

УДК 556.555.7(476)

ГИДРОХИМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ АЦИДОТРОФНЫХ ОЗЕР БЕЛАРУСИ В УСЛОВИЯХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ И АНТРОПОГЕННОЙ НАГРУЗКИ

Н. Ю. СУХОВИЛО¹⁾, А. И. МОРОЗ¹⁾, А. А. НОВИК¹⁾, Д. Б. ВЛАСОВА¹⁾

¹⁾Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

Ацидотрофные озера – уникальные для территории Беларуси водоемы, которые характеризуются минимальными значениями концентрации веществ, растворенных в водной массе. Они обладают высокой чувствительностью к изменению природно-климатических условий на водосборах и к антропогенной трансформации водного, гидрохимического и термического режимов, но при этом достаточно слабо реагируют на восстановительные мероприятия. Озера подобного типа являются местами обитания представителей редких и охраняемых видов флоры и фауны. Изучение современного состояния ацидотрофных озер позволит установить намечающиеся тенденции эвтрофирования на ранних этапах и принять меры, направленные на предотвращение деградации данных лимносистем и исчезновения представителей охраняемых видов аквафлоры. Анализировался гидрохимический режим ацидотрофных озер Беларуси в условиях климатических изменений и антропогенного воздействия на их водосборы. Исследование гидрохимических показателей восьми ацидотрофных озер Беларуси показало, что по сравнению с концом 1970-х – началом 1980-х гг. в них повысился уровень минерализации воды и концентрации аммоний-иона, а также снизились значения содержания кислорода, растворенного в водной массе, и прозрачность. В озерах Свитязь и Белое (Лунинецкий район) летом у дна формируется сероводородная зона. Это свидетельствует об ухудшении экологического состояния ацидотрофных озер. Результаты исследования могут быть применены для управления водными экосистемами, при их восстановлении, оптимизации хозяйственного использования водосборов озер, а также в образовательном процессе в целях подготовки специалистов – гидрометеорологов и геоэкологов.

Ключевые слова: ацидотрофное озеро; водосбор; гидрохимический режим; экологическое состояние; изменение климата; антропогенное воздействие.

Благодарность. Исследование выполнено при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта X22M-069.

Образец цитирования:

Суховило НЮ, Мороз АИ, Новик АА, Власова ДБ. Гидрохимический режим ацидотрофных озер Беларуси в условиях климатических изменений и антропогенной нагрузки. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология.* 2023;2:58–69. EDN: LDQHRD

For citation:

Sukhovilo NYu, Maroz AI, Novik AA, Vlasova DB. Hydrochemical regime of Belarus acidotrophic lakes under conditions of climatic changes and anthropogenic load. *Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology.* 2023; 2:58–69. Russian. EDN: LDQHRD

Авторы:

Нина Юрьевна Суховило – кандидат географических наук; заведующий научно-исследовательской лабораторией озераведения факультета географии и геоинформатики.

Алексей Игоревич Мороз – студент факультета географии и геоинформатики. Научный руководитель – кандидат географических наук Т. Г. Табальчук.

Алексей Александрович Новик – кандидат географических наук, доцент; доцент кафедры общего землеведения и гидрометеорологии факультета географии и геоинформатики.

Дарья Борисовна Власова – младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории озераведения факультета географии и геоинформатики.

Authors:

Nina Yu. Sukhovilo, PhD (geography); head of the laboratory of lake research, faculty of geography and geoinformatics.

sukhovilony@bsu.by

<https://orcid.org/0000-0003-0629-126X>

Aliaksei I. Maroz, student at the faculty of geography and geoinformatics.

alexiusmoroz@gmail.com

Aliaksei A. Novik, PhD (geography), docent; associate professor at the department of general geography and hydrometeorology, faculty of geography and geoinformatics.

novika@bsu.by

<http://orcid.org/0000-0002-9416-6313>

Daria B. Vlasova, junior researcher at the laboratory of lake research, faculty of geography and geoinformatics.

vlasovadb@bsu.by

<https://orcid.org/0009-0008-6026-0310>

HYDROCHEMICAL REGIME OF BELARUS ACIDOTROPHIC LAKES UNDER CONDITIONS OF CLIMATIC CHANGES AND ANTHROPOGENIC LOAD

N. Yu. SUKHOVILO^a, A. I. MAROZ^a, A. A. NOVIK^a, D. B. VLASOVA^a

^aBelarusian State University, 4 Niezaliezhnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

Corresponding author: N. Yu. Sukhovilo (sukhovilony@bsu.by)

Acidotrophic lakes are unique reservoirs for the territory of Belarus, which are characterised by a minimum concentration of dissolved substances. They are very sensitive to changes in natural and climatic conditions in watersheds and anthropogenic transformation of water, hydrochemical and thermal regimes, but at the same time they react rather weakly to restoration measures. Lakes of this type are habitats for rare and protected species of flora and fauna. The study of the current state of acidotrophic lakes will make it possible to identify emerging trends in eutrophication at an early stage and to take measures aimed at preventing the degradation of these limnosystems and the disappearance of protected species of aquaflora. The purpose of the study is the analysis of hydrochemical regime of acidotrophic lakes in Belarus under the conditions of climate change and anthropogenic impact on their watersheds. An analysis of the hydrochemical parameters of eight acidotrophic lakes in Belarus showed that, compared with the late 1970s – early 1980s there was an increase in water mineralisation, ammonium ion concentration, a decrease in the concentration of dissolved oxygen and transparency. In the lakes Svityaz and Beloe (Luninets district), a hydrogen sulfide zone forms near the bottom in summer. This testifies to the deterioration of the ecological state of acidotrophic lakes. The results of the study can be used for the management of aquatic ecosystems, during their restoration, optimisation of the economic use of lake catchment areas, in the educational process in the training of hydrometeorologists and geoecologists.

Keywords: acidotrophic lake; catchment; hydrochemical regime; ecological state; climate change; anthropogenic impact.

Acknowledgements. The research was funded by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research according to the research project X22M-069.

Введение

Среди всего многообразия озер, различающихся как строением котловин, видом водного питания, химическим составом вод, так и уровнем продуцирования, особняком стоят озера, которые имеют низкую продуктивность, специфические черты аazonального характера (водораздельное положение водосборов), малые размеры, гидрологическую замкнутость, верховые болота на водосборе, а также небольшие показатели минерализации и активной реакции воды.

Термин «ацидотрофные озера» впервые был введен А. Ф. Тинеманом в 1928 г. Под этим понятием подразумевались низкопродуктивные озера со значениями водородного показателя ниже 5,5. В 1933 г. Шинкичи Йошимура разделил ацидотрофные озера на два типа: в озерах первого типа кислая реакция среды обусловлена особенностями подстилающих пород, а в озерах второго типа – биологическими процессами. К данной классификации позднее был добавлен третий тип озер, закисление которых вызвано выпадением кислотных дождей, т. е. влиянием антропогенного фактора [1]. Позже Б. М. Александров при разработке типологии озер на основе биологических показателей выделил так называемые ацидотрофные (ацидные) озера. В первую очередь он полагался на количественные (продукционные) критерии развития флоры и фауны, но не рассматривал видовой состав гидробионтов [2].

В последние годы исследование ацидотрофных озер проводится в основном гидробиологами, оно направлено на установление особенностей функционирования отдельных сообществ и их адаптации к кислой реакции среды обитания. Одним из наиболее изученных является оз. Крейтер (штат Орегон, США), имеющее вулканическое происхождение [3, p. 180].

В СССР первые исследования ацидотрофных водоемов связаны с деятельностью С. Н. Скадовского, Г. Г. Винберга и др. В качестве характерных черт закисленных водоемов указывались низкие значения содержания кальция, полное или почти полное отсутствие гидрокарбонатов, а также сульфатный класс вод. В дальнейшем особенности структуры и специфика функционирования биоты болотных гумифицированных водоемов, в том числе ацидотрофных, анализировались главным образом на примере озер Карелии и Ленинградской области, где они получили наиболее широкое распространение [4; 5].

В 1994 г. был издан сборник трудов Института биологии внутренних вод имени И. Д. Папанина [6]. В нем описаны особенности экосистем озер с кислой реакцией среды Дарвинского государственного природного биосферного заповедника (Вологодская и Ярославская области, Россия), где закисление

имело как естественные, так и антропогенные причины с преобладанием первых. Авторами сборника чаще рассматривались озера, расположенные в пределах верховых болот, что несколько отличает их от объектов настоящего исследования.

В Беларуси кислотные водоемы, размещенные вне крупных верховых болот, обнаружили в 1970-х гг. в ходе паспортизации озер. Впервые комплексно были описаны подобные озера, определены состав водной массы, гидрологические и гидробиологические особенности этих водоемов [7]. При паспортизации объектов выявлено, что практически все озера имеют на водосборе небольшой верховой болотный массив, который служит источником образования гумусовых кислот. В классификации, предложенной О. Ф. Якушко, они отнесены к озерам первого типа – глубоким небольшим мезотрофным озерам с признаками олиготрофии [8]. Однако такое утверждение не совсем обоснованно, так как, несмотря на схожесть некоторых классификационных признаков, максимальная глубина подобных водоемов редко превышает 10 м. В настоящее время на территории Беларуси отдельные кислотные озера изучаются в контексте выявления закономерностей распространения представителей охраняемых видов аквафлоры, в основном полушника озерного (*Isoetes lacustris* L.) и лобелии Дортмана (*Lobelia dortmanna* L.) [9].

Среди всех водоемов страны озера кислотного типа считаются наименее распространенными. М. И. Петрова уточнила особенности расположения этих водоемов, а также определила параметры и характеристики среды кислотных озер Беларуси [10].

На некоторых кислотных озерах имеются пункты наблюдения за состоянием высшей водной растительности Национальной системы мониторинга окружающей среды. Кроме образцов самой водной растительности, отбираются пробы воды и донных отложений для анализа их химического состава. Исследования, которые проводятся в рамках Национальной системы мониторинга окружающей среды, осуществляются раз в 5–10 лет, но в основном охватывают ключевые участки и являются единичными и несистематичными¹.

Из-за слабого характера водообмена и низких значений концентрации веществ, растворенных в водной массе, кислотные озера сильно уязвимы к изменению окружающей среды, которое обусловлено как климатическими сдвигами, так и антропогенной нагрузкой. Это может привести к исчезновению представителей охраняемых видов водной флоры и фауны. По этой причине необходимо детально изучить среду распространения представителей охраняемых видов растений в целях своевременного выявления изменений в химическом составе воды, гидрологическом, газовом и температурном режимах [11].

Актуальность исследования кислотных озер продиктована несколькими причинами – исключительной редкостью встречаемости уникальных для территории Беларуси водоемов данного типа и их высокой уязвимостью к внешнему климатическому и антропогенному воздействию. Трансформации, которые происходят в кислотных озерах, приводят к исчезновению и сокращению числа представителей обитающих в них редких и реликтовых видов, таких как полушник озерный и лобелия Дортмана, – биоиндикаторов изменения климата, загрязнения и эвтрофикации вод.

Цель исследования – анализ гидрохимического режима кислотных озер Беларуси в условиях климатических изменений и антропогенного воздействия на их водосборы.

Материалы и методы исследования

Исходными сведениями послужили данные натурных наблюдений и фондовые материалы научно-исследовательской лаборатории озероведения факультета географии и геoinформатики Белорусского государственного университета за период с 1971 по 2022 г., которые включают информацию о морфометрических и гидрохимических параметрах кислотных озер, особенностях их водосборов и характере водообмена². Применялись полевой, лабораторный, сравнительно- и эколого-географический методы, а также методы системного анализа и математической статистики (регрессионный, корреляционный анализ).

Из общего количества известных кислотных озер исследованы восемь модельных водоемов, имеющих типичные признаки. Они различаются морфометрией, генезисом котловин, химическим составом воды и степенью биогенной нагрузки, поэтому достаточно полно отражают природные особенности кислотных озер Беларуси. Географическое положение объектов исследования представлено на рис. 1.

¹Проведение наблюдений за ресурсами водной растительности, а также за средой ее произрастания : отчет о НИР / БГУ ; рук. Б. П. Власов. Минск, 2000–2016. № ГР 20164690.

²Комплексное лимнологическое обследование озерных водоемов Белоруссии : отчет о НИР / БГУ ; рук. О. Ф. Якушко. Минск, 1971–1980. ХД-ЛОЗ-671717 ; Проведение наблюдений за ресурсами водной растительности... ; Власов Б. П., Якушко О. Ф., Гигевич Г. С. Озера Беларуси : справочник. Минск : Минсктиппроект, 2004. 284 с.



Рис. 1. Картограмма расположения объектов исследования.
Обозначения: I – Поозерье; II – Центральная Беларусь; III – Полесье
Fig. 1. Map of the location of research objects.
Designations: I – Poozerie; II – Central Belarus; III – Polesie

Большинство анализируемых озер приурочены к Полоцкой озерно-ледниковой низине, однако оз. Свитязь расположено на Новогрудской конечно-моренной возвышенности, оз. Ильгиния – в пределах Свенцянских ледниковых гряд, а оз. Белое (Лунинецкий район) – на Логишинской водно-ледниковой равнине.

Озера имеют ледниковое, реже карстовое (озера Свитязь и Белое (Лунинецкий район)) происхождение, относятся к числу неглубоких и небольших по площади водоемов. Их котловины характеризуются простым строением: округлой или овальной формой, плавной береговой линией, воронкообразной подводной частью. Узкая, пологая литораль занимает 10–20 % от площади акватории, она сложена песком и заиленным песком. Неширокий, крутой сублиторальный склон образован опесчаненным илом. Ложе плоское. Берега ацидотрофных озер Поозерья чаще всего крутые, сложенные песком и торфом, заросшие водно-болотной растительностью. Пойма не выражена. Склоны котловин (высота 5–10 м) на отдельных участках крутые, но чаще пологие, они образованы песком, в основном покрыты лесом. Водосборы озер имеют малую площадь – от 0,25 км² (оз. Ильгиния) до 2,02 км² (оз. Чербомысло). Максимальной площадью обладает водосбор оз. Свитязь (9,04 км²). Рельеф преимущественно крупнохолмистый, пологоволнистый, склоны чаще сложены песком, покрыты сосновым лесом. На водосборе почти всех озер расположены небольшие массивы верховых болот, примыкающих к акватории. Гидрологическая сеть на водосборах озер не развита, практически все водоемы не имеют впадающих водотоков.

Уровеньный режим озер стабильный. За многолетний период, по данным наблюдений, отмечаются незначительные колебания уровня воды в годовом цикле.

В приходной части водного баланса преобладают приток грунтовых вод и осадки на зеркало озера, а в его расходной части доминирует испарение с поверхности озер. Из оз. Свитязь вытекает р. Своротва, остальные озера являются бессточными. Водообмен замедленный. Основные морфометрические характеристики исследуемых озер приведены в таблице.

Морфометрические характеристики исследуемых озер

Morphometric characteristics of studied lakes

Озеро	Район	Характеристики							
		Площадь, км ²	Объем, млн м ³	Максимальная глубина, м	Средняя глубина, м	Открытость	Глубинность	Площадь водосбора, км ²	Период водообмена, лет
Белое	Лунинецкий	0,23	1,75	17,0	7,6	0,03	99,13	0,31	44,80
Белое	Полоцкий	1,0	8,42	19,6	8,4	0,12	8,40	1,80	21,05
Большое Островито	Полоцкий	0,48	1,50	6,0	3,1	0,15	3,97	1,12	6,0

Озеро	Район	Характеристики							
		Площадь, км ²	Объем, млн м ³	Максимальная глубина, м	Средняя глубина, м	Открытость	Глубинность	Площадь водосбора, км ²	Период водообмена, лет
Бредно	Верхнедвинский	0,21	0,54	4,6	1,9	0,15	20,36	0,30	6,90
Глубокое	Полоцкий	0,42	2,20	11,5	5,2	0,08	6,93	1,94	3,58
Ильгиния	Мядельский	0,08	0,43	15,6	5,1	0,02	179,89	0,25	8,07
Свитязь	Новогрудский	2,24	7,76	15,0	3,4	0,52	5,80	9,04	5,0
Чербомысло	Полоцкий	0,50	1,67	6,9	3,3	0,15	4,18	2,02	3,71

Гидрохимический режим озер формируется под влиянием характера питания (атмосферные осадки), гидрологических особенностей, состава приточных вод и морфометрического строения котловины. Небольшая площадь водосбора и отсутствие поверхностного притока способствуют стабильности химического состава водной массы в течение вегетационного сезона. Значительные глубины озер при их малой площади содействуют установлению в теплое время года прямой температурной стратификации³.

Донные отложения водоемов характеризуются четко выраженным поясным распределением и обнаруживают закономерность, определяемую формой котловины и расположением глубин. Минеральные осадки мелководной прибрежной зоны озер представлены песком и заиленным песком. Литораль и сублиторальный склон выстланы песком, ширина полосы изменяется от нескольких метров в озерах Бредно, Чербомысло, Глубокое и Большое Островито до 70–100 м в озерах Белое (Полоцкий район) и Свитязь. В сублиторали и на границе с ней к песчаным осадкам примешиваются алевритовые частицы и формируется опесчаненный ил. Последний образует сплошную непрерывную полосу шириной от 10–25 м в озерах Чербомысло, Большое Островито и Бредно до 100–200 м в озерах Свитязь, Белое (Лунинецкий район) и Белое (Полоцкий район). Наименьшая ширина залегания ила отмечена вдоль пологих и заболоченных берегов. С глубиной песок замещается заиленным песком и опесчаненным илом. В глубоководной части озерного ложа распространены тонкодетритовые сапропели⁴. Этот тип осадков занимает до 80 % от площади дна озер. Основным источником накопления органического вещества сапропелей служат главным образом планктонные организмы и остатки высших растений.

Все озера отличаются слабым развитием жизни. Видовой состав гидробионтов бедный, продукция низкая. Высшая водная растительность в озерах не получила широкого распространения. Она представлена полупогруженными растениями, занимающими литоральную зону на глубине от 0,2 до 0,7 м (различные виды осоки (*Carex* sp.), тростник обыкновенный (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.), ситняг болотный (*Eleocharis palustris* (L.) Roem. & Schult.)). Тростник образует сильно разреженные заросли на отдельных участках литорали у самого уреза воды. В этом же поясе местами вдоль берегов озер Свитязь, Белое (Лунинецкий район) и Бредно встречается редкий, охраняемый вид – лобелия Дортмана. Растения с плавающими листьями в озерах развиты слабо или отсутствуют. Среди них наиболее распространены кувшинка чисто-белая (*Nymphaea candida* J. Presl & C. Presl), кубышка желтая (*Nuphar lutea* (L.) Sm.), рдест плавающий (*Potamogeton natans* L.), горец земноводный (*Polygonum amphibium* L.). Кувшинка и горец встречаются единичными экземплярами в заливах. Погруженные растения не отличаются видовым разнообразием, они представлены в основном элодеей канадской (*Elodea canadensis* Michx.), полушником озерным, а также различными видами рдестов (*Potamogeton* sp.) и мхов (*Fontinalis* sp.). Охраняемый вид полушник озерный произрастает в прибрежной части всех озер на глубине от 0,7 до 3,3 м. Видовой состав фитопланктона крайне беден, преобладают зеленые водоросли. Зоопланктон и зообентос также характеризуются слабым развитием. В зоопланктоне оз. Бредно отмечено наличие редкого для озер Беларуси голопедия горбатого (*Holopedium gibberum* Zaddach), который обитает в слабоминерализованных водах. Озера относятся к хириноидно-олигохетному типу.

Анализируемые озера являются слабопродуктивными водоемами, их ихтиофауна классифицируется как окунево-щучья. Из рыб здесь водятся щука (*Esox lucius* L.), окунь (*Perca fluviatilis* L.), плотва (*Rutilus rutilus* L.), карась (*Carassius carassius* L.) и линь (*Tinca tinca* L.).

³Проведение наблюдений за ресурсами водной растительности...

⁴Там же.

Результаты и их обсуждение

Под влиянием специфических условий на водосборах (высокая лесистость, наличие небольшого болотного массива, преобладание песчаных покровных отложений) в изучаемых озерах сформировался гидрохимический режим, отличающийся от зонального, характерного для большинства водоемов Беларуси. Среди уникальных свойств ацидотрофных озер следует отметить низкую минерализацию воды, малые значения концентрации других веществ, растворенных в водной массе, кислую реакцию среды и невысокую цветность.

Газовый режим озер тесно связан с их морфометрией, трофическим статусом и термической стратификацией. На рис. 2 отражены кривые вертикального распределения кислорода, растворенного в воде озер Белое (Лунинецкий район), Белое (Полоцкий район), Бредно и Глубокое, а также показатели термической стратификации этих водоемов в период летней стагнации 2022 г.

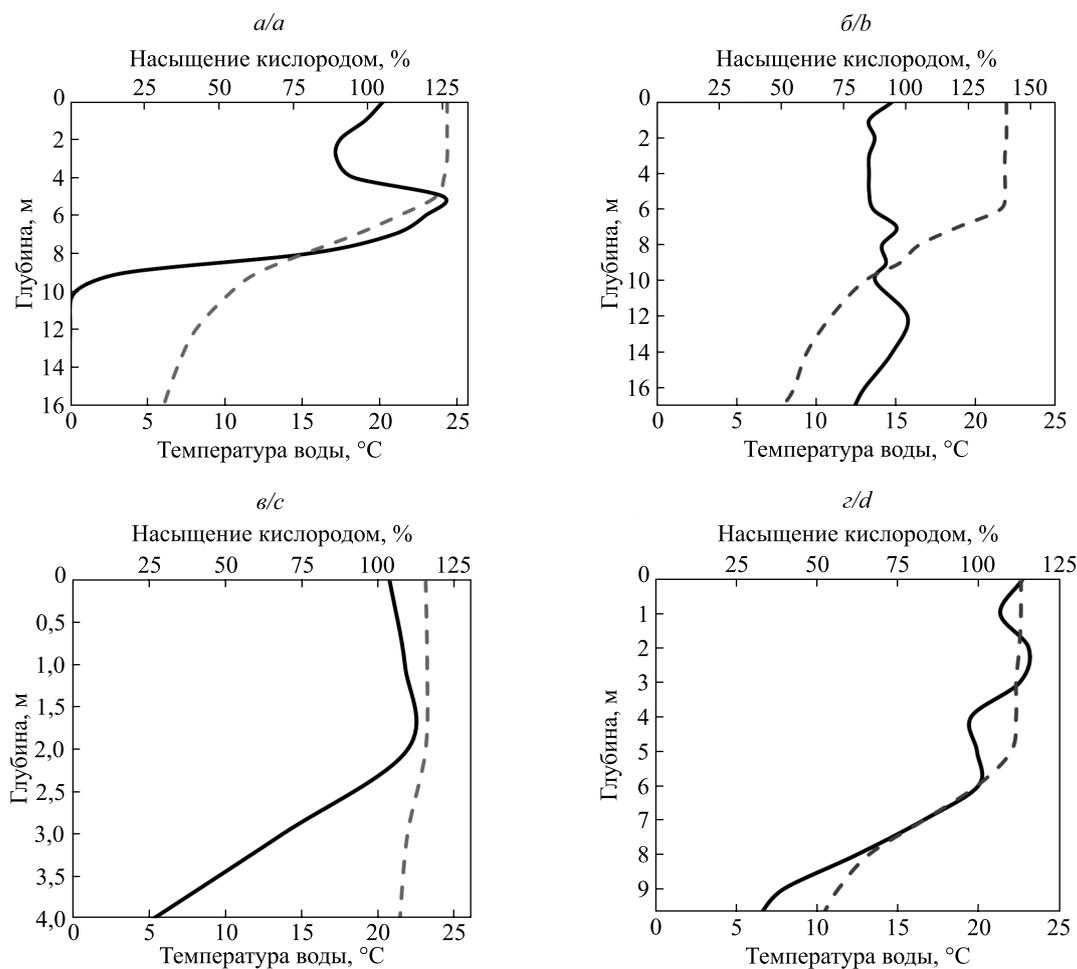


Рис. 2. Вертикальное распределение кислорода, растворенного в воде озер Белое (Лунинецкий район) (а), Белое (Полоцкий район) (б), Бредно (в) и Глубокое (г), и термическая стратификация этих водоемов в период летней стагнации 2022 г.

Сплошной линией обозначен уровень насыщения воды кислородом, пунктирной – температура воды

Fig. 2. Vertical distribution of oxygen dissolved in the water of lakes Beloe (Luninets District) (a), Beloe (Polotsk District) (b), Bredno (c), and Glubokoe (d) and thermal stratification of these reservoirs during the summer period of 2022.

The solid line indicates the level of water saturation with oxygen, the dotted line indicates the water temperature

Характеристикой силы температурной стратификации является термическая устойчивость озер. Ее степень определяется на основании того, какую работу необходимо совершить для перевода озера в состояние гомотермии в адиабатических условиях. Максимальное значение (270 Дж/м²) термической устойчивости водной массы во время наблюдений за температурой воды с 1971 по 2022 г. было зафиксировано в оз. Белое (Лунинецкий район). Несмотря на большую глубину оз. Белое (Полоцкий район), показатель

термической устойчивости его водной массы был ниже (196 Дж/м^2). Это связано с лучшими условиями вертикального и горизонтального водообмена оз. Белое (Полоцкий район) вследствие большой площади его водной поверхности (площадь водоемов различается в 4,5 раза). В мелководных нестратифицированных озерах показатель термической устойчивости был близок к значению 0. Так, в оз. Бредно эта величина составила $2,0 \text{ Дж/м}^2$, а в оз. Чербомысло – $7,66 \text{ Дж/м}^2$.

Хотя полевое обследование озер в 2022 г. проводилось при относительно невысоких температурах воздуха (до $+22 \text{ }^\circ\text{C}$), был отмечен рост значений термической устойчивости в большинстве водоемов. Исключение составляет оз. Свитязь, полевые исследования которого проходили при температуре воздуха около $+18 \text{ }^\circ\text{C}$, а также оз. Чербомысло, которое достаточно активно перемешивалось ветром. В нестратифицированных озерах Бредно и Большое Островито показатели термической устойчивости изменились незначительно, в оз. Глубокое они возросли с $11,87$ до $35,64 \text{ Дж/м}^2$ (в 3 раза), а в оз. Белое (Лунинецкий район) достигли $281,3 \text{ Дж/м}^2$. Усиление температурной стратификации приводит к изменению газового режима водоемов и формированию вертикальной неоднородности химического состава воды.

Примером водоема с выраженной термической стратификацией, но с отсутствующей кислородной стратификацией является оз. Белое (Полоцкий район). Температура воды в нем понижается на $14 \text{ }^\circ\text{C}$ – с $21,9 \text{ }^\circ\text{C}$ у поверхности до $7,9 \text{ }^\circ\text{C}$ у дна, в то время как значения содержания кислорода, растворенного в водной массе, колеблются в пределах $79\text{--}100 \%$.

При близких показателях глубины и схожем характере температурной стратификации кислородная стратификация в оз. Белое (Лунинецкий район) существенно отличается от кислородной стратификации в оз. Белое (Полоцкий район). В приповерхностном слое воды наблюдается состояние, близкое к кислородному насыщению. Максимальный показатель концентрации кислорода отмечен на нижней границе эпилимниона (125%). Глубже 10 м расположена зона аноксии с сероводородом. В оз. Свитязь, где в гипolimнионе также отсутствует растворенный кислород, вода начинает приобретать запах сероводорода с глубины 9 м .

В оз. Бредно, несмотря на отсутствие термической стратификации, формируется достаточно четко выраженная кислородная стратификация со снижением значений концентрации кислорода, растворенного в водной массе, с $9,2 \text{ мг/дм}^3$ на глубине 2 м до $2,1 \text{ мг/дм}^3$ у дна (или с $107,5$ до $23,8 \%$).

В свою очередь, в оз. Глубокое присутствует как температурное, так и кислородное расслоение водной массы, однако уровень насыщения воды кислородом у дна не опускается ниже $3,6 \text{ мг/дм}^3$ (или 32%).

Следует отметить, что с момента первого полевого обследования кислородный режим кислототрофных озер ухудшился: в большинстве водоемов появилась отсутствовавшая ранее кислородная стратификация, а в озерах Свитязь и Белое (Лунинецкий район) в гипolimнионе сформировалась сероводородная зона, что свидетельствует о неблагоприятном экологическом состоянии озер.

Минерализация воды в кислототрофных озерах на протяжении всего периода исследования была низкой и изменялась от $5,4 \text{ мг/дм}^3$ по состоянию на 2001 г. в оз. Бредно до $65,5 \text{ мг/дм}^3$ по состоянию на 2022 г. в оз. Белое (Полоцкий район). Вода озер относится к гидрокарбонатному классу кальциевой и магниевой групп. На рис. 3 представлены значения концентрации главных ионов в поверхностном слое воды кислототрофных озер Беларуси с июля по август 2022 г.

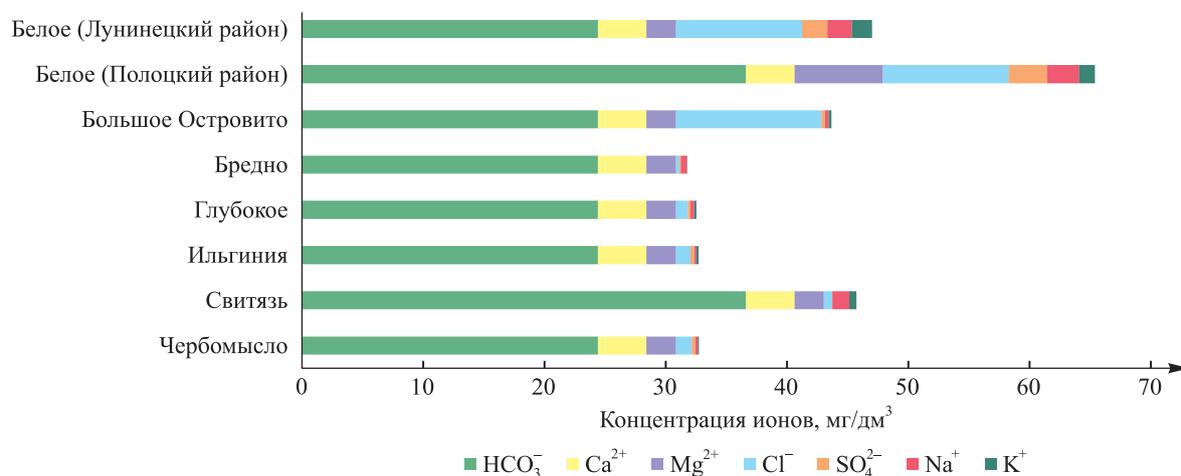


Рис. 3. Концентрация главных ионов в поверхностном слое воды исследуемых озер с июля по август 2022 г.

Fig. 3. Concentration of main ions in surface water layer of studied lakes from July to August 2022

Из рис. 3 видно, что озера Чербомысло, Бредно, Глубокое и Ильгиния характеризуются очень близкими величинами минерализации (около 30–32 мг/дм³) и схожим ионным составом воды. Более высокая минерализация воды в оз. Большое Островито обусловлена повышенными значениями концентрации в ней хлорид-ионов, источник поступления которых еще предстоит уточнить, поскольку минеральные удобрения и песчано-солевые смеси в пределах залесенного слабо освоенного водосбора не используются, а ближайшие промышленные предприятия располагаются более чем в 35 км от водоема. В озерах Белое (Лунинецкий район) и Свитязь относительно высокая минерализация воды вызвана их активным рекреационным использованием, а в оз. Белое (Полоцкий район) – более хорошей по сравнению с другими водоемами сельскохозяйственной освоенностью водосбора.

На рис. 4 отражена динамика показателей относительного содержания главных ионов в воде оз. Бредно. За последние 45 лет состав воды изменился. В 1978–2001 гг. вода относилась к сульфатному классу кальциевой группы, а в 2008 г. – к гидрокарбонатному классу кальциевой группы. В 2013 г. состав воды соответствовал гидрокарбонатному классу магниевой группы. Такие колебания концентрации гидрокарбонат-иона могут являться признаком неустойчивого карбонатного равновесия в водоеме. В данный момент вода относится к гидрокарбонатному классу кальциевой группы.

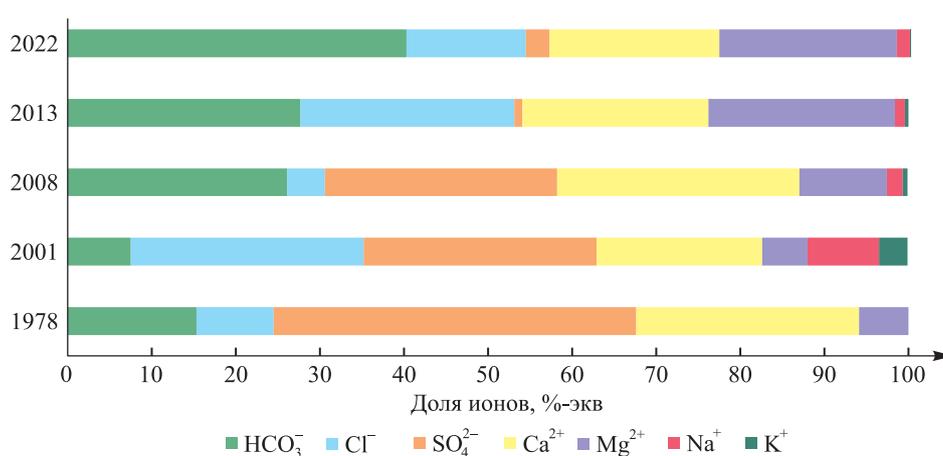


Рис. 4. Динамика показателей относительного содержания главных ионов в воде оз. Бредно с 1978 по 2022 г.

Fig. 4. The dynamic of indicators of the relative content of main ions in Bredno Lake from 1978 to 2022

За период изучения химического состава воды acidотрофных озер Беларуси значения минерализации воды в них увеличились. В оз. Бредно за 20 лет они возросли в 6 раз, в озерах Большое Островито, Белое (Полоцкий район) и Белое (Лунинецкий район) – примерно в 2 раза, а в оз. Свитязь – в 1,5 раза.

Показатели концентрации биогенных элементов в воде анализируемых озер существенно различаются. Значения содержания фосфат-иона во всех озерах, за исключением гиполимниона оз. Белое (Лунинецкий район), находились на уровне ниже чувствительности метода измерения. В оз. Белое (Лунинецкий район) они составили 0,021 мг/дм³. Показатель концентрации нитрит-иона не превысил порог чувствительности метода определения (0,003 мг/дм³) ни в одной точке отбора проб воды. Значения содержания нитрат- и аммоний-ионов в воде модельных acidотрофных озер Беларуси с июля по август 2022 г. приведены на рис. 5.

При достаточном количестве растворенного в воде кислорода преобладает нитратная форма азота, а при его дефиците – аммонийная. В исследуемых водоемах данная закономерность соблюдается. Так, в озерах Чербомысло, Белое (Полоцкий район), Глубокое и Ильгиния доминирует нитратная форма азота, а в остальных водоемах – аммонийная. В оз. Белое (Лунинецкий район) отмечено превышение значений предельно допустимой концентрации аммонийного азота для хозяйственно-питьевого водоснабжения в 1,6 раза, для рыборазведения в 6,3 раза. Основной причиной увеличения данного показателя является большой неконтролируемый поток отдыхающих, особенно в выходные дни. Превышения значений предельно допустимой концентрации нитратного азота обнаружено не было.

Величины водородного показателя в acidотрофных озерах Беларуси за период проведения полевых исследований менялись от 4,2 в оз. Глубокое до 8,4 в оз. Белое (Лунинецкий район) (рис. 6).

Изменение величин водородного показателя свидетельствует об ослаблении болотного питания изученных озер и переходе отдельных из них из acidотрофных водоемов в эвтрофные. В многолетнем

разрезе наиболее сильный рост значений водородного показателя (с 6,5 в 1989 г. до 8,4 в 2022 г.) наблюдается в оз. Белое (Лунинецкий район). Это привело к резкому сокращению в водоеме площадей распространения полушника озерного, что говорит о трансформации озера из acidотрофного состояния в эвтрофное. В зимний период 2023 г. значение водородного показателя снизилось до 5,4. Поскольку оз. Белое (Лунинецкий район) расположено южнее, чем остальные объекты настоящего исследования, его можно использовать в качестве модельного водоема при изучении трансформации лимносистем в условиях изменяющегося климата.

Интегральным показателем, позволяющим достаточно быстро визуально оценить экологическое состояние водоема, является прозрачность воды (рис. 7). Как правило, световодные acidотрофные озера характеризуются высокой прозрачностью. Озера Белое (Полоцкий район) и Глубокое выделяются наибольшей для водоемов Беларуси прозрачностью, что свидетельствует о хорошем качестве их вод. Летом 2022 г. показатели прозрачности воды в объектах исследования колебались от 2,1 м в оз. Бредно до 6,5 м в оз. Белое (Полоцкий район). Наиболее высокая (9,5 м) прозрачность в вегетационный период была зафиксирована в оз. Глубокое 17 июня 1977 г., это является рекордной величиной для озер Беларуси.

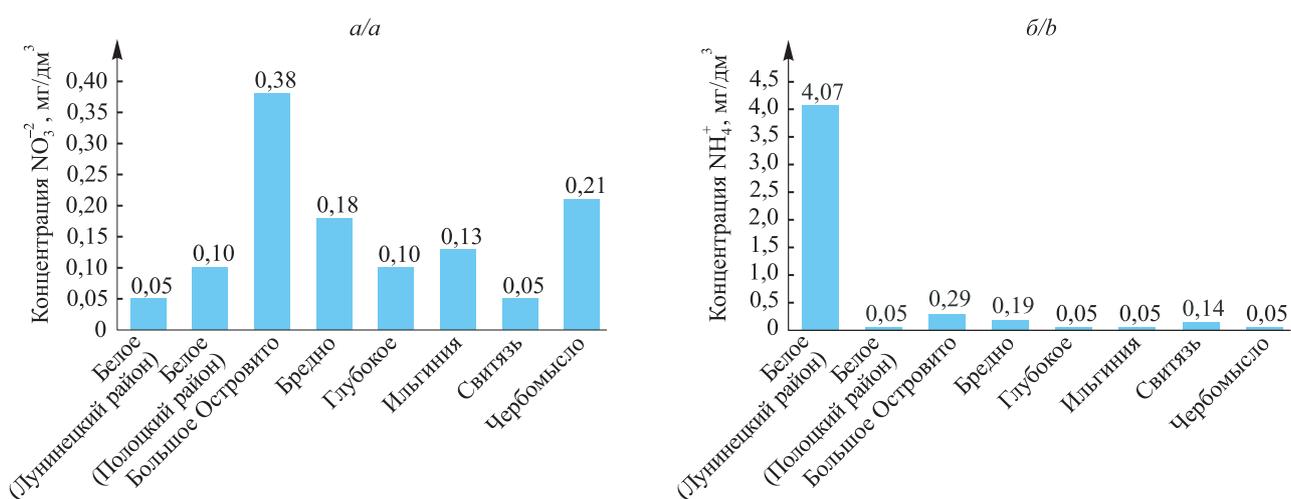


Рис. 5. Концентрация нитрат-ионов (а) и аммоний-ионов (б) в поверхностном слое воды исследуемых озер с июля по август 2022 г.

Fig. 5. Concentration of nitrate-ions (a) and ammonium-ions (b) in surface water layer of studied lakes from July to August 2022

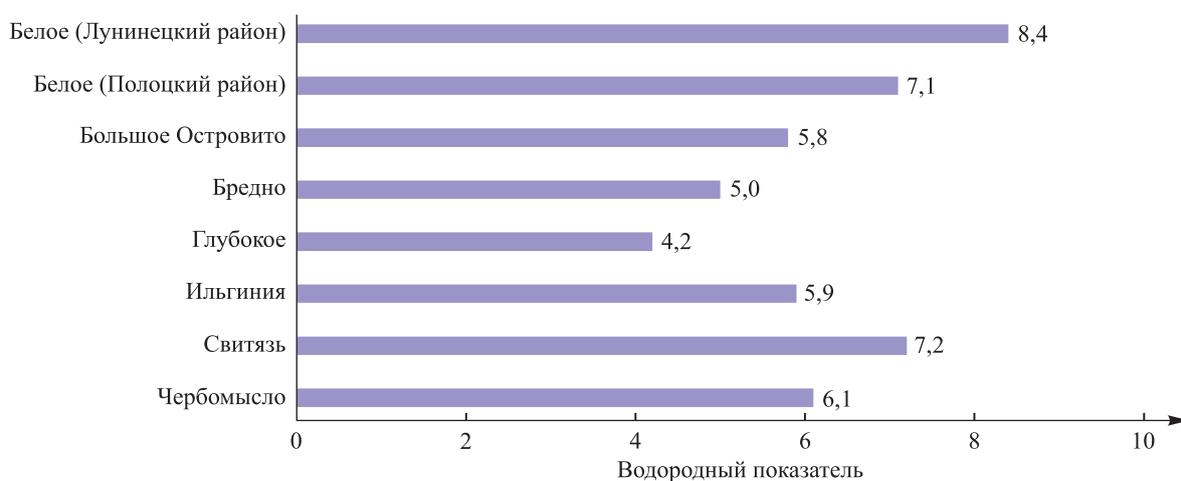


Рис. 6. Величины водородного показателя в воде исследуемых озер с июля по август 2022 г.

Fig. 6. Hydrogen index values in water of studied lakes from July to August 2022

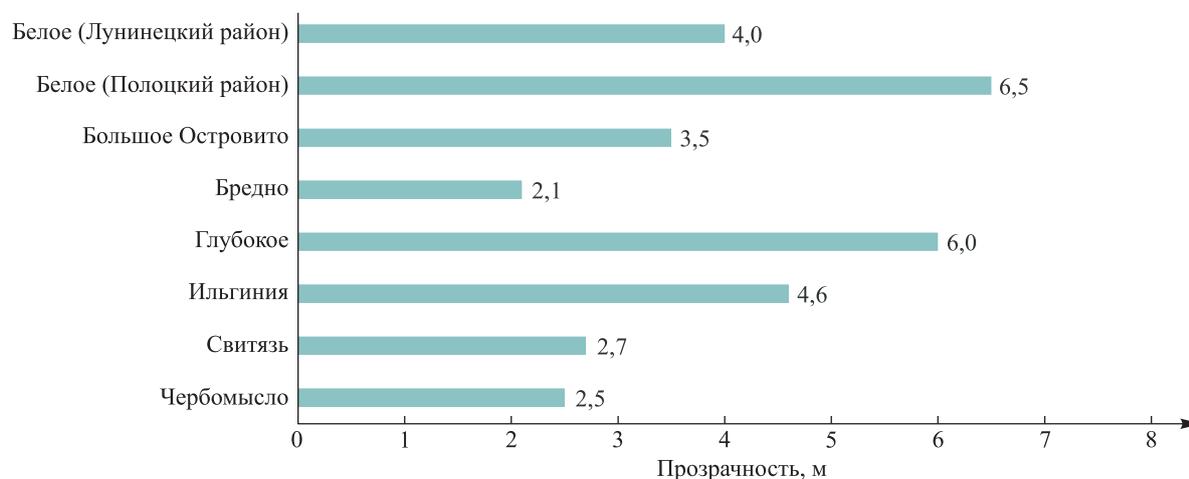


Рис. 7. Прозрачность воды, измеренная с помощью диска Секки, в исследуемых озерах с июля по август 2022 г.

Fig. 7. Transparency measured with a Secchi depth in studied lakes from July to August 2022

В зимний период из-за низких температур воды и короткого светового дня биомасса фитопланктона, как правило, снижается, что приводит к повышению прозрачности воды. Так, в оз. Белое (Полоцкий район) 16 февраля 2023 г. значение этого показателя достигало 10,0 м, а в оз. Свитязь 14 февраля 2023 г. – 4,2 м, что более чем в 1,5 раза выше прозрачности летом.

Наиболее существенное снижение прозрачности воды за период наблюдений произошло в оз. Свитязь (с 7,0 до 2,5 м), также сильно сократились эти показатели в озерах Глубокое (с 9,5 до 6,0 м) и Бредно (с 4,6 до 2,1 м). Рост прозрачности с 4,2 до 6,5 м отмечен в оз. Белое (Полоцкий район).

Цветность воды является важным показателем ее качества и определяется долей содержания в водоеме фульвокислот, соединений трехвалентного железа и гумусовых кислот. В открытой части водоемов у поверхности вода восьми исследованных озер Беларуси характеризуется низкой и очень низкой цветностью (от 5° до 50°). В придонном слое, а также у берегов, примыкающих к болотным массивам, цветность воды в периоды интенсивного болотного питания может быть несколько выше.

Для учета всего комплекса параметров, отражающих химический состав воды ацидотрофных озер Беларуси, выполнен кластерный анализ, который позволил разделить их на три кластера (рис. 8). В качестве входных данных использовались значения водородного показателя, цветности и прозрачности воды, а также концентрации главных ионов и биогенных элементов.

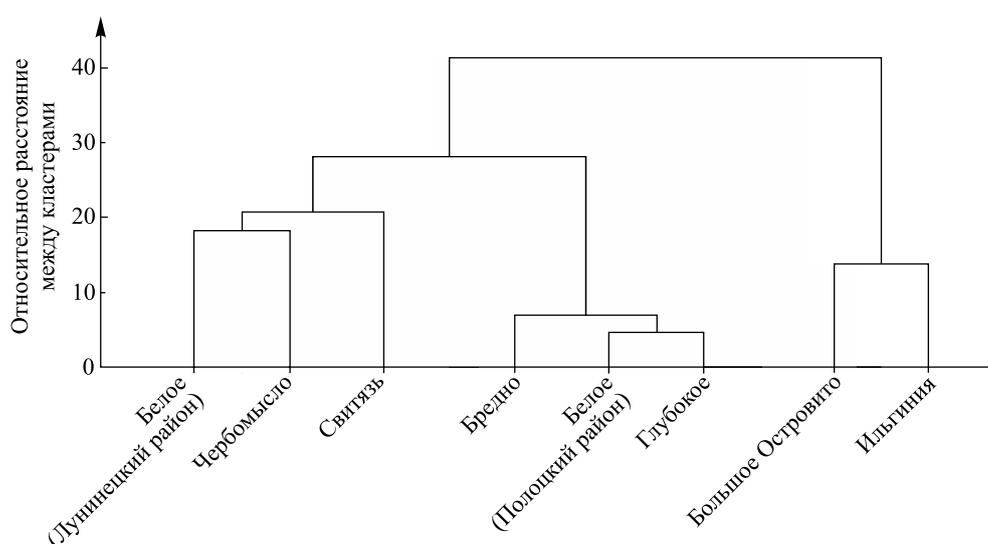


Рис. 8. Результаты кластерного анализа химического состава воды исследуемых озер

Fig. 8. The results of cluster analysis of chemical composition of water in studied lakes

Первый кластер образуют озера, подверженные антропогенному воздействию сильнее остальных водоемов (озера Белое (Лунинецкий район), Свитязь и Чербомысло). Второй кластер формируют озера, которые в большей степени отличаются ненарушенным химическим составом воды, однако испытывают влияние хозяйственной деятельности человека (озера Бредно, Белое (Полоцкий район) и Глубокое). Озера третьего кластера обладают составом воды, близким к естественному, поскольку они расположены в слабо освоенных и удаленных от поселений районах (оз. Большое Островито) либо в заповедной зоне Национального парка «Нарочанский» с ограничением хозяйственной деятельности (оз. Ильгиния).

Заключение

За прошедшие десятилетия химический состав водной массы кислотных озер Беларуси претерпел серьезные изменения. Большинство из исследованных в 2022 г. водоемов данного типа не являются классическими кислотными водоемами со значениями водородного показателя ниже 5,5. Как правило, они колебались в пределах 4,2–7,2. Реакция воды в оз. Белое (Лунинецкий район) была слабощелочной.

Увеличение минерализации воды, значений концентрации аммоний-иона, снижение показателей содержания кислорода, растворенного в водной массе, и прозрачности воды свидетельствуют об ухудшении экологического состояния кислотных озер Беларуси. Основной причиной таких изменений является хозяйственная деятельность человека. Рост числа отдыхающих на всех озерах, за исключением оз. Ильгиния, повлек за собой дополнительный приток биогенных элементов. Туристические стоянки и кемпинги, разбитые на озерах Чербомысло, Большое Островито и Глубокое, не оборудованы водонепроницаемыми выгребными ямами. Недостаточная информированность населения приводит к тому, что мытье посуды и выполнение гигиенических процедур с использованием синтетических поверхностно-активных веществ часто осуществляются многочисленными отдыхающими непосредственно в озерах.

Для предотвращения дальнейших негативных изменений в исследуемых озерах рекомендуется соблюдать режим охраны с ограничением использования водоемов в рекреационных целях путем регулирования численности отдыхающих. Кроме уменьшения антропогенной нагрузки в теплый период года, предлагается проведение аэрации водной массы глубоких озер для обогащения гипolimниона кислородом. В случае роста величин водородного показателя и достижения им значения выше 7,5 необходимо снизить уровень кислотности водоемов. Это позволит обезопасить представителей охраняемых видов макрофитов, зоопланктона и ихтиофауны.

Результаты проведенного исследования могут быть применены для управления водными экосистемами, при планировании их рационального использования, подготовке рекомендаций по восстановлению подобных водоемов, при оптимизации хозяйственной деятельности на водосборах озер, а также в образовательном процессе в целях обучения специалистов – гидрологов и гидроэкологов.

Библиографические ссылки

1. Larson DW. *On reconciling lake classification with the evolution of four oligotrophic lakes in Oregon* [dissertation]. Corvallis: Oregon State University; 1970. 145 p.
2. Александров БМ. К познанию малых озер южной Карелии в типологическом и гидробиологическом отношении. *Труды Карельского отделения ГосНИОРХ*. 1968;5(1):246–256.
3. Hildrew AG. *Freshwater acidification: natural history, ecology and environmental policy*. Oldendorf: International Ecology Institute; 2018. 194 p.
4. Скадовский СН. Предварительное сообщение о результатах гидробиологического и физико-химического исследования Петровских озер Тверской губернии. В: Скадовский СН, редактор. *Применение методов физической химии к изучению биологии пресных вод*. Москва: Государственный институт народного здравоохранения; 1928. с. 215–239 (Труды Звенигородской гидрофизиологической станции Института экспериментальной биологии ГИНЗа).
5. Скадовский СН. Физико-химический режим Петровских озер и общее заключение. *Зоологический журнал*. 1933;12(3):3–34.
6. Комов ВТ, редактор. *Структура и функционирование экосистем кислотных озер*. Санкт-Петербург: Наука; 1994. 248 с. (Труды Института биологии внутренних вод имени И. Д. Папанина; выпуск 70 (73)).
7. Курлович НН. Новые местонахождения и основные условия произрастания полушника озерного в озерах Белоруссии. *Вестник БГУ. Серия 2, Химия. Биология. География*. 1979;1:53–56.
8. Якушко ОФ. *Озероведение: география озер Белоруссии*. Минск: Вышэйшая школа; 1981. 223 с.
9. Власов БП. Особенности уникальных озер Беларуси как формирующая основа ресурсов реликтовых видов *Isoetes L.* и *Lobelia dortmanna L.* *Вестник БГУ. Серия 2, Химия. Биология. География*. 2014;1:62–67.
10. Петрова МИ, Власов БП. Типизация озер Белорусского Поозерья на основании абиотических показателей. *Вестник БГУ. Серия 2, Химия. Биология. География*. 2008;2:77–81.
11. Власов БП, Джус МА, Юхимук АН, Власова АБ. Реликтовый вид полушник озерный (*Isoetes lacustris L.*): интегральный подход к изучению и проблемы сохранения генетического ресурса вида в Беларуси. В: Национальный парк «Нарочанский». *Современное состояние и перспективы развития особо охраняемых природных территорий (ООПТ)*. Минск: Бинера; 2019. с. 175–181.

References

1. Larson DW. *On reconciling lake classification with the evolution of four oligotrophic lakes in Oregon* [dissertation]. Corvallis: Oregon State University; 1970. 145 p.
2. Alexandrov BM. [To the knowledge of small lakes in southern Karelia in typological and hydrobiological relations]. *Trudy Karel'skogo otdeleniya GosNIORKh*. 1968;5(1):246–256. Russian.
3. Hildrew AG. *Freshwater acidification: natural history, ecology and environmental policy*. Oldendorf: International Ecology Institute; 2018. 194 p.
4. Skadovskii SN. [Preliminary report on the results of hydrobiological and physico-chemical studies of the Petrovsky lakes of the Tver province]. In: Skadovskii SN, editor. *Primenenie metodov fizicheskoi khimii k izucheniyu biologii presnykh vod* [Application of methods of physical chemistry to the study of biology of freshwater water]. Moscow: Gosudarstvennyi institut narodnogo zdoravookhraneniya; 1928. p. 215–239 (Trudy Zvenigorodskoi gidrofiziologicheskoi stantsii Instituta eksperimental'noi biologii GINZa). Russian.
5. Skadovskii SN. [Physical and chemical regime of Petrovsky lakes and general conclusion]. *Zoologicheskii zhurnal*. 1933;12(3): 3–34. Russian.
6. Komov VT, editor. *Struktura i funkcionirovanie ekosistem atsidnykh ozer* [Structure and functioning of ecosystems of acid lakes]. Saint Petersburg: Nauka; 1994. 248 p. (Trudy Instituta biologii vnutrennikh vod imeni I. D. Papanina; vypusk 70 (73)). Russian.
7. Kurlovich NN. [New locations and basic conditions for the growth of the lacustrine mulberry in the lakes of Belarus]. *Vestnik BGU. Seriya 2, Khimiya. Biologiya. Geografiya*. 1979;1:53–56. Russian.
8. Yakushko OF. *Ozerovedenie: geografiya ozer Belorussii* [Lake science: geography of lakes in Belarus]. Minsk: Vyshejschaja shkola; 1981. 223 p. Russian.
9. Vlasov BP. Features of unique lakes of Belarus as forming basis of resources of relict species *Isoetes* L. and *Lobelia dortmanna* L. *Vestnik BGU. Seriya 2, Khimiya. Biologiya. Geografiya*. 2014;1:62–67. Russian.
10. Petrova MI, Vlasov BP. The typification of Belarusian Poozerie's lakes. *Vestnik BGU. Seriya 2, Khimiya. Biologiya. Geografiya*. 2008;2:77–81. Russian.
11. Vlasov BP, Dzhus MA, Yukhimuk AN, Vlasova AB. The relict species lake quillwort (*Isoetes lacustris* L.): an integrative approach to the study and problems of genetic resource of species conservation in Belarus. In: Narochansky National Park. *Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya osobo okhranyaemykh prirodnykh territorii (OOPT)* [Current state and prospects for the development of specially protected natural areas (PNAs)]. Minsk: Biner; 2019. p. 175–181. Russian.

Получена 30.03.2023 / исправлена 19.09.2023 / принята 22.09.2023.
Received 30.03.2023 / revised 19.09.2023 / accepted 22.09.2023.