

Межгодовые изменения содержания органического вещества и биогенных элементов в водохранилищах Нижней Волги: влияние климатической трансформации

Е.А. Шашуловская  , С.А. Мосияш 

 shash.elena2010@yandex.ru

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

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Изучение динамики органического вещества и биогенных элементов – показателей, обуславливающих качество воды водоемов комплексного назначения, в условиях возросшей экстремальности климата приобретает особое значение при разработке и принятии решений по адаптации водохозяйственного комплекса России к изменению условий окружающей среды. **Методы.** Для исследования использованы полученные авторами данные гидрохимического режима Саратовского и Волгоградского водохранилищ за период 2001–2022 гг. **Результаты.** В условиях глобальной макроклиматической трансформации (изменения термического режима, внутригодового перераспределения водного стока и уменьшения количества осадков) выявлена тенденция снижения величин показателей, связанных с водностью, – цветности, перманганатной окисляемости и аммонийного азота. Повышение летней температуры воды способствует увеличению содержания легкоокисляемого органического вещества вследствие роста продуктивности автотрофов. В Волгоградском водохранилище, как более трофном, колебания концентраций общего и легкоокисляемого органического вещества происходили на более высоком уровне, чем в Саратовском. Повышение зимней приземной температуры воздуха может быть основной причиной снижения концентрации аммонийного азота и повышения содержания железа. Динамика нитратов и фосфатов связана с варьированием индекса Северо-Атлантического колебания (САК), являющегося маркером глобальных атмосферных процессов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: органическое вещество, биогенные элементы, водный сток, Саратовское и Волгоградское водохранилища, индекс САК, изменение климата.

Для цитирования: 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. DOI: 10.35567/19994508-2024-3-83-100.

Дата поступления 05.02. 2024.

Interannual changes in the content of organic matter and biogenic elements in reservoirs of the Lower Volga: the influence of climatic transformation

Elena A. Shashulovskaya  , Svetlana A. Mosiyash 

 shash.elena2010@yandex.ru

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

ABSTRACT

Relevance. The study of the dynamics of organic matter and biogenic elements – indicators that determine the water quality of reservoirs of complex purpose, in conditions of increased

© Шашуловская Е.А., Мосияш С.А., 2024

climate extremes, is of particular importance in developing and making decisions on the adaptation of the Russian water management complex to changing environmental conditions. **Methods.** The data obtained by the authors from the hydro/chemical regime of the Saratov and Volgograd reservoirs for the period 2001-2022 were used for the study. **Results.** Under the conditions of global macroclimatic transformation (changes in the thermal regime, intra-annual redistribution of water runoff and decrease in precipitation), a tendency has been revealed to decrease the values of indicators related to water content: chromaticity, permanganate oxidability and ammonium nitrogen. An increase in summer water temperature contributes to an increase in the content of easily oxidizable organic matter due to an increase in the productivity of autotrophs. In the Volgograd reservoir, as a more trophic one, fluctuations in the concentrations of total and easily oxidized organic matter occurred at a higher level than in the Saratov one. An increase in winter surface air temperature may be the main reason for a decrease in ammonium nitrogen concentration and an increase in iron content. The dynamics of nitrates and phosphates is associated with fluctuations in the North Atlantic Oscillation Index (NAO), which is a marker of global atmospheric processes.

Keywords: organic matter, biogenic elements, water runoff, Saratov and Volgograd reservoirs, NAO index, climate change.

For citation: Shashulovskaya E.A., Mosiash S.A. Interannual changes in the content of organic matter and biogenic elements in reservoirs of the Lower Volga: the influence of climatic transformation. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2024. No. 3. P. 83–100. DOI: 10.35567/19994508-2024-3-83-100.

Received 05.02. 2024.

ВВЕДЕНИЕ

Саратовское и Волгоградское водохранилища – замыкающие природно-техногенные водоемы комплексного назначения в огромном Волжском каскаде. Они являются транспортными артериями, используются для целей энергетики, водоснабжения, ирригации и рыбного хозяйства. Расположенные в индустриально развитом регионе за свои более чем полувековые периоды эксплуатации Саратовское и Волгоградское водохранилища стали аккумуляторами многих химических веществ природного и антропогенного происхождения. На качество воды оказывает влияние не только транзит загрязняющих веществ из вышерасположенных водохранилищ, но и сброс от точечных и диффузных источников на водосборе.

Трансформация климата последних десятилетий приводит к изменениям компонентов гидрологического цикла, прежде всего, водного стока, зависящего от увлажненности региона [1]. На фоне роста количества осадков над сушей в средних широтах в течение последних десятилетий наблюдается увеличение повторяемости и интенсивности засух на юге Европейской территории России (ЕТР). В бассейнах Днепра, Дона и Нижней Волги в начале XXI в. зарегистрировано снижение объема водного стока, чаще наблюдаются маловодные годы [2]. Маловодье наносит вред не только судоходству, водоснабжению и гидроэнергетике, но и может привести к существенной трансформации водных экосистем, нарушая их природную самоочищающую способность.

Начало XXI в. характеризуется увеличением температур приземного воздуха – главного индикатора изменения климата [3]. Рост приземной температуры на территории России в последние десятилетия происходит в два раза быстрее, чем в среднем по планете [3], как следствие – возрастает температура поверхностных вод. В водохранилищах р. Волги с 1970-х годов отмечена устойчивая тенденция к повышению летней температуры воды [4–6]. Увеличение температуры воды удлиняет вегетационный период, увеличивает оборачиваемость питательных веществ и приводит к усилению процессов эвтрофирования [7, 8].

Из крупномасштабных циркуляционных систем наибольший интерес для климата России представляет Северо-Атлантическое колебание (САК), сущность которого заключается в перераспределении атмосферных масс между Арктикой и субтропической Атлантикой. В исследованиях последних десятилетий предпринята попытка оценить влияние САК на погоду и климат Европы [9–11]. Чередования положительных и отрицательных фаз САК вызывают большие изменения в ветровом режиме, переносах тепла и влаги, траекториях и интенсивности циклонической деятельности.

Для оценки продукционного и самоочищающего потенциала водных систем в условиях климатических изменений необходимы теоретические представления о механизмах их функционирования. Главными факторами, обуславливающими качество воды в водных объектах и определяющими условия существования гидробионтов и общую продуктивность природных вод, является содержание органического вещества (ОВ) и биогенных элементов (БЭ). Их концентрации подвержены существенным пространственно-временным изменениям, тесно связаны с жизнедеятельностью организмов различного трофического уровня и обусловлены многими природными факторами. Изучение динамики этих компонентов необходимо для прогнозирования возможных изменений гидрохимического режима в зависимости от меняющихся условий среды. Контроль качества водных ресурсов в условиях возрастающей экстремальности климата, наблюдаемой в последние десятилетия, приобретает особое значение при разработке и принятии решений по адаптации водохозяйственного комплекса России к изменению климата [12].

В связи с вышеизложенным, целью данного исследования стал анализ многолетних изменений содержания органического вещества и биогенных элементов, определение тенденций их динамики в воде водохранилищ Нижней Волги в начале XXI в. в условиях климатических изменений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Замыкающие водохранилища Волжского каскада – Саратовское и Волгоградское (шестая и седьмая ступени соответственно) – расположены в основном в лесостепной и степной зонах, общая протяженность искусственных водоемов около 900 км [13]. Это крупные (площадь зеркала соответственно ~1830 и 3120 км²) и относительно неглубокие (средняя глубина 7 и 10 м) водохранилища. Интенсивность водообмена в Саратовском водохранилище 8–19 [14], в Волгоградском – 7,5 раз в год [15]. Основная часть водного баланса Саратовского и Волгоградского водохранилищ приходится на сток р. Волги, доля

боковой приточности составляет, соответственно, ~2 % и < 1 % [15]. Уровненный режим – относительно постоянный, только в период половодья в апреле-мае наблюдается резкий подъем уровня воды.

Гидрохимический материал для исследования отобран в 2001–2022 гг. на русловых и прибрежных участках Саратовского и Волгоградского водохранилищ с помощью батометра Руттнера. Картосхема расположения стандартных мониторинговых разрезов представлена в ранее опубликованных работах [5, 6]. Отбор проб проводили в течение вегетационного сезона: весной (апрель-май), летом (июль- август) и осенью (октябрь-ноябрь). На русловых участках пробы отбирали с поверхностного и придонного (0,5 м от дна) горизонтов, на прибрежных – только с поверхности. Всего было проанализировано около 2700 проб. Для определения содержания органического вещества (цветности, перманганатной (ПО) и бихроматной (ХПК) окисляемости, биохимического потребления кислорода (БПК₅)) и биогенных элементов (минеральных форм азота и фосфора, общего железа, кремния) использовали общепринятые методики титриметрического и фотометрического анализов [16]. Объем водного стока оценивали по данным сброса через Саратовский и Волжский гидроузлы, доступным на сайте ПАО «Русгидро»¹. Высокая проточность Саратовского водохранилища, а также последовательное расположение исследуемых водоемов в одном каскаде обусловили высокий коэффициент корреляции между объемами пропущенной через них воды ($r = 0,98$ при $p < 0,05$). Величины стока половодья рассчитывали по данным за апрель и май. Трансформированные ряды значений индекса САК доступны на сайте².

Для статистической обработки данных (расчета средних значений показателей, ошибок, коэффициентов корреляции Спирмена r и детерминации R^2) использовали специализированный пакет Statgraf Centurion XVI, для построения графиков – стандартные программы для персонального компьютера. При анализе результатов выделяли средние за вегетационный сезон концентрации, при этом многолетние данные разделили на два периода в соответствии с динамикой индекса САК.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В связи со сложным многокомпонентным воздействием факторов среды на экосистемы водоемов в публикациях последних лет большое внимание уделяется глобальным атмосферным процессам, маркером которых является индекс САК [17–20]. Северо-Атлантическое колебание – одна из важнейших характеристик крупномасштабной циркуляции атмосферы в северном полушарии. Оно выражено во все сезоны года и проявляется в масштабах от нескольких суток до нескольких столетий. При положительных значениях САК зимы становятся мягче, количество осадков увеличивается. В периоды с отрицательными значениями САК наблюдаются похолодание и уменьшение количества осадков. Чередование фаз положительных и отрицательных значений определяет температуру воды, ле-

¹ ПАО «Русгидро». Режим доступа: rushydro.ru (дата обращения 18.12.2023).

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: 17.01.2024).

довый режим водоемов, интенсивность перемешивания воды [20]. С динамикой САК согласуются основные последствия современной трансформации климата для водоемов Европейской территории России, которые проявляются в изменении температуры воды и количества осадков над водосборной площадью [19].

В 2001–2022 гг. в динамике САК отмечено два периода: уменьшение индекса с 2001 по 2010 гг. до минимальных значений (-13,83) в 2010 г., с 2011 г. наметилась тенденция к возрастанию. С динамикой индекса согласуются изменения водного стока: в 2001–2010 гг. отмечен отрицательный тренд ($R_2 = 0,39$, $p = 0,05$), с 2011 по 2022 гг. наблюдалось некоторое увеличение его объема. Колебания годового водного стока исследуемых водоемов в период 2001–2022 гг. происходили в интервале 195–299 км³ (табл. 1). В 2011–2022 гг., по сравнению с первым десятилетием XXI в., наблюдалось сокращение расхода весеннего половодья, связанное с ростом зимних температур приземного воздуха и увеличением дренирующих свойств почв. Внутригодовое перераспределение водного стока отмечено на большинстве рек Европейской территории России [2], а на водохранилищах дополнительное влияние может оказывать работа гидроэлектростанций.

На территории Средней Волги, являющейся основной стокоформирующей зоной исследуемых искусственных водоемов, зарегистрирован рост зимних температур приземного воздуха, особенно заметный с 2011 г., что отражает общую тенденцию, характерную в начале XXI в. для территории европейской части России [1, 6, 21]. В водохранилищах Волги отмечен рост летних температур воды. Так, в Куйбышевском водохранилище в последние годы наметилась устойчивая тенденция повышения температуры поверхностного слоя воды на 1,6 °С по сравнению с историческим периодом 1957–1980 гг. [22]. В настоящее время на Саратовском водохранилище с 1960–1970-х годов температура воды в июле увеличилась на ~1,3 °С [6], в Волгоградском – на ~2,4°С [5]. Только за прошедшие двадцать два года нового столетия температура воды в июле в нижеволжских водохранилищах повысилась в среднем на 0,4 – 0,8 °С (табл. 1).

Таблица 1. Гидроклиматические характеристики Саратовского и Волгоградского водохранилищ в период 2001–2022 гг.

Table 1. Hydro-climatic characteristics of the Saratov and Volgograd reservoirs in the period 2001–2022

Показатель	Водохранилище			
	Саратовское		Волгоградское	
	2001–2010 гг.	2011–2022 гг.	2001–2010 гг.	2011–2022 гг.
Т воды июля, °С	19,4 – 23,5	19,5 – 22,0	21,3 – 26,2	20,8 – 24,9
	20,6 ± 0,6	21,0 ± 0,3	22,3 ± 0,6	23,1 ± 0,4
Годовой сток, км ³	195 – 286	204 – 299	195 – 286	199 – 295
	248 ± 9	248 ± 10	251 ± 10	242 ± 10
Весенний сток, %	25 – 37	24 – 40	26 – 37	24 – 39
	34 ± 1	31 ± 1	33 ± 1	31 ± 1

Примечание: над чертой – пределы колебания показателя, под чертой – среднее значение и его ошибка.

Изменения гидрологического и температурного режима водоемов вследствие климатической трансформации тесно связаны с динамикой основных показателей качества воды гидроэкосистем – ОВ и БЭ. Автохтонное ОВ, образующееся в водных объектах в результате продукционной жизнедеятельности автотрофов, является основным источником легкоокисляемого органического вещества [23].

Пределы колебания содержания легкоокисляемого ОВ, определяемого по пятисуточной экспозиции (БПК₅), в 2001–2022 гг. в Саратовском водохранилище составили 0,9 – 2,7 мгО₂/дм³, в Волгоградском – 1,5 – 3,1 мгО₂/дм³. В течение вегетационного сезона минимальные значения БПК₅ регистрировались при низком уровне продукционных процессов в ранневесенний и позднесенний периоды, максимальные – летом при образовании автохтонного ОВ.

В Волгоградском водохранилище повышенные значения БПК₅ в отдельные годы отмечались и осенью в районе влияния г. Саратова и были, видимо, связаны с локальным поступлением легкоокисляемой органики со сточными водами. В этом же районе отмечены и минимальные величины БПК₅ (<0,5 мг/дм³), что, возможно, было признаком торможения биохимических процессов в результате влияния токсичных веществ антропогенного происхождения. Доля лабильной органики в общем ОВ в 2011–2022 гг. по сравнению с первым десятилетием XXI в. в исследуемых водохранилищах практически не изменилась (табл. 2). В Волгоградском водохранилище колебания показателя БПК₅ в этот период были выражены более отчетливо (рис. 1).

Таблица 2. Содержание органического вещества (средняя концентрация и ее ошибка) в воде Саратовского и Волгоградского водохранилищ в вегетационный период 2001–2022 гг.

Table 2. The content of organic matter (average concentration and its error) in the water of the Saratov and Volgograd reservoirs in the growing season 2001–2022

Показатель	Водохранилище			
	Саратовское		Волгоградское	
	2001–2010 гг.	2011–2022 гг.	2001–2010 гг.	2011–2022 гг.
Цветность, град.	–	32±2	–	29±2
ПО, мгО/дм ³	8,8±0,4	7,6±0,3	9,0±0,4	7,6±0,3
ХПК, мгО/дм ³	28±3	25±1	29±2	26±1
БПК ₅ , мгО ₂ /дм ³	1,6±0,1	1,7±0,2	2,5±0,1	2,1±0,2
БПК ₅ /ХПК, %	5,8±0,5	6,7±0,7	8,9±0,8	8,2±0,6

Примечание: «–» – отсутствие данных.

Аллохтонное ОВ гумусовой природы в основном характеризуют показатели цветности воды и ПО [24]. Интенсивность окраски воды в Саратовском водохранилище колебалась в 2012–2022 гг. от 23 до 44, в Волгоградском водохранилище – от 21 до 37 градусов цветности. При этом средневегетационные значения показателя синхронно изменялись с величиной водного стока водохранилищ: Саратовского – $r = 0,69$ при $p < 0,05$, Волгоградского – $r = 0,58$

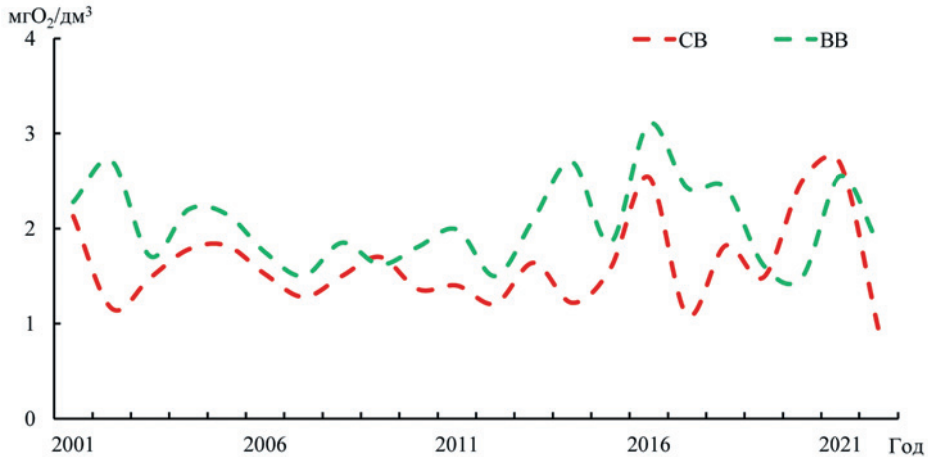


Рис. 1. Динамика БПК₅ в воде Саратовского и Волгоградского водохранилищ в 2001–2022 гг.: здесь и далее на рисунках СВ – Саратовское водохранилище, ВВ – Волгоградское водохранилище.

Fig. 1. Dynamics of BOD₅ in the water of the Saratov and Volgograd reservoirs in 2001–2022: here and further in Fig. СВ – Saratov reservoir, ВВ – Volgograd reservoir.

при $p < 0,05$. Наиболее сильная связь между величинами цветности воды и объемом стока отмечена в период весеннего половодья. При обильных дождевых паводках повышенные значения цветности регистрировались и летом, и осенью. Вода Саратовского водохранилища более цветная: среднее значение за 2012–2022 гг. – 32 ± 2 град. цветности по сравнению с 29 ± 2 в расположенном ниже по течению Волгоградском водохранилище, что отражает зональные особенности водосборного бассейна Волги с присутствием более окрашенных вод в ее верхней части.

Цветность и ПО связаны значимыми корреляционными отношениями, т. к. характеризуют, главным образом, одни и те же группы органического вещества. В Волгоградском водохранилище наиболее тесная связь между величинами ПО и стока отмечена в зимний и весенний периоды [25]. За исследуемые годы зарегистрированы отрицательные тренды объема стока и величины ПО в период половодья (апрель, май). Колебания ПО в Саратовском водохранилище связаны с изменениями водного стока с коэффициентом корреляции $r = 0,64$, а в Волгоградском, при аналогичном тренде значений, связь между этими показателями слабая ($r = 0,36$), т. к. в отдельные маловодные годы в Волгоградском водохранилище, как более трофном [26], в величину ПО, очевидно, вносит вклад автотонное ОВ. В то же время связь между колебаниями значений ПО для двух водохранилищ аппроксимируется коэффициентом корреляции r равным 0,84. В 2001–2010 гг. зарегистрированы отрицательные тренды водного стока и ПО (рис. 2а), в 2011–2022 гг. колебания этих показателей в водохранилищах происходили синхронно и на одном уровне (рис. 2б).

Содержание общего ОВ по бихроматной окисляемости изменялось в рассматриваемый период в пределах 21–40 мгО/дм³. Средняя величина показате-

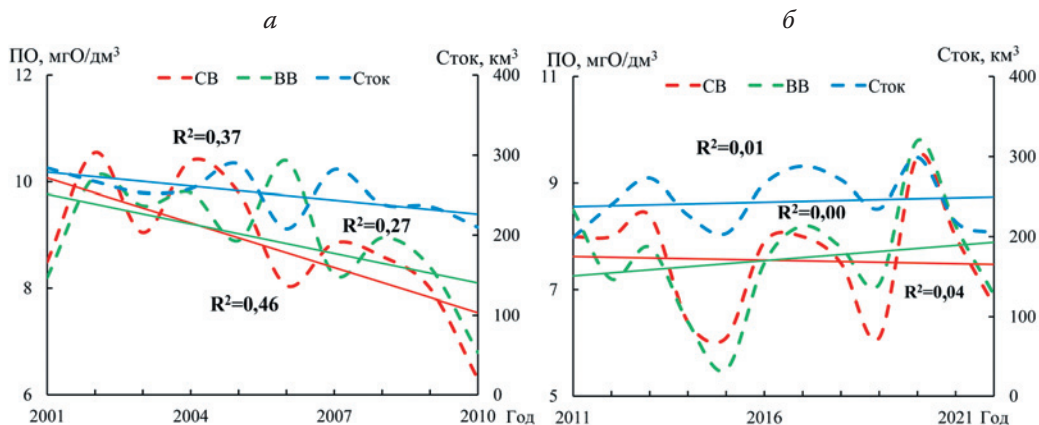


Рис. 2. Динамика ПО в воде Саратовского и Волгоградского водохранилищ и объема годового стока через Волжский гидроузел в 2001–2010 гг.(а) и в 2011–2022 гг.(б): здесь и на рис. 3–6 сплошные линии – основные тренды изменения показателей.
 Fig. 2. Dynamics of PO in the water of the Saratov and Volgograd reservoirs and the volume of annual runoff through the Volga hydroelectric complex in 2001–2010 (a) and in 2011–2022 (б): here and in Fig. 3–6 solid lines are the main trends in indicators.

ля составила в Саратовском водохранилище – 27 ± 1 мгО/дм³, в Волгоградском – 28 ± 1 мгО/дм³. Колебания величины ХПК в Волгоградском водохранилище, как и величины БПК₅, также происходили на более высоком уровне, но, в отличие от Саратовского, характеризовались отрицательной тенденцией (рис. 3). Межгодовые изменения концентрации общего ОВ в водохранилищах были достаточно согласованны и не связаны с динамикой стока, однако в зимний период в Волгоградском водохранилище содержание общего ОВ, ПО и цветность воды изменялись синхронно с его величиной [25].

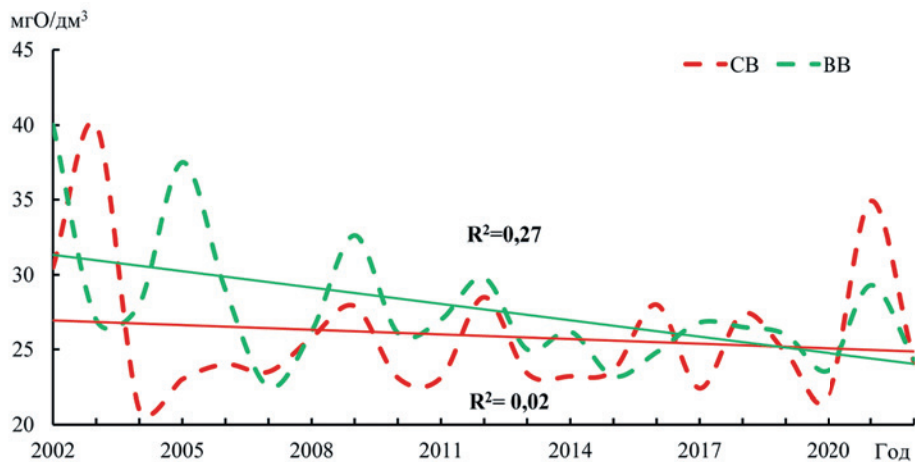


Рис. 3. Динамика содержания общего ОВ в воде Саратовского и Волгоградского водохранилищ в 2001–2022 гг.
 Fig. 3. Dynamics of total OM content in the water of the Saratov and Volgograd reservoirs in 2001–2022.

Концентрации биогенных элементов за исследуемый период в водохранилищах очень близки (табл. 3). Тенденции их изменения за период исследования позволили предположить определяющий фактор, влияющий на их среднесезонное содержание, и прогнозировать дальнейшую динамику в связи с климатической трансформацией.

Таблица 3. Содержание биогенных элементов (средняя концентрация и ее ошибка) в воде Саратовского и Волгоградского водохранилищ в вегетационный период 2001–2022 гг.

Table 3. The content of biogenic elements (average concentration and its error) in the water of the Saratov and Volgograd reservoirs in the growing season 2001–2022

Показатель	Водохранилище			
	Саратовское		Волгоградское	
	2001–2010 гг.	2011–2022 гг.	2001–2010 гг.	2011–2022 гг.
N-NH ₄ , мг/дм ³	0,38±0,04	0,21±0,02	0,34±0,04	0,18±0,02
N-NO ₂ , мг/дм ³	0,012±0,002	0,031±0,004	0,015±0,002	0,015±0,003
N-NO ₃ , мг/дм ³	0,50±0,08	0,39±0,04	0,61±0,11	0,40±0,03
P-PO ₄ , мг/дм ³	0,054±0,004	0,047±0,006	0,056±0,004	0,050±0,005
Fe, мг/дм ³	0,15±0,02	0,26±0,02	0,16±0,01	0,22±0,01
Si, мг/дм ³	3,6±0,5	3,3±0,1	4,7±0,5	3,3±0,1

В период 2001–2022 гг. в нижневолжских водохранилищах наблюдалось снижение содержания аммонийного азота (рис. 4 а). Более низкая концентрация аммония в начале XXI в. отмечена в воде Ириклинского (на р. Урал) и верхневолжского Ивановского водохранилищ, в искусственных водоемах Днепровского каскада [5, 20, 21]. Динамика этого показателя характеризуется отрицательным линейным трендом и имеет коэффициент детерминации

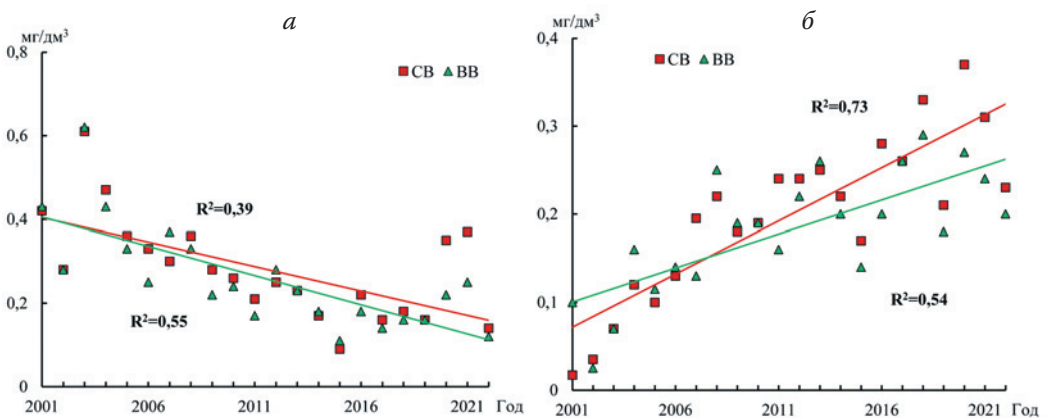


Рис. 4. Динамика аммонийного азота (а) и общего железа (б) в воде Саратовского и Волгоградского водохранилищ в 2001–2022 гг.

Fig. 4. Dynamics of ammonium nitrogen (a) and total iron (b) in the water of the Saratov and Volgograd reservoirs in 2001–2022.

R^2 для Волгоградского водохранилища – 0,55, для Саратовского – 0,39 (при $p < 0,05$). Одной из причин отрицательного тренда концентрации аммонийного азота, возможно, является снижение объема весеннего притока, связанного с климатической трансформацией. Другими возможными факторами, влияющими на концентрацию ингредиента, могут быть более активное вовлечение азота в биогеохимические циклы и ускорение процессов денитрификации при повышении температуры воды и снижении концентрации кислорода [29, 30]. Также возможно стимулирование денитрификации бактериями терригенного гумуса [31], количество которого в Волгоградском водохранилище увеличилось в результате зимнего потепления [5].

Линейным положительным трендом в исследуемый период в нижеволжских водохранилищах характеризуется динамика железа (рис. 4б). Увеличение количества оттепелей и жидких осадков в зимний период приводит к возрастанию объема вод, богатых гумусовым веществом с большим содержанием природного железа, поступающих из водохранилищ Верхней Волги и р. Камы [32]. С 2011 г. отмечена синхронность колебаний содержания этого элемента с водным стоком в вегетационный сезон в обоих водохранилищах ($r=0,63-0,65$, $p=0,02$). Весной наблюдались максимальные концентрации железа и зарегистрирована высокая корреляционная связь этого элемента и цветности воды ($r=0,85-0,88$, $p < 0,05$) [32]. В последние десятилетия увеличение концентрации железа отмечается и в других водных объектах, расположенных на заболоченных территориях северных регионов мира, где с водосбора в водотоки и водоемы поступает большое количество ОВ гумусовой природы [33].

Нитраты являются доминирующей формой минерального азота в нижеволжских водохранилищах. Пределы колебания концентрации этого соединения в исследуемый период составили $0,12-0,95$ мг/дм³ в Саратовском водохранилище и $0,16-0,94$ мг/дм³ в Волгоградском. Межгодовая динамика нитратного азота характеризовалась снижением среднесезонной концентрации в первое десятилетие XXI в. и тенденцией к увеличению в последующие годы. Парный корреляционный анализ между содержанием нитратов и индексом САК не выявил связи между этими показателями, но при полиномиальном сглаживании установлена значимая связь, характеризуемая коэффициентами корреляции $r = 0,65$ при $p=0,01$ для Саратовского водохранилища и $r = 0,55$ при $p = 0,02$ для Волгоградского (рис. 5).

Содержание минерального фосфора колебалось в 2001–2022 гг. в пределах $0,024-0,084$ мг/дм³. В отличие от соединений минерального азота, средние концентрации фосфатов в рассматриваемые периоды были близки (табл. 3). В 2001–2010 гг. при отрицательном тренде водного стока изменения содержания элемента происходили в противофазе с этим показателем: в годы повышенной водности количество фосфора снижалось, а при уменьшении стока содержание этого элемента возрастало. Особенностью сезонной динамики минерального фосфора является повышение его содержания осенью [32], очевидно, за счет внутренней биогенной нагрузки – гидролого-гидрофизических и химико-биологических внутриводоемных процессов, тесно связанных с формированием зон аноксии в придонных слоях водохранилища. В предыдущие годы исследования отмечалась аналогичная динамика фосфатов, что позволило сделать

предположение о преимуществе внутриводоемных процессов (регенерации соединений фосфора из донных отложений, минерализации автохтонного ОВ) в генезисе этого элемента. В период уменьшения индекса САК (2001–2010 гг.), характеризующегося снижением количества осадков и, соответственно, объема водного стока, наблюдалась отрицательная тенденция содержания фосфатов. В период повышения индекса САК (2011–2020 гг.) содержание минерального фосфора увеличивалось (рис. 6). Парный корреляционный анализ не выявил связи между этими показателями, но при полиномиальном сглаживании динамики фосфатов в Саратовском и Волгоградском водохранилищах и индекса САК можно отметить согласованное изменение их трендов, выраженное коэффициентами корреляции 0,58 и 0,51 (при $p = 0,00–0,01$) соответственно.

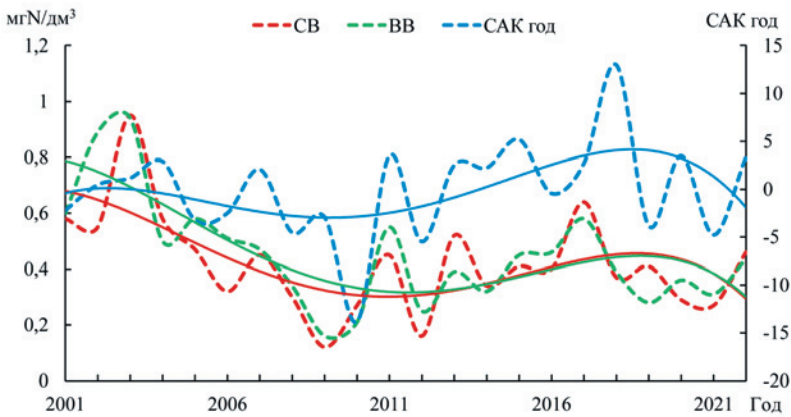


Рис. 5. Динамика индекса САК и содержания азота нитратов в воде Саратовского и Волгоградского водохранилищ в 2001–2022 гг.

Fig. 5. Dynamics of the NAO index and nitrate content in the water of the Saratov and Volgograd reservoirs in 2001–2022.

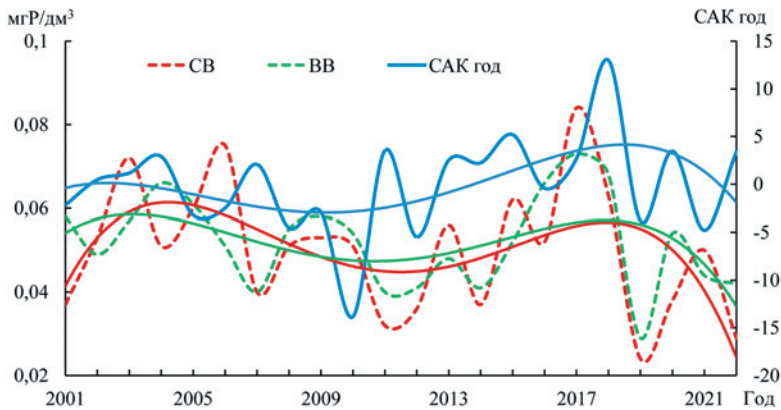


Рис. 6. Динамика индекса САК и содержания фосфатов в воде Саратовского и Волгоградского водохранилищ в 2001–2022 гг.

Fig. 6. Dynamics of the NAO index and phosphate content in the water of the Saratov and Volgograd reservoirs in 2001–2022.

Взаимодействие САК с водными экосистемами достаточно сложно и не всегда однозначно. Считается, что при отрицательных значениях САК наблюдается похолодание [20], однако в 2010 г. при максимальных годовых отрицательных значениях индекса САК (-13) на водохранилищах Волжского каскада в летний период наблюдалась аномальная жара и максимальное повышение летней температуры воды, вследствие чего в последующие годы зафиксирован рост фитопланктона [19].

В табл. 4 приведены коэффициенты корреляции между зимними и годовыми значениями САК и гидрохимическими показателями. Достоверная связь между индексом САК, июльской температурой воды и водным стоком отмечена в период его снижения. При этом более тесная корреляционная связь зафиксирована с годовыми значениями САК. В положительную фазу индекса САК в 2011–2022 гг. связь между этими показателями не установлена.

Таблица 4. Коэффициенты корреляции между значениями некоторых гидрохимических показателей Саратовского и Волгоградского водохранилищ и гидрометеорологических характеристиками в разные периоды

Table 4. Correlation coefficients between the values of some hydrochemical indicators of the Saratov and Volgograd reservoirs and hydrometeorological characteristics in different periods of the study

Показатель	Саратовское водохранилище				Волгоградское водохранилище			
	Т воды в июле	Водный сток	САК зима	САК год	Т воды в июле	Водный сток	САК зима	САК год
2001–2010 гг.								
Водный сток	-0,5		0,50	0,63	-0,49		0,50	0,63
Т воды в июле		-0,5	-0,88	-0,84		-0,49	-0,74	-0,84
ПО	-0,86	0,75	0,67	0,85	-0,87	0,07	0,56	0,68
ХПК	-0,16	0,01	0,30	0,18	-0,37	0,16	0,21	0,23
БПК ₅	-0,29	0,25	0,17	0,29	-0,17	0,22	-0,13	0,05
N-NH ₄	-0,83	0,26	0,43	0,53	-0,46	0,43	0,46	0,56
N-NO ₃	-0,40	0,41	0,3	0,51	-0,66	0,40	0,36	0,56
P-PO ₄	-0,16	-0,34	-0,04	0,04	-0,11	0,01	-0,04	0,03
2011–2022 гг.								
Водный сток	-0,45		0,09	0,15	-0,15		0,09	0,08
Т воды в июле		-0,45	-0,36	-0,24		-0,14	-0,32	-0,04
Цветность	-0,17	0,83	0,15	-0,16	-0,10	0,8	-0,46	0,02
ПО	0,24	0,66	-0,16	0,06	-0,28	0,50	-0,35	0,12
ХПК	0,24	-0,03	-0,02	-0,17	0,23	-0,17	-0,48	-0,35
БПК ₅	-0,02	0,45	0,25	0,18	0,49	0,43	-0,25	0,28
N-NH ₄	0,64	0,31	-0,58	-0,36	0,11	0,23	-0,11	-0,47
N-NO ₃	-0,53	0,16	-0,35	0,27	-0,14	0,09	-0,27	0,4
P-PO ₄	-0,62	0,42	0,19	0,50	-0,14	0,68	0,16	0,55

Примечание: жирным шрифтом выделены значимые коэффициенты корреляции (при $p < 0,05$).

Несмотря на то что при парном корреляционном анализе связь между содержанием нитратного азота и фосфатов с индексом САК не установлена, при полиномиальном трендовом сглаживании их динамики коэффициенты корреляции возрастают и становятся значимыми при $r = 0,00-0,02$ (табл. 5), что может свидетельствовать о влиянии глобальных климатических факторов на динамику этих ингредиентов.

Таблица 5. Коэффициенты корреляции между значением индекса САК и объемом годового стока, среднесезонной концентрацией нитратов и фосфатов в 2001–2022 гг.
Table 5. Correlation coefficients between the value of the NAO index and the volume of annual runoff, the average seasonal concentration of nitrates and phosphates in 2001–2022

Показатель	Водохранилище			
	Саратовское		Волгоградское	
	r фактическое	r расчетное	r фактическое	r расчетное
Водный сток	0,12	0,80	0,16	0,72
N-NO ₃	0,02	0,65	0,11	0,55
P-PO ₄	0,09	0,58	0,01	0,51

За исследуемый период не выявлено закономерностей в динамике нитритного азота и кремния. Содержание нитритов в основном было низким (0,006–0,025 мгN/дм³), но в отдельные годы (2011–2014 гг.) на некоторых станциях, главным образом Саратовского водохранилища, зарегистрировано существенное повышение количества этого соединения, что может быть связано с поступлением загрязняющих веществ и торможением процесса нитрификации. Содержание кремния не связано с климатическими изменениями и определяется, главным образом, географической зональностью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Большая часть акватории водохранилищ Нижней Волги находится в пределах одной географической зоны, что определяет сходство природно-климатических условий. В результате низкой боковой приточности исследуемых водоемов их гидрохимический режим определяется притоком ингредиентов с водным стоком из вышерасположенных водохранилищ каскада и собственными внутриводоемными процессами.

Колебания содержания общего и лабильного органического вещества в Волгоградском водохранилище выражены более отчетливо, чем в Саратовском. В связи с устойчивой тенденцией повышения летней температуры воды в условиях продолжающейся климатической трансформации допустимо прогнозировать дальнейший рост первичной продукции в водохранилищах и увеличение содержания легкоокисляемого автохтонного органического вещества.

Цветность воды исследованных искусственных водоемов характеризуется близкими значениями, их средневегетационные концентрации статистически связаны с объемом стока. Уровень содержания органического вещества, окисляемого перманганатом калия, в Саратовском водохранилище тесно связан

с межгодовой водностью, в отличие от Волгоградского, где отмечена слабая корреляция между этими показателями, вероятно, в связи с более высокой трофностью водоема и вкладом в объем содержания этой группы веществ автохтонного ОВ. В связи с продолжающимися климатическими изменениями и снижением объема стока в половодье можно ожидать дальнейшего уменьшения связанных с ним показателей, характеризующих аллохтонное органическое вещество: цветности и перманганатной окисляемости.

Тенденции изменения содержания биогенных элементов за последние двадцать два года позволили выявить определяющий фактор, влияющий на их среднесезонную концентрацию и прогнозировать дальнейшую динамику в связи с климатической трансформацией. Пределы колебания содержания биогенных элементов и их межгодовая динамика в Саратовском и Волгоградском водохранилищах очень близки по значениям, что указывает на доминирование в их генезисе водного стока из вышерасположенных водохранилищ каскада. Снижение водного стока в половодье, очевидно, является одной из основных причин уменьшения среднесезонной концентрации аммонийного азота. Увеличение количества оттепелей и жидких осадков в зимний период приводит к возрастанию объема вод, богатых гумусовым веществом с большим содержанием природного железа. Как следствие, в исследуемых водохранилищах отмечен достоверный положительный тренд этого элемента. Динамика нитратов и фосфатов связана с колебаниями индекса САК, являющегося маркером глобальных атмосферных процессов. Закономерности и механизмы этого влияния требуют дальнейшего изучения.

Благодарности. Авторы выражают благодарность коллегам Саратовского филиала ФГБНУ «ВНИРО» И.Г. Филимоновой, Л.В. Гришиной и Е.Г. Кузиной за активное участие в обработке гидрохимического материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черенкова Е.А., Сидорова М.В. Оценка современных условий недостаточного увлажнения, влияющих на маловодность в бассейнах крупных рек Европейской части России // Водные ресурсы. 2021. Т. 48. № 3. С. 260–269. DOI:10.31857/S0321059621030068.
2. Многолетние колебания и изменчивость водных ресурсов и основных характеристик стока рек Российской Федерации: научно-прикладной справочник. СПб.: ООО «РИАЛ». 2021. 190 с.
3. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. СПб.: Научные технологии, 2022. 124 с.
4. Законнова А.В., Литвинов А.С. Многолетние изменения гидроклиматического режима Рыбинского водохранилища // Труды ИБВВ РАН. 2016. № 75(78). С. 16–22. DOI: 10.24411/0320-3557-2016-10016.
5. Шашуловская Е.А., Мосияш С.А., Далечина И.Н. Эвтрофирование Волгоградского водохранилища: влияние климатической трансформации или сукцессионных процессов? // Труды Зоологического института РАН. 2023. Т. 327. № 3. С. 390–406. DOI:10.31610/trudyzin/2023.327.3.390.
6. Шашуловская Е.А., Мосияш С.А. Особенности динамики экологических параметров Саратовского водохранилища в начале XXI века // Трансформация экосистем. 2023. № 6(5). С. 11–28. DOI: 10.23859/estr-220701.

7. Перова С.Н. Изменения структуры макрозообентоса Рыбинского водохранилища в условиях повышения температуры // Биология внутренних вод. 2019. № 4–2. С. 44–54. DOI: 10.1134/S0320965219040296.
8. Linnik P.M. Climate Change as an Important Factor of the Formation of the Chemical Composition of Surface Waters at the Present Time (a Review) // Hydrobiological Journal 2021. Vol. 57. No. 1. P. 78–94 DOI: 10.1615/HydrobJ.v57.i1.90.
9. Ottersen G., Planque B., Belgrano A., Post E., Reid Ph.C. Stenseth N.C. Ecological effects of the North Atlantic Oscillation // Oecologia. 2001. 128. P. 1–14. DOI:10.1007/s004420100655.
10. Markovic D., Scharfenberger U., Schmutz S., Voltaire C. Variability and alterations of water temperatures across the Elbe and Danube River Basins // Climatic Change. 2013. Vol. 119. P. 375–389. DOI: 10.1007/s10584-013-0725-4.
11. Kukushkin A.S. Effects of large-scale atmospheric oscillations on hydrometeorological conditions in the Danube River Basin in winter // Russian Meteorology and Hydrology. 2020. Vol. 45. P. 630–638. DOI: 10.3103/S1068373920090046.
12. Фролова Н.Л., Магрицкий Д.В., Киреева М.Б., Григорьев В.Ю., Гельфан А.Н., Сазонов А.А., Шевченко А.И. Сток рек России при происходящих и прогнозируемых изменениях климата: обзор публикаций. 1. Оценка изменений водного режима рек России по данным наблюдений // Водные ресурсы. 2022. Т. 49. №3. С. 251–269. DOI: 10.31857/S032105962203004X.
13. Волга и ее жизнь. Л.: «Наука». 1978. 348 с.
14. Горин Ю.И. Некоторые черты гидрологического режима Саратовского водохранилища // Труды Института биологии внутренних вод АН СССР. 1972. Вып. 23 (26). С. 193–198.
15. Шашуловский В.А., Мосияш С.С. Формирование биологических ресурсов Волгоградского водохранилища в ходе сукцессии его экосистемы. М.: КМК. 2010. 250 с.
16. Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 541 с.
17. Лазарева В.И., Копылов А.И., Пырина И.Л., Соколова Е.А., Масленникова Т.С. Отклик планктона Рыбинского водохранилища на динамику Североатлантического колебания (North atlantic oscillation – NAO) // Проблемы водохранилищ и их водосборов: труды Межд. научно-практ. конф. Пермь, 2013. С. 145–150.
18. Малинин В.Н., Гордеева С.М. Североатлантическое колебание и увлажнение Европейской территории России // Общество. Среда. Развитие. 2014. Т. 31. № 2. С. 191–198.
19. Минеева Н.М. Содержание фотосинтетических пигментов в водохранилищах Верхней Волги (2005–2016 гг.) // Биология внутренних вод. 2019. №2–1. С. 33–41. DOI: 10.1134/S0320965219020104.
20. Копылов А.И., Масленникова Т.С., Косолапов Д.Б. Сезонные и межгодовые колебания первичной продукции фитопланктона в Рыбинском водохранилище: влияние погодных и климатических изменений // Водные ресурсы. 2019. Т. 46. № 3. С. 270–277. DOI: 10.31857/S0321-0596463270-277.
21. Джамалов Р.Г., Фролова Н.Л., Телегина Е.А. Изменение зимнего стока рек Европейской части России // Водные ресурсы. 2015. Т. 15. № 6. С. 581–588. DOI: 10.7868/S0321059615060036.
22. Селезнева К.В., Селезнева А.В., Селезнев В.А. Повышение температуры Куйбышевского водохранилища и риски водопользования // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2023. № 3. С. 49–62. DOI: 10.35567/19994508_2023_3_4.
23. Минеева Н.М., Бикбулатова Е.М. Вклад первичной продукции в общий фонд органического вещества в водохранилищах Волжского каскада // Водные ресурсы. 2008. Т. 35. № 5. С. 587–594.
24. Лозовик П.А., Зобкова М.В., Рыжаков А.В., Зобков М.Б., Ефремова Т.А., Сабылина А.В., Ефремова Т.В. Alloхтонное и автохтонное органическое вещество природных вод: кинетические и термодинамические закономерности трансформации, количественный и качественный составы // Доклады академии наук. 2017. Т. 477. № 6. С. 728–732. DOI: 10.7868/S086956521736021X.

25. Шашуловская Е.А., Мосияш С.А. Гидрохимический режим Волгоградского водохранилища в подледный (зимний) период / Сб. статей междунаучно-практ. конф. «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2019» / Севастополь: СевГУ, 2019. С. 1768–1772.
26. Минеева Н.М., Поддубный С.А., Степанова И.Э., Цветков А.И. Абиотические факторы и их роль в развитии фитопланктона Нижней Волги // Биология внутренних вод. 2023. №1. С. 53–64. DOI: 10.31857/S0320965223010114.
27. Кирпичникова Н.В., Лапина Е.Е., Кудряшова В.В. Многолетняя динамика содержания азота и фосфора в грунтовых водах водосбора Ивановского водохранилища // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 5. С. 536–545. DOI: 10.31857/S0321059620050107.
28. Жежеря В.А., Жежеря Т.П., Линник П.М. Біогенні речовини у воді водосховищ Дніпровського каскаду після зарегулювання стоку Дніпр. // Гідробіологічний журнал. 2021. № 6. С. 89–109.
29. Veraart A. J., De Klein J. J. and Scheffer M. Warming can boost denitrification disproportionately due to altered oxygen dynamics // PLoS One. 2011. 6(3). P. e18508.
30. Chou Q., Nielsen A., Andersen T.K., Hu F., Chen W., Cao T., Ni L., Søndergaard M., Johansson L.S., Jeppesen E. and Trolle D. The impacts of extreme climate on summer-stratified temperate lakes: Lake Søholm, Denmark, as an example // Hydrobiologia. 2021. Vol. 848. P. 3521–3537. DOI:10.1007/s10750-021-04607-9.
31. Isles P.D.F., Jonsson A., Creed I.F., Bergstrom A.-K. 2020. Does browning affect the identity of limiting nutrients in lakes? // Aquatic Science. 2020. 82(2). Art. 45. DOI:10.1007/s00027-020-00718-y.
32. 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. DOI: 10.1134/S1995082921060110.
33. Калинин Н.М., Филатов Н.Н., Теканова Е.В., Балаганский А.Ф. Многолетняя динамика стока железа и фосфора в Онежское озеро с водами р. Шуя в условиях климатических изменений // Региональная экология. 2018. № 2. С. 65–73. DOI: 10.30694/1026-5600-2018-2-65-73.

REFERENCES

1. Cherenkova E.A., Sidorova M.V. On the impact of insufficient atmospheric moistening of the low annual discharge of large rivers in European Russia. *Water resources*. 2021. Vol. 48. No. 3. P. 351–360. DOI: 10.1134/S0097807821030064.
2. Long-term fluctuations and variability of water resources and the main characteristics of river flow in the Russian Federation: scientific and applied reference. St. Petersburg: REAL LLC. 2021. 190 p. (In Russ.).
3. The third assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation. General summary. St. Petersburg: Science-intensive technologies, 2022. 124 p. (In Russ.).
4. Zakonnova A.V., Litvinov A.S. Long-term changes in the hydrochemical regime of the Rybinsk reservoir. *Proceedings of the IBIW RAS*. 2016. No.75(78). P. 16–22. DOI: 10.24411/0320-3557-2016-10016 (In Russ.).
5. Shashulovskaya E.A., Mosiyash S.A., Dalechina I.N. Eutrophication of the Volgograd reservoir: the influence of climatic transformation or successional processes? *Proceedings of the Zoological Institute of the Russian Academy of Sciences*. 2023. Vol. 327. No.3. P. 390–406. DOI: 10.31610/trudyzin/2023.327.3.390 (In Russ.).
6. Shashulovskaya E.A., Mosiyash S.A. Characteristic features of the dynamics of environmental parameters of the Saratov Reservoir in the beginning of the 21st century. *Ecosystem Transformation*. 2023. 6 (5). 11–28. DOI: 10.23859/estr-220701.
7. Perova S.N. Changes in the structure of macrozoobenthos in the Rybinsk reservoir under conditions of rising temperature. *Inland Water Biology*. 12(S). P. 49–59. DOI: 10.1134/S0320965219040296.

8. Linnik P.M. Climate Change as an Important Factor of the Formation of the Chemical Composition of Surface Waters at the Present Time (a Review). *Hydrobiological Journal*. 2021. 57(1). P. 78–94 DOI: 10.1615/HydrobJ.v57.i1.90.
9. Ottersen G., Planque B., Belgrano A., Post E., Reid Ph.C. Stenseth N.C. Ecological effects of the North Atlantic Oscillation. *Oecologia*. 2001. Vol. 128. 1–14 DOI:10.1007/s004420100655.
10. Markovic D., Scharfenberger U., Schmutz S., Voltaire C. Variability and alterations of water temperatures across the Elbe and Danube River Basins. *Climatic Change*. 2013. Vol. 119. P. 375–389. DOI: 10.1007/s10584-013-0725-4.
11. Kukushkin A.S. Effects of large-scale atmospheric oscillations on hydrometeorological conditions in the Danube River Basin in winter. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2020. Vol.45. P. 630–638. DOI: 10.3103/S1068373920090046.
12. Frolova N.L., Magritskiy D.V., Kireeva M.B., Grigoriev V.Yu., Gelfan A.N., Sazonov A.A., Shevchenko A.I. Stream flow of Russian rivers under current and forecasted climate changes: a review of publications. 1. Assessment of changes in the water regime of Russian rivers by observation data. *Water resources*. 2022. Vol. 49. No. 3. P. 333–350. DOI: 10.31857/S032105962203004X.
13. Volga and its life. L., “Science”. 1978. 348 p. (In Russ.).
14. Gorin Yu.I. Some features of the hydrological regime of the Saratov reservoir. *Tr. Institute of Biology. inter. waters of the USSR Academy of Sciences*. 1972. Iss. 23 (26). P. 193–198 (In Russ.).
15. Shashulovskiy V.A., Mosiyash S.S. Formation of biological resources of the Volgograd reservoir during the succession of its ecosystem. Moscow, KMK. 2010. 250 p. (In Russ.).
16. Guidelines for the chemical analysis of land surface waters. L.: Hydrometeoizdat, 1977. 541 p. (In Russ.).
17. Lazareva V.I., Kopylov A.I., Pyrina I.L., Sokolova E.A., Maslennikova T.S. Response of the plankton of the Rybinsk reservoir to the dynamics of the North Atlantic oscillation (North Atlantic oscillation - NAO). *Problems of reservoirs and their catchments: proceedings of the International Scientific and Practical Conference*. Perm. 2013. Pp. 145–150 (In Russ.).
18. Malinin V.N., Gordeeva S.M. North Atlantic oscillation and humidification of the European territory of Russia. *Society, Environment, Development*. 2014. Vol. 31. No.2. Pp. 191–198 (In Russ.).
19. Mineeva N.M. Content of photosynthetic pigments in the Upper Volga reservoirs (2005–2016). *Inland Water Biology*. 2019. No. 1–2. P. 161–169. DOI: 10.1134/S0320965219020104.
20. Kopylov A.I., Maslennikova T.S., Kosolapov D.B. Seasonal and year-to-year variations of phytoplankton primary production in the Rybinsk reservoir: the effect of weather and climatic variations. *Water Resources*. 2019. Vol. 46. No. 3. P. 395–402. DOI: 10.31857/S0321-0596463270-277.
21. Dzhamalov R.G., Telegina E.A., Frolova N.L. Winter runoff variations in European Russia. *Water Resources*. 2015. Vol. 15. No. 6. P. 758–765. DOI: 10.7868/S0321059615060036.
22. Selezneva K.V., Selezneva A.V., Seleznev V.A. Temperature rise of the Kuibyshev reservoir and risks of water use. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2023. No. 3. P. 49–62. DOI: 10.35567/19994508_2023_3_4 (In Russ.).
23. Mineeva N.M., Bikbulatova E.M. The contribution of primary production to the overall organic matter pool in Volga reservoirs. *Water Resources*. 2008. Vol. 35. No. 5. P. 562–569.
24. Lozovik P.A., Zobkova M.V., Ryzhakov A.V., Zobkov M.B., Efremova T.A., Sabylina A.V., Efremova T.V. Allochthonous and autochthonous organic matter of natural waters: kinetic and thermodynamic patterns of transformation, quantitative and qualitative compositions. *Doklady Earth Sciences*. 2017. Vol. 477. No. 2. P. 1510–1514. DOI: 10.7868/S086956521736021X.
25. Shashulovskaya E.A., Mosiyash S.A. Hydrochemical regime of the Volgograd reservoir in the ice (winter) period. *Collection of articles of the international scientific and practical conference “Environmental, industrial and energy security -2019”*. Sevastopol: SevGU. 2019. P. 1768–1772 (In Russ.).
26. Mineeva N.M., Poddubny S.A., Stepanova I.E., Tsvetkov A.I. Abiotic factors and their role in the development of phytoplankton in the Lower Volga. *Inland Water Biology*. 2023. Vol. 16. No. 1. P. 70–80. DOI: 10.31857/S0320965223010114.
27. Kirpichnikova N.V., Lapina E.E., Kudryashova V.V. Long-term dynamics of nitrogen and phosphorus concentrations in subsoll water in Ivankovo reservoir. *Water Resources*. 2020. Vol. 47. No. 5. P. 721–730. DOI: 10.31857/S0321059620050107.

28. Zhezherya V. A., Zhezherya T. P., Linnik P. M. Biogenic substances in the water of reservoirs of the Dnieper cascade after overregulation of the Dnieper runoff. *Hydrobiological Journal*. 2021. No. 6. P. 89–109 (In Ukr.).
29. Veraart A.J., De Klein J.J. and Scheffer M. Warming can boost denitrification disproportionately due to altered oxygen dynamics. *PLoS One*. 2011. 6(3). P. e18508.
30. Chou Q., Nielsen A., Andersen T.K., Hu F., Chen W., Cao T., Ni L., Søndergaard M., Johansson L.S., Jeppesen E. and Trolle D. The impacts of extreme climate on summer-stratified temperate lakes: Lake Søholm, Denmark, as an example. *Hydrobiologia*. 2021. Vol. 848. P. 3521–3537. DOI:10.1007/s10750-021-04607-9.
31. Isles P.D.F., Jonsson A., Creed I.F., Bergstrom A.-K. Does browning affect the identity of limiting nutrients in lakes? *Aquatic Sciences*. 2020. 82(2). Art. 45. DOI:10.1007/s00027-020-00718-y.
32. 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. DOI: 10.1134/S1995082921060110.
33. Kalinkina N.M., Filatov N.N., Tekanova E.V., Balagansky A.F. Long-term dynamics of iron and phosphorus runoff into Lake Onega with the Shuya River waters under conditions of climatic changes. *Regional ecology*. 2018. No. 2. P. 65–73. DOI: 10.30694/1026-5600-2018-2-65-73 (In Russ.).

Сведения об авторах:

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

Мосияш Светлана Александровна, канд. биол. наук, старший научный сотрудник, лаборатория рыбохозяйственной экологии Саратовского филиала ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии», Россия, 410002, г. Саратов, ул. Чернышевского, 152; ORCID0000-0003-0875-6358; 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; ORCID 0000-0003-1072-7046; e-mail: shash.elena2010@yandex.ru

Svetlana A. Mosiyash, Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher at 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; ORCID0000-0003-0875-6358; e-mail: mosiyashsa@yandex.ru