УДК 504.465; 556.314; 550.46 *https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-1-94-108*

Оригинальная статья/Original paper

Гидрохимический режим Волгоградского водохранилища в подледные периоды 2011–2024 годов

Е. А. Шашуловская, С. А. Мосияш

shash.elena2010@yandex.ru

Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии, Саратовский филиал, г. Саратов, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Подледный (зимний) период на водохранилищах в силу естественных факторов способствует формированию специфического гидрохимического режима. Изучение динамики основных гидрохимических компонентов подо льдом является актуальной задачей в связи с современной трансформацией климата, которая проявляется в основном в зимний период и связана с вариациями Североатлантического колебания (North Atlantic Oscillation, NAO) – маркера глобальных атмосферных процессов. В связи с этим цель нашей работы – оценка динамики основных гидрохимических компонентов Волгоградского водохранилища в подледные периоды 2011–2024 гг. с учетом изменения его гидрологического режима и метеорологических процессов. **Методы.** Исследовали содержание pH, растворенного кислорода, главных ионов, органического вещества, биогенных элементов по общепринятым методикам. Использовали корреляционный анализ для выявления взаимосвязи между гидрохимическими и гидрологическими параметрами, метод главных компонент – для исследования структуры исходных показателей. **Результаты.** За исследуемый период отмечен положительный тренд суммы ионов натрия и калия и слабая тенденция увеличения содержания хлоридов и сульфатов. Минерализация колебалась в интервале 315–402 мг/дм^3. С динамикой индекса NAO согласуются изменения годового водного притока Волгоградского водохранилища. Отмечена связь между изменениями зимнего притока и индекса NAO за осенний период предшествующего года. Наиболее тесная связь между этими показателями наблюдалась в 2016–2024 гг. с коэффициентом корреляции r = 0,89. Величина зимнего притока связана корреляционными отношениями с показателями общего и аллохтонного органического вещества. Отмечена согласованная динамика между водностью в зимний период и концентрациями минерального азота и общего железа. На содержание хлоридов, сульфатов и лабильного органического вещества значительное влияние оказывает антропогенный фактор. Межгодовая динамика минерального фосфора, в отличие от других исследованных компонентов, более специфична и определяется не только гидрологическими, но и метеорологическими факторами, маркером которых является индекс NAO. Полученные зависимости могут быть использованы для прогноза содержания тех или иных ингредиентов в связи с изменением водного баланса в зимний период.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Волгоградское водохранилище, зимний период, водный сток, солевой состав, органическое вещество, биогенные элементы, индекс Североатлантического колебания

Для цитирования: Шашуловская Е. А., Мосияш С. А. Гидрохимический режим Волгоградского водохранилища в подледные периоды 2011–2024 годов // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2026. № 1. С. 94–108. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-1-94-108; EDN: DOUFPK

Hydrochemical conditions of the Volgograd reservoir during the ice-covered periods of 2011–2024

Elena A. Shashulovskaya ✉, **Svetlana A. Mosiyash**

✉ shash.elena2010@yandex.ru

Russian Research Institute of Fisheries and Oceanography, Saratov Branch, Saratov, Russia

ABSTRACT

Relevance. The ice-covered (winter) period on reservoirs, due to natural factors, contributes to the formation of a specific hydrochemical conditions. Studying the dynamics of the main hydrochemical components under the ice is an urgent task due to the current climate transformation, which manifests itself mainly during the winter period and is associated with variations in the North Atlantic Oscillation (NAO), a marker of global atmospheric processes. In this regard, the purpose of our work is to assess the dynamics of the main hydrochemical components of the Volgograd Reservoir during the ice-covered periods of 2011–2024, taking into account changes in its hydrological conditions and meteorological processes. **Methods.** The content of pH, dissolved oxygen, major ions, organic matter, and biogenic elements was studied using conventional methods. Correlation analysis was used to identify the relationship between hydrochemical and hydrological parameters, and the principal component analysis was used to study the structure of the initial indicators. **Results.** During the study period, there was a positive trend in the sum of sodium and potassium ions, and a slight increase in the content of chlorides and sulfates. The mineralization ranged from 315 to 402 mg/dm^3. Changes in the annual water inflow of the Volgograd Reservoir are consistent with the dynamics of the NAO index. There is a correlation between changes in the winter inflow and the NAO index for the autumn period of the previous year. The strongest correlation between these indicators was observed in 2016–2024, with a correlation coefficient of r = 0,89. The magnitude of the winter inflow is correlated with the total and allochthonous organic matter. There is a consistent relationship between winter water content and concentrations of mineral nitrogen and total iron. The content of chlorides, sulfates, and labile organic matter is significantly influenced by anthropogenic factors. Unlike other components studied, the interannual dynamics of mineral phosphorus is more specific and is determined not only by hydrological but also by meteorological factors, as indicated by the NAO index. The obtained dependencies can be used to predict the content of certain ingredients in connection with changes in the water balance during the winter season.

KEYWORDS: Volgograd Reservoir, ice-covered period, water runoff, salt composition, organic matter, biogenic elements, North Atlantic Oscillation Index

For citation: Shashulovskaya E. A., Mosiyash S. A. Hydrochemical conditions of the Volgograd reservoir during the ice-covered periods of 2011–2024. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2026. No. 1. P. 94–108. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-1-94-108; EDN: DOUFPK

ВВЕДЕНИЕ

Волгоградское водохранилище, как крупный водоем комплексного назначения, замыкающий Волжский каскад, в силу своей значимости является объектом многолетних гидрохимических исследований, которые проводятся в основном в весенне-осенний (безледный) период [1–3 и др.]. Между тем в зимний сезон в результате современной трансформации климата наблюдают-

ся частые зимние оттепели, уменьшается промерзание почвы, увеличивается частота зимних паводков с инфильтрацией талых и пополнением грунтовых вод, сокращаются сроки ледостава на реках и водохранилищах [4–7]. Ледостав на Волгоградском водохранилище в настоящее время сократился до 50–105 сут. В этот период ряд естественных факторов (прекращение внешнего газообмена водных масс, резкое уменьшение ветро-волнового воздействия и активности биоты, низкая температура, отсутствие поверхностного стока, преобладание грунтового питания) приводит к замедлению внутриводоемных процессов и способствует формированию специфического гидрохимического режима. Это делает все более актуальным изучение динамики основных гидрохимических компонентов подо льдом и роли этого периода в процессах всей экосистемы.

Опубликованные в современной литературе материалы зимних гидрохимических исследований немногочисленны [8–12]. В подледный период отмечается уменьшение концентрации растворенного кислорода вследствие снижения гидродинамической активности и уровня фотосинтеза. Содержание кислорода определяется глубиной водоема и скоростью разложения органики. Соответственно, последствия органического загрязнения зимой проявляются более четко. Увеличиваются минерализация и содержание минеральных форм азота и фосфора преимущественно за счет подземного питания и антропогенной нагрузки. В подледный период на водохранилищах сезонного регулирования стока снижается уровень воды вследствие естественного уменьшения приточности на фоне расходования воды для нужд энергетики и водоснабжения [13]. Следствием понижения уровня воды является образование значительных площадей обсыхания ледяного покрова, перемещение зон переменного подпора, изменение конфигурации береговой линии. В результате наблюдается значительная гетерогенность концентраций химических ингредиентов по акватории [12].

Бассейн Волги, занимающий практически всю территорию европейской части России южнее 60° с.ш., находится в зоне влияния Северной Атлантики, что является важнейшим фактором режима тепло- и влагообеспеченности в регионе [14]. Степень этого воздействия зависит от усиления или ослабления зонального переноса, показателем которого является индекс Североатлантического колебания (North Atlantic Oscillation, NAO).

Цель данной работы – оценка динамики гидрохимического режима Волгоградского водохранилища в подледные периоды 2011–2024 гг. с учетом изменения его притока, а также глобальных атмосферных процессов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материал отбирали в 2011, 2013, 2014, 2016–2024 гг. со льда преимущественно в феврале на русловых и литоральных участках верхней зоны водохранилища: выше (ст. Пристанное, Усть-Курдюм, Затон) и ниже г. Саратова (ст. Увек, Князевка). Всего отобрано и обработано 68 проб. Исследования ги-

дрохимического режима проводили по показателям реакции среды pH, кислородного режима, солевого состава, биогенных и органических веществ по стандартным методикам. Минерализацию оценивали расчетным методом как сумму показателей главных ионов.

Объем водного притока к водохранилищу через плотину Саратовской ГЭС рассчитывали по данным, доступным на сайте ПАО «РусГидро»[1]. Трансформированные ряды значений индекса NAO заимствованы из открытого доступа[2]. Сумма атмосферных осадков получена из архива[3] и была рассчитана за сентябрь – декабрь предшествующего года по данным метеостанции г. Казани, поскольку территория Средней Волги является стокообразующей для водохранилищ Нижней Волги. Объем зимнего притока и величину индекса NAO_w оценивали как сумму показателей за декабрь предыдущего года и январь и февраль текущего. Также в расчетах использовали суммарное значение индекса NAO_o за сентябрь – декабрь предшествующего года.

Коэффициенты детерминации (R^2) и корреляции Пирсона (r) вычисляли в MS Excel 2010 и STATISTICA 10, статистическую достоверность оценивали при уровне значимости (p) < 0,05. Использовали метод главных компонент для исследования структуры исходных гидрохимических показателей.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Гидролого-климатические характеристики в период исследования

Основное влияние на формирование гидрохимического режима Волгоградского водохранилища оказывает вышерасположенное Саратовское водохранилище. Боковая приточность в Волгоградском водохранилище незначительна (< 1 % от общего поверхностного притока) [15]. За исследуемый период объем зимнего притока фиксировали в пределах 37,0–57,6 км^3 (табл. 1), и его динамика согласованно изменялась с годовыми величинами с коэффициентом корреляции r = 0,76 при p = 0,00. Синхронность колебания этих показателей прослеживается для большинства рек европейской части России [16].

В маловодные годы (2011, 2015, 2022, 2023) объем зимнего притока к Волгоградскому водохранилищу колебался в пределах 37,0–39,4 км^3, в многоводные (2013, 2017, 2020) – возрастал в 1,2–1,5 раза. Увеличение водности рек в зимний период определяется сложными взаимосвязями метеорологических и стоковых характеристик, в основе которых могут лежать повышение количества осадков за предшествующий осенний период и изменение режима температуры воздуха [16]. Количество осенних осадков определяет водность зимнего

1 Филиал ПАО «РусГидро» – «Саратовская ГЭС», RUS. URL: http://www.volges.rushydro.ru (дата обращения: 25.08.2025).

2 National Weather Service, Climate Prediction Center, USA. Web page. URL: https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/pna/nao.shtml (дата обращения: 13.05.2025).

3 Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных (ВНИИГМИ-МЦД), RUS. URL: http://www.meteo.ru (дата обращения 10.09.2025).

периода и формирует запасы подземных вод, которые играют основную роль в питании реки в этот период. Сумма отрицательных температур воздуха в зимний период сокращает сток на водосборе из-за более глубокого промерзания почв. Диапазон количества атмосферных осадков, выпавших в районе Средней Волги, колебался от 113 до 306 мм с максимумом в период 2011–2012 гг. и в 2023 г. Самой теплой была зима 2020 г., холодной – 2011 г. Возможно, сложные взаимодействия вышеуказанных метеорологических характеристик (табл. 1) могли обусловить в определенной степени динамику зимнего притока к Волгоградскому водохранилищу.

Таблица 1. Гидролого-климатические характеристики исследуемого периода 2011–2024 гг.
Table 1. Hydrological and climatic characteristics of the study period 2011–2024

Год	Зимний приток к Волгоградскому водохранилищу, км^3	Годовой приток к Волгоградскому водохранилищу, км^3	NAO_o	NAO_w	Атмосферные осадки, мм	Температура воздуха зимой, °С
2011	37,0	199,3	–5,19	–0,18	281	–12,7
2012	42,4	242,0	4,81	1,59	286	–10,4
2013	57,6	272,8	–3,06	–0,10	263	–9,7
2014	54,8	227,0	0,81	1,63	236	–8,5
2015	39,3	204,0	2,89	3,11	191	–7,6
2016	51,7	266,5	3,77	1,70	196	–5,9
2017	45,9	287,5	1,34	1,48	243	–9,8
2018	57,6	271,7	0,46	3,02	262	–8,4
2019	44,5	235,3	3,10	0,88	143	–8,5
2020	57,3	299,1	–0,09	2,60	138	–3,5
2021	44,0	218,6	2,57	–0,97	113	–11,9
2022	38,0	204,4	–2,39	2,76	201	–7,0
2023	40,8	206,1	–1,79	2,17	306	–9,1
2024	39,4	235,0	–0,85	1,30	233	–10,7

Изменения зонального переноса в Северном полушарии в зимний сезон в основном следуют вариациям NAO[4], которые обусловливают скорость ветра и его направление, температуру воздуха и режим осадков над Европейским континентом [17]. Все эти факторы определяют гидрологический режим рек и водохранилищ.

В начале XXI в. в динамике годового индекса NAO наблюдалось два периода: снижение до 2010 г. и последующая тенденция к возрастанию [2]. С динамикой индекса согласуются изменения годового водного стока Волгоградского водохранилища: в 2001–2010 гг. отмечен отрицательный тренд (R^2 = 0,39), с 2011 по 2022 г. наблюдалось некоторое увеличение его объема [2]. Изменения зимнего притока и индекса NAO_o в исследуемый период показаны на рис. 1.

4 Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. СПб.: Наукоемкие технологии, 2022. 124 с.

Наиболее тесная связь между этими показателями отмечена в 2016–2024 гг. с коэффициентом корреляции r = 0,89. Причиной нарушения синхронности колебаний показателей может быть антропогенный фактор – регулирование стока через гидротехническое сооружение (ГЭС).

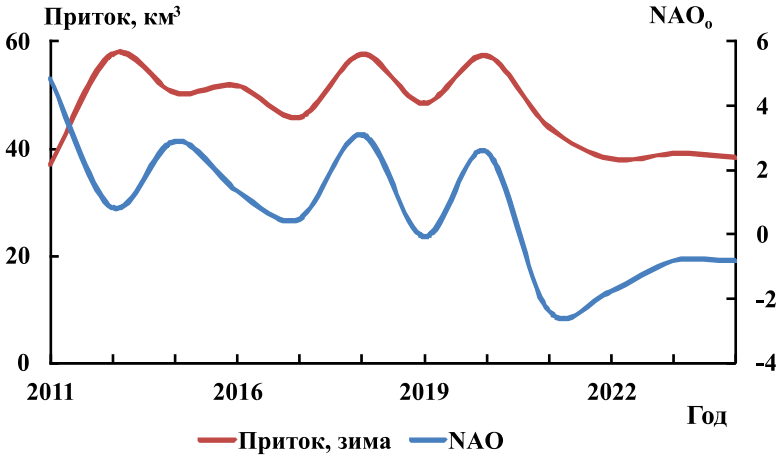


Рис. 1. Динамика объема зимнего притока воды к Волгоградскому водохранилищу и значений индекса NAO_o в период 2011–2024 гг.
Fig. 1. Dynamics of the volume of winter water inflow to the Volgograd Reservoir and the NAO_O index values in the period 2011–2024

Реакция среды pH, растворенный кислород, солевой состав

Реакция среды pH колебалась в интервале 6,9–8,6. Содержание растворенного кислорода изменялось от 7,6 до 12,6 мг/дм³. Более низкие концентрации O_2 отмечены на литоральных участках, в русловой части водохранилища значения элемента достигали 9,9–12,6 мг/дм³.

Минерализация воды Волгоградского водохранилища в зимний период колебалась от 315 до 402 мг/дм³, наблюдали некоторое повышение показателя за исследованный период (R^2 = 0,26 при p = 0,09). Доминирующими ионами, как и в вегетационный сезон, являлись гидрокарбонаты и кальций (табл. 2).

Концентрации ионов Ca^{2+}, Mg^{2+}, HCO_3^- за исследуемый период колебались на одном уровне, в то время как в содержании суммы Na^+ и K^+ отмечен положительный тренд (R^2 = 0,35 при p = 0,04), а в динамике Cl^- и SO_4^{2-} наблюдали слабую тенденцию к повышению концентраций (R^2 = 0,19–0,22 при p = 0,12–0,16). Между величинами зимнего притока и содержанием сульфатов фиксировали отрицательную достоверную связь (r = –0,64 при p = 0,02). Причем максимальные концентрации сульфатов отмечены в 2023–2024 гг. и могли быть обусловлены увеличением количества осадков в стокообразующей зоне в предшествующий осенний период (табл. 1). Возможно, повышенные концентрации этого соединения связаны с антропогенным фактором. К подобному выводу пришел автор статьи [10] при исследовании зимнего режима Угличского водохранилища.

Таблица 2. Средние значения главных ионов (в мг*экв/дм^3) и минерализации (мг/дм^3) в воде Волгоградского водохранилища в подледные периоды 2011–2024 гг.
Table 2. Average values of major ions (in mg*eq/dm^3) and mineralization (mg/dm^3) in the water of the Volgograd Reservoir during the ice–covered periods of 2011–2024

Год исследования	Ca^{2+}	Mg^{2+}	$Na^+ + K^+$	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Минерализация
2011	3,03	1,09	0,75	2,68	0,76	1,43	350
2013	2,58	0,99	0,79	2,68	0,87	0,81	315
2014	3,15	1,55	0,17	3,00	0,84	1,03	349
2016	2,70	1,03	0,64	2,80	0,91	0,66	316
2017	3,46	1,03	0,95	3,13	0,92	1,39	394
2018	3,08	1,50	0,52	3,20	0,75	1,15	369
2019	3,00	1,14	1,16	3,10	0,90	1,25	382
2020	2,43	1,18	0,90	2,70	0,79	1,03	326
2021	2,80	1,70	0,45	3,00	1,18	0,77	349
2022	2,86	1,10	1,04	2,84	0,93	1,23	360
2023	2,87	1,07	1,65	2,84	0,95	1,80	402
2024	2,85	1,29	1,22	2,77	0,92	1,62	382

Органическое вещество

Значения цветности и перманганатной окисляемости (ПО) главным образом характеризуют органическое вещество (ОВ) аллохтонного происхождения. По величине бихроматной окисляемости (ХПК) судят о количестве общего ОВ. Показатель $БПК_5$ характеризует содержание легкоокисляемого ОВ. Величины исследованных показателей приведены в табл. 3.

В зимние периоды исследуемых лет показатели содержания общего и аллохтонного ОВ связаны между собой корреляционными отношениями: статистическая связь между ними колебалась от 0,71 до 0,76 ($p < 0,05$). Величина зимнего притока связана с показателями ПО, ХПК и цветности воды ($r = 0,56–0,75$ при $p = 0,01–0,04$). Связь между содержанием лабильного ОВ и объемом зимнего притока отсутствовала. Очевидно, ОВ в зимний период в основном представлено гуминовыми и фульвокислотами, поступающими с водосбора, а в балансе легкоокисляемого ОВ определенную роль играют антропогенные источники.

Экстремальные и средние концентрации показателей ОВ в зимний период выше, чем в вегетационный (табл. 3), что связано, очевидно, со спецификой ус-

ловий подледного периода: ограничение поступления кислорода и замедление окислительных процессов, низкая температура и снижение активности биоты.

Одним из последствий потепления климата выступает браунификация озер и рек, т. е. увеличение цветности воды в результате возрастания стока гумусовых веществ и связанного с ними железа [18]. Для Волгоградского водохранилища характерны невысокие значения цветности. Однако в отдельные годы повышенного притока в зимний период (2013, 2018, 2020 гг.) окраска воды возрастала до 50–61 градуса. Очевидно, что максимальные значения цветности связаны с увеличением доли стока с заболоченных водосборов Верхней Волги в годы высокой водности (2013, 2018) или с аномально теплой погодой зимы 2019–2020 гг., которая могла способствовать вымыванию гумуса из прибрежных почв и развитию биохимических процессов, не свойственных данному сезону.

Таблица 3. Содержание ОВ и биогенных элементов в зимние и вегетационные периоды 2011–2024 гг. (в числителе приведены пределы колебания, в знаменателе – среднее значение и его ошибка)
Table 3. Content of organic matter and biogenic elements in the winter and growing seasons of 2011–2024. (the numerator shows the range of fluctuations, and the denominator shows the average value and its error)

Показатель	Зимний период	Вегетационный период*
Цветность, градусы	$\frac{20-61}{36\pm4}$	$\frac{21-37}{29\pm2}$
ПО, мгО/дм^3	$\frac{6,7-13,4}{8,8\pm0,6}$	$\frac{5,6-8,5}{7,3\pm0,3}$
ХПК, мгО/дм^3	$\frac{20-46}{32\pm2}$	$\frac{21-40}{26\pm1}$
БПК$_5$, мгО$_2$/дм^3	$\frac{0,6-4,7}{2,6\pm0,3}$	$\frac{1,5-3,1}{2,1\pm0,2}$
N–NH$_4$, мг/дм^3	$\frac{<0,02-0,47}{0,17\pm0,03}$	$\frac{0,11-0,29}{0,18\pm0,02}$
N–NO$_3$, мг/дм^3	$\frac{0,46-0,97}{0,65\pm0,04}$	$\frac{0,16-0,94}{0,40\pm0,03}$
P–PO$_4$, мг/дм^3	$\frac{0,018-0,10}{0,067\pm0,006}$	$\frac{0,024-0,084}{0,050\pm0,005}$
Si, мг/дм^3	$\frac{2,8-5,8}{3,7\pm0,2}$	$\frac{2,9-3,6}{3,3\pm0,1}$
Fe, мг/дм^3	$\frac{0,14-0,46}{0,26\pm0,03}$	$\frac{0,14-0,26}{0,22\pm0,01}$

Примечание: * – по [1, 3].

Биогенные элементы

С объемом водного притока в зимний период статистически связано содержание аммония, нитратов и железа (r = 0,66–0,80 при p = 0,00–0,03). Снижение водности в зимние периоды исследуемых лет, очевидно, явилось причиной отрицательного тренда этих элементов (рис. 2).

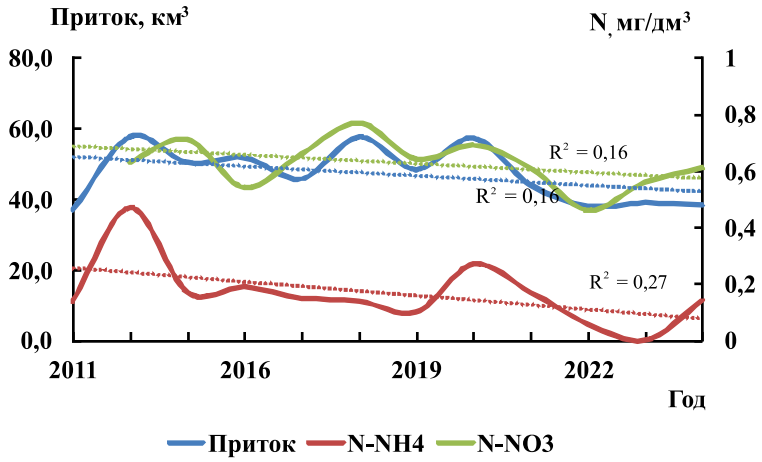


Рис. 2. Динамика притока и соединений азота в воде Волгоградского водохранилища в зимние периоды 2011–2024 гг. (пунктирными линиями показаны основные тенденции изменения показателей)

Fig. 2. Dynamics of the inflow and nitrogen compounds in the water of the Volgograd Reservoir in the winter periods of 2011–2024 (the dotted lines show the main trends in the change of indicators)

Максимальные и средние концентрации минерального фосфора в зимний период выше, чем в вегетационный (табл. 3), когда элемент активно расходуется при биопродукционных процессах. Сезонная динамика фосфатов характеризовалась увеличением концентраций элемента к осени [3], так что его максимальные значения в зимний период могут быть обусловлены накоплением за вегетационный. В вегетационный сезон выявлено также согласованное изменение трендов динамики годового индекса NAO и минерального фосфора [1]. Как в зимний период, так и в вегетационный не отмечено корреляционных отношений фосфатов с другими элементами, соединениями или гидрологическими характеристиками.

Статистическая связь межгодовой динамики содержания фосфатов в зимние периоды исследуемых лет и индекса NAO_o приближается к достоверному уровню ($r = 0,57$ при $p = 0,07$). Количественные показатели минерального фосфора зимой в воде Волгоградского водохранилища определяются водностью не только зимнего сезона, но и предшествующего осеннего, что обусловливает достоверную статистическую связь между суммарным притоком за эти периоды и содержанием этого элемента ($r = 0,61$, $p = 0,05$). Таким образом, с определенной долей вероятности можно предположить, что на содержание фосфора влияют не только гидрологические, но и метеорологические факторы, маркером которых является индекс NAO.

Среднее содержание железа и кремния, вторых по значимости для биологической продуктивности биогенных элементов, в зимние периоды исследуемых лет колебалось в пределах 0,14–0,46 и 2,8–5,8 мг/дм³ соответственно (табл. 3). Максимальные концентрации железа отмечены в годы наибольше-

го зимнего притока (2013, 2020). Динамика железа связана с колебаниями цветности как в зимний период (r = 0,81, p = 0,001) (рис. 3), так и в вегетационный (r = 0,86 при p = 0,02) [3]. В последние десятилетия увеличение концентрации железа отмечается в водных объектах, расположенных на заболоченных территориях северных регионов мира, где с водосбора в водотоки и водоемы поступает большое количество ОВ гумусовой природы [18]. Содержание кремния изменялось в узких пределах, достоверных связей с исследованными гидрохимическими и гидрологическими показателями не обнаружено.

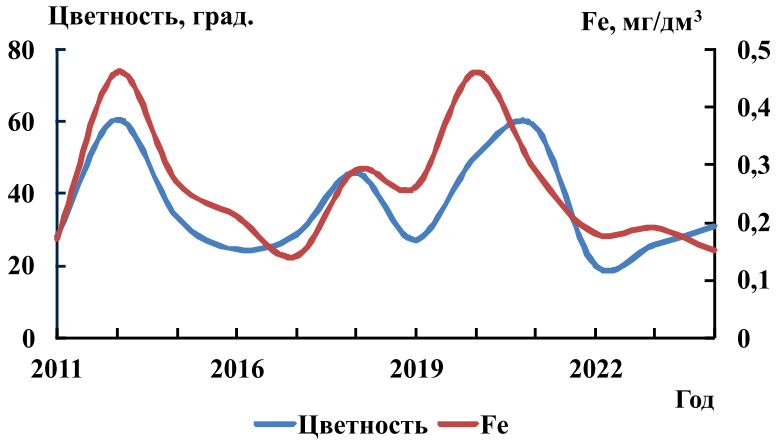


Рис. 3. Динамика железа и цветности в воде Волгоградского водохранилища в зимние периоды 2011–2024 гг.
Fig. 3. Dynamics of iron and coloration in the water of the Volgograd Reservoir in the winter periods of 2011–2024

Для определения структуры взаимосвязи между полученными гидрохимическими показателями применили метод главных компонент. По итогам анализа были отобраны две первые компоненты, учитывающие 74,5 % изменчивости исходных показателей.

Итоговая матрица факторных нагрузок дает представление о структурной организации исходных гидрохимических показателей и степени их связи с тем или иным главным фактором (компонентой). Первый фактор, определяющий 55,8 % дисперсии, свидетельствует о согласованной динамике показателей цветности, минерального азота, железа и объема водного притока (табл. 4). Совершенно независимо от указанных показателей происходят изменения содержания минерального фосфора, который совместно со значениями индекса NAO_o оказался во второй компоненте, вбирающей в себя 18,7 % вариабельности исходной информации. В этой связи можно предположить, что межгодовая динамика фосфатов более специфична и определяется иными механизмами в отличие от предыдущей группы показателей.

Таблица 4. Матрица факторных нагрузок гидрохимических показателей Волгоградского водохранилища, метеорологических и гидрологических факторов (жирным шрифтом выделены значимые нагрузки)

Table 4. Matrix of factor loads of hydrochemical indicators of the Volgograd reservoir, meteorological and hydrological factors (significant loads are highlighted in bold)

Показатель	Главные факторы	
	1	2
Зимний приток, км^3	**0,97**	0,13
Цветность, град.	**0,73**	0,59
Азот минеральный, мг/дм^3	**0,94**	–0,12
Фосфор минеральный, мг/дм^3	–0,14	**0,73**
Кремний, мг/дм^3	0,57	–0,38
Железо, мг/дм^3	**0,86**	–0,27
Индекс NAO_o	–0,03	**0,80**

ВЫВОДЫ

Таким образом, несмотря на то что Волжский каскад представляет собой цепь искусственных водоемов, простирающуюся на многие тысячи километров, существенное влияние на формирование гидрохимического режима водохранилищ Нижней Волги могут оказывать условия в верховьях каскада и в стокообразующей зоне. Динамика аллохтонного ОВ, железа и соединений минерального азота тесно связана с водностью в зимний период. Изменения концентрации минерального фосфора не согласуются с другими гидрохимическими показателями, что, вероятно, свидетельствует о еще более выраженной специфике его генезиса в экосистеме водохранилища.

Полученные зависимости, описывающие влияние водного притока на гидрохимические компоненты Волгоградского водохранилища, позволят прогнозировать содержание тех или иных ингредиентов в связи с динамикой водного баланса, а также с изменениями индекса NAO – маркера глобальных атмосферных процессов. Прогнозирование содержания органических и биогенных веществ, определяющих трофику водной экосистемы, может предоставить возможность управления состоянием экосистемы, основанного на приемах регулирования важнейших элементов гидрологического режима.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов с кем-либо.

CONFLICT OF INTEREST

There is no conflict of interest.

Благодарности

Авторы выражают благодарность коллегам Саратовского филиала ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО» И. Г. Филимоновой, Л. В. Гришиной и М. А. Сивущиной за активное участие в обработке гидрохимического материала.

Acknowledgements

The authors express their gratitude to the colleagues from the "VNIRO" Saratov branch: I. G. Filimonova, L. V. Grishina and M. A. Sivushchina for their active participation in the hydrochemical material processing.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шашуловская Е. А., Мосияш С. А. Биогенные элементы в водохранилищах Нижней Волги в начале XXI века // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов: труды IX Всероссийской научно–практической конференции с международным участием. Т. 2. Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2023. С. 154–158.
2. Шашуловская Е. А., Мосияш С. А. Межгодовые изменения содержания органического вещества и биогенных элементов в водохранилищах Нижней Волги: влияние климатической трансформации // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 3. С. 83–100. https://doi.org/10.35567/19994508–2024–3–83–100
3. Shashulovskaya E. A., Mosiyash S. A. and Dalechina I. N. Long-Term Changes in the Main Indicators of the Trophic State of the Large Plain Reservoir under the Influence of Climatic Transformation and Successional Processes // Inland Water Biology. 2021. Vol. 14. No. 6. P. 627–637. https://doi.org/10.1134/S1995082921060110
4. Wrzesiński D., Ptak M., Baczyńska F. Effect of the North Atlantic Oscillation on Ice Phenomena on Selected Lakes in Poland Over the Years 1961–2010 // Quaestiones Geographicae. 2013. Vol. 32 (3). P. 119–128. https://doi.org/10.2478/QUAGEO-2013-0020
5. Здоровеннова Г. Э., Гавриленко Г. Г., Здоровеннов Р. Э., Маммарелла И., Ояла А., Хейсканен Ю., Тержевик А. Ю. Эволюция температуры водной толщи бореальных озер на фоне изменений регионального климата // Известия Русского географического общества. 2017. Т. 149. № 6. С. 59–74.
6. Варенцова Н. А., Киреева М. Б., Фролова Н. Л., Харламов М. А., Илич В. П., Сазонов А. А. Прогноз притока воды к Цимлянскому водохранилищу в период половодья в современных климатических условиях: проблемы и воспроизводимость // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 6. С. 694–709. https://doi.org/10.31857/S0321059620060152
7. Калинкина Н. М., Теканова Е. В., Ефремова Т. В., Пальшин Н. И., Назарова Л. Е., Баклагин В. Н., Здоровеннов Р. Э., Смирнова В. С. Реакция экосистемы Онежского озера в весенне-летний период на аномально высокую температуру воздуха зимы 2019/2020 годов // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2021. Т. 85. № 6. С. 888–899. https://doi.org/10.31857/S2587556621060078
8. Речкалов В. В., Захаров С. Г., Сайфуллина И. Т. Распределение кислорода в толще воды озера Смолино в подлёдный период // Вестник Челябинского государственного университета. 2010. № 8 (189). С. 72–76.
9. Раднаева Л. Д., Ширеторова В. Г., Цыбекмитова Г. Ц., Павлов И. А., Андреев С. Г., Пинтаева Е. Ц., Гармаев Е. Ж., Тулохонов А. К. Особенности макро- и микроэлементного состава и пигментных характеристик планктонных водорослей озера Гусиное в подледный период // Вестник Бурятского государственного университета. Химия. Физика. 2018. № 4. С. 13–25.

10. Григорьева И. Л. Закономерности и факторы формирования зимнего гидрохимического режима Угличского водохранилища // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2020. № 2. С. 52–64. https://doi.org/10.35567/1999-4508-2020-2-4
11. Томберг И. В., Синюкович В. Н., Сороковикова Л. М., Раднаева Л. Д., Павлов И. А., Ширеторова В. Г., Чернышов М. С., Тулохонов А. К. Особенности химического состава вод реки Селенги в период зимней межени 2017–2018 года // География и природные ресурсы. 2020. № 3. Т. 162. С. 81–88.
12. Григорьева И. Л., Кузовлев В. В. Особенности зимнего гидрохимического режима Иваньковского водохранилища в многолетнем аспекте // Вестник Тверского государственного университета. Серия: География и геоэкология. 2021. Т. 33. № 1. С. 14–24.
13. Калинин В. Г. Водный режим камских водохранилищ и рек их водосбора в зимний сезон. Пермь, 2014. 184 с.
14. Попова В. В., Георгиади А. Г. Спектральные оценки связи изменчивости стока Волги и североатлантического колебания в 1882–2007 гг. // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2017. № 2. С. 47–59. https://doi.org/10.15356/0373-2444-2017-2-47-59
15. Шашуловский В. А., Мосияш С. С. Формирование биологических ресурсов Волгоградского водохранилища в ходе сукцессии его экосистемы. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2010. 250 с.
16. Джамалов Р. Г., Сафронова Т. И., Телегина Е. А. Внутригодовое распределение стока рек с оценкой роли зимней межени // Водные ресурсы. 2017. Т. 44. № 6. С. 603–611. https://doi.org/10.7868/S0321059617060049
17. Данилович И. С., Вжезински Д., Лопух П. С., Некрасова Л. А. Влияние североатлантического колебания на сток рек Беларуси // Вестник БГУ. Серия 2: Химия. Биология. География. 2007. № 3. С. 100–104.
18. Назарова Л. Е., Исакова К. В., Калинкина Н. М., Балаганский А. Ф. Влияние потепления климата на зимний сток реки Шуя и последствия для зообентоса Онежского озера // Известия Русского географического общества. 2022. Т. 154. № 1. С. 28–36. https://doi.org/10.31857/S0869607122010086

REFERENCES

1. Shashulovskaya E. A., Mosiyash S. A. Biogenic elements in reservoirs of the Lower Volga at the beginning of the XXI century / Modern problems of reservoirs and their catchments: proceedings of the IX All–Russian Scientific and Practical Conference with international participation. Vol. 2. Perm: Perm State National Research University, 2023. P. 154–158 (in Russian).
2. Shashulovskaya E. A., Mosiyash S. A. Interannual changes in the content of organic matter and biogenic elements in reservoirs of the Lower Volga: the impact of climatic transformation. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2024. No. 3. P. 83–100 (in Russian). https://doi.org/10.35567/19994508–2024–3–83–100
3. Shashulovskaya E. A., Mosiyash S. A. and Dalechina I. N. Long-Term Changes in the Main Indicators of the Trophic State of the Large Plain Reservoir under the Influence of Climatic Transformation and Successional Processes. *Inland Water Biology*. 2021. Vol. 14. No. 6. P. 627–637. https://doi.org/10.1134/S1995082921060110
4. Wrzesiński D., Ptak M., Baczyńska F. Effect of the North Atlantic Oscillation on Ice Phenomena on Selected Lakes in Poland Over the Years 1961–2010. *Quaestiones Geographicae*. 2013. Vol. 32 (3). P. 119–128. https://doi.org/10.2478/QUAGEO-2013-0020
5. Zdorovennova G. E., Gavrilenko G. G., Zdorovennov R. E., Mammarella I., Ojala A., Heiskanen Yu., Terzhevik A. Yu. Evolution of the water column temperature in boreal lakes

against the background of regional climate changes. *Newsletters of the Russian Geographical Society*. 2017. Vol. 149. No. 6. P. 59–74 (in Russian).

6. Varentsova N. A., Kireeva M. B., Frolova N. L., Kharlamov M. A., Ilich V. P., Sazonov A. A. Forecasting water inflow into the Tsimlyansk reservoir during spring flood undercurrent climate conditions: problems and reproducibility. *Water resources.* 2020. Vol. 47. No. 6. P. 953–967. (in Russian). https://doi.org/10.31857/S0321059620060152
7. Kalinkina N. M., Tekanova E. V., Efremova T. V., Palshin N. I., Nazarova L. E., Baklagin V. N., Zdorovennov R. E., Smirnova V. S. The reaction of the ecosystem of Lake Onega in the spring and summer period to the abnormally high air temperature in winter 2019/2020. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Series: Geography*. 2021. Vol. 85. No. 6. P. 888–899 (in Russian). https://doi.org/10.31857/S2587556621060078
8. Rechkalov V. V., Zakharov S. G., Saifullina I. T. Distribution of oxygen in the water column of Lake Smolino during the subglacial period. *Bulletin of the Chelyabinsk State University*. 2010. No. 8 (189). P. 72–76 (in Russian).
9. Radnaeva L. D., Shiretorova V. G., Tsybekmitova G. Ts., Pavlov I. A., Andreev S. G., Pintaeva E. Ts., Garmaev E. Zh., Tulokhonov A. K. Features of macro- and microelement composition and pigment characteristics of planktonic algae of Lake Gusinoe during the ice-covered period. *Bulletin of Buryat State University. Chemistry. Physics.* 2018. No. 4. P. 13–25 (in Russian).
10. Grigorieva I. L. Patterns and factors of formation of the winter hydro/chemical regime of the Uglich reservoir. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2020. No. 2. P. 52–64 (in Russian). https://doi.org/10.35567/1999-4508-2020-2-4
11. Tomberg I. V., Sinyukovich V. N., Sorokovikova L. M., Radnaeva L. D., Pavlov I. A., Shiretorova V. G., Chernyshov M. S., Tulokhonov A. K. Features of the Chemical Composition of the Selenga River Waters during the Winter Low Water Period of 2017–2018. *Geography and Natural Resources*. 2020. No. 3. Vol. 162. P. 81–88 (in Russian).
12. Grigorieva I. L., Kuzovlev V. V. Features of the winter hydro/chemical regime of the Ivankovo reservoir in the long–term aspect. *Bulletin of Tver State University. Series: Geography and Geo/ecology*. 2021. Vol. 33. No. 1. P. 14–24 (in Russian).
13. Kalinin V. G. Water regime of the Kama reservoirs and their catchment rivers in the winter season. Perm, 2014. 184 p. (in Russian).
14. Popova V. V., Georgiadi A. G. Spectral estimates of the relationship between the variability of the Volga runoff and the North Atlantic oscillation in 1882–2007. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Series: Geography*. 2017. No. 2. P. 47–59 (in Russian). https://doi.org/10.15356/0373-2444-2017-2-47-59
15. Shashulovsky V. A., Mosiyash S. S. Formation of biological resources of the Volgograd reservoir during the succession of its ecosystem. M.: Association of Scientific publications of the KMC, 2010. 250 p. (in Russian).
16. Jamalov R. G., Safronova T. I., Telegina E. A. Annual distribution of river runoff with estimated contribution of winter low–water season. *Water resources*. 2017. Vol. 44. No. 6. P. 785–792. https://doi.org/10.7868/S0321059617060049
17. Danilovich I. S., Vrzhesinski D., Lopukh P. S., Nekrasova L. A. Influence of the North Atlantic Oscillation on the Flow of Belarusian Rivers. *Newsletters of BSU. Series 2: Chemistry. Biology. Geography.* 2007. No. 3. P. 100–104 (in Russian).
18. Nazarova L. E., Isakova K. V., Kalinkina N. M., Balagansky A. F. The influence of climate warming on the winter flow of the Shuya River and the consequences for the zoobenthos of Lake Onega. *Proceedings of the Russian Geographical Society*. 2022. Vol. 154. No. 1. P. 28–36 (in Russian). https://doi.org/10.31857/S0869607122010086

Сведения об авторах:

Шашуловская Елена Александровна, канд. биол. наук, заведующий лабораторией рыбохозяйственной экологии Саратовского филиала ГНЦ РФ ФГБНУ «Всероссийский научно–исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии», Россия, 410002, г. Саратов, ул. Чернышевского, 152; https://orcid.org/0000–0003–1072–7046; e-mail: shash.elena2010@yandex.ru

Мосияш Светлана Александровна, канд. биол. наук, старший научный сотрудник лаборатории рыбохозяйственной экологии Саратовского филиала ГНЦ РФ ФГБНУ «Всероссийский научно–исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии», Россия, 410002, г. Саратов, ул. Чернышевского, 152; https://orcid.org/0000–0003–0875–6358; e-mail: mosiyashsa@yandex.ru

About the authors:

Elena A. Shashulovskaya, Candidate of Biological Sciences, Head of the Laboratory of Fisheries Ecology of the Saratov Branch of the All-Russian Scientific Research Institute of Fisheries and Oceanography, 152 Chernyshevsky str., Saratov, 410002, Russia; https://orcid.org/0000–0003–1072–7046; e-mail: shash.elena2010@yandex.ru

Svetlana A. Mosiyash, Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, the Laboratory of Fisheries Ecology of the Saratov Branch of the All-Russian Scientific Research Institute of Fisheries and Oceanography, 152 Chernyshevsky str., Saratov, 410002, Russia; https://orcid.org/0000–0003–0875–6358; e-mail: mosiyashsa@yandex.ru

Поступила в редакцию / Received 07.11.2025.
Поступила после рецензирования / Revised 16.01.2026.
Принята к публикации / Accepted 22.01.2026.