd, Pb и Cr, способны образовывать прочные комплексы с гидроксидами Fe и Mn на границе между донными отложениями и нижними слоями воды. Концентрация и химическая форма этих элементов влияет на процессы миграции других загрязнителей, в некоторых случаях способствуя улучшению качества поверхностных вод. Поэтому не следует исключать эти вещества из числа показателей, определяемых при оценке качества природных вод, но говорить о наличии загрязнения воды Mn^{2+} и $\text{Fe}_{\text{общ}}$ можно только с учетом особенностей региональной геохимии.

Поскольку загрязнение Рыбинского вдхр. обусловлено рядом природных и антропогенных факторов, которые находятся в сложной взаимосвязи, они должны учитываться в случае положительного решения о реализации проектов по восстановлению затопленных земель. Снижение уровня даже на 4 м относительно НПУ приведет к заметному ухудшению экологической ситуации. Если в 2024 г. наблюдалось превышение ПДК_{рх} только по 4 из 12 показателей: $\text{Fe}_{\text{общ}}$, Mn^{2+} , Cu^{2+} и Zn^{2+} (табл. 5), то при опускании отметки НПУ до 98 м следует ожидать превышения уже по 9 из 12 показателей (табл. 3). В норме останется содержание NO_3^- , Ca^{2+} и Mg^{2+} .

Достоверную оценку изменений качества воды при стабилизации уровня водохранилища на одной отметке на основе экспериментальных данных осуществить довольно затруднительно, поскольку водоем проточный и его уровень зависит от множества факторов, включая количество осадков в течение определенного периода времени, испытывает сезонные колебания и т. д. (за последний год уровень Рыбинского вдхр. менялся в пределах 99,67–101,78 м) [Уровни...]. Можно предположить, что природные процессы, благодаря которым формируется ионный состав воды, придут в состояние динамического равновесия через некоторое время после стабилизации уровня водоема. Например, повышение концентрации химических веществ в водоеме, обусловленное понижением НПУ, приведет к сокращению разницы между содержанием этих соединений в поверхностных водах и в донных отложениях, из-за чего скорость ионного обмена между этими средами уменьшится до некоего равновесного значения, отклонения от которого будут происходить в небольшом диапазоне. Интенсивность антропогенных процессов, влияющих на качество воды, вероятнее всего, не изменится и скорость поступления загрязняющих веществ от антропогенных источников останется прежней. Но за счет меньшей кратности разбавления будут постоянно регистрироваться более высокие значения гидрохимических показателей, чем прежде. Поэтому при долгосрочной стабилизации уровня Рыбинского вдхр., вероятно, следует ожидать ухудшения показателей качества воды до определенных постоянных величин, несущественно изменяющихся в узких пределах.

Ликвидация последствий снижения НПУ потребует немалых финансовых затрат, связанных как с необходимостью устранения загрязнения воды и грунта осушенных территорий, так и с иными последствиями осушения, включая разрушение биогеоценологических связей, установившихся в водоеме и на прибрежных землях за десятки лет существования водоема. Помимо этого, следует ожидать значительного экономического ущерба из-за нарушения функционирования сложной и многоплановой инфраструктуры, деятельность которой неразрывно связана с Рыбинским вдхр. (нарушение водоснабжения, навигации, энергетической функции и др.) [Шкардюк, 2013]. Поэтому реализация подобных проектов нам представляется преждевременной и нецелесообразной как с экологической, так и с экономической точки зрения.

Заключение

Снижение уровня Рыбинского вдхр. приведет к росту концентрации в нем загрязняющих веществ по закону, близкому к обратной экспоненциальной зависимости. При этом важным показателем представляется не только абсолютное изменение концентрации, но и скорость этого изменения, которая может быть оценена через предлагаемую нами величину эквивалентного уровня водоема по определенному веществу. Данный показатель также дает возможность оценить предельные уровни, ниже которых экологические последствия будут эквивалентны превышению ПДК_{рх} по данному показателю. Прогнозирование качества воды с применением метода эквивалентного уровня позволяет предположить, что в случае понижения отметки водоема на 4 м (до 98 м БС), как предлагается в ряде проектов по восстановлению затопленных земель, следует ожидать увеличения концентраций анионов SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , NO_3^- , катиона NH_4^+ и НП в Рыбинском вдхр. до значений, превышающих нормативы ПДК_{рх} в 1,7–10,8 раза, тогда как в 2024 г. зафиксировано превышение только по содержанию ряда металлов.

При этом наблюдаемые высокие концентрации Mn^{2+} и $Fe_{общ}$ могут быть обусловлены особенностями региональной геохимии, которые необходимо учитывать при оценке качества воды.

Реализация проектов по восстановлению земель, утраченных при создании Рыбинского вдхр., с высокой вероятностью приведет к серьезным экологическим проблемам, а также к нарушению инфраструктуры, связанной с водохранилищем, и как следствие – к значительному урону в нескольких секторах отечественной экономики. Таким образом, подобные проекты представляются нерациональными, сопряженными с неоправданно большими финансовыми затратами и с ущербом для окружающей среды.

Литература

- Александрова А. Б., Иванов Д. В., Маланин В. В., Шурмина Н. В., Галиахметова Л. К., Богданова О. А. Показатели накопления и миграции тяжелых металлов в бассейне равнинного водохранилища // Геология, география и глобальная энергия. 2020. № 4(79). С. 126–133.
- Баранова А. С. Молога. Создание Рыбинского водохранилища // Переломные моменты истории: люди, события, исследования: Мат-лы междунар. науч. конф. (Санкт-Петербург, 01 апр. 2022 г.). СПб., 2022. С. 138–142.

Буторин Н. В., Курдина Т. Н., Бакастов С. С. Температура воды и грунтов Рыбинского водохранилища / Ред. Б. Б. Богословский. Л.: Наука, 1982. 221 с.

Васильев Ю. С., Масликов В. И., Шилин М. Б. Режим регулирования стока Рыбинского водохранилища как основной фактор формирования экологической ситуации в осушенной зоне // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2016. № 45. С. 28–42.

Веницианов Е. В., Кирпичникова Н. В. Оценка состояния качества воды системы водохранилищ – источников питьевого водоснабжения Москвы – по многолетней динамике гидрохимических параметров // Метеорология и гидрология. 2020. № 8. С. 67–76.

Герасимов Ю. В. Популяционная динамика рыб Рыбинского водохранилища за период его существования: роль естественных и антропогенных факторов // Труды ВНИРО. 2015. Т. 156. С. 67–90.

ГОСТ 31869-2012. Вода. Методы определения содержания катионов (аммония, бария, калия, кальция, лития, магния, натрия, стронция) с использованием капиллярного электрофореза.

ГОСТ Р 57162-2016. Вода. Определение содержания элементов методом атомно-абсорбционной спектроскопии с электротермической атомизацией.

ГОСТ 31867-2012. Вода питьевая. Определение содержания анионов методом хроматографии и капиллярного электрофореза.

ГОСТ 34100.3-2017 / ISO/IEC Guide 98-3:2008. Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения.

Гржибовская О. В. Бумажная реинкарнация Монолога // Рыбинские известия [Электронный ресурс]. 2012. URL: <https://gazeta-rybinsk.ru/2012/04/18/4346> (дата обращения: 17.01.2026).

Григорьева И. Л., Кузовлев В. В. Особенности зимнего гидрохимического режима Иваньковского водохранилища в многолетнем аспекте // Вестник Тверского государственного университета. Сер. География и геоэкология. 2021. № 1(33). С. 14–24. doi: 10.26456/2226-7719-2021-1-14-24

Даченко Ю. С., Пуклаков В. В. Многолетние изменения балансов химических веществ в Можайском водохранилище // Гидрометеорология и экология. 2024. № 75. С. 310–317. doi: 10.33933/2713-3001-2023-75-310-317

Законнов В. В., Литвинов А. С., Законнова А. В. Пространственно-временная трансформация грунтового комплекса водохранилищ Волги. Сообщение 2. Результаты мониторинга донных отложений и последствия понижения уровня Рыбинского водохранилища // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2015. № 4. С. 21–35.

Иванова Н. Во имя Победы // Вестник РусГидро [Электронный ресурс]. 2016. № 7. URL: <https://vestnik-rushydro.ru/articles/7-noyabr-2016/data/vo-imya-pobedy/> (дата обращения: 15.01.2026).

Калецкая М. Л., Немцова С. Ф., Скокова Н. Н. Дарвинский заповедник // Заповедники СССР. Заповедники европейской части РСФСР. I. М.: Мысль, 1988. С. 152–184.

Каменев В. И., Степкин Ю. И., Мелихова Е. П. Особенности формирования качества питьевой воды в г. Воронеже // Российский вестник гигиены. 2025. № 3. С. 23–28. doi: 10.24075/rbh.2025.137

Каримов А. Строительство Рыбинского водохранилища – великий подвиг советского народа // КПРФ. Ярославское областное отделение [Электронный ресурс]. 03.02.2018. URL: <https://yarkprf.ru/строительство-рыбинского-водохранилища/> (дата обращения: 18.01.2026).

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

Кравцова А. В., Ходоровская Н. И., Дерябина Л. В. Комплексная характеристика состояния Шершневого водохранилища (Россия, г. Челябинск) // Научное обозрение. Биологические науки. 2023. № 1. С. 85–90. doi: 10.17513/srbs.1319

Кузин Б. С. Рыбинское водохранилище и его жизнь / Ред. Б. К. Штегман. Л.: Наука, 1972. 364 с.

Лагутина Н. В., Новиков А. В., Сумарукова О. В., Науменко Н. О. Оценка качества вод Рыбинского водохранилища вследствие снижения уровня вод // Природообустройство. 2019. № 2. С. 122–125. doi: 10.34677/1997-6011/2019-2-122-126

Левитес В. В. Теория вероятностей и математическая статистика. Часть 2: Математическая статистика. Мурманск: МАУ, 2024. 108 с.

Липатникова О. А., Лубкова Т. Н., Коробова Н. А. Формы нахождения микроэлементов в воде и донных отложениях Пироговского водохранилища // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 2020. № 6. С. 59–68. doi: 10.33623/0579-9406-2020-6-59-68

Ложкина Р. А., Томилина И. И., Гапеева М. В. Долговременные изменения качества воды Рыбинского водохранилища по данным биотестирования // Трансформация экосистем. 2020. Т. 3, № 3(9). С. 125–138. doi: 10.23859/estr-200323

Мальшев Н. А., Мальцев М. М. 25 лет Угличской и Рыбинской ГЭС: Из опыта строительства и эксплуатации. М.; Л.: Энергия, 1967. 311 с.

Матлин Г. М., Гохштейн А. Б., Кунахович Г. Д. Единая глубоководная система внутренних водных путей Европейской части СССР. М.: Транспорт, 1971. 129 с.

Николаев В. А. Опыт сплава леса по Рыбинскому водохранилищу. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1956. 51 с.

Нохрин Д. Ю., Дерхо М. А., Мухамедьярова Л. Г., Живетина А. В. Структура изменчивости гидрохимического состава воды в водохранилище озерного типа // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. Биология. Химия. 2021. Т. 7, № 2. С. 117–133. doi: 10.37279/2413-1725-2021-7-2-117-133

Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ в водах водных

объектов рыбохозяйственного значения. Приказ от 26 мая 2025 года № 296 / Министерство сельского хозяйства РФ; Федеральное агентство по рыболовству. Зарегистрирован в Минюсте России 2 июня 2025 г. N 82497.

Орлова А. Ю., Богомолов А. В., Лучников А. И., Ляхин Ю. С., Антонова М. В. Особенности формирования качества воды Аргазинского водохранилища в периоды низких уровней // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 3. С. 21–34. doi: 10.35567/19994508-2025-3-21-34

Отчет ГП ЯО «Северный водоканал» / Центральная лаборатория водопровода. Рыбинск, 2024. 58 с.

ПНД Ф 14.1:2:4.128-98. Количественный химический анализ вод. Методика измерений массовой концентрации нефтепродуктов в пробах природных, питьевых, сточных вод флуориметрическим методом на анализаторе жидкости «Флюорат-02».

Рыбинское водохранилище // Федеральное агентство водных ресурсов Российской Федерации [Электронный ресурс]. URL: <https://voda.gov.ru/reservoirs/7273/> (дата обращения: 10.01.2026).

Рыбинское водохранилище в годы Великой Отечественной войны // Пресс-служба Минприроды России [Электронный ресурс]. 2020. URL: https://www.mnr.gov.ru/press/75-let-pobedy/rybinskoe_vodokhranilishche_v_gody_velikoy_otechestvennoy_voyny/ (дата обращения: 21.01.2026).

Степаньян О. В., Рыбалкина Е. И., Хорошев О. А., Казеев К. Ш., Нестерук Г. В., Клещенко А. В., Польшин В. В., Герасюк В. С. Использование донных отложений Цимлянского водохранилища в качестве органического удобрения // Наука Юга России. 2024. Т. 20, № 4. С. 61–69. doi: 10.7868/S25000640240409

Толкачев Г. Ю., Корженевский Б. И., Коломийцев Н. В. Распределение тяжелых металлов по формам существования и их содержание в донных отложениях плесов Иваньковского водохранилища // Природообустройство. 2023. № 1. С. 89–94. doi: 10.26897/1997-6011-2023-1-89-94

Уравнение регрессии // Новый семестр [Электронный ресурс]. URL: <https://math.semestr.ru/corel/corel.php> (дата обращения: 21.02.2026).

Уровни водохранилищ ГЭС // ПАО «РусГидро» [Электронный ресурс]. URL: <https://rushydro.ru/informer/> (дата обращения: 20.02.2026).

Фашчевская Т. Б., Мотовилов Ю. Г., Кортунова К. В. Моделирование генетических составляющих водного и химического стока тяжелых металлов в бассейне Нижнекамского водохранилища // Водные ресурсы. 2023. Т. 50, № 4. С. 492–508. doi: 10.31857/S0321059623040077

Филатова Е. А. Затопленные территории: оценка возможности восстановления утраченного наследия // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2024. № 2(61). С. 28–33. doi: 10.25628/UNIIP.2024.61.2.004

Фоменко А. И. Зональные особенности химического состава вод малых рек бассейна Рыбинского водохранилища // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2020. № 1. С. 19–30. doi: 10.35567/1999-4508-2020-1-2

Широкова В. А., Снытко В. А., Низовцев В. А., Фролова Н. Л., Дмитрук Н. Г., Чеснов В. М., Озерова Н. А., Широков Р. С. Тихвинская водная система: ретроспектива и современность. Гидролого-экологическая обстановка и ландшафтные изменения в районе водного пути. М.: Акколитъ, 2013. 376 с.

Шкардюк И. Э. О понижении уровня Рыбинского водохранилища // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. 2013. № 3-2(122). С. 91–94.

Шубенков М. В. Восстановление затопленных природных и культурно-исторических территорий Верхней Волги // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2024. № 1. С. 25–36. doi: 10.21869/2311-1518-2024-45-1-25-36

Mamytova N. S., Akbayeva L. Kh., Kobetayeva N. K., Tulegenov Y. A., Makazhanov Y. J. Study of the self-cleaning ability of a reservoir and watercourses by hydrochemical indicators of Akmola region for 2018 // Вестник Евразийского национального университета имени Л. Н. Гумилева. Сер. Биологические науки. 2022. № 2(139). С. 86–96. doi: 10.32523/2616-7034-2022-139-2-86-96

Ritchie A. C., Warrick J. A., East A. E., Magirl C. S., Stevens A. W., Bountry J. A., Randle T. J., Curran C. A., Hilldale R. C., Duda J. J., Gelfenbaum G. R., Miller I. M., Pess G. R., Foley M. M., McCoy R., Ogston A. S. Morphodynamic evolution following sediment release from the world's largest dam removal // Scientific reports. 2018. No. 8. Art. 13279. doi: 10.1038/s41598-018-30817-8

References

Aleksandrova A. B., Ivanov D. V., Malanin V. V., Shurmina N. V., Galiakhmetova L. K., Bogdanova O. A. Indicators of accumulation and migration of heavy metals in the plain reservoir basin. *Geologiya, geografiya i global'naya energiya = Geology, Geography and Global Energy*. 2020;4(79):126–133. (In Russ.)

Baranova A. S. Mologa. Creation of the Rybinsk Reservoir. *Perelomnye momenty istorii: lyudi, sobytiya, issledovaniya: Materialy Mezhd. nauch. konf. (Sankt-Peterburg, 01 apr. 2022 g.) = Turning points in history: people, events, and research. Proceed. of the int. sci. conf. (St. Petersburg, Apr. 01, 2022)*. St. Petersburg; 2022. P. 138–142. (In Russ.)

Butorin N. V., Kurdina T. N., Bakastov S. S. Water and soil temperature of the Rybinsk Reservoir. *Leninograd: Nauka*; 1982. 221 p. (In Russ.)

Datsenko Yu. S., Puklakov V. V. Long-term changes of chemical balances in the Mozhaysk Reservoir. *Gidrometeorologiya i ekologiya = Hydrometeorology and Ecology*. 2024;75:310–317. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2023-75-310-317

Fashchevskaya T. B., Motovilov Yu. G., Kortunova K. V. Modeling genetic components of water and chemical runoff of heavy metals in the Nizhnekamsk Reservoir basin. *Vodnye resursy = Water Resources*. 2023;50(4): 492–508. (In Russ.). doi: 10.31857/S0321059623040077

Filatova E. A. Flooded territories: assessing the possibility of restoring lost heritage. *Akademicheskij vestnik UralNIIProekt RAASN*. 2024;2(61):28–33. (In Russ.). doi: 10.25628/UNIIP.2024.61.2.004

Fomenko A. I. Zonal features of the chemical composition of small rivers in the Rybinsk Reservoir basin. *Vodnoe khozyaistvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie = Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2020;1:19–30. (In Russ.). doi: 10.35567/1999-4508-2020-1-2

Gerasimov Yu. V. Population dynamics of the Rybinsk Reservoir fishes throughout the whole period of its existence: role of natural and anthropogenic factors. *Trudy VNIRO = Proceedings of VNIRO*. 2015;156:67–90. (In Russ.)

GOST 31867-2012. Drinking water. Determination of anions content by chromatography and capillary electrophoresis method. (In Russ.)

GOST R 57162-2016. Water. Determination of elements content by graphite furnace atomic absorption spectrometry. (In Russ.)

GOST 31869-2012. Water. Methods for the determination of cations (ammonium, barium, potassium, calcium, lithium, magnesium, sodium, strontium) content using capillary electrophoresis. (In Russ.)

GOST 34100.3-2017 / ISO/IEC Guide 98-3:2008. Uncertainty of measurement. Part 3. Guide to the expression of uncertainty in measurement. (In Russ.)

Grigor'eva I. L., Kuzovlev V. V. Features of the winter hydrochemical regime of the Ivankovo Reservoir in the long-term aspect. *Vestnik Tverskogo gos. universiteta. Ser. Geografiya i geoekologiya = Herald of Tver State University. Series: Geography and Geoecology*. 2021;1(33):14–24. (In Russ.). doi: 10.26456/2226-7719-2021-1-14-24

Grzhibovskaya O. V. Mologa's paper reincarnation. *Rybinskie izvestiya = Rybinsk News*. 2012. (In Russ.) URL: <https://gazeta-rybinsk.ru/2012/04/18/4346> (accessed: 17.01.2026).

Ivanova N. In the name of Victory. *Vestnik RusGidro = RusHydro Bulletin*. 2016(7). (In Russ.). URL: <https://vestnik-rushydro.ru/articles/7-noyabr-2016/data/vo-imya-pobedy/> (accessed: 15.01.2026).

Kaletskaya M. L., Nemtsova S. F., Skokova N. N. Darwin Nature Reserve. *Zapovedniki SSSR. Zapovedniki evropeiskoi chasti RSFSR = Nature reserves of the USSR. Nature reserves of the European part of the RSFSR*. I. Moscow: Mysl'; 1988. P. 152–184. (In Russ.)

Kamenev V. I., Stepin Yu. I., Melikhova E. P. Factors influencing the quality of drinking water in Voronezh. *Rossiiskii vestnik gigieny = Russian Bulletin of Hygiene*. 2025;3:23–28. (In Russ.). doi: 10.24075/rbh.2025.137

Karimov A. The construction of the Rybinsk Reservoir is a great feat of the Soviet people. *KPRF. Yaroslavskoe oblastnoe otделение = Communist Party of the Russian Federation. Yaroslavl regional branch*. 03.02.2018. (In Russ.) URL: <https://yarkprf.ru/строительство-рыбинского-водохранилища/> (accessed: 18.01.2026).

Kashutina E. A., Yasinskii S. V., Rasulova A. M., Fasakhov M. A., Shaidulina A. A., Grishantseva E. S. Mass concentration of pollutants in the water of the Upper Volga reservoirs during years of varying water flow. *Vodnoe khozyaistvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie = Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2024;6:38–60. (In Russ.). doi: 10.35567/19994508-2024-6-38-60

Kravtsova A. V., Khodorovskaya N. I., Deryabina L. V. Complex characteristics of the state of the Shershnevsky Reservoir (Russia, Chelyabinsk). *Nauchnoe obozrenie. Biologicheskie nauki = Scientific Review. Biological Sciences*. 2023;1:85–90. (In Russ.). doi: 10.17513/srbs.1319

Kuzin B. S. The Rybinsk Reservoir and its life. Leningrad: Nauka; 1972. 364 p. (In Russ.)

Lagutina N. V., Novikov A. V., Sumarukova O. V., Naumenko N. O. Assessment of the water quality of the Rybinsk Reservoir as a result of the water level lowering. *Prirodoobustroistvo = Environmental Engineering*. 2019;2:122–125. (In Russ.). doi: 10.34677/1997-6011/2019-2-122-126

Levels of hydroelectric power station reservoir. PAO «RusGidro» = PJSC RusHydro. (In Russ.). URL: <https://rushydro.ru/informer/> (accessed: 20.02.2026).

Levites V. V. Probability theory and mathematical statistics. Part 2: Mathematical Statistics. Murmansk: MAU; 2024. 108 p. (In Russ.)

Lipatnikova O. A., Lubkova T. N., Korobova N. A. Trace element speciation in water and bottom sediments of the Pirogov Reservoir. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 4. Geologiya = Moscow University Bulletin. Ser. 4. Geology*. 2020;6:59–68. (In Russ.). doi: 10.33623/0579-9406-2020-6-59-68

Lozhkina R. A., Tomilina I. I., Gapeeva M. V. Long-term dynamics of the water quality in the Rybinsk Reservoir according to biotesting. *Transformatsiya ekosistem = Ecosystem Transformation*. 2020;3(3-9): 125–138. (In Russ.). doi: 10.23859/estr-200323

Malyshev N. A., Mal'tsev M. M. 25 years of Uglich and Rybinsk hydroelectric power plants: from the experience of construction and operation. Moscow-Leningrad: Ehnergiya; 1967. 311 p. (In Russ.)

Mamytova N. S., Akbayeva L. Kh., Kobetayeva N. K., Tulegenov Y. A., Makazhanov Y. J. Study of the self-cleaning ability of a reservoir and watercourses by hydrochemical indicators of Akmla region for 2018. *Vestnik Evraziiskogo natsional'nogo universiteta imeni L. N. Gumileva. Ser. Biologicheskie nauki = Bulletin of the L. N. Gumilyov Eurasian National University. Series: Biological Sciences*. 2022;2(139):86–96. doi: 10.32523/2616-7034-2022-139-2-86-96

Matlin G. M., Gokhshtein A. B., Kunakhovich G. D. Unified deep-water system of inland waterways of the European part of the USSR. Moscow: Transport; 1971. 129 p. (In Russ.)

Nokhrin D. Yu., Derkho M. A., Mukhamed'yarova L. G., Zhiwetina A. V. The structure of the variability of the hydrochemical composition of water in a lake-type reservoir. *Uchenye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V. I. Vernadskogo. Biologiya. Khimiya = Scientific Notes of V. I. Vernadsky Crimean Federal University. Biology. Chemistry*. 2021;7(2):117–133. (In Russ.). doi: 10.37279/2413-1725-2021-7-2-117-133

Nikolaev V. A. Timber rafting experience on the Rybinsk Reservoir. Moscow; Leningrad: Goslesbumizdat; 1956. 51 p. (In Russ.)

On approval of water quality standards for water bodies of fishery importance, including standards for maximum permissible concentrations of pollutants in the waters of water bodies of fishery importance.

Order dated May 26, 2025, No. 296. Ministry of Agriculture of the Russian Federation; Federal Agency for Fisheries. Registered with the Ministry of Justice of Russia on June 2, 2025, No. 82497. (In Russ.)

Orlova A. Yu., Bogomolov A. V., Luchnikov A. I., Lyakhin Yu. S., Antonova M. V. Features of the formation of the water quality in the Argazinsky Reservoir during the low-level periods. *Vodnoe khozyaistvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie = Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2025;3:21–34. (In Russ.). doi: 10.35567/19994508-2025-3-21-34

PND F 14.1:2:4.128-98. Quantitative chemical analysis of water. Methods for measuring the mass concentration of petroleum products in samples of natural, drinking and waste waters using the fluorimetric method on a Fluorat-02 liquid analyzer. (In Russ.)

Regression equation. *Novyi semestr = A new semester*. (In Russ.). URL: <https://math.semestr.ru/corel/corel.php> (accessed: 21.02.2026).

Report of the State Enterprise of the Yaroslavl Region 'Svernoy Vodokanal'. Central Water Supply Laboratory. Rybinsk; 2024. 58 p. (In Russ.)

Ritchie A. C., Warrick J. A., East A. E., Magirl C. S., Stevens A. W., Bountry J. A., Randle T. J., Curran C. A., Hilldale R. C., Duda J. J., Gelfenbaum G. R., Miller I. M., Pess G. R., Foley M. M., McCoy R., Ogston A. S. Morphodynamic evolution following sediment release from the world's largest dam removal. *Scientific reports*. 2018;8:13279. doi: 10.1038/s41598-018-30817-8

Rybinsk Reservoir during the Great Patriotic War. *Press-sluzhba Minprirody Rossii = Press Service of the Ministry of Natural Resources of Russia*. (In Russ.). URL: https://www.mnr.gov.ru/press/75-let-pobedy/rybinskoe_vodokhranilishche_v_gody_velikoy_otechestvennoy_voyny/ (accessed: 21.01.2026).

Rybinsk Reservoir. *Federal'noe agentstvo vodnykh resursov Rossiiskoi Federatsii = Federal Agency for Water Resources of the Russian Federation*. (In Russ.). URL: <https://voda.gov.ru/reservoirs/7273/> (accessed: 10.01.2026).

Shirokova V. A., Snytko V. A., Nizovtsev V. A., Frolova N. L., Dmitruk N. G., Chesnov V. M., Ozerova N. A., Shirokov R. S. Tikhvin water system: past and present. Hydrological and ecological situation and landscape

changes in the waterway area. Moscow: Akkolit; 2013. 376 p. (In Russ.)

Shkardiyuk I. E. On a decline in the Rybinsk Reservoir. *Int. Sci. J. Alt. Energy Ecol*. 2013;3-2(122):91–94. (In Russ.)

Shubenkov M. V. Restoration of the flooded natural and cultural-historical territories of the Upper Volga region. *Biosfernaya sovместimost': chelovek, region, tekhnologii = Biosphere Compatibility: Human, Region, Technology*. 2024;1:25–36. (In Russ.). doi: 10.21869/2311-1518-2024-45-1-25-36

Stepan'yan O. V., Rybalkina E. I., Khoroshev O. A., Kazeev K. Sh., Nesteruk G. V., Kleshchenkov A. V., Pol'shin V. V., Gerasyyuk V. S. Use of bottom sediments of the Tsimlyansk Reservoir as organic fertilizer. *Nauka Yuga Rossii = Science in the South of Russia*. 2024; 20(4):61–69. (In Russ.). doi: 10.7868/S25000640240409

Tolkachev G. Yu., Korzhenevskii B. I., Kolomiitsev N. V. Distribution of heavy metals by forms of existence and their content in the bottom sediments of the reach of the Ivankovsky Reservoir. *Prirodoobustroistvo = Environmental Engineering*. 2023;1:89–94. (In Russ.). doi: 10.26897/1997-6011-2023-1-89-94

Vasil'ev Yu. S., Maslikov V. I., Shilin M. B. Regime of the flowing regulation of the Rybinsk Reservoir as a principal factor of formation of the ecological situation in the drainage area. *Uchenye zapiski Rossiiskogo gos. gidrometeorologicheskogo universiteta = Scientific Notes of the Russian State Hydrometeorological University*. 2016;45:28–42. (In Russ.)

Venitsyanov E. V., Kirpichnikova N. V. Assessment of water quality in the system of reservoirs – sources of water supply in Moscow based on long-term dynamics of hydrochemical parameters. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2020;45(8):571–578. doi: 10.3103/S1068373920080087

Zakonov V. V., Litvinov A. S., Zakonova A. V. Spatial-temporal transformation of the ground complex of the Volga reservoirs. Communication 2. Results of monitoring bottom sediments and consequences of lowering the level of the Rybinsk Reservoir. *Vodnoe khozyaistvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie = Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2015;4:21–35. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 27.01.2026; принята к публикации / accepted: 11.03.2026.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Нартов Александр Сергеевич

канд. геогр. наук, доцент кафедры почвоведения, мелиорации и геоэкологии

e-mail: nartovalexander@gmail.com

Лаврухина Марина Анатольевна

магистрант кафедры почвоведения, мелиорации и геоэкологии

e-mail: lavruhina020@gmail.com

CONTRIBUTORS:

Nartov, Alexander

Cand. Sci. (Geog.), Associate Professor

Lavruhina, Marina

Master's Student