УДК 574.5+504.456

ДИНАМИКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ШЕРШНЁВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА В ЗАСУШЛИВЫХ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

А.В. Кравцова[1]*, Н.И. Ходоровская[1], С.Г. Левина[2], В.В. Баженова[1], И.И. Фирулина[3]
[1] Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия; [2] Южно-Уральский государственный гуманитарно-педагогический университет, Челябинск, Россия; [3] Самарский государственный экономический университет, Самара, Россия.
Эл. почта: kravtsova87@yandex.ru
Статья поступила в редакцию 23.05.2025; принята к публикации 23.09.2026

Исследована динамика гидрохимических и гидробиологических показателей экосистемы Шершнёвского водохранилища (г. Челябинск) в условиях гидрометеорологических изменений с 2018 по 2023 год. Показано, что в маловодный засушливый период растут численность цианобактерий и коэффициент годового водообмена за счет попусков с вышерасположенного в каскаде водоема, однако значимые изменения в динамике гидрохимических показателей не отмечены. Методом главных компонент выявлено, что состояние водохранилища определяется на 54% двумя комплексами факторов – на 29% накоплением органического вещества (перманганатная окисляемость, цветность, химическое потребление кислорода) и на 25% процессами, определяющими биологическую продуктивность (численность фитопланктона, биологическое потребление кислорода, нитраты и нитриты). Фактор «водообмен» на 77% влияет на второй комплекс факторов и способствует сохранению общего режима функционирования экосистемы водохранилища в продолжительных засушливых условиях.
Ключевые слова: *водохранилище, гидрохимические показатели, фитопланктон, гидрометеорологические изменения.*

DYNAMICS OF INDICATORS OF ECOLOGICAL CONDITION OF SHERSHNEV RESERVOIR IN DRY HYDROMETEOROLOGICAL CONDITIONS

A.V. Kravtsova[1]*, N.I. Khodorovskaya[1], S.G. Levina[2], V.V. Bazhenova[1], I.I. Firulina[3]
[1]Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia; [2]South Ural State Humanitarian and Pedagogical University, Chelyabinsk, Russia; [3]Samara State Economic University, Samara, Russia.
Email: kravtsova87@yandex.ru

The dynamics of hydrochemical and hydrobiological indicators of the ecosystem of the Shershnevsky Reservoir (Chelyabinsk) under conditions of hydrometeorological changes that occurred in 2018–2023 were studied. It has been shown that, in the low-water dry period, the abundance of cyanobacteria and the annual water exchange ratio increase due to outflows from the above-located reservoirs water, but no significant changes in the dynamics of hydrochemical indicators are noted. Using the principal component methodology revealed that the conditions of the Shershnevskiy Reservoir are determined by 54% by two sets of factors: 29% –organic matter accumulation (permanganate test, coloration, and chemical oxygen demand), and 25% – the processes that determine the biological productivity (phytoplankton, BPC5, nitrate and nitrite levels). The "water exchange" factor affects the second set of factors by 77% and contributes to maintaining the overall functioning of the reservoir ecosystem in prolonged dry conditions.
Keywords*: reservoir, hydrochemical indicators, phytoplankton, hydrometeorological changes.*

Статья опубликована в журнале Геосферные исследования № 4 за 2026 год. Включена в базу РИНЦ и корректировке не подлежит. Возможны изменения.

ВВЕДЕНИЕ

Глобальное изменение климата и его последствия – одна из наиболее важных проблем современности. Климатические сдвиги в сочетании с антропогенным стрессом могут, в частности, вызывать негативные тренды в качестве воды в водных экосистемах, что особенно остро проявляется в маловодные и засушливые годы [34, 45].

Существует большое число прогнозов, согласно которым изменение климата окажет значительное влияние на эвтрофикацию водоемов [52]. Ожидается, что такие эффекты будут варьировать в зависимости от водоема и от времени года, при этом повышение температуры и удлинение вегетационного периода увеличат численность водорослей [9, 38]. Рост количества сильных осадков усилит стоки и поступление питательных веществ в реки и водохранилища [48]. Повышение частоты и интенсивности засух приведет к застойным явлениям на водотоках и будет способствовать цветению водорослей. В целом изменения климата существенно повлияют на эвтрофикацию экосистем озер и водохранилищ[49] и в конечном итоге снизят их устойчивость и биоразнообразие [53].

Результаты ряда исследований [2, 5, 15, 27, 29, 36] показывают, что в зависимости от сочетания различных гидроклиматических факторов, включая температуру воздуха, количество осадков, уровень воды, и выраженности их изменений, изменения происходят в показателях, отражающих содержание растворенного органического вещества и структуру фитопланктонного сообщества. В маловодные засушливые годы наблюдаются изменение динамики биогенных элементов, увеличение цветности воды, усиление эвтрофирования, сдвиги в биоразнообразии и структуре альгоценозов. В период повышенной

водности отмечается рост поступления аллохтонных веществ в водные объекты, вызывающих изменения в циклах веществ, ключевых для гидробионтов. Все это неблагоприятно сказывается на качества воде, включая водоемы и водотоки, используемые для водоснабжения населения [21]. Сочетание специфичных для конкретной территории факторов окружающей среды и характера антропогенной нагрузки в местных условиях формируют специфические особенности изменчивости водоемов.

Цель работы: анализ особенностей гидрохимических характеристик и показателей фитопланктонного сообщества Шершнёвского водохранилища в засушливых условиях.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Шершнёвское водохранилище (ШВХ), созданное на реке Миасс, находится в черте г. Челябинска (Россия). Наполняемость этого водоема в значительной степени зависит от попусков воды с Аргазинского водохранилища, относительно которого он расположен ниже по каскаду. По размерам он соответствует разряду средних водохранилищ руслового типа; длина – 17,5 км, наибольшая ширина – 4,0 км (средняя – 2,2 км), полный объем при нормальном подпорном уровне 76 млн. м^3. Водохранилище имеет 3 плеса: верхний – речной, средний и приплотинный – озерные. Водоем мелководный – около 50% площади занимают глубины до 4 м. Большие глубины встречаются в приплотинном участке, где максимальная глубина достигает 14 м. ШВХ – единственный источник питьевого водоснабжения для г. Челябинска и его агломерации с населением около 1,5 млн чел. По результатам многолетних исследований [14], в верховье ШВХ в последние годы наблюдается значительное ухудшение качества воды. В целом, по комплексу показателей экосистема переходит из многолетнего устойчивого мезотрофного состояния в эвтрофное. Сопровождается этот процесс снижением качества воды, прогрессирующим «цветением» водоема, возрастанием органического загрязнения, появлением неприятных запахов и повышением цветности воды. К важнейшим причинам следует относить усиление негативных внутриводоемных процессов, связанных с существованием застойных зон, накопленного объема донных отложений, обширных мелководий в верховьях водохранилища, притоком загрязненного водного и твердого стока с территории водосбора р. Миасс.

На рис. 1 показан район исследований на ШВХ. Для проведения исследования выделены 2 участка – верховье и приплотинный участок. На первом расположены пункты наблюдения (п.н.) п.н. 1 в 2 км выше по течению от водозабора городских очистных сооружений водопровода и п.н. 2 в непосредственной близости от них. Этот участок представляет собой речной плес, где глубины составляют от 1 до 4–5 м, дно песчано-илистое. Качество воды здесь соответствует тому, что поступает на очистные сооружения водопровода и в значительной степени определяет состояние водохранилища в целом. Второй участок – приплотинный, здесь находится п.н. 3 – озеровидный участок водохранилища, где глубина достигает 8–10 м.

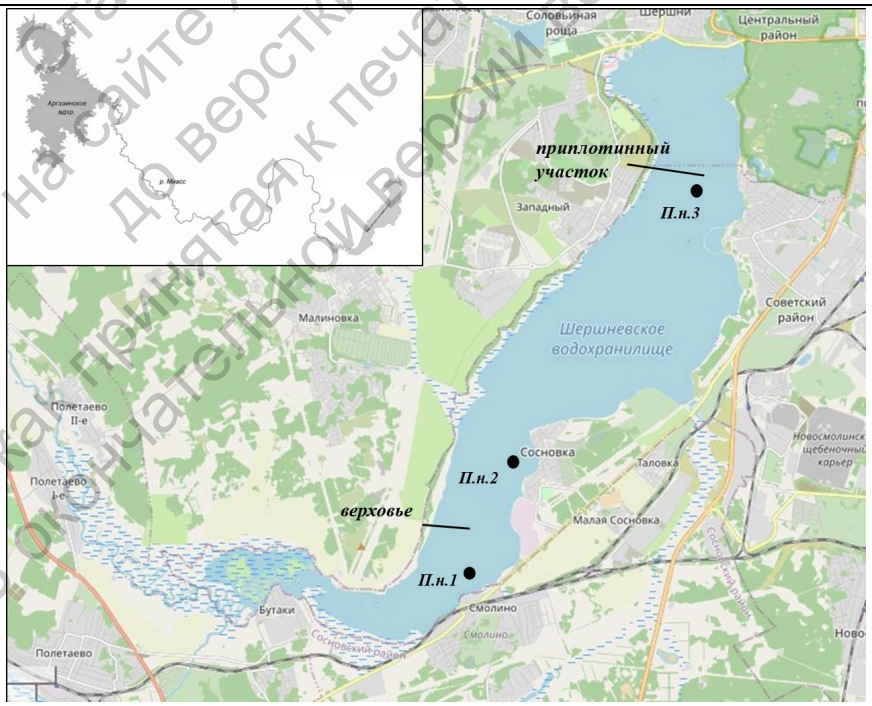


Рис. 1. Расположение пунктов наблюдения (п.н.) на Шершнёвском водохранилище.

Собственные исследования проводили в периоды с апреля по август в 2018–2023 годах. Пробы в п.н. 1 и 2 брали в прибрежных зонах водохранилища на расстоянии 50 м от берега с поверхностного горизонта с глубины в 0,4 м. Были отобраны и проанализированы 32 пробы по 15 гидрохимическим

Статья принята к публикации на сайте журнала «Биосферная совместимость: человек, регион, технологии» 2026 Т. 1 (45) № 1. С. 1–14. До верстки и корректуры. Принятая к печати версия может быть изменена.

показателям – биологическое потребление кислорода за пять суток ($БПК_5$), окисляемость перманганатом, химическое потребление кислорода (ХПК), цветность, содержание взвешенных веществ, аммонийный азот, нитраты, нитриты, фосфаты, железо, марганец, медь, цинк, pH, растворенный кислород – в периоды половодья и летней межени. Для определения гидробиологических показателей (видовой состав, численность и биомасса фитопланктона) отобраны 36 проб в июне, июле, августе. Данные за сентябрь–март (период осенней и зимней межени) в 2018–2023 годах представлены архивными материалами лаборатории Сосновских очистных сооружений водоканала (г. Челябинск) и Челябинского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды.

С помощью батометра Молчанова отбирали 3 $дм^3$ воды для гидрохимического анализа и 1,5 $дм^3$ для изучения фитопланктона. Непосредственно на водоеме определяли содержание растворенного кислорода с помощью полевого портативного оксиметра МАРК-302М с кислородным датчиком ДК-302М (ООО «ВЗОР») и водородный показатель и температуру воды с помощью полевого портативного pH-метра SG2 (Mettler Toledo), также измеряли прозрачность воды с помощью диска Секки и температуру воздуха на высоте 0,5-1 м от поверхности.

Определение гидрохимических (цветность, pH, азот аммонийный, нитрит-ион, нитрат-ион, фосфат-ион, железо общее, медь, марганец, цинк, окисляемость перманганатная, ХПК, $БПК_5$) и гидробиологических (видовой состав, численность, биомасса фитопланктона) показателей проводили в аккредитованной лаборатории Учебного научно-исследовательского центра биотехнологий (Аттестат аккредитации № РОСС RU.0001. 515711) ФГБОУ ВО «Челябинский государственный университет» по сертифицированным методикам в соответствии с действующими нормативными документами[1] и общепринятыми методами[2].

Для определения видового состава фитопланктона использовали 0,5 $дм^3$ пробы. При наличии возможности просмотреть пробу в живом состоянии проводили видовую идентификацию в день отбора пробы без фиксации, в ином случае пробу подвергали обработке. Пробу природной воды сгущали с помощью вакуумного насоса на мембранном фильтре с диаметром пор 0,45 мкм. Затем сгущенный осадок с фильтра осторожно переносили в склянку при помощи кисточки и доводили до объема 5 мл дистиллированной водой. Концентрированную пробу фиксировали 4% раствором формалина. Определение, подсчет и измерение фитопланктона осуществлялся в лаборатории в соответствии с руководством [1,17] с использованием микроскопа Микмед-5 (ЛОМО) в камере Горяева. Биомассу фитопланктона оценивали на основе определения объемов клеток водорослей общепринятым счетно-объемным методом [11,25].

Расчет годового коэффициента водообмена (Дпр) производился по формуле [10]:

$$Дпр = \frac{\boldsymbol{W}пр}{\boldsymbol{V}},$$

где: $\boldsymbol{W}$пр – объема притока в водоем за год, $\boldsymbol{V}$ – средний объем воды водоема за год.

Статистическую обработку данных проводили в специализированной программной среде R (версия 4.x) с использованием пакетов vegan, ggplot2, ggrepel, dplyr, readxl и в Excel. Для отображения динамики гидрохимических и гидробиологических показателей использовали расчет среднегодовых значений показателей для двух участков наблюдений – верховье и приплотинный, медианы полученных значений и коробчатые диаграммы с указанием 95% доверительного интервала и квартилей. Для выявления основных факторов, определяющих изменчивость гидрохимического и гидробиологического состояния водохранилища, был применен метод главных компонент (Principal Component Analysis, PCA). Перед проведением многомерного анализа все показатели были стандартизированы методом Z-преобразования. Стандартизация была выполнена для устранения влияния различий в размерности и диапазонах изменчивости отдельных показателей. Для исследования взаимосвязей характеристик водной экосистемы использовался расчет коэффициентов корреляционной взаимосвязи изучаемых показателей по Пирсону. Тесноту связи оценивали по шкале Чеддока: от 0 до 0,3 – очень слабая, от 0,3 до 0,5 – слабая, от 0,5 до 0,7 – средняя, от 0,7 до 0,9 – сильная (высокая), от 0,9 до 1,0 – очень сильная (очень высокая). В анализ были включены следующие показатели: $БПК_5$, перманганатная окисляемость, химическое потребление кислорода (ХПК), цветность, содержание взвешенных веществ, аммонийный азот, нитраты, нитриты, фосфаты, железо, марганец, медь, цинк, pH, растворенный кислород и численность фитопланктона. Коэффициент водообмена рассматривали как внешний гидрологический фактор. Статистически значимыми считались различия и взаимосвязи при $p < 0,05$ [33,37,47].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

Гидрологические и гидрохимические показатели

Период 2018–2023 годы для водных объектов водосборной территории р. Миасс, Аргазинского и Шершневского водохранилищ, характеризуется пониженной водностью, и такая тенденция усиливается с 2020 года (таблица 1). В период летне-осенней межени уровень воды в реках бассейна р. Тобол на территории Челябинской области, к которому относятся эти водные объекты, достигал 60% от нормы (по данным Челябинского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды).

[1] РД 52.18.769-2012

[2] ГОСТ 17.1.3.07-82, РД 52.24.620-2000

Статья опубликована на сайте оптимизатора до выхода журнала в библиотеку и каталоги. Вы можете ознакомиться с ней раньше, чем она появится в печатной версии журнала за 2026 год. Полнотекстовая версия доступна по подписке.

Табл. 1.

Метеорологические условия Шершнёвского водохранилища в 2018–2023 годах

Год	Среднегодовая температура воздуха, °С	Средняя температура воздуха за май–август, °С	Число жарких дней с температурой воздуха, >29°С	Годовое количество осадков, мм
2018	+2,3	15,9	10	404
2019	+3,9	17,0	10	440
2020	+5,6	18,3	29	471
2021	+4,2	19,6	40	273
2022	+3,5	17,2	15	386
2023	+5,1	18,3	23	656

Период 2018–2019 годы характеризуется суммой осадков и среднегодовой температурой воздуха, в целом соответствующей климатической норме. Далее в 2018–2023 годы, особенно в летний период 2020–2021 годов наблюдались аномальные погодные условия: температура воздуха была существенно выше, а осадки – ниже нормы, что можно охарактеризовать как маловодный засушливый период. В 2022–2023 годы наблюдались метеорологические условия незначительно выше климатической нормы.

На рис. 2 показан коэффициент водообмена ШВХ.

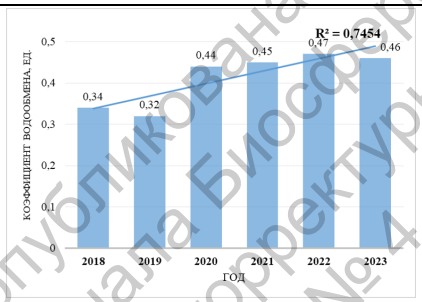


Рис. 2. Годовые коэффициенты водообмена Шершнёвского водохранилища с 2018 по 2023 год и линейный тренд их изменений.

Анализ динамики среднегодового коэффициента водообмена по притоку ШВХ свидетельствует о его статистически значимом увеличении (R = 0,74, p = 0,02) с 2020 до 2023 года по сравнению с 2018 годом – с 0,34 до 0,46, несмотря на засушливые условия. Так что наполненность ШВХ составляла 85–89%. Это обеспечено значительными объемами воды, принудительно поступающей с Аргазинского водохранилища с 2019 г. В результате такой ситуации, в 2023 году полезный объем последнего снизился до 29%. Таким образом, приток водных масс из верхнего водохранилища в каскаде обеспечил поддержание в целом нормального объема ШВХ с 2020 года.

В подледный период температура воды водохранилища в 2018–2023 годы составляла от 0°С до +4°С. На рис. 3 представлена динамика температурного режима водоема в период с мая по август.

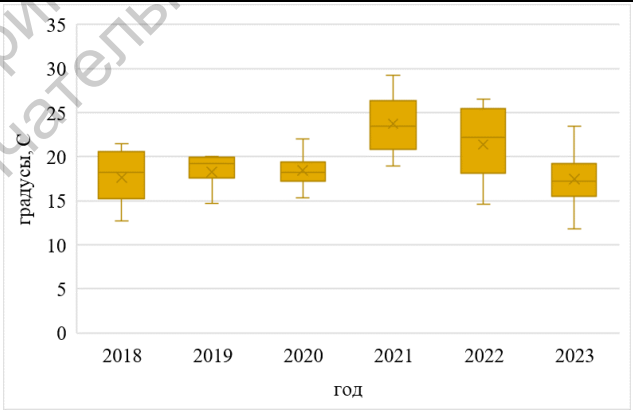


Рис. 3. Динамика средней температуры поверхностного слоя воды Шершнёвского водохранилища за вегетационный сезон по годам.

В 2021 и 2022 годах наблюдались высокие температуры воды, максимальные значения которых достигали 21–26°С, тогда как в 2018 году верхние слои воды прогревались в среднем только до 16,8°С. Это

Статья опубликована в сетевом журнале Биосфера по результатам принятия к печати в № 4 за 2026 год. В окончательной версии возможны изменения.

обусловлено ростом среднего значения температуры воздуха в вегетационный сезон и количеством жарких дней (табл. 1). За весь период исследования воды водохранилища определялись как нейтрально-слабощелочные (pH 7,1–9,1). Кислородный режим можно охарактеризовать как удовлетворительный, содержание растворенного кислорода колебалось в среднем на уровне 8–12 мг/дм^3 и анаэробных условий не наблюдалось. Явления перенасыщения воды кислородом отмечены в периоды максимального развития фитопланктона, когда количество газа в воде достигало 182,7% в 2020 году. Корреляционный анализ подтвердил сильную положительную взаимосвязь между уровнем pH воды и содержанием растворенного кислорода (r_s= +0,91, p<0,0001), что является типичным явлением в летний период активного развития фитопланктона. С интенсификацией процессов фотосинтеза в водоеме, как правило, формируются слабощелочные условия и повышается уровень кислорода в верхних слоях воды [29].

Гидрохимические и гидробиологические характеристики определяют продуктивность экосистемы и, как следствие, ее трофность и устойчивость [12, 32]. Далее рассмотрены среднегодовые значения уровней цветности, перманганатной окисляемости, биологического потребления кислорода ($БПК_5$), соединений азота, фосфатов, тяжелых металлов, общей численности и биомассы фитопланктона.

Во внутригодовой изменчивости указанных гидрохимических показателей в верховье ШВХ наблюдаются следующие особенности. Их резкое возрастание происходит в период начала половодья (апрель) и дальнейшее постепенное снижение, а в летнюю межень (август) отмечается повышение значений. Весной это может быть вызвано поступлением органических и других загрязняющих веществ извне, а также из накопленных в донных отложениях органических остатков вследствие активного перемешивания водной толщи. Летом складываются благоприятные условия для роста и развития микроорганизмов (в том числе и цианобактерий, пик бурного развития которых приходится на июль), а также происходит интенсификация биологического окисления автохтонного и аллохтонного органического вещества. На рис. 4, 5, 6 этим явлениям соответствуют выбросы и более расширенные значения верхнего квартиля по сравнению с нижним. Зимой и осенью величины перечисленных показателей в основном низкие.

Динамика цветности воды водохранилища за весь исследуемый период представлена на рис. 4. Воды речного плеса характеризуется высокими значениями этого показателя в период половодья (33–80 град. цветности), что отражено выбросами на графике.

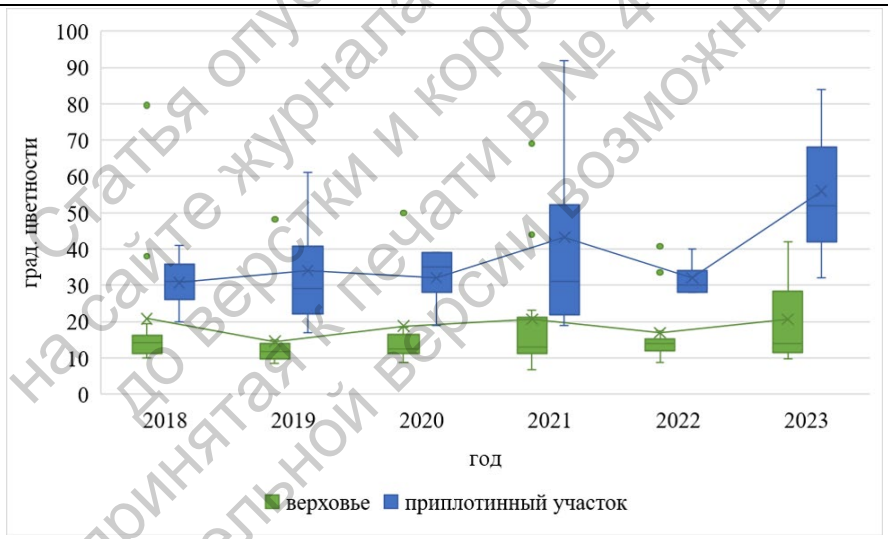


Рис. 4. Динамика цветности воды Шершнёвского водохранилища.
**Примечание: здесь и далее на графиках точками показаны выбросы, линейный график – среднее значения показателя, линия внутри ящика – медиана.*

Такая динамика цветности воды обусловлена несколькими факторами. Весной это связано с увеличением поступления поверхностного стока. Однако в 2020, 2021, 2022 годах появляется повторный пик показателя в августе: до 40–50 град. цветности. В засушливый период 2020–2022 годов значительное развитие фитопланктона и увеличение продуктов его жизнедеятельности способствовало повышению цветности, что подтверждается данными корреляционного анализа (r = +0,64, p = 0,04). В остальное время года значения цветности составляют 10–20 град. Также в значительной мере на цветность воды в водоеме влияет сток рек Миасс и Биргильда, где высоки концентраци тяжелых металлов и повышена цветность. Цветность в приплотинном участке в целом в 2 раза выше при сравнении с верховьем водохранилища и достигает максимума весной (40–90 град. цветности). Однако аномально высокие значения (выбросы) здесь не наблюдались. Сила взаимосвязи между уровнем перманганатной окисляемости и цветностью вод в водоеме составляет r = +0,76 (p = 0,008) и характеризуется как средняя. Вместе с тем на цветность воды водохранилища также положительно влияют соединения железа (r = +0,65, p = 0,03).

Статья опубликована на сайте журнала Биосферы до верстки и корректуры. Принята к печати в № 4 за 2025 год. В окончательной версии возможны изменения.

Содержание органического вещества в водоемах определяется уровнем продукционно-деструкционных процессов, поступлением его с поверхностным стоком, а также активностью его трансформации в водоеме. Соотношение этих факторов изменяется во времени, пространстве и зависит от гидрологического режимов водоема и погодных условий [7, 8]. Количество легко окисляемого растворенного органического вещества можно оценить по показателям $БПК_5$ и перманганатной окисляемости, а общее содержание трудно и легко окисляемых как органических, так и неорганических соединений – по ХПК [18, 31]. Кроме того, цветность воды отражает наличие таких окрашенных соединений, как гуминовые вещества и фульвокислоты, поступающих с поверхностным стоком с почвы и с водным гумусом. Содержание растворенного органического вещества, которое является доступным для гидробионтов, в особенности для фитопланктона, и влияет на его жизнедеятельность, отражают такие показатели как биологическое потребление кислорода (БПК) и перманаганатная окисляемость. На рис. 5 и 6 показана динамика содержания органических веществ в воде ШВХ в верховье и приплотинном участке соответственно.

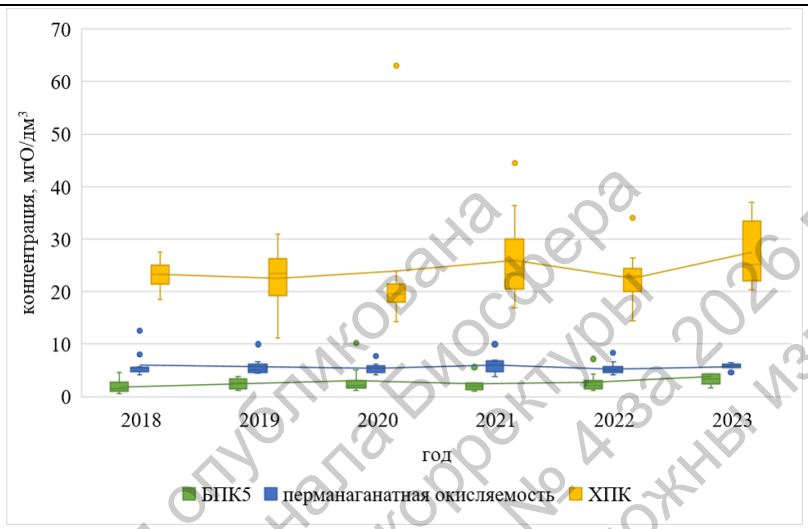


Рис. 5. Динамика показателей $БПК_5$, ХПК перманганатной окисляемости воды Шершнёвского водохранилища (верховье). Обозначения см. рис. 4.

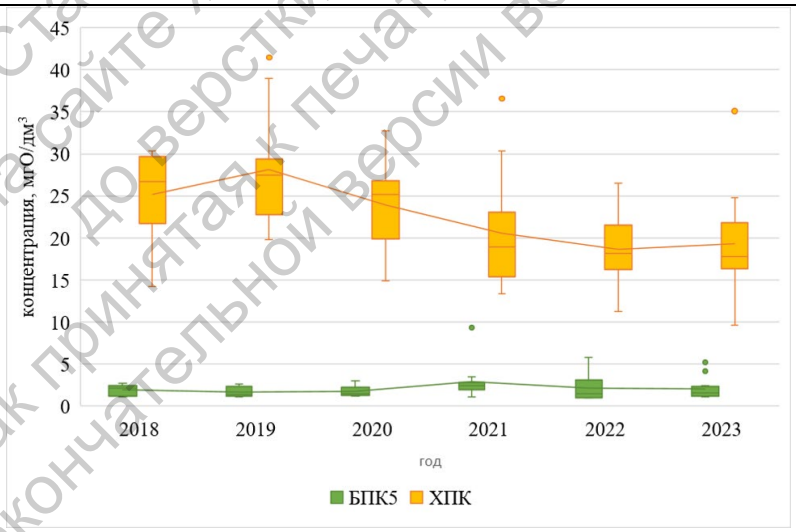


Рис. 6. Динамика показателей $БПК_5$ и ХПК воды Шершнёвского водохранилища (приплотинный участок). Обозначения см. рис. 4.

Статья опубликована на сайте журнала Биосфера до верстки и корректуры как принятая к печати в окончательной версии № 4 за 2026 год. возможны изменения.

В верховье водохранилища за исследуемый период произошло увеличение средних значений показателя $БПК_5$ (рис. 5) почти в 2 раза: с 1,46 мгО/дм^3 до 3,84 мгО/дм^3. Максимальное количество доступной для биологического окисления органики по $БПК_5$ зарегистрировано в августе наиболее жарких 2020–2022 годов (4,7-10,2 мгО/дм^3), что показано также в [30], и в периоды максимального численности фитопланктона. Это обусловлено процессами внутри водоема, связанными с повышением температуры воды и воздуха, развитием фитопланктонного сообщества и увеличением уровней pH и кислорода в воде. Такие условия способствуют деструкции органического вещества и переводу ее в лабильную форму, более усвояемую для гидробионтов, особенно доступную для бактериальной флоры [19, 24]. Это подтверждается

результатами корреляционного анализа, согласно которому уровень $БПК_5$ характеризуется статистически достоверными ($p < 0,01$) положительными связями слабой силы с уровнем pH ($r = +0,38$), средней силы с показателем ХПК ($r = +0,65$) и высокой – с численностью фитопланктона ($r = +0,79$). В приплотинном участке ШВХ (рис. 6) выраженных изменений показателя в 2018–2023 годах не наблюдается, в отличие от верховья. Значения $БПК_5$ составляют в среднем около 2 мгО/дм^3, выбросы отмечены в 2021 и 2023 годах.

Перманганатная окисляемость обусловлена в основном содержанием аллохтонных органических веществ, а цветность определяется наличием окрашенных гуминовых и фульвокислот, поступающих с поверхностным стоком [16, 29, 32]. В сезонной динамике показателя можно выделить значительное увеличение его к окончанию зимней межени и к моменту таяния ледового покрова– до 12 мгО/дм^3 (рис. 5). Второй подъем содержания органического вещества наблюдается в августе до 6,0–8,3 мгО/дм^3. Однако в динамике среднегодовых концентраций показателя перманганатной окисляемости значительных изменений не отмечено, диапазон колебаний составил 5,4–6,1 мгО/дм^3 (рис.5). Количество лабильной формы органического вещества в ШВХ зависит от степени развития альгофлоры, уровня цветности воды и содержания трудно окисляемых органических веществ. Это согласуется с данными корреляционного анализа. Выявлена средняя взаимосвязь перманганатной окислямости с численностью фитопланктона ($r = +0,49$, $p = 0,04$), ХПК ($r = +0,54$, $p = 0,0001$) и цветностью ($r = +0,75$, $p = 0,0001$).

Среднегодовое значение химического потребления кислорода в воде верховья ШВХ (рис. 5) за исследуемый период колеблется в диапазоне 19–26 мгО/дм^3. В 2020–2022 годах отмечено резкое возрастание этого показателя в период весеннего половодья и межени: до 34–60 мгО/дм^3. В приплотинном участке водоема (рис. 6) с 2020 года наблюдается тенденция к снижению ХПК в воде с 25 мгО/дм^3 до 17 мгО/дм^3, а в 2021 и 2023 годах максимальные значения отмечены в конце летней межени.

Соотношение перманганатной окисляемости и ХПК воды водоема является постоянным за весь период исследования и свидетельствует о преобладании в воде трудно окисляемых соединений в основном автохтонного происхождения. Их основным источником является разложение органического вещества растительного и животного происхождения. Еще одним источником служат донные отложения. В условиях пониженного водообмена и интенсивного разложения органического вещества в придонных слоях водоема могут формироваться анаэробные восстановительные условия, в результате которых в воду поступают соединения, накопленные в донных отложениях [22, 23].

В 2020–2022 годах по мере развития засушливых условий в регионе в ШВХ не происходило явно выраженное увеличения растворенных органических соединений, если судить по $БПК_5$ и бихроматной и перманганатной окисляемости, а в отдельных случаях эти показатели снижались. Выявленная особенность гидрохимического режима ШВХ обусловлена увеличивающимся транзитом водных масс, поступающих с Аргазинского водохранилища с 2020 года. В результате содержание различных форм органического вещества в водоеме относительно стабильно.

Важнейшими биогенными элементами, лимитирующими развитие фитопланктона, являются азот и фосфор [35]. Их динамика представлена на рис. 7 и 8.

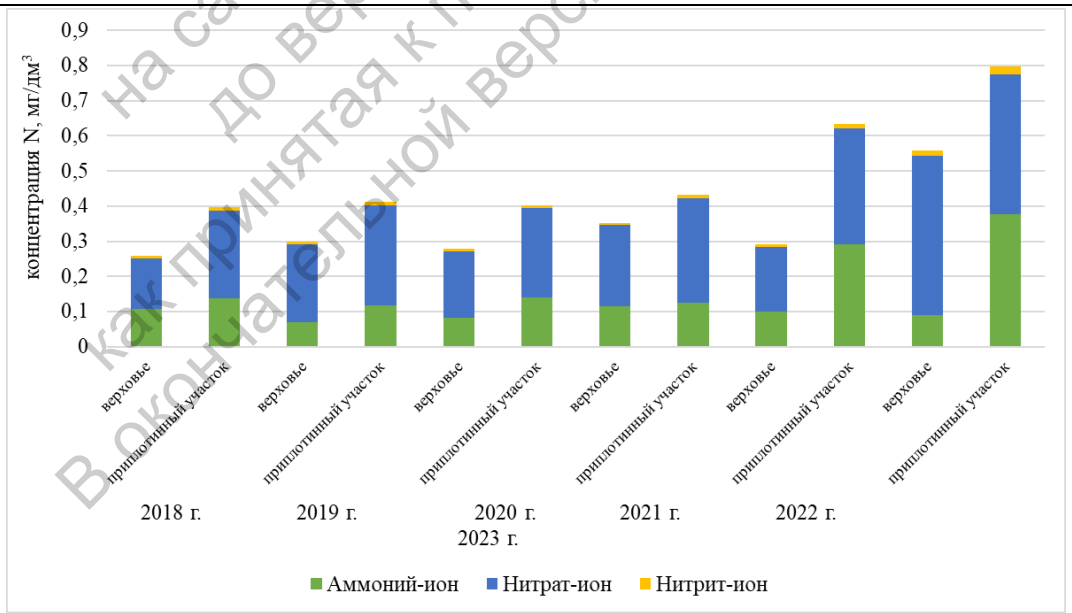


Рис. 7. Среднегодовая концентрация суммарного азота в воде Шершнёвского водохранилища.

Концентрации ионов аммония, нитрата и нитрита в воде ШВХ варьируются за весь период исследования в диапазонах 0,08–4,03 мг/дм^3, 0,1–4,03 мг/дм^3 и 0,02–0,08 мг/дм^3 соответственно. При этом максимальные значения содержания соединений азота в воде наблюдается во время весеннего половодья. В

Статья опубликована на сайте журнала Биосферная
до верстки и корректуры
принятая к печати № 4 за 2020 год.
окончательной версии возможны изменения.

остальное время их количество сравнительно низкое. Возможно, это связано с активным использованием соединений азота сине-зелеными водорослями [19, 44] и депонированием соединений азота в донных отложениях водохранилища, что показано нами ранее [13]. Возможно, также повышение температуры стимулирует метаболическую активность большинства видов бактерий, что ведет к усиленному окислению аммония и уменьшению его концентрации [24]. Суммарное количество азота в 2018–2023 годах колеблется в диапазоне от 3 до 4,2 мг/дм^3. При этом в водах приплотинного участка содержание азота несколько выше при сравнении с верховьем. Вероятно, это обусловлено рекреационным воздействием – здесь расположено несколько пляжей. В целом преобладающей формой азота (60–80%) во всем водоеме является нитратная – конечный продукт процессов нитрификации.

Изменения содержания фосфора находятся в тесной связи с интенсивностью протекания биопродукционных процессов [26, 43]. На концентрацию фосфатов значительно влияет массовое летнее развитие фитопланктона, особенно цианобактерий, которые активно используют фосфаты, в результате чего происходит снижение концентрации растворенного фосфора в воде, а после отмирания клеток соединения фосфора высвобождаются в воду [46], и их концентрации увеличиваются. Затем осенью соединения фосфора уходят в донные отложения. К окончанию зимы смена окислительно-восстановительной обстановки на дне водоема приводит к высвобождению соединений фосфора. Далее в период половодья перемешивание водных масс на мелководье приводит к миграции в верхние слои воды фосфатов, которые становятся доступными фитопланктону. Анализ внутригодовой динамики фосфатов в ШВХ показал, что перечисленные процессы происходят в водоеме. Изменчивость количества соединений фосфора в 2018–2023 гг. показана на рис. 8.

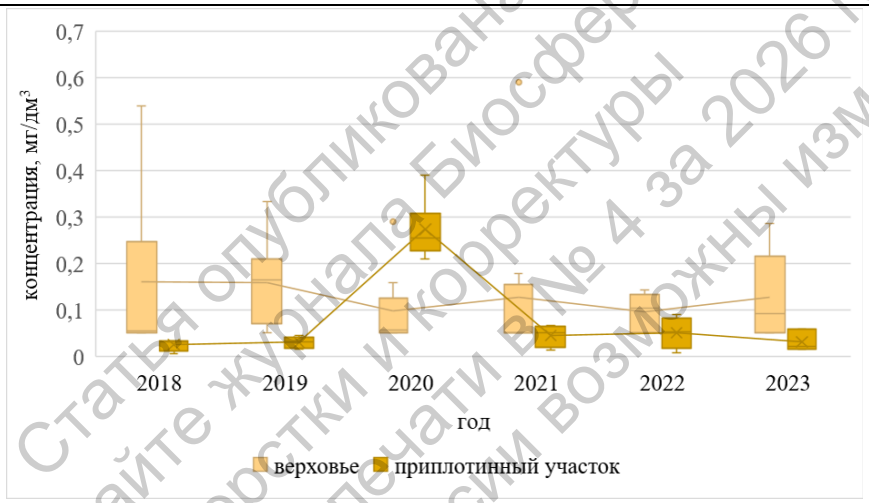


Рис. 8. Среднегодовое содержание фосфатов в воде Шершнёвского водохранилища.

В верховье водохранилища среднегодовое значение концентрации фосфатов колеблется на уровне 0,1–0,15 мг/дм^3 с максимумом в апреле до 0,54 мг/дм^3 (на рис. 7 это выражается в увеличении верхнего квартиля и 95% доверительного интервала). Такая динамика связана с высвобождением фосфора из донных отложений в придонный слой воды зимой, а весной в период половодья активное перемешивание вод приводит к его поступлению в водную толщу. Минимальные уровни наблюдаются в период увеличения численности фитопланктонного сообщества и составляют в среднем 0,05 мг/дм^3 в связи с активным потреблением фосфатов. Максимальный разброс выявлен в 2018, 2019 и 2023 годах, тогда как в остальные годы колебания менее выражены. Вероятно, это обусловлено следующим. Сверхвысокий уровень развития фитопланктона в 2020–2022 годах (до 470 млн клеток/дм^3) способствовал снижению содержания растворенных форм фосфора в воде. Повышение объемов воды, поступающей из Аргазинского водохранилища, привело к транзиту водных масс и, как следствие, к уменьшению количества осаждаемых фосфатов в придонные слои воды и в донные отложения в верховье водохранилища. В результате этого в засушливый период колебания содержания соединений фосфора имели менее выраженный характер при сравнении с годами, когда увлажнение было нормальным. В приплотинном участке ШВХ динамика среднего содержания фосфатов в воде стабильная за весь исследуемый период (0,02–0,05 мг/дм^3). Вероятно, это обусловлено увеличением объема водных масс и процессами разбавления. Значительное повышение фосфатов до 0,27 мг/дм^3, отмеченное на данном участке в 2020 году, возможно связано с поступлением накопленных соединений из верховья водохранилища.

Для альгофлоры водоемов значение имеют также другие ~~биогенные~~ элементы, особенно железо, марганец, медь, цинк. Известно, что Fe и Mn могут осаждать фосфор и тем способствовать снижению его концентрации в воде, изменяя важный для фитопланктона показатель соотношения азота и фосфора [40, 42]. Поступая в водоемы, эти элементы встраиваются в биогеохимические циклы, накапливаются в донных отложениях и способны длительное время влиять на различные внутриводоемные процессы [41, 50, 51].

Статья опубликована на сайте журнала Биосфера до верстки и корректуры в № 4 за 2026 год. К печати в окончательной версии возможны изменения.

Вместе с тем природно-антропогенные особенности Южного Урала способствовали образованию природно-техногенных биогеохимических провинций с высоким содержанием тяжелых металлов в первую очередь в подземных и поверхностных водах [6]. Диапазоны ~~их~~ средних концентраций в воде ШВХ за исследуемый период составили для меди 0,001–0,01 мг/дм^3, для цинка 0,005–0,03 мг/дм^3, для марганца 0,01–0,32 мг/дм^3, для железа общего 0,04–0,42 мг/дм^3. При этом содержание тяжелых металлов в воде верховья в основном выше по сравнению с приплотинным участком, что обусловлено стоком р. Миасс, которая характеризуется значительным количеством этих соединений.

Гидробиологические показатели

Изменения абиотических составляющих среды обитания влекут за собой трансформации в количественных и структурных характеристиках биоты, а для водных экосистем изменения происходят в первую очередь в сообществе фитопланктона [35]. Важнейшей характеристикой водной экосистемы является первичная продукция, ключевую роль в которой играет альгоценоз и особенно мелкие формы водорослей [23]. В связи с вариабельностью гидрологического режима, климатических факторов и химического состава воды в ШВХ в 2018–2023 годы наблюдались и изменения гидробиологических характеристик водоема.

Динамики численности фитопланктона в верховьях ШВХ (рис. 9) показывает, что за исследуемый период там наблюдаются явления «цветения» разной степени выраженности.

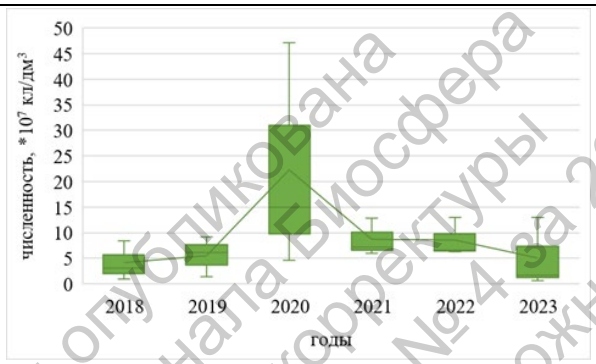


Рис. 9. Численность фитопланктона Шершнёвского водохранилища в вегетационный период.

На рис. 10 показана динамика биомассы фитопланктона в водоеме, которая совпадает с динамикой численности клеток водорослей. Максимальное количество первичной продукции в ШВХ отмечено в годы с температурой воздуха выше климатической нормы (2020– 2022 годы) и достигало 17,4 мг/дм^3.

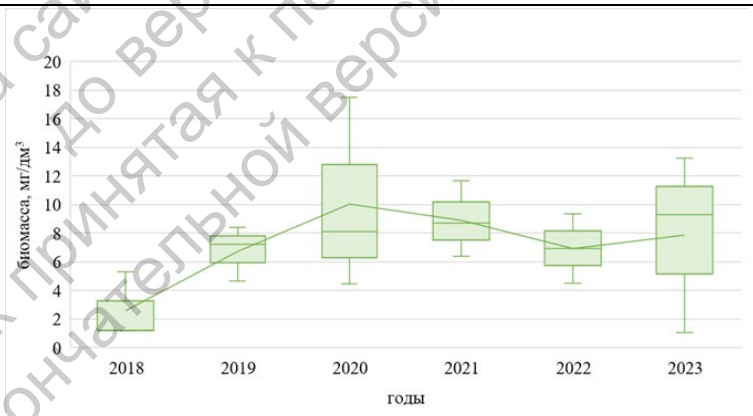


Рис. 10. Биомасса фитопланктона Шершнёвского водохранилища в вегетационный период.

Минимальное количество клеток (11 млн кл./дм^3) отмечено в 2018 году , когда воздух и вода прогрелись только до 16,6°С и 15,8°С. Максимальная численность фитопланктона (470 млн кл/дм^3) в ШВХ наблюдалась в 2020 году как последствие резких изменений метеорологических условий. Летом 2020 года увеличилось число жарких дней с температурой воздуха до 29°С. Далее в 2021–2022 годах маловодные засушливые условия сохраняются и усиливаются, вода прогревается до 25,8°С. Однако в этот период происходит снижение количества фитопланктона в среднем до 100 млн кл/дм^3. Это связано с тем, что с Аргазинского водохранилища вынужденно сбрасывается значительный объем водных масс для обеспечения поддержания нормального подпорного уровня ШВХ. В результате увеличения скорости движения воды из верховьев водоема уносятся пятна скоплений фитопланктона. В 2023 году продолжается снижение

Статья опубликована на сайте журнала Биосфера как принятая к печати и корректуры до верстки и окончательной версии в №4 за 2026 год. В окончательной версии возможны изменения.

численности водорослей до 48 млн кл/дм^3, чему способствует снижение температуры воздуха и воды до 17,4°С и 17,55°С соответственно.

На рис. 11 представлена структура численности фитопланктонного сообщества ШВХ.

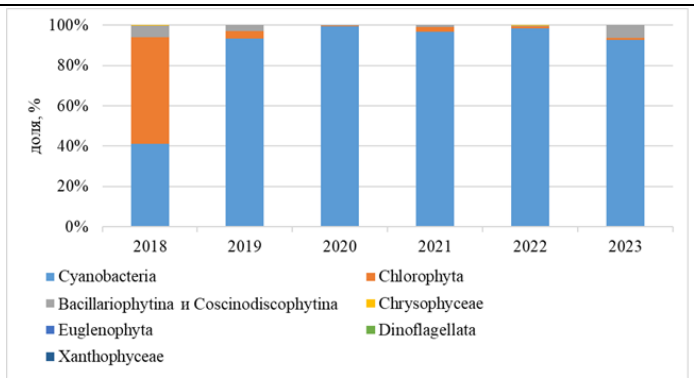


Рис. 11. Состав фитопланктона Шершнёвского водохранилища по отделам за вегетационный сезон, % от численности.

Альгоценоз ШВХ за весь исследуемый период 2018–2023 годы состоит из представителей отделов Cyanobacteria, Chlorophyta подотделов Bacillariophytina и Coscinodiscophytina отдела Heterokontophyta, в меньшей степени представлены отделы Euglenophyta, Charophyta, Dinoflagellata, класса Chrysophytyceae отдела Heterokontophyta, класса Xanthophyceae отдела Heterokontophyta. Наибольшее видовое разнообразие за весь период исследования выявлено у зеленых водорослей число видов которых составило 41, у диатомовых водорослей – 31, а цианобактерии представлены 14 видами. В 2018–2023 годах доминирующими видами были *Planktothrix agardhii*, *Aphanizomenon flos-aquae* и *Dolichospermum flos-aquae*.

В многолетней динамике ШВХ для вегетационного периода характерно увеличение доли цианобактерий по численности в фитопланктонном сообществе [3]. В 2018 году доминантом были Chlorophyta с долей по численности в 53%, а Cyanobacteria составляли по численности 41% (рис. 10). По мере усиления засушливых условий в альгоценозе наблюдается абсолютное доминирование цианобактерий по численности, доля которых составляла 90% и более.

На рис. 12 представлена структура биомассы фитопланктонного сообщества ШВХ.

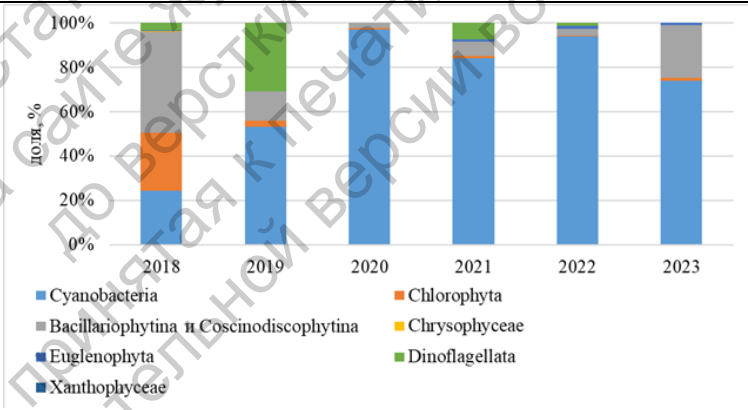


Рис. 12. Биомассы по отделам фитопланктона в Шершнёвском водохранилище за вегетационный сезон, %.

В распределении биомассы по отделам в 2018 году доминируют диатомовые – 40%, а с 2019 г. преобладают цианобактерии. Их доля в общей биомассе составляла в 2019–2023 годах от 50% до 97%, что обусловлено в основном высокой численностью Cyanobacteria. Корреляционным анализом подтверждено стимулирующее воздействие растворенного органического вещества (по $БПК_5$ и перманганатной окисляемости) на рост численности и биомассы фитопланктона ($r = +0{,}62…0{,}79$, $p < 0{,}01$), что отмечено в [4].

Взаимосвязи между гидрологическими, гидрохимическими и гидробиологическими показателями

Анализ комплекса гидрохимических и гидробиологических показателей ШВХ за 2018–2023 годы показал, что наибольшая изменчивость в засушливых условиях у гидробиологических показателей, тогда как ожидаемые значимые изменения в гидрохимическом режиме не происходят. Для оценки значимости гидрохимических и гидробиологических показателей водохранилища был выполнен анализ главных компонент (PCA) по стандартизированной матрице данных. В анализ были включены 16 гидрохимических и

Статья опубликована на сайте журнала Биосферы до верстки и корректуры. Принятая к печати в № 4 от 2025 год. В окончательной версии возможны изменения.

гидробиологических показателей. Переменные «год», «месяц» и «коэффициент водообмена» в матрицу анализа не включались и использовались только при последующей интерпретации результатов ординации. Анализ выполнен по корреляционной матрице стандартизированных данных. Интерпретация главных компонент проводилась на основе величины и знака нагрузок переменных. Результаты представлены в табл. 2 и на рис. 13.

Табл. 2.

Результаты PCA-анализа массива данных и матрица факторных нагрузок гидрохимических и гидробиологических показателей Шершневского водохранилища

Компонента	**Собственные числа**	**Объясняемая дисперсия, %**	**Кумулятивная дисперсия, %**
PC1	4,64	29,00	29,00
PC2	3,86	24,16	53,16
PC3	1,45	9,09	62,26
PC4	1,10	6,91	69,16
PC5	1,08	6,74	75,9
PC6	0,95	5,91	81,82

Факторные нагрузки				
Показатель	*r (ГК1)*	*Вклад в ГК1, %*	*r (ГК2)*	*Вклад в ГК2, %*
Цветность	0,796	15,80	–0,405	3,70
Перманганатная окисляемость	0,782	13,93	–0,315	2,24
ХПК	0,834	10,18	0,108	0,26
Железо общее	0,705	10,07	–0,812	14,86
Взвешенные вещества	0,528	6,00	0,16	0,67
Фосфаты	0,466	9,41	–0,578	7,54
Нитриты	0,619	7,75	–0,751	12,69
$БПК_5$	0,491	4,87	0,644	10,46
Цинк	0,448	4,06	0,304	2,08
Численность фитопланктона	0,424	3,63	0,708	14,08
Медь	–0,313	2,12	–0,397	6,02
Кислород	–0,397	2,94	–0,252	1,43
Нитраты	–0,070	0,09	–0,762	12,83
Марганец	0,185	0,79	–0,587	5,87
pH	0,116	0,31	0,644	12,02
Аммоний	0,071	0,11	–0,087	0,13
Статистическая значимость p = 0,001				

Анализ собственных значений показал, что критерию Кайзера ($\lambda > 1$) соответствуют пять главных компонент. Их собственные значения составили 4,64; 3,87; 1,46; 1,11 и 1,08 соответственно. Совокупно данные компоненты объясняли 75,9% общей изменчивости исследованных показателей. Наибольший вклад в структуру многомерного пространства вносили первые две компоненты, объясняющие соответственно 29,0% и 24,2% общей дисперсии. Таким образом, пространство ГК1–ГК2 описывало 53,2% общей изменчивости гидрохимических и гидробиологических характеристик водохранилища.

Для интерпретации компонент учитывались показатели, имеющие коэффициент корреляции с главной компонентой $|r| \geq 0,60$. Именно такие переменные в наибольшей степени определяют экологический смысл соответствующей компоненты.

Первая главная компонента характеризовалась высокой положительной связью с химическим потреблением кислорода (r = 0,834), цветностью воды (r = 0,796), перманганатной окисляемостью (r = 0,782), содержанием железа (r = 0,705) и нитритов (r = 0,619). Наибольший вклад в формирование компоненты вносили цветность (15,80%), перманганатная окисляемость (13,93%), ХПК (10,18%), железо (10,07%). Показатели, тесно связанные с первой компонентой, характеризуют процессы, связанные с накоплением растворенного органического вещества и сопровождающей его миграцией железа.

Вторая главная компонента характеризовалась высокой положительной связью с численностью фитопланктона (r = 0,708), величиной pH (r = 0,644) и $БПК_5$ (r = 0,644), а также высокой отрицательной связью с содержанием железа (r = −0,812), нитратов (r = −0,762) и нитритов (r = −0,751). Наибольший вклад в формирование данной компоненты вносили железо (14,86%), численность фитопланктона (14,08%), нитраты (12,83%), нитриты (12,69%), pH (12,02%) и $БПК_5$ (10,46%). Таким образом, вторая главная компонента отражает биопродуктивность водохранилища и процессы трансформации органического вещества.

Визуализация результатов PCA представлена на рис. 13.

Статья опубликована на сайте журнала Биосферы до верстки и корректуры. Подлежит к печати с № 4 за 2026 год. Возможны изменения.

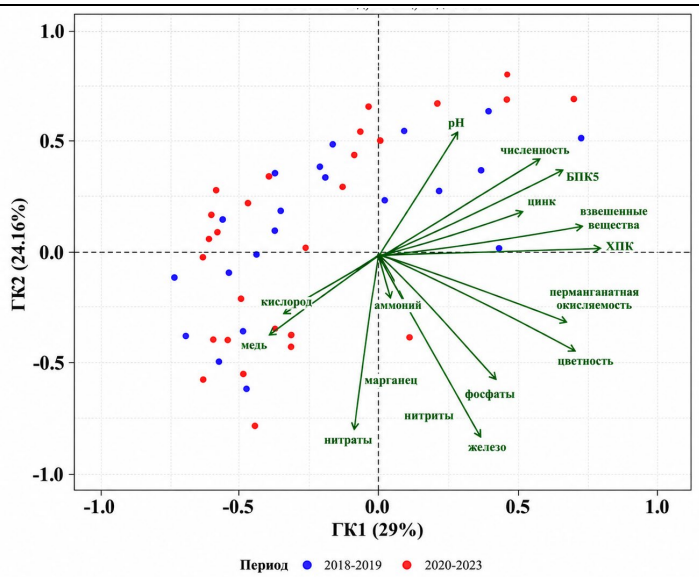


Рис. 13. PCA-биплот гидрохимических и гидробиологических показателей Шершнёвского водохранилища за 2018–2023 годы. См. комментарии в тексте.

Стрелки на рис. 13 отражают направление увеличения значений показателей, а их длина пропорциональна силе связи (корреляции) переменной с пространством первых двух главных компонент. Векторы перманганатной окисляемости и цветности располагаются практически параллельно друг другу, что свидетельствует об их высокой положительной взаимосвязи и совместном участии в формировании ГК1. По второй главной компоненте хорошо выражено разделение между двумя противоположными группами показателей. Векторы численности фитопланктона, $БПК_5$ и pH, характеризующие развитие биологической продукции и изменение кислотно-щелочного режима водоема, расположены близко друг к другу и имеют сходное направление. В противоположном направлении ориентированы железо общее, нитраты и нитриты, которые образуют компактную группу тесно взаимосвязанных переменных, отражающих процессы накопления растворенных форм биогенных элементов.

Каждая точка на диаграмме соответствует одному месяцу наблюдений и представляет собой совокупность всех исследованных гидрохимических и гидробиологических характеристик в данный период. Расстояние между точками отражает степень сходства гидрохимического состояния водохранилища: близко расположенные точки характеризуются сходным сочетанием показателей, тогда как удаленные соответствуют периодам с наиболее выраженными различиями. Несмотря на частичное перекрытие наблюдений, соответствующих периодам нормальных гидрометеорологических (2018–2019 годы) и засушливых условий (2020–2023 годы), на диаграмме наблюдается увеличение разброса точек в засушливый период. Полного разделения групп в пространстве PCA не наблюдается, что свидетельствует о сохранении общего режима функционирования экосистемы водохранилища даже в условиях продолжительной засухи. Вместе с тем засушливые годы характеризуются более высокой вариабельностью гидрохимического состояния, особенно по показателям, формирующим вторую главную компоненту.

Однако нужно учитывать, что месячные данные характеризуются высокой сезонной вариабельностью. Весенний паводок, летняя биологическая продукция, осеннее перемешивание и зимний подледный период формируют значительные различия между месяцами одного и того же года. Поэтому для выявления именно межгодовой направленности изменений были дополнительно рассчитаны годовые центроиды в пространстве PCA, которые представлены на рис. 14.

Годовой центроид представляет собой среднее положение всех месячных наблюдений соответствующего года по координатам ГК1 и ГК2. То есть годовой центроид характеризует усредненное многомерное состояние экосистемы за год. Такой подход позволяет разделить два уровня изменчивости: внутригодовой и межгодовой. Месячные наблюдения показывают сезонную структуру и разброс состояний водохранилища, тогда как годовые центроиды позволяют оценить траекторию изменения системы между годами и сопоставить ее с изменением коэффициента водообмена. После расчета центроидов коэффициент водообмена был наложен на пространство PCA как внешний гидрологический фактор. Это позволило оценить, в каком направлении изменяется усредненное состояние водоема при изменении водообмена. Цвет точек отражает величину годового коэффициента водообмена, стрелка показывает направление увеличения водообмена, рассчитанное по коэффициентам корреляции между водообменом и координатами годовых центроидов. Анализ графика показал, что водообмен имеет более тесную связь со второй главной компонентой ($r = 0{,}88$), чем с первой ($r = 0{,}38$) и его вклад в ГК2 составляет 77%. Следовательно, водообмен является одним из важнейших факторов, влияющих на численность фитопланктона, $БПК_5$ и pH, концентрацию железа общего, нитрат- и нитрит-ионов.

Статья опубликована в журнале «Биосфера» (ISSN 2076-7794). Полнотекстовая версия доступна на сайте журнала: http://www.biosphere-jrn.ru/ Для цитирования: Ершова Е.В. // Биосфера. 2026. Т. 18. № 1. С. 12–26. Возможны изменения.

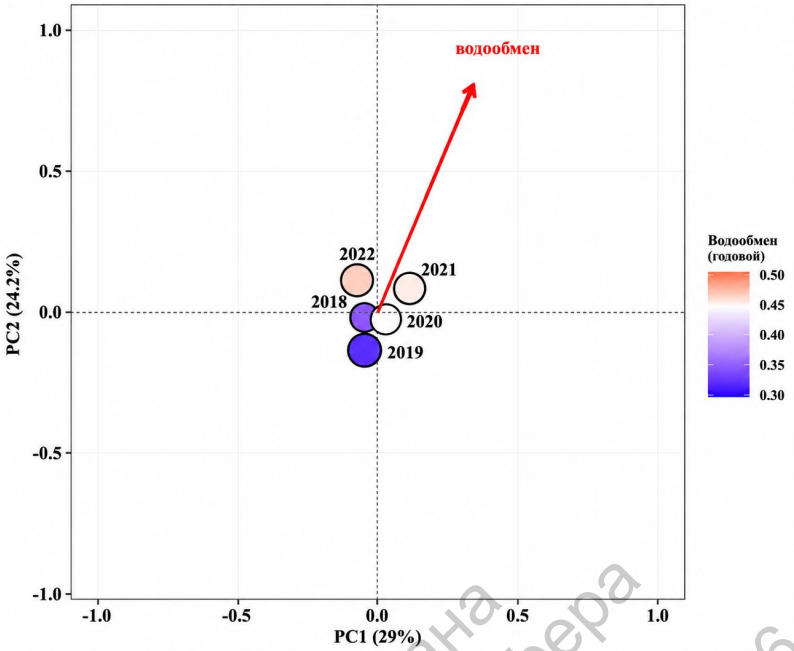


Рис. 14. Расположение годовых центроидов (2018–2023 годы.) в пространстве первых двух главных компонент (ГК1 и ГК2) и направление влияния годового коэффициента водообмена.

В гидрохимическом и гидробиологическом режиме водных масс наблюдается изменения в зависимости от гидрометеорологических условий, однако принципиальных трансформаций в экосистеме не происходит. Достаточно стабильное состояние обусловлено возросшим объемом воды поступающего с Аргазинского водохранилища, который приводит к сглаживанию динамики показателей качества воды, что также отмечено в [39].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В маловодные засушливые годы рост численности и биомассы фитопланктона стал в ШВХ основной тенденцией. Численность клеток водорослей достигала 470 млн кл/дм^3, биомасса увеличилась с 4 мг/дм^3 до 17 мг/дм^3. Cyanobacteria являлись абсолютно доминирующим отделом по численности и биомассе (более 90%), чему способствовали повышение температуры воды и воздуха и увеличение концентрации лабильных форм органического вещества.

В динамике содержания легкодоступного растворенного органического вещества для гидробионтов ($БПК_5$, перманганатная окисляемость, цветность) можно отметить его увеличение с наступлением засушливого периода. В годы с высоким уровнем развития численности фитопланктона происходит повышение содержания трудно окисляемого органического вещества (по ХПК). При этом наибольшая изменчивость вышеперечисленных показателей в экосистеме водохранилища отмечается в годы с количеством осадков и температурой значительно выше климатической нормы (2020–2021). Относительно высокие концентрации фосфатов в воде наблюдались в более прохладные периоды при низком развитии продукционных процессов, чем в более теплые годы. Однако принципиальных изменений в экосистеме ШВХ в продолжительных засушливых условиях засухи не наблюдается.

Использование статистического метода PCA (анализ главных компонент) показывает, что состояние водохранилища в 2018–2023 годах на 54% определяется двумя главными компонентами, которые сформированы двумя комплексами процессов. Первый комплекс связан с накоплением органического вещества и миграцией железа, тогда как второй отражает соотношение между биологической продуктивностью и накоплением растворенных форм азота и металлов. Анализ взаимосвязей главных компонент с водообменом показал, что этот фактор на 77% влияет на динамику численности фитопланктона, количество лабильного органического вещества ($БПК_5$) и процессы нитрификации. Вероятно, это обусловлено повышенным поступлением водных масс из вышерасположенного Аргазинского водохранилища, которые обеспечили удаление скоплений фитопланктона и продуктов разложения органического вещества. Таким образом, отсутствие выраженных изменений в гидрохимическом режиме ШВХ в засушливых условиях связано с антропогенным фактором – искусственно увеличенным объемам попусков с Аргазинского водохранилища. Дальнейшее изучение изменчивости данных факторов необходимо для разработки мероприятий по управлению водными объектами питьевого назначения, направленных на сохранение биологического разнообразия и устойчивости экосистем в условиях меняющегося климата и антропогенного воздействия.

Статья опубликована на сайте журнала Биосфера по результатам рецензирования и корректуры. Как принята к печати в № 4 за 2026 год. В окончательной версии возможны изменения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абакумов ВА. ред. Руководство по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений Л.: Гидрометеоиздат; 1983.
2. Афонина ЕЮ, Ташлыкова НА. Влияние факторов среды на структуру планктонных сообществ минеральных озер в разные фазы водности. Вестн МГУ Сер 16 Биол. 2019;74(1):3-9.
3. Гладкова ОВ, Ходоровская НИ. Видовая структура и эколого-географическая характеристика фитопланктонного сообщества Шершневского водохранилища в условиях возрастающего антропогенного воздействия. Научное обозрение. Биологические науки. 2019;(3):11-16.
4. Горохова ОГ. Сапробиологическая характеристика малых водоемов и водотоков Средне-Волжского биосферного резервата по водорослям-индикаторам. Биосфера. 2024;16(4):439-49. https://doi.org/10.24855/biosfera.v16i4.965
5. Гречушникова МГ, Соколов ДИ, Ерина ОН, Терешина МА, Ломов ВА, Ефимова ЛЕ. Сезонная и синоптическая изменчивость гидроэкологических характеристик слабопроточного долинного водохранилища. Метеорол гидрол. 2020;(8):92-101.
6. Грибовский ГП, Грибовский ЮГ, Плохих НА. Биогеохимические провинции Урала и проблемы техногенеза. В кн.: Техногенез и биогеохимическая эволюция таксонов биосферы. Труды биогеохимической лаборатории. Т. 24. М.: Наука; 2003. С. 174-87.
7. Григорьева ИЛ, Комиссаров АБ. Влияние абиотических факторов на формирование сообществ фитопланктона Иваньковского водохранилища. В кн.: Биология водных экосистем в XXI веке: факты, гипотезы, тенденции. Тезисы докладов Всероссийской конференции. 2021. С. 52.
8. Григорьева ИЛ. Влияние гидрометеорологических факторов на гидрохимические характеристики Угличского водохранилища в летний период. Вестн Твер гос ун-та. Сер геогр геоэкол. 2023;1(41):16-25. https://doi.org/10.26456/2226-7719-2023-1-16-25
9. Кашулин НА, Беккелунд АК. Изменения климата и цветение арктического озера Имандра. Биосфера. 2022;14(2):98-125. http://dx.doi.org/10.24855/biosfera.v14i2.673
10. Китаев АБ. Методы оценки внешнего водообмена водохранилищ. Геогр вестн. 2005;(1-2):73-81.
11. Кольцова ТИ. Определение объема и поверхности клеток фитопланктона. Биол науки. 1970;(6):114-20.
12. Котовщиков АВ, Долматова ЛА, Сутченкова ОС. Изменение экологического состояния среднего руслового таежного водохранилища хозяйственно-питьевого назначения через 60 лет его существования. Вода: химия и экология. 2017;(1):3-10.
13. Кравцова АВ, Ходоровская НИ, Левина СГ. Современное состояние донных отложений Шершневского водохранилища. Современные материалы и методы решения экологических проблем постиндустриальной агломерации : сборник материалов II всероссийской научно-практической конференции; 2024 Дек 16–18, Челябинск, Россия. Челябинск: Южно-Уральский государственный университет; 2025. С. 23-28.
14. Кравцова АВ, Ходоровская НИ, Ячменев ВА, Баженова ВВ. Особенности многолетней динамики развития гидрохимических показателей воды Шершневского водохранилища. Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2021;(5):8-28. https://doi.org/ 10.35567/1999-4508-2021-5-1.
15. Кременецкая ЕР, Белова СЛ, Соколов ДИ. Особенности баланса органического вещества в долинном водохранилище в летний период при пониженном уровне воды. В кн.: Современные проблемы водохранилищ и их водосборов. Труды Международной научно-практической конференции. Пермь; 2011. С. 121-6.
16. Ларионов ЮВ, Скопинцев БА. Перманганатная и бихроматная окисляемость органического вещества взвесей водоемов разной степени трофности. Биол внутр вод: Информ бюл. 1980;(46):49-53.
17. Определитель пресноводных водорослей СССР. Т. 1-14. М.-Л.: Изд-во АН СССР; 1951-1986.
18. Отюкова НГ. Органическое вещество в водных объектах особо охраняемых природных территорий на примере притоков озера Плещеево (Ярославская обл.) и реки Таденки Приокско-Террасного биосферного заповедника (Московская обл.). Водные ресурсы. 2021;48(3):344-53. https://doi.org/10.31857/S0321059621030111
19. Рижинашвили АЛ. Контуры теории функционирования водных экосистем: биогенное лимитирование. Усп совр биол. 2022;142(3):253-67. https://doi.org/10.31857/S004213242203006
20. Рижинашвили АЛ. Углеводы в водных экосистемах и их возможная связь с жизнедеятельностью организмов различных трофических уровней. Усп совр биол. 2019;139(1):75-83. https://doi.org/10.1134/S0042132419010083
21. Румянцев ВА, Крюков ЛН, Поздняков ШР, Жуковский АВ. Цианобактериальное "цветение" воды – источник проблем природопользования и стимул инноваций в России. Общество. Среда. Развитие. 2011;2(19):222-228.
22. Садчиков АП, Остроумов СА, Котелевцев СВ. Продукционная и трофическая роль размерных групп фитопланктона: вклад в первичную продуктивность и формирование качества воды. Использование и охрана природных ресурсов в России. 2018;(3):72-5.

Статья получена в редакцию 20.01.2026 г.
Принята к публикации после рецензирования и корректуры
Дата публикации в журнале № 4-25 2026 год.
На сайте журнала в свободном доступе
В окончательном варианте возможны изменения.

23. Садчиков АП, Остроумов СА. Водоросли и цианобактерии, как факторы формирования фонда растворенных органических веществ и качества воды, в водоеме при отмирании клеток. Рыбное хозяйство. 2020;(6):53-8. https://doi.org/10.37663/0131-6184-2020-6-53-58
24. Садчиков АП, Остроумов СА. Качество воды и роль микробиоты в водоемах различного трофического уровня: взаимосвязи между растворенным органическим веществом, бактериями, водорослями и детритом. Водоочистка Водоподготовка Водоснабжение. 2020;(10):10-7.
25. Садчиков АП. Методы изучения пресноводного фитопланктона. М.: Университет и школа; 2003.
26. Селезнев ВА, Беспалова КВ, Селезнева АВ. Сезонная изменчивость содержания фосфатов в Волжской воде в условиях антропогенного эвтрофирования водохранилищ. Хим технол воды. 2018;40(5):573-80.
27. Соколов ДИ. Изменение окисляемости и цветности воды под влиянием водохранилища. Вестн МГУ Сер 5 География. 2013;(6):9-15.
28. Степанова ИЭ. Характеристики органического вещества в Рыбинском водохранилище на современном этапе. Вода: химия и экология. 2015;(10):3-10.
29. Цветкова ЛИ. Оценка трофического состояния поверхностных вод. СПб.: СПбГАСУ; 2008.
30. Шашуловская ЕА, Мосияш СА, Далечина ИН, Филимонова ИГ, Гришина ЛВ, Кузина ЕГ, Шашуловская ОВ. Динамика трофических показателей малого равнинного водохранилища в разные периоды его существования (на примере Пензенского водохранилища на р. Сура). Журн Сиб федер ун-та сер биол. 2020;13(4):368-86. https://doi.org/10.17516/1997-1389-0334
31. Шашуловская ЕА, Мосияш СА, Далечина ИН. Особенности гидрохимического состава и структуры фитопланктона крупного водохранилища в годы, контрастные по гидрологическому и температурному режиму. В кн.: Современные проблемы водохранилищ и их водосборов. Труды VIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Пермь; 2021. С. 392-7.
32. Шашуловская ЕА, Мосияш СА. Пространственно-временная изменчивость гидрохимических показателей Ириклинского водохранилища в современных условиях. Изв РАН Сер геогр. 2022;86(5):697-714. https://doi.org/10.31857/S2587556622050119
33. Шитиков ВК, Зинченко ТД. Многомерный статистический анализ экологических сообществ (обзор). Теор прикл экол. 2019;(1):5-11. https://doi.org/10.25750/1995-4301-2019-1-005-011.
34. Adrian R, O'Reilly CM, Zagarese H, et al. Lakes as sentinels of climate change. Limnol Oceanogr. 2009;54(6, part 2):2283-97. doi:10.4319/lo.2009.54.6_part_2.2283.
35. Andersen I, Williamson T, González MJ, Vanni MJ. Nitrate, ammonium, and phosphorus drive seasonal nutrient limitation of chlorophytes, cyanobacteria, and diatoms in a hyper-eutrophic reservoir. Limnol Oceanogr. 2019;65(5):1-17. doi:10.1002/lno.11363.
36. Andersen JH, Schlüter L, Ærtebjerg G. Coastal eutrophication: Recent developments in definitions and implications for monitoring strategies. J Plankton Res. 2006;28(7):621-28. doi:10.1093/plankt/fbl001.
37. Desarbo WS. Redundancy analysis. In: Encyclopedia of statistical sciences. Vol. 11. New Jersey: John Wiley & Sons; 2006. P. 7031-5.
38. Fragoso CR, Motta Marques DML, Ferreira TF, et al. Potential Effects of Climate Change and Eutrophication on a Large Subtropical Shallow Lake. Environ Model Softw. 2011;26:1337-48.
39. Liu X, Song Y, Ni T, et al. Ecological evolution of algae in connected reservoirs under the influence of water transfer: Algal density, community structure, and assembly processes. Sci Total Environ. 2024;915: 170086. doi10.1016/j.scitotenv.2024.170086.
40. Mayer LM, Liotta FP, Norton SA. Hypolimnetic redox and phosphorus cycling in hypereutrophic Lake Sebasticook, Maine. Water Res. 1982;16(7):1189-96. doi:10.1016/0043-1354(82)90137-3.Aa
41. Moore JW, Ramamoorthy S. Heavy metals in natural waters: applied monitoring and impact assessment. New York: Springer-Verlag; 1983. 270 p.
42. Pearce AR, Chambers LG, Hasenmueller EA. Characterizing nutrient distributions and fluxes in a eutrophic reservoir, Midwestern United States. Sci Total Environ. 2017;581:589-600. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.01.002.
43. Poikane S, Kelly MG, Salas F, et al. Nutrient criteria for surface waters under the European Water Framework Directive: Current state-of-the-art, challenges and future outlook. Sci Total Environ. 2019;695:133888. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.133888.
44. Schindler DW, Hecky RE. Eutrophication: More nitrogen data needed [Letter]. Science. 2009;324(5928):721-2. doi:10.1126/science.324_721b.
45. Shimoda Y, Azim E, Perhar G, Ramin M, Kenney M, Sadraddini S, et al. Our current understanding of lake ecosystem response to climate change: what have we really learned from the north temperate deep lakes? J Great Lakes Res. 2011;37(2):173-93. doi:10.1016/j.jglr.2010.10.004.
46. Sinang SC, Reichwaldt ES, Ghadouani A. Local nutrient regimes determine site-specific environmental triggers of cyanobacterial and microcystin variability in urban lakes. Hydrol Earth Syst Sci. 2015;19:2179-95. doi:10.5194/hess-19-2179-2015.
47. Sokal RR. Biometry: the principles and practice of statistics in biological research. 4th ed. New York: Freeman; 2012. 937 p.
48. U.S. Global Change Research Program. National Climate Assessment [Internet]. 2014 [cited 2022 Oct 2]. Available from: https://nca2014.globalchange.gov/report.

Статья отобрана для публикации в журнале «Водное хозяйство России» по результатам рецензирования и корректуры автора. Опубликована в № 4 за 2026 год. Допустимы незначительные изменения.

49. Ventela AM, Kirkkala T, Lendasse A, Tarvainen M, Helminen H, Sarvala J. Climate-related challenges in long-term management of Säkylän Pyhäjärvi (SW Finland). Hydrobiologia. 2011;660:49-58. doi:10.1007/s10750-010-0415-4.
50. Wood CM, Farrell AP, Brauner CJ, editors. Homeostasis and toxicology of essential metals. Fish physiology series. Vol. 31A. New York: Academic Press; 2012a. 497 p.
51. Wood CM, Farrell AP, Brauner CJ, editors. Homeostasis and toxicology of non-essential metals. Fish physiology series. Vol. 31B. New York: Academic Press; 2012b. 507 p.
52. Xia R, Zhang Y, Critto A, et al. The Potential Impacts of Climate Change Factors on Freshwater Eutrophication: Implications for Research and Countermeasures of Water Management in China. Sustainability. 2016;8(3):229. doi:10.3390/su8030229.
53. Yin Y, Yang K, Gao M, et al. Declined nutrients stability shaped by water residence times in lakes and reservoirs under climate change. Sci Total Environ. 2024;953:133888.

Статья опубликована на сайте журнала Биосфера до верстки и корректуры как принятая к печати в № 4 за 2026 год. В окончательной версии возможны изменения.