Особенности многолетней динамики развития гидрохимических показателей воды Шершневского водохранилища

А.В. Кравцова , Н.И. Ходоровская ,

В.А. Ячменев , В.В. Баженова

kravtsova87@yandex.ru

ФГБОУ ВО «Челябинский государственный университет», г. Челябинск, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Шершневское водохранилище является единственным источником хозяйственно-питьевого водоснабжения Челябинской агломерации. Водоем и его водосборная территория подвергаются интенсивной техногенной и рекреационной нагрузке, что отражается на качестве воды и состоянии экосистемы водохранилища. Цель данной работы – изучение особенностей многолетней динамики развития гидрохимических показателей воды Шершневского водохранилища, позволяющих определить тенденции изменения состояния экосистемы водного объекта и предложить мероприятия для сохранения эксплуатационных свойств водоема. **Методы.** Определены особенности развития показателей качества воды: pH, минерализация, мутность, цветность, взвешенные вещества, содержание растворенного кислорода и органических веществ по перманганатной окисляемости и БПК₅, а также изменение концентраций аммонийного, нитритного, нитратного азота и фосфатов. Для обработки данных использован метод регрессионного анализа и расчета коэффициентов корреляционной взаимосвязи изучаемых показателей. **Результаты.** В воде Шершневского водохранилища за период 1972–2020 гг. в обе фазы гидрологического режима отмечены тенденции достоверного снижения минерализации, мутности и перманганатной окисляемости. В летнюю межень обнаружен достоверный рост цветности, содержания кислорода и ортофосфатов. Выявленные особенности изменений гидрохимического режима свидетельствуют об усилении процессов антропогенного эвтрофирования Шершневского водохранилища и дают возможность прогнозировать состояние водной экосистемы. Полученная информация может быть реализована в процессе принятия управленческих решений по природоохранным мероприятиям для Шершневского водохранилища.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Шершневское водохранилище, многолетняя динамика, гидрохимические показатели, половодье, межень, регрессионный анализ.

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Челябинской области в рамках научного проекта № 20-41-000001.

© Кравцова А.В., Ходоровская Н.И., Ячменев В.А., Баженова В.В., 2021

Для цитирования: Кравцова А.В., Ходоровская Н.И., Ячменев В.А., Баженова В.В. Особенности многолетней динамики развития гидрохимических показателей воды Шершневского водохранилища // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2021. № 5. С. 8–28. DOI: 10.35567/1999-4508-2021-5-1.

Дата поступления 16.07.2021.

Features of the long-term dynamics of development hydro/chemical parameters of the water of the Shershnevsk Reservoir

Anna V. Kravtsova , Nadezhda I. Khodorovskaia ,
Vladislav A. Yachmenev , Vasilina V. Bazhenova

kravtsova87@yandex.ru

Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

ABSTRACT

Significance. The Shershnevsk reservoir is the only source of economic and drinking water supply in the Chelyabinsk agglomeration. The reservoir and its catchment area are subjected to intense man-made and recreational loads, which affects the water quality and the status of the reservoir ecosystem. The purpose of this work is to study the features of the long – term dynamics of the development of hydro/chemical indicators of the water of the Shershnevsk reservoir in order to determine trends in the dynamics of the state of the reservoir ecosystem and propose measures to preserve the operational properties of the reservoir. **Methods.** The features of the development of water quality indicators over time are determined: pH, mineralization, turbidity, color, suspended solids, the content of dissolved oxygen and organic substances by permanganate oxidability and BPK₅, as well as changes in the concentrations of ammonium, nitrite, nitrate nitrogen and phosphates. To process the data, the regression analysis method and the calculation of the correlation coefficients of the studied indicators were used. **Results.** In the water of Shershnevsk reservoir for the period 1972-2020, trends of a significant decrease in mineralization, turbidity and permanganate oxidability were noted in both phases of the hydrological mode. In the summer low water period, a significant increase in chromaticity, oxygen content in water and orthophosphates was detected. The information obtained can be implemented in the process of making management decisions on environmental protection measures for the Shershnevsk reservoir.

Keywords: Shershnevsk reservoir, long-term dynamics, hydro/chemical indicators, spring flood, low water, regression analysis.

Financing: The work has been done with RFFR and Chelyabinsk Oblast support within scientific project No 20-41-000001 framework.

For citation: Kravtsova A.V., Khodorkovskaya N.I., Yachmenev V.A., Bazhenova V.V. Features of the long-term dynamics of development hydro/chemical parameters of the water of the Shershnevsk Reservoir. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2021. No. 5. P. 8–28. DOI: 10.35567/1999-4508-2021-5-1.

Received July 16, 2021.

ВВЕДЕНИЕ

Водохранилища представляют собой сложные природно-техногенные образования, созданные на базе естественных водных объектов и, в отличие от естественных водных объектов, имеющие искусственный режим регулирования. Эти особенности влияют на процессы формирования и динамики водных масс водохранилищ, их химико-биологической трансформации, определяющей питьевое и технологическое качество воды, биологическую продуктивность и рыбохозяйственную ценность [1]. Направленное антропогенное регулирование ведущих факторов в водохранилищах вносит ускоренные изменения в происходящие в них процессы и явления, поэтому такие водоемы развиваются в ускоренном темпе, часто циклически и скачкообразно [2].

На начальных этапах формирования экосистемы водохранилища значительное влияние оказывает поступление в воду растворенных веществ из затопленного почвенно-растительного покрова и грунтов, продуктов абразии берегов [3]. Для гидрохимического режима водохранилища на данном этапе характерно ухудшение кислородного режима, повышение цветности и перманганатной окисляемости, что свидетельствует о высоком содержании органического вещества в воде. Речные воды, попадая в зону замедленных скоростей, застаиваются, в результате внутриводоемных процессов преобразуются, и общая минерализация воды постепенно изменяется. Отмечаются также значительные колебания содержания органических веществ и биогенных элементов. Дальнейшее существование водохранилища отличается относительной стабильностью гидрохимического режима, наблюдается увеличение растворенного кислорода в воде. Наиболее динамичными составляющими являются биогенные элементы и органическое вещество: их количество и распределение связано с развитием всех процессов в экосистеме. Главным питательным элементом в этот период выступает фосфор [4–8]. При снижении внешнего поступления соединений азота снижение их концентрации в воде происходит относительно короткий срок (менее 5 лет) по сравнению с периодом изменения концентрации общего фосфора в воде, составляющим 10–15 лет. Это связано с аккумуляцией фосфора в донных отложениях водоемов. В неглубоких, хорошо перемешиваемых водоемах, основной запас фосфора сосредоточен в донных отложениях, его миграция в результате внутриводоемных процессов вносит существенный вклад в поступление фосфора в поверхностные слои водоема [9].

Для понимания современных тенденций динамики состояния экосистемы водохранилищ изучение направленности происходящих перемен гидрохимического режима водных масс в длительном временном аспекте

является особенно актуальным в связи с перспективами сохранения эксплуатационных свойств таких водных объектов.

Шершневское водохранилище находится в черте г. Челябинска, построено на р. Миасс и введено в эксплуатацию в 1969 г. По размерам относится к средним водохранилищам руслового типа: длина – 17,5 км, наибольшая ширина – 4,0 км (средняя – 2,2 км), полный объем при НПУ 176 млн м³, коэффициент водообмена 1,0–2,4. Водохранилище имеет три плеса: верхний – речной, средний и приплотинный – озерные. Водоем мелководный – около 50 % площади занимают глубины до 4 м. Область больших глубин находится в приплотинном участке, максимальная глубина достигает 14 м [10].

Водохранилище выполняет функции многолетнего регулирования стока на среднем участке р. Миасс – от Аргазинского водохранилища до г. Челябинска. Река Миасс имеет рыбохозяйственное значение. Шершневское водохранилище обладает статусом водоема первой категории водопользования и используется как единственный источник питьевого назначения для Челябинской агломерации с населением более 1,1 млн человек. Водохранилище также интенсивно используется в рекреационных целях, кроме того, в настоящее время активно застраиваются берега водоема.

Проведенные ранее исследования [11] показали, что в период 1975–2020 гг. вода Шершневского водохранилища в 100 % случаев соответствует нормативам ПДК_{пит} и ПДК_{рх} по показателям pH, минерализации, содержанию растворенного кислорода, азота общего. Однако, с точки зрения функционирования водной экосистемы, были отмечены факторы риска для экологического благополучия Шершневского водохранилища: выявлено несоответствие установленным нормативам содержания в воде цинка, меди, марганца, железа и фосфора.

Целью данной работы являлось изучение особенностей многолетней динамики развития важнейших гидрохимических показателей водных масс Шершневского водохранилища в длительном временном аспекте в связи с перспективами сохранения его эксплуатационных свойств.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В основу исследований качества воды положены архивные данные Социальных очистных сооружений МУП ПОВВ (г. Челябинск); Российского научно-исследовательского института комплексного использования и охраны водных ресурсов, Южно-Уральский филиал (г. Челябинск); данные публикаций (Кривопаловой З.Ф., Танаевой Г.В. 1981, 1983, 1985, 1989, 1990, Еремкиной Т.В., Ходоровской Н.И. и др.; результаты собственных многолетних исследований (2004–2010 гг., 2015–2020 гг.) в ФГБОУ ВО «Челябинский государственный университет».

Собственные исследования проводились в аккредитованной лаборатории Учебного научно-исследовательского центра биотехнологий (Аттестат аккредитации № РОСС RU.0001. 515711) по сертифицированным методикам в соответствии с действующими нормативными документами¹. На рис. 1 показан район многолетних исследований в речном плесе водохранилища, расположенный вблизи водозабора городских очистных сооружений водопровода.

Рис. 1. Схема Шершневого водохранилища.
Fig. 1. The schematic map of the Shershnevsk Reservoir.

В работе представлены результаты исследований гидрохимических показателей в период весеннего половодья и летне-осенней межени с 1972 по 2020 гг. Весеннее половодье – наиболее показательный период, с точки зрения химического состава воды и ее загрязнения ввиду обильного стока талых вод снегового покрова с водосборной территории. Летне-осенняя межень является наиболее благоприятным периодом для характеристики биохимического состава воды в связи с активным протеканием биологических процессов и интенсивным развитием первичной продукции, позво-

¹ ГОСТ 17.1.3.07-82: Охрана природы. Гидросфера. Правила контроля качества воды водоемов и водотоков.

ляющими судить о происходящих изменениях в трофическом состоянии водного объекта. Протекающие биохимические процессы в данный период определяют состояние экосистемы водохранилища.

Изучение закономерностей развития гидрохимических показателей проводили с помощью специализированной программной среды Statistica Base vers. 13.5.0. Для исследования изменений характеристик воды использовали метод регрессионного анализа и расчет коэффициентов корреляционной взаимосвязи изучаемых показателей по Спирмену. Анализ адекватности моделей выполнялся сравнением фактического F и табличного (критического) F значений критерия Фишера: чем больше фактическое значение F -критерия, тем выше адекватность и достоверность модели. Оценка тесноты связи производилась по шкале Чеддока. Проведена также проверка полученных результатов на статистическую достоверность с помощью t -критерия Стьюдента [13].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для изучения особенностей динамики развития гидрохимических показателей состава воды проведен регрессионный анализ и получены линии тренда, позволяющие судить о направленности происходящих трансформаций гидрохимического режима Шершневого водохранилища.

На рисунках ниже представлены зависимости, характеризующие динамику гидрохимического режима в период весеннего половодья и летне-осенней межени с 1972 по 2020 гг. по следующим показателям: минерализация, мутность, цветность, окисляемость перманганатная, содержание растворенный кислорода, БПК₅, аммоний-ионов, нитрат-ионов, фосфат-ионов и азота общего.

Многолетняя динамика значений водородного показателя (рН) воды Шершневого водохранилища в период половодья и межени с 1972 г. по 2020 г. свидетельствует о стабильных нейтрально-щелочных условиях в водоеме. За исследуемый период значения рН в период половодья находились в пределах 7,9–8,7, в период межени – 7,95–8,9. Летом наблюдался стойко выраженный сдвиг рН в щелочную сторону.

Минерализация обусловлена присутствием в воде солей вод, поступающих с водосборной территории. Вода Шершневого водохранилища по классификации О.А. Алекина является среднеминерализованной, умеренной жесткости, гидрокарбонатного класса с преобладающими катионами кальция и магния. Жесткость воды 3–4 Ж⁰, при этом кальций составляет 35–45 мг/дм³, магний 15–25 мг/дм³. Гидрокарбонаты колеблются в диапазоне 150–200 мг/дм³, хлориды составляют в среднем 10–15 мг/дм³, сульфаты 35–40 мг/дм³. За многолетний период происходит постепенное достовер-

ное снижение общей минерализации воды как в половодье, так и в летне-осеннюю межень ($F=11,390$, $p=0,0004$ и $F=12,088$, $p=0,0004$ соответственно). В период весеннего половодья минерализация воды несколько ниже, чем в летне-осеннюю межень, за счет разбавления талыми водами с территории водосбора.

В начальный период формирования водохранилища среднее значение минерализации составляло в половодье $257,4 \text{ мг/дм}^3$, в межень – $278,2 \text{ мг/дм}^3$, в настоящее время – $233,2 \text{ мг/дм}^3$ и $237,3 \text{ мг/дм}^3$ соответственно. Таким образом, наблюдается тенденция к опреснению воды в Шершневском водохранилище за многолетний период. Как показал анализ солевого состава воды, тенденция снижения общей минерализации обусловлена статистически значимым уменьшением концентрации сульфат-ионов (SO_4) как в половодье, так и в летне-осеннюю межень ($F=6,998$, $p=0,0117$ и $F=9,591$, $p=0,0036$), которые снижаются с 65 мг/дм^3 до 40 мг/дм^3 .

Мутность является органолептическим показателем качества воды, характеризующимся присутствием тонкодисперсных примесей нерастворимых и в основном коллоидных неорганических и органических веществ различного происхождения.

Рис. 2. Динамика изменения мутности воды в Шершневском водохранилище в период 1972–2020 гг.

Fig. 2. Dynamic of the Shershnensk Reservoir water turbidity during the 1972–2020 period.

За исследуемый период 1972–2020 гг. наблюдается статистически значимая тенденция к снижению мутности в период половодья и межени: $F=10,57$, $p=0,0020$ и $F=8,34$, $p=0,0051$ (рис. 2). Падение концентрации взвеси по показателю мутность составляет примерно 40 мг/дм^3 в половодье, в фазу летне-осенней межени она снижается незначительно – на 5 мг/дм^3 . Следует отметить, что в половодье выявлена достоверно высокая степень корреляции между показателем мутности воды и содержанием взвешенных веществ (коэффициент корреляции Спирмена $r_s=0,79$). По результатам расчетов данных летне-осенней межени установлено, что коэффициент корреляции составляет $0,53$, что в соответствии со шкалой Чеддока также указывает на заметную связь данных показателей. В этот период на мутность и содержание взвешенных веществ в воде оказывают влияние вещества микробиологического происхождения – бактериопланктон, фитопланктон и зоопланктон.

Как мутность воды, так и содержание взвешенных веществ в половодье в 2–3 раза выше по сравнению с меженью. В первое десятилетие эксплуатации Шершневого водохранилища наблюдались значительные колебания в концентрации взвешенных веществ: в половодье минимальное значение составляло $5,8 \text{ мг/дм}^3$, максимальное – $107,5 \text{ мг/дм}^3$, в межень – $2,5 \text{ мг/дм}^3$ и $31,4 \text{ мг/дм}^3$ соответственно. Основным источником поступления взвеси на данном этапе эксплуатации водоема являлись продукты переработки берегов водохранилища и его ложа. С 1984–1985 гг. заметно значительное снижение количества твердых частиц в воде, что, возможно, связано с окончательной стабилизацией процессов формирования берегов и ложа водохранилища. В период 2015–2020 гг. диапазон изменений концентрации взвешенных веществ существенно уменьшился и составил в половодье $3\text{--}18 \text{ мг/дм}^3$, в межень $3\text{--}24 \text{ мг/дм}^3$. Среднее содержание взвесей в рассматриваемые фазы гидрологического режима в настоящее время практически уравнивается. За весь исследуемый период для половодья наблюдается достоверное уменьшение количества взвешенных веществ в воде ($F=9,529$, $p=0,0032$), для межени такой тенденции не выявлено. Это связано с тем, что водосборная территория Шершневого водохранилища с момента его создания претерпела значительные изменения. В 1970–1980 годы это были преимущественно сельскохозяйственные территории с высокой степенью распаханности. В начале XXI в. эти участки начали осваивать для жилищной застройки, появилось значительное по площади твердое (асфальт и бетон) покрытие. С этого времени на содержание взвешенных веществ в большей степени оказывает влияние состав воды притоков с водосбора и жизнедеятельность гидробионтов водохранилища.

Цветность воды обуславливается поступающими почвенными гуминовыми веществами и соединениями железа, особенно в период половодья (рис. 3): цветность воды водохранилища в половодье в 2–3 раза выше, чем в период летне-осенней межени. С 1972 по 2020 гг. значительные колебания цветности отмечаются в период половодья – с 24 до 220 град. цветности, которые к 2020 г. постепенно затухают. В период летне-осенней межени отмечается значительно меньший диапазон колебаний цветности – с 19 до 100 град. цветности, происходит постепенное достоверное возрастание цветности воды ($F=7,100$, $p=0,0148$) с 32 до 58 град. цветности. За исследуемый многолетний период в воде Шершневского водохранилища отмечена значительная взаимосвязь показателей мутности и цветности воды, особенно в весенний период, коэффициент корреляции составляет $r_s = 0,71$.

Кислород является одним из важнейших растворенных газов, режим которого в значительной степени влияет на химико-биологическое состояние водоемов. Концентрация кислорода в воде водного объекта определяет величину окислительно-восстановительного потенциала, а также направление и скорость процессов химического и биохимического окисления органических и неорганических соединений.

Рис. 3. Динамика изменения цветности воды в Шершневском водохранилище в период 1972–2020 гг.

Fig. 3. Dynamic of the Shershnevsk Reservoir water colority during the 1972–2020 period.

В Шершневом водохранилище ежегодно, в период летне-осенней межени, отмечается бурное «цветение» воды, обусловленное обильным появлением синезеленых водорослей, с развитием которых связано и изменение содержания растворенного в воде кислорода. За исследуемый период выявлена статистически значимая тенденция к увеличению содержания растворенного кислорода с $7,5 \text{ мг/дм}^3$ до 12 мг/дм^3 в фазу межени ($F=9,407586$; $p=0,0079$). На рис. 4 представлена динамика значений показателя степень насыщения кислородом в период половодья и межени с 1972 по 2020 гг. Относительное содержание кислорода в воде, выраженное в процентах от его нормального содержания, показывает степень насыщения воды кислородом. Насыщение воды кислородом в открытый период близко к 100 %, при «цветении» в отдельные годы – 120 %.

За исследуемый период отмечена тенденция к увеличению степени насыщения кислородом и в фазу половодья, и в фазу межени, но статистически значимые изменения отмечены только для межени ($F=14,81272$; $p=0,0008$). В фазу половодья данный показатель увеличивается примерно на 20 %, в межень – на 40 %. Полученные закономерности за многолетний период показали, что преобладающей гидрологической фазой прироста растворенного кислорода в водохранилище является летне-осенняя межень, что свидетельствует о неуклонной интенсификации процессов новообразования первичной продукции и фотосинтеза в водоеме.

Рис. 4. Динамика степени насыщения кислородом воды Шершневого водохранилища в период 1972–2020 гг.
Fig. 4. Dynamic of the Shershnevsk Reservoir water oxygen saturation degree during the 1972–2020 period.

Показатель перманганатной окисляемости (ПО) позволяет оценить содержание в воде легкоокисляемых органических соединений. На изменение концентрации легко окисляемых веществ влияет поступление загрязнений извне – из других водных объектов, с атмосферными осадками и поверхностным стоком. Большую роль оказывают внутриводоемные биохимические процессы продуцирования и трансформации органического вещества. Максимальное и минимальное значения ПО за всю историю существования Шершневого водохранилища отмечены в первое десятилетие эксплуатации водоема как в период половодья, так и в летне-осеннюю межень (14,3 и 5,5 мг/дм³; 14,6 и 5,7 мг/дм³ соответственно). Со временем происходит достоверное уменьшение окисляемости в каждую из исследуемых фаз гидрологического режима ($F=10,04$, $p=0,0017$ и $F=8,850$, $p=0,0026$), что свидетельствует о снижении количества легкоокисляемых веществ в воде Шершневого водохранилища.

Перманганатная окисляемость характеризует преимущественно содержание окрашенных гуминовых веществ, в связи с чем этот показатель связан с цветностью воды. Корреляционный анализ показал, что за исследуемый период, в половодье, заметная взаимосвязь обнаружена с цветностью ($r_s=0,66$), мутностью ($r_s=0,67$), взвешенными веществами ($r_s=0,53$), биогенными элементами – аммоний-ионом ($r_s=0,64$).

Показатель БПК₅, характеризующий содержание органических веществ в воде, в первую очередь, связан с жизнедеятельностью гидробионтов и внутриводоемными процессами, а также с поступлением загрязняющего органического вещества антропогенного происхождения. График (рис. 6) показывает, что диапазон колебаний величины БПК₅ в период весеннего пополнения воды в водохранилище составляет от 1,8 до 6,0 мгО/дм³ и отличается относительной стабильностью в течение всего периода 1972–2020 гг. В фазе летне-осенней стабилизации уровня воды БПК₅ характеризует, в основном, процессы биологического окисления, продуцируемого первичного органического вещества в водном объекте. В первое десятилетие эксплуатации Шершневого водохранилища в меженный период наблюдались значительные колебания величины БПК₅ – от 0,52 до 12 мгО/дм³. В дальнейшем с 1983 г. по 2003 г. диапазон изменений БПК₅ уменьшился и составил 2,0–6,0 мгО/дм³. С 2003 г. отмечена динамика в повышении среднего уровня органического вещества по БПК₅, что характеризует общий уровень его накопления в экосистеме. В период 2003–2020 гг. амплитуда колебаний БПК₅ в воде регистрируется на уровне первых лет существования водохранилища в интервале значений от 1,8 до 12 мгО/дм³.

Содержание в воде биогенных веществ – один из наиболее важных показателей качества поверхностных вод. Их образование, трансформация

Рис. 5. Динамика показателя перманганатная окисляемость воды Шершневого водохранилища в период 1972–2020 гг.

Fig. 5. Dynamic of the Shershnevsk Reservoir water permanganate oxidability during the 1972–2020 period.

Рис. 6. Динамика БПК₅ воды Шершневого водохранилища в период 1972–2020 гг.

Fig. 6. Dynamic of the Shershnevsk Reservoir water BOD₅ during the 1972–2020 period.

и минерализация оказывают существенное влияние на химический состав поверхностных вод, в т. ч. и на изменение концентраций минеральных форм азота и фосфора [14]. На формирование режима биогенных элементов в верхней части Шешневского водохранилища решающее влияние оказывает сток р. Миасс, на остальной акватории содержание биогенных элементов регулируется внутриводоемными процессами. Из биогенных элементов была рассмотрена многолетняя динамика минеральных соединений азота и фосфора.

Преобладающей формой минерального азота в Шершневском водохранилище является азот нитратный. Пределы колебаний концентрации нитратов по сравнению с аммоний-ионом в многолетнем аспекте более широкие: в половодье интервал колебаний содержания нитратов в воде составляет $0,12\text{--}5,6\text{ мг/дм}^3$ при среднем значении $2,4\text{ мг/дм}^3$, аммоний-ион имеет диапазон $0,05\text{--}3,2\text{ мг/дм}^3$ при среднем значении $0,77\text{ мг/дм}^3$. В весенний период количество ионов аммония и нитратов значительно превышает их концентрации по сравнению с летней меженью за счет присутствия трансформированных зимних вод и влияния поверхностного талого стока.

В период половодья 1990 г. и 1991 г. отмечены аномально высокие значения концентраций нитратов и аммоний-иона (рис. 7). Максимальные значения NO_3 наблюдались в 1990 г. и 1991 г. и составили 11 мг/дм^3 и $15,5\text{ мг/дм}^3$ соответственно, NH_4 также вырос в эти годы до $5,5\text{ мг/дм}^3$. Исследования показали, что это связано с необычными для региона гидрометеорологическими особенностями указанных лет – малоснежными зимами и очень теплым апрелем и маем по сравнению с климатической нормой, что привело к раннему таянию снега, бурному и быстрому паводку. В эти годы также отмечены необычно высокие значения мутности ($78\text{--}87\text{ мг/дм}^3$) и цветности воды ($140\text{--}220$ град. цветности).

В летне-осеннюю межень происходит существенное снижение концентрации соединений азота вследствие потребления гидробионтами. В межень содержание нитратов в воде колеблется от $0,02$ до $2,7\text{ мг/дм}^3$ при среднем значении $0,79\text{ мг/дм}^3$, а аммоний-ион имеет амплитуду изменений $0,05\text{--}1,6\text{ мг/дм}^3$ при среднем содержании в воде $0,29\text{ мг/дм}^3$. Для водохранилища характерно низкое содержание нитритов в обе фазы гидрологического режима, составляющее $0,005\text{--}0,02\text{ мг/дм}^3$.

Характеристика динамики биогенных элементов (азота и фосфора) в период летне-осенней межени особенно важна в связи с активным протеканием биохимических процессов, влияющих на развитие первичной продукции в водоеме. На рис. 8 отражено изменение содержания азота общего в воде Шершневского водохранилища в летне-осеннюю межень за многолетний период. Количество азота общего в воде описывается достоверной

Рис. 7. Динамика концентраций нитрат-ионов (а) и аммоний-ионов (б) в воде Шершневского водохранилища в период 1972–2020 гг.

Fig. 7. Dynamic of the nitrate-ions (a) and ammonia-ions (b) in the Shershnnevsk Reservoir water during the 1972–2020 period.

полиномиальной линией регрессии ($F=12,767$, $p=0,00004$). Начальный период существования Шершневого водохранилища характеризовался низкими значениями минерального азота общего $0-0,26 \text{ мгN/дм}^3$, далее его содержание увеличивается до $0,6 \text{ мгN/дм}^3$. В настоящее время количество азота общего снижается, несмотря на значительный размах значений суммарных концентраций минерального азота в воде – от $0,1$ до $1,4 \text{ мгN/л}$.

Фосфор – важнейший биогенный элемент, чаще всего лимитирующий развитие продуктивности водоемов. Оценка его концентрации в поверхностных водах и характер распределения имеют большое значение при определении настоящей и потенциальной биологической продуктивности водоема.

Рис. 8. Динамика концентрации азота общего в воде Шершневого водохранилища в период 1972–2020 гг.

Fig. 8. Dynamic of total nitrogen concentration in the Shershnevsk Reservoir water during the 1972–2020 period.

В проведенных ранее исследованиях уже отмечалось, что многолетняя динамика минерального фосфора обладает выраженной тенденцией к росту, отражая скорость антропогенного эвтрофирования Шершневого водохранилища [15]. Анализ данных с 1972 по 2020 гг. (рис. 9) выявил до-

Рис. 9. Динамика концентрации фосфат-иона в воде Шершневого водохранилища в период 1972–2020 гг.
Fig. 9. Dynamic of phosphate-ions concentration in the Shershnevsk Reservoir water during the 1972–2020 period.

стоверную линейную зависимость, свидетельствующую о постепенном возрастании концентрации фосфатов ($F=17,326$, $p=0,0002$) в воде Шершневого водохранилища в период летне-осенней межени. В первые десятилетия эксплуатации водохранилища содержание фосфат-ионов колебалось в диапазоне $0,04–0,20$ мг/дм³. С 2010 г. отмечен значительный рост данного показателя, в настоящее время концентрация фосфатов в среднем составляет $0,3$ мг/дм³, а пределы колебаний достигают $0,08–0,6$ мг/дм³. Таким образом, прослеживается тенденция постепенного накопления в воде Шершневого водохранилища минерального фосфора, что способствует увеличению уровня эвтрофирования водохранилища.

ВЫВОДЫ

Исследования направленности происходящих перемен гидрохимического режима и особенностей многолетней динамики развития важнейших гидрохимических показателей водных масс Шершневого водохранилища показали, что в длительном временном аспекте с 1972 по 2020 гг. в воде

водохранилища установились стабильные нейтрально-щелочные условия в вегетационный период с тенденцией роста щелочных значений pH в последнее пятилетие. Достоверно выявлено снижение минерализации воды в водохранилище как в половодье, так и в летне-осеннюю межень, тренд снижения общей минерализации обусловлен статистически значимым уменьшением концентрации сульфат-ионов.

За исследуемый период наблюдается статистически значимая тенденция к снижению мутности и взвешенных веществ в воде. Очевидно, это связано с окончательной стабилизацией процессов формирования берегов и ложа водохранилища, а также со значительными изменениями на водосборной территории Шершневского водохранилища – сокращением сельскохозяйственных угодий, увеличением площади жилой застройки.

Происходит достоверное снижение перманганатной окисляемости в каждую из исследуемых фаз гидрологического режима, но, в целом, наблюдается накопление органических веществ по БПК₅ в воде Шершневского водохранилища.

В период летне-осенней межени в длительном временном аспекте определено достоверное изменение следующих гидрохимических показателей: снижаются перманганатная окисляемость и азот общий; возрастают цветность, содержание растворенного кислорода в воде; наблюдается выраженный рост минерального фосфора. Эти особенности изменения гидрохимических показателей характеризуют усиление процессов фотосинтеза, повышения продуктивности и уровня антропогенного эвтрофирования водохранилища.

Полученная информация важна для принятия управленческих решений по выработке природоохранных мероприятий для оздоровления экосистемы Шершневского водохранилища. Выявленные тенденции эвтрофикации показывают, что возможным основным источником повышения содержания органического вещества в воде является его миграция из накопленных донных отложений. Для снижения концентрации органических соединений в воде рекомендуется очистка дна от донных отложений в районе верховьев Шершневского водохранилища. Также предлагается обеспечить функционирование схемы существующей системы переброски воды из Долгобродского водохранилища через Аргазинское в Шершневское водохранилище, что позволит повысить водообмен и предотвратить «цветение» воды, снизить темпы эвтрофикации и улучшить состояние экосистемы Шершневского водохранилища. Следует расширить программу мониторинга гидрохимических показателей воды и донных отложений в водохранилищах системы переброски, установив периодичность и сроки проведения наблюдений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Двинских С.А., Китаев А.Б. Особенности функционирования водохранилища как природно-техногенного объекта // Географический вестник. 2014. № 2. С. 34–41.
2. Авакян А.Б., Салтанкин В.П., Шарапов В.А. Водохранилища. Москва: Мысль, 1987. 323 с.
3. Эдельштейн К.К. Гидрология озер и водохранилищ. М.: Изд-во «Перо», 2014. 399 с.
4. Лопух П.С. Закономерности развития водоемов замедленного водообмена, их использование и охрана. Минск: БГУ. 2000. 332 с.
5. Многолетняя динамика водно-экологического режима Новосибирского водохранилища / В.М. Савкин и др. Новосибирск: Изд-во Сибирского отделения РАН, 2014. 390 с.
6. Лобченко Е.Е., Минина Л.И., Ничипорова И.П., Первышева О.А. Динамика качества воды Цимлянского водохранилища (за период с 1979 по 2014 годы) // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2016. № 6. С. 74–92. DOI: 10.35567/1999-4508-2016-6-6.
7. Абдрахманов Р.Ф., Полева А.О., Валитов С.А. Формирование химического состава воды и донных отложений Павловского водохранилища // Геологический вестник. 2018. № 3. С. 124–136.
8. Хафизов А.Р., Валитов С.А., Камалетдинова Л.А., Низамова Р.А., Гайсин И.З., Многолетняя динамика и современные тенденции изменения химического состава воды в акватории Павловского водохранилища // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2020. № 4. С. 19–34. DOI: 10.35567/1999-4508-2020-4-2.
9. Durand P., Breuer L., Johnes P., Billen G., Butturini A., Pinay G., Wright R. Nitrogen processes in aquatic ecosystems. In M. Sutton, C. Howard, J. Erisman, G. Billen, A. Bleeker, P. Grennfelt, et al. (Eds.), The European Nitrogen Assessment: Sources, Effects and Policy Perspectives (P. 126-146). Cambridge: Cambridge University Press. 2011. DOI: 10.1017/CBO9780511976988.010
10. Ушакова О.С., Сокольских И.И. Шершневское водохранилище / Вода России. Научно-популярная энциклопедия. 2021. Режим доступа: https://waterrf.ru/Водные_объекты/1712/ Шершнёвское водохранилище (дата обращения: 04.07.2021).
11. Khodorovskaia N., Yachmenev V., Kravtsova A., Kraineva S., Deryabina L. Ecological well-being of water sources as a factor of an industrial city sustainable development. E3S Web Conferences Ural Environmental Science Forum “Sustainable Development of Industrial Region” (UESF-2021). 2021. № 258. Режим доступа: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2021/34/e3sconf_uesf2021_08007.pdf (дата обращения: 04.07.2021).
12. Ницкая С.Г., Ходоровская Н.И., Еремкина Т.В., Устименко А.В. Элементы гидрологического режима водохранилищ Челябинского промузла // Биологические ресурсы и рациональное рыбохозяйственное использование водоемов

Урала: сб. науч. тр. Урал. фил. ФГУП «Госрыбцентр». Екатеринбург, 2006. № 11. С. 5–18.

13. Sokal, Robert R. Biometry: the principles and practice of statistics in biological research. New York: Freeman, cop. 2012. 937 с.
14. Келлер И.А., Китаев А.Б. Динамика биогенных веществ в Воткинском водохранилище // Географический вестник. 2011. № 3. С. 27–35.
15. Ходоровская Н.И., Еремкина Т.В., Антипова В.А. Современное состояние Шершневского водохранилища в условиях антропогенного эвтрофирования // Мат-лы IV Всеросс. конф. по водной экотоксикологии «Антропогенное влияние на водные организмы и экосистемы». Ч. 2. Борок. 2011. С. 177–181.

REFERENCES

1. Dvinskikh S. A., Kitaev A. B. Special features of a reservoir functioning as a nature/man-made unit. *Geograficheskii vestnik*. [Geographical Herald], 2014, no 2, p. 34–41 (in Russ.).
2. Avakian A. B., Saltankin V. P., Sharapov V. A. Reservoirs. Moskva: Mysl [Idea], 1987, 323 p. (in Russ.).
3. Edel'shtein K.K. Hydrology of lakes and reservoirs. M.: Izd-vo «Pero» [“Pero” Publishing house], 2014, 399 p. (in Russ.).
4. Lopukh P.S. Regularities of the retarded water exchange water bodies' development, their use and protection. Minsk: BGU, 2000. 332 p. (in Russ.).
5. Many-year dynamics of the Novosibirsk Reservoir water/ecological regime / V.M. Savkin et al. Novosibirsk: Izd-vo Sibirskogo otd-niya Rossiiskoy akad. nauk [Publishing house of the Russian Academy of Sciences Siberian Branch], 2014. 390 p. (in Russ.).
6. Lobchenko E.E., Minina L.I., Nichiporova I.P., Pervysheva O.A. Dynamics of the Tsimlyansk Reservoir water quality (over the 1979-2014 period). Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management, 2016, no 6, p. 74–92 (in Russ.).
7. Abdrakhmanov R.F., Poleva A.O., Valitov S.A. Formation of the water and bottom sediments chemical composition in the Pavlovsk Reservoir. *Geologicheskii vestnik* [Geological Herald], 2018, no 3, p. 124–136 (in Russ.).
8. Khafizov A.R., Valitov S.A., Kamaletdinova L.A., Nizamova R.A., Gaisin I.Z., Many-year dynamics and current trends of the water chemical composition changing in the Pavlovsk Reservoir water area. Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management, 2020, № 4, p. 19–34 (in Russ.).
9. Durand, P., Breuer, L., Johnes, P., Billen, G., Butturini, A., Pinay, G., Wright, R. Nitrogen processes in aquatic ecosystems. In M. Sutton, C. Howard, J. Erisman, G. Billen, A. Bleeker, P. Grennfelt, et al. (Eds.). The European Nitrogen Assessment: Sources, Effects and Policy Perspectives (pp. 126-146). Cambridge: Cambridge University Press, 2011. DOI: 10.1017/CBO9780511976988.010.
10. Ushakova O. S., Sokol'skikh I. I. The Shershnevsk Reservoir. Voda Rossiya. Nauchno-populiarnaya entsiklopediya [Water of Russia. Scientific/popular encyclopedia]. 2021. URL: [https://waterrf.ru/Vodnye_ob"ekty/1712/ Shershnevskoe vodokhranilishche \(data obrashcheniia: 04.07.2021\)](https://waterrf.ru/Vodnye_ob) (in Russ.).
11. Khodorovskaia N., Yachmenev V., Kravtsova A., Kraineva S., Deryabina L. Ecological well-being of water sources as a factor of an industrial city sustainable development. E3S

- Web Conf. Ural Environmental Science Forum “Sustainable Development of Industrial Region” (UESF-2021). 2021. № 258. URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3s-conf/pdf/2021/34/e3sconf_uesf2021_08007.pdf (data obrashcheniia: 04.07.2021).
12. Nitskaya S. G., Khodorovskaya N. I., Eremkina T. V., Ustimenko A. V. Elements of the Chelyabinsk industrial cluster reservoirs' hydrological regime. *Biologicheskie resursy i ratsional'noe rybnokhoziaistvennoe ispol'zovanie vodoemov Urala* [Biological resources and rational fishery use of the Ural water bodies]: sb. nauch. tr. Ural. fil. FGUP «Gosrybt-sentr». Ekaterinburg, 2006, no 11, p. 5–18 (in Russ.).
 13. Sokal Robert R. Biometry: the principles and practice of statistics in biological research. New York: Freeman, cop. 2012. 937 s.
 14. Keller I.A., Kitaev A.B. Dynamics of biogenic substances in the Votkinsk Reservoir. *Geograficheskii vestnik* [Geographical Herald], 2011, №3, p. 27–35 (in Russ.).
 15. Khodorovskaya N.I., Eremkina T.V., Antipova V.A. Current status of the Shershnevsk Reservoir in the conditions of anthropogenic eutrophication. Materialy IV Vserossiiskoi konferentsii po vodnoi ekotoksikologii, posviashchennoi pamiati B.A. Flerova. «Antropogennoe vliianie na vodnye organizmy i ekosistemy» [Anthropogenic impact on aquatic organisms and ecosystems]i shkoly-seminara «Sovremennye metody issledovaniia i otsenki kachestva vod, sostoiianiia vodnykh organizmov i ekosistem v usloviakh antropogennoi nagruzki» [Contemporary methods of research and assessment of water quality, status of aquatic organisms and ecosystems in the conditions of anthropogenic load]. Part 2. Borok. 2011. P. 177–181 (in Russ.).

Сведения об авторах:

Кравцова Анна Викторовна, старший преподаватель биологического факультета, ФГБОУ ВО «Челябинский государственный университет», Россия, 454001, г. Челябинск, ул. Братьев Кашириных, д. 129; ORCID: 0000-0001-9098-5795; e-mail: kravtsova87@yandex.ru

Ходоровская Надежда Игоревна, канд. техн. наук, доцент, заведующая лабораторией водных экосистем и технологии воды, Учебный научно-исследовательский центр биотехнологий, ФГБОУ ВО «Челябинский государственный университет», Россия, 454001, г. Челябинск, ул. Братьев Кашириных д. 129; ORCID: 0000-0002-2114-0091; e-mail: nikhod@yandex.ru

Ячменев Владислав Анатольевич, канд. геогр. наук, начальник Учебного научно-исследовательского центра биотехнологий, ФГБОУ ВО «Челябинский государственный университет», Россия, 454001, г. Челябинск, ул. Братьев Кашириных д.129; ORCID: 0000-0002-1471-0156; e-mail: evo-chel@yandex.ru

Баженова Василина Викторовна, инженер, лаборатория водных экосистем и технологии воды, Учебный научно-исследовательский центр биотехнологий, ФГБОУ ВО «Челябинский государственный университет», Россия, 454001, г. Челябинск, ул. Братьев Кашириных д.129; ORCID: 0000-0002-5342-4590; e-mail: cbt@csu.ru

About the authors:

Anna V. Kravtsova, Senior Lecturer, Biological Faculty, Chelyabinsk State University, ul. Br. Kashirinykh, 129, Chelyabinsk, 454001, Russia; ORCID: 0000-0001-9098-5795; e-mail: kravtsova87@yandex.ru

Nadezhda I. Khodorovskaya, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Director of the Laboratory of Aquatic Ecosystems and Water Technology, Academic Research Center of Biotechnologies, Chelyabinsk State University, ul. Br. Kashirinykh, 129, Chelyabinsk, 454001, Russia; ORCID: 0000-0002-2114-0091; e-mail: nikhod@yandex.ru

Vladislav A. Yachmenev, Candidate of Geographical Sciences, Director of Academic Research Center of Biotechnologies, Chelyabinsk State University, ul. Br. Kashirinykh, 129, Chelyabinsk, 454001, Russia; ORCID: 0000-0002-1471-0156; e-mail: evo-chel@yandex.ru

Vasilina V. Bazhenova, Engineer, Laboratory of Aquatic Ecosystems and Water Technology, Academic Research Center of Biotechnologies, Chelyabinsk State University, ul. Br. Kashirinykh, 129, Chelyabinsk, 454001, Russia; ORCID: 0000-0002-5342-4590; e-mail: e-mail: cbt@csu.ru