

## ДИНАМИКА ТЕРМИЧЕСКИХ, ГИДРОХИМИЧЕСКИХ И ГИДРОБИОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОДОЕМА-ОХЛАДИТЕЛЯ ЛУКОМЛЬСКОЙ ГРЭС В ЗИМНИЙ ПЕРИОД

Н. Ю. Суховило<sup>1</sup>, В. М. Самойленко<sup>1</sup>, В. В. Вежновец<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь;

<sup>2</sup>ГНПО «НПЦ НАН Беларусь по биоресурсам», Минск, Беларусь

**Аннотация.** В статье рассматриваются особенности зимнего термического, гидрохимического и гидробиологического режима водоема-охладителя Лукомльской ГРЭС – озера Лукомское в зимний период. Актуальность исследования заключается в необходимости мониторинга качества воды в озере в связи с активизацией лимнических процессов из-за теплового загрязнения. Цель работы – провести комплексное исследование отдельных абиотических и биотических компонентов экосистемы озера Лукомского за период с 1972 по 2024 г.

Отмечена высокая скорость поступления и накопления в водной массе водоема гидрокарбонатов, ионов магния, натрия и хлора при относительном снижении содержания сульфатов и кальция. Среди биогенных элементов наиболее устойчивый рост характерен для соединений фосфора.

Многолетние исследования зимнего фитопланктона водоема-охладителя свидетельствуют об относительном постоянстве структуры сообщества и его доминирующего комплекса. Вспышки развития водорослей в отдельные годы в значительной степени обусловлены погодными условиями.

Видовой состав и структура сообщества зоопланктона в настоящее время типичны для зимнего периода и соответствуют водоемам с низкой трофностью. Сокращение общей численности за счет коловраток и рост биомассы, в значительной степени формируемой крупными ракообразными, свидетельствуют о снижении темпов эвтрофирования водоема-охладителя.

**Ключевые слова:** озеро Лукомское; водоем-охладитель; гидрохимический режим; растворенный кислород; температура воды; фитопланктон; зоопланктон.

**Для цитирования.** Суховило Н. Ю., Самойленко В. М., Вежновец В. В. Динамика термических, гидрохимических и гидробиологических характеристик водоема-охладителя Лукомльской ГРЭС в зимний период // Природопользование. – 2024. – № 2. – С. 46–60.

## DYNAMICS OF THERMAL, HYDROCHEMICAL AND HYDROBIOLOGICAL CHARACTERISTICS OF LUKOML SDPP COOLING POND IN WINTER PERIOD

N. Yu. Sukhovilo<sup>1</sup>, V. M. Samoilenko<sup>1</sup>, V. V. Vezhnavets<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Belarusian State University, Minsk, Belarus;

<sup>2</sup>State Scientific and Production Association "Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Bioresources", Minsk, Belarus

**Abstract.** The article discusses the features of the winter thermal, hydrochemical and hydrobiological regime of the cooling pond of the Lukomlskaya GRES – Lake Lukomskoe. The relevance of the study lies in the need to monitor the quality of water in the lake due to the activation of limnic processes due to thermal pollution. The purpose of the research was to study individual abiotic and biotic components of the ecosystem of Lake Lukomskoe for the period from 1972 to 2024.

In the ionic structure, it is noted that hydrocarbonates, as well as magnesium, sodium and chlorine ions, are characterized by the highest rate of entry and accumulation in the water mass of the reservoir, with a relative decrease in the content of sulfates and calcium. Among the biogenic elements, the most stable growth is demonstrated by the concentration of phosphorus.

Long-term studies of winter phytoplankton of the cooling pond indicate a relative constancy of the community structure and its dominant complex. Outbreaks of algae development in some years are largely due to weather conditions. The species composition and structure of the zooplankton community are currently typical for the winter period and correspond to reservoirs with low trophicity. The reduction in the total number due to rotifers and the growth of biomass, largely formed by large crustaceans, indicate a decrease in the rate of eutrophication of the cooling reservoir.

**Keywords:** Lake Lukomskoe, cooling pond, dissolved oxygen, water temperature, phytoplankton, zooplankton

**For citation.** Sukhovilo N. Yu., Samoilenka V. M., Vezhnavets V. V. Dynamics of thermal, hydrochemical and hydrobiological characteristics of Lukoml SDPP cooling pond in winter period. *Nature Management*, 2024, no. 2, pp. 46–60.

**Введение.** Стремительное развитие тепловой и атомной энергетики привело к тому, что водоемы-охладители в настоящее время представляют собой достаточно распространенный тип водных объектов. Они подвержены интенсивному антропогенному воздействию и являются объектом пристального внимания экологов и различных природоохранных организаций. Воздействие объектов энергетики на экосистемы водоемов-охладителей носит многоплановый характер. Оно заключается в заметном изменении не только их температурного режима, но и гидрологических и гидродинамических показателей, загрязнении вод различными агентами со стороны как собственно электростанции, так и различных бытовых и производственных служб, в той или иной мере с ней связанных.

Подогрев может как оказывать позитивное воздействие на гидробионтов, так и становиться причиной их массовой гибели при повышении температуры воды до экстремального уровня. Помимо прямого воздействия повышение температуры воды способно оказывать значимые косвенные воздействия. Среди них следует отметить термическое эвтрофирование – увеличение продуктивности экосистемы в целом.

Помимо прочего, повышение температуры воды создает условия для вселения в водоемы-охладители и развития в них теплолюбивых видов гидробионтов.

Ухудшение качества вод может создать серьезные помехи в системе технического водоснабжения электростанции и даже привести к возникновению чрезвычайной ситуации в ее работе. Примерами могут служить бурные «цветения» фитопланктона или интенсивное засторание макрофитами, вызванное эвтрофированием вод.

В связи с этим экологический мониторинг экосистемы водоемов-охладителей в настоящее время является достаточно актуальной проблемой.

Основная цель работы – выполнить комплексное исследование отдельных абиотических и биотических компонентов экосистемы оз. Лукомское в зимний период.

**Материалы и методы исследования.** Озеро Лукомское – один из наиболее крупных водоемов Беларуси. С середины 1960-х годов функционирует в качестве водоема-охладителя Лукомльской ТЭС с установленной мощностью 2444,5 МВт. Его экосистема на протяжении последних 50 лет кроме теплового испытывает другие виды антропогенного воздействия, среди которых наибольшее негативное влияние оказывает садковый комплекс по выращиванию рыбы. Комбикорм, используемый для кормления рыбы, является мощным дополнительным источником биогенных веществ, в частности фосфора, ответственного за скорость и интенсивность эвтрофирования водоема.

Площадь акватории оз. Лукомское составляет 37,7 км<sup>2</sup>. В северной его части имеется пять небольших островов общей площадью 0,07 км<sup>2</sup>. Котловина озера подпрудного типа, овальной формы, вытянута с севера на юг на 10,4 км, расширяется в центре до 6,5 км (при средней ширине 3,5 км). Озеро неглубокое: максимальная глубина равна 11,5 м, средняя – 6,6 м. На долю глубин до 2,0 м приходится около 11 % площади акватории, в то время как глубины более 4,0 м занимают 77 %. Основные морфометрические характеристики озера приведены в таблице, картосхема глубин – на рис. 1.

#### Морфометрические характеристики озера Лукомское [1]

#### Morphometric characteristics of Lake Lukomskoe [1]

Характеристика	Единица измерения	Значение	Характеристика	Единица измерения	Значение
Площадь	км <sup>2</sup>	37,7	Длина береговой линии	км	36,4
Длина	км	10,4	Объем водной массы	млн м <sup>3</sup>	249
Ширина максимальная	км	6,5	Площадь водосбора	км <sup>2</sup>	172,34
Глубина максимальная	м	11,5	Период водообмена	лет	7,2
Глубина средняя	м	6,6		–	–

Площадь водосбора оз. Лукомское (без площади озера) по результатам расчета с помощью цифровой модели рельефа с разрешением 10 м/пикс. составляет 172,34 км<sup>2</sup>. Доля земель, занятых лесами и древесно-кустарниковой растительностью, – 52,8 % водосбора (91,0 км<sup>2</sup>), заболоченность – 1,9 % (3,25 км<sup>2</sup>). Площадь сельскохозяйственных земель – 59 км<sup>2</sup> (34,2 % площади водосбора). Населенные пункты занимают 14,4 км<sup>2</sup>, или 8,3 % водосбора, водные объекты – 1,85 км<sup>2</sup>, или 1,07 % водосбора. На иные земли (дороги, рекреационные объекты) приходится 2,84 км<sup>2</sup>, или 1,6 % водосбора.

Исходными данными для проведения исследования послужили фондовые материалы научно-исследовательской лаборатории (далее – НИЛ) озероведения и Белгидромета [2] за период с 1972 по 2024 г. Основными методами исследования были полевой, лабораторный, системного анализа, сравнительно- и эколого-географический, методы математической статистики (регрессионный, корреляционный анализ).

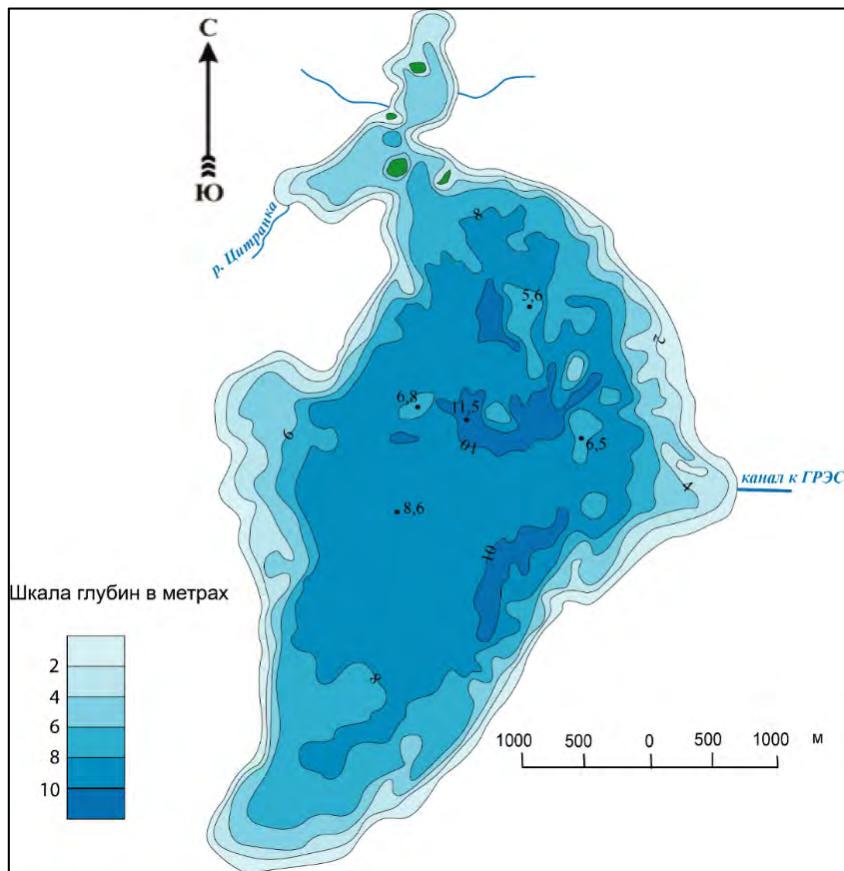


Рис. 1. Батиметрическая схема озера Лукомское

Fig. 1. Bathymetric map of Lake Lukomskoe

Измерение температуры воды производили со льда или с лодки ртутным термометром, встроенным в батометр. Измерение прозрачности воды выполняли с помощью диска Секки.

Анализ проб воды до 2012 г. осуществляли в НИЛ озероведения Белорусского государственного университета, после – в лаборатории Института природопользования НАН Беларуси (Г. М. Бокая). В ходе анализа определяли такие показатели, как минерализация воды, концентрация главных ионов, минеральных форм азота и фосфора, железа общего, цветность, pH (дополнительно с помощью pH-метра Hanna Instruments осуществляли измерения во время проведения полевых исследований).

Отбор проб производили батометром Молчанова в пелагической части, покрытой льдом, в точке максимальной глубины с разных горизонтов. Затем пробы фиксировали раствором Утермеля с последующим добавлением формалина. Для концентрации проб применяли отстойный метод. Численность клеток подсчитывали в камере Фукса – Розенталя. Расчеты биомассы проводили по методу геометрического подобия [3, 4].

Отбор проб зоопланктона производили с помощью пятилитрового планктоночерпачеля Вовка в модификации Щербакова. На орудии лова использовали шелковое сите № 70. Пробы фиксировали 4%-ным раствором формалина. Для определения численности зоопланктона пробы полностью просчитывали под бинокуляром в камере Богорова. Для расчета биомассы зоопланктона определяли среднюю длину тела в популяциях веслоногих ракообразных отдельно для взрослых особей, копеподитов и науплиусов. Индивидуальную массу животных измеряли по формуле связи массы и размеров тела [5] с использованием коэффициентов  $a$  и  $b$  для планктона ракообразных и коловраток ( $e = 3$ ) [6].

**Результаты и их обсуждение.** Термический режим оз. Лукомское определяется его географическим положением в умеренном климатическом поясе. Это обуславливает почти ежегодное (исключение – зима 2019/20 гг.) формирование ледового покрова на большей части акватории.

В зимний период зона влияния Лукомльской ГРЭС значительно меняется по площади, что отражено на рис. 2 на примере зимы 2023/24 гг. В начале января 2024 г. почти вся акватория озера была покрыта льдом (см. рис. 2, а). Небольшие полыни наблюдались только в месте сброса теплой воды с ГРЭС, а также в устье водоотводящего канала. К концу февраля площадь ледового покрова сокращалась (см. рис. 2, б). Ширина полосы открытой воды менялась слабо и была равна 700–800 м, площадь составила 4,5 км<sup>2</sup>, или 12 % акватории. В 2022 г. во время полевого обследования 19–20 февраля площадь акватории, свободной от льда, была в 3 раза больше. Аномально теплой зимой 2020 г. ледовый покров не формировался. На отдельных участках западного берега при похолоданиях образовывались забереги.

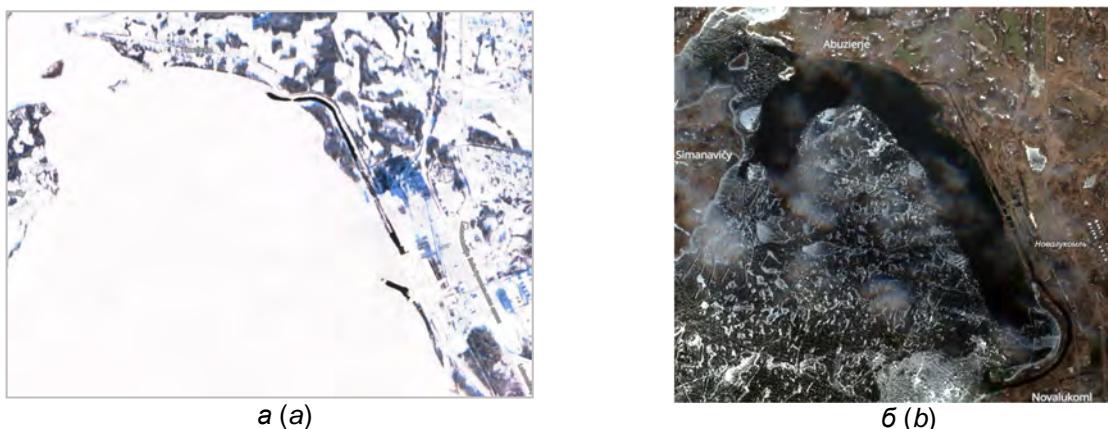


Рис. 2. Изменение площади акватории оз. Лукомское, свободной от льда, 08.01.2024 (а) и 27.02.2024 (б) по данным космического аппарата Sentinel 2

Fig. 2. Change in the ice-free area of Lake Lukomskoe on 08.01.2024 (a) and 27.02.2024 (b) according to data from the Sentinel 2

Подледные температуры воды у поверхности в период полевых наблюдений НИЛ озероведения выше, чем в озерах, не подверженных тепловому загрязнению, и составляют около 1,0–1,6 °С. По данным Белгидромета, они совпадают с температурами воды в ненарушенных озерах. Обратная температурная стратификация практически полностью отсутствует. 21 февраля 2024 г. температура воды на мониторинговой вертикали, расположенной вне зоны подмеса теплых вод, увеличивалась от 1,6 °С у поверхности до 2,8 °С у дна, как показано на рис. 3.

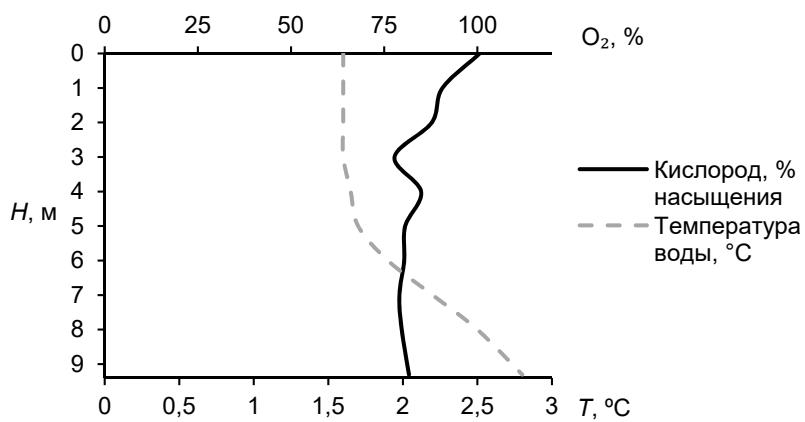


Рис. 3. Вертикальное распределение температуры воды и растворенного кислорода на мониторинговой вертикали вне зоны влияния ГРЭС

Fig. 3. Vertical distribution of water temperature and dissolved oxygen at the monitoring vertical in zone without the influence of SDPP

В 2022 г. вертикальный температурный градиент был еще более слабым. Температура воды увеличивалась от 1,2 °С у поверхности до 1,8 °С у дна. Во время наблюдений зафиксированы случаи с более низкими температурами воды: 14 марта 2004 г. во время ледостава по всей толще они равнялись 0,2–0,4 °С. Аналогичные кривые вертикального распределения температур отмечались также в предледоставный период с интенсивным выхолаживанием на фоне активного ветрового перемешивания. Классическая обратная стратификация с температурами около 4 °С у дна и близкими к нулю у поверхности сотрудниками НИЛ озероведения не фиксировалась, однако встречается в материалах наблюдений Белгидромета [2].

Химический состав озерных вод формируют факторы, среди которых наиболее важными являются природные (физико-географические условия, характер водосборной площади, морфология озерной котловины, водообмен, объем и состав приточных вод) и антропогенные (поступление биогенных и загрязняющих веществ, изменение температуры вод и водного баланса). Факторы воздействия подразделяются на внешние и внутриводоемные процессы.

Основу гидрохимического режима образуют площадное, вертикальное и межсезонное распределение температуры, растворенных газов, состава и количество основных ионов минерализации ( $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Fe}_{\text{общ}}$ ), питательных веществ соединений азота и фосфора ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{N}_{\text{общ}}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{P}_{\text{общ}}$ ), растворенное и взвешенное органическое вещество, микроэлементы и тяжелые металлы.

Вертикальное распределение растворенного кислорода в зимний период по данным наблюдений последних лет характеризуется как равномерное по всей водной толще с небольшим максимумом у поверхности. Газовый режим оз. Лукомское в период зимней стагнации имеет незначительный дефицит кислорода у дна. Зимой 2024 г. его концентрация в поверхностном горизонте в точке контроля составляет 14,1 мг/дм<sup>3</sup>, постепенно снижаясь с глубиной до 10,9 мг/дм<sup>3</sup>, что соответствует 77–100 % насыщения и укладывается в диапазон многолетних колебаний. При такой концентрации кислорода в зимнее время заморы рыбы не возникают, однако в период ледостава необходим оперативный контроль за содержанием растворенного кислорода для принятия своевременных мер по недопущению заморов.

По величине минерализации озеро занимает промежуточное положение между более минерализованными озерами степной зоны и слабоминерализованными водоемами севера Европейской части. Согласно классификации О. А. Алекина [7], вода в оз. Лукомское относится к гидрокарбонатному классу кальциевой группы второго типа, для которого характерно следующее соотношение главных ионов:  $\text{HCO}_3^- < \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} < \text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$ . В последние 20 лет ионы магния зачастую преобладают над ионами кальция.

В зимний период минерализация воды в открытой части оз. Лукомское колеблется от 208,7 (1984 г.) до 307,2 мг/дм<sup>3</sup> (1998 г.) с тенденцией к увеличению в 1980–90-х годах и последующей стабилизацией. Аналогичный тренд наблюдается и в динамике минерализации воды в пробах, отобранных в июле и августе. В феврале 2024 г. минерализация воды в поверхностном слое изменяется по акватории незначительно: от 247,2 мг/дм<sup>3</sup> в Гурецкой луке (северо-западном заливе) до 273,9 мг/дм<sup>3</sup> в центре, юго-западной части озера. Различия в содержании ионов по вертикали более контрастны. Наибольшая их концентрация отмечена в придонных слоях северного залива (281,2 мг/дм<sup>3</sup>). Причины такой повышенной концентрации можно связать с изменением водного баланса в холодное время года в сторону увеличения подземного питания и отсутствия активного динамического перемешивания.

Как и в большинстве озер гумидной зоны умеренного климатического пояса, в воде озера преобладает гидрокарбонат-ион. Его концентрация в зимний период колеблется от 140,3 до 195,2 мг/дм<sup>3</sup>.

Сульфат-ион ранее занимал второе место среди анионов после гидрокарбонат-иона. Источниками этих соединений являются промышленные и коммунальные сточные воды, удобрения и др. Большой вклад вносят атмосферные осадки в результате загрязнения атмосферы соединениями серы в результате сгорания топлива, нефтепродуктов, торфа и др. Концентрация сульфатов в среднем составляет 21,8 мг/дм<sup>3</sup> и колеблется от 3,1 мг/дм<sup>3</sup> в 2018 г. до 39,2 мг/дм<sup>3</sup> в 2001 г. В ее многолетней динамике отмечается период роста, продлившийся до начала XXI в. с дальнейшим снижением до уровня конца 1970-х годов. Это объясняется как переходом ГРЭС на природный газ, так и общим снижением промышленных выбросов в атмосферу.

Хлориды являются показателями загрязнения воды промышленными, хозяйствственно-бытовыми и сельскохозяйственными стоками. Концентрация хлоридов за период исследований оз. Лукомское выросла более чем в 4 раза: с 6,4 мг/дм<sup>3</sup> в 1976 г. до 28,2 мг/дм<sup>3</sup> в 2013 г. В настоящее время концентрация хлоридов часто превышает концентрацию сульфатов.

Диапазоны колебаний концентраций главных ионов приведены на рис. 4.

Среди катионов ведущая роль на протяжении долгого времени принадлежала иону кальция. Его концентрация постепенно снижается: с 40–45 до 31–37 мг/дм<sup>3</sup>. В абсолютном выражении кальций все

еще преобладает над магнием (в среднем – 13,8 мг/дм<sup>3</sup> при диапазоне колебаний 6,6–24,3 мг/дм<sup>3</sup>), но в относительном выражении наблюдается смена группы вод с кальциевой на магниевую.

Натрий-ион демонстрирует динамику, схожую с сульфатами, с максимумом концентрации (до 18,3 мг/дм<sup>3</sup>) в начале 2000-х годов. Концентрация ионов калия не превышает 4,1 мг/дм<sup>3</sup>.

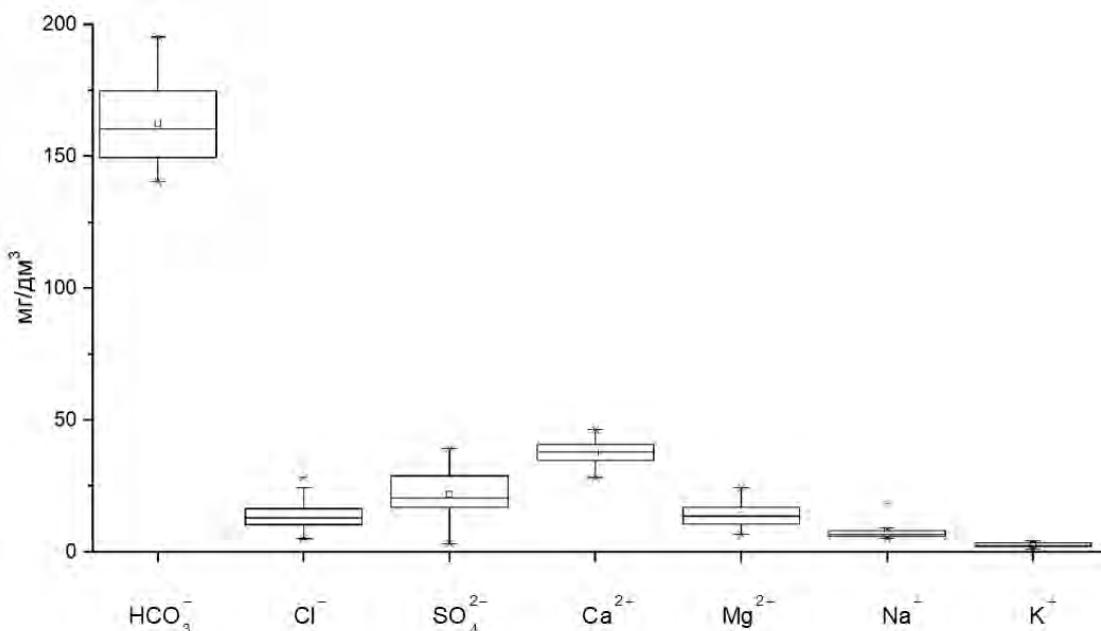


Рис. 4. Диапазоны колебаний концентраций главных ионов в зимний период в воде оз. Лукомское

Fig. 4. Ranges of fluctuations in concentrations of the main ions in the water of Lake Lukomskoe in winter

При оценке состояния и функционирования водных экосистем важным этапом является анализ содержания биогенных элементов. Они активно участвуют в биопродукционных процессах, определяют интенсивность формирования первичной продукции. Концентрация в воде водоемов биогенных веществ, в первую очередь общего азота и общего фосфора, служит эффективным показателем трофического состояния водоемов.

Анализ многолетних наблюдений позволяет проследить динамику и сделать определенные обобщения количественного содержания соединений азота и фосфора в воде оз. Лукомское. Минеральные формы азота в воде водоемов представлены ионами аммония, нитритами, нитратами, переходящими в водной массе из одной формы в другую в результате деятельности соответствующих видов бактерий. Круговорот азота включает процессы азотфиксации, нитрификации, аммонификации, денитрификации, которые замыкаются на поступлении газообразного азота в водоем из атмосферы и выделении его обратно в атмосферу.

За период наблюдений значения соединений азота изменились в широком интервале: аммонийного азота – 0,0–2,16 мг/дм<sup>3</sup>; нитратного – 0,0–0,50; нитритного – 0,0–0,02 мг/дм<sup>3</sup>. Наибольшим динамическим изменениям за период наблюдения подвергалось содержание иона аммония ( $\text{NH}_4^+$ ). Наличие в водах озера иона аммония связано с биохимическими процессами разложения белковых веществ, соединений азота. Большая часть ионов аммония попадает в воду со стоками животноводческих ферм, сельскохозяйственных полей, промышленных предприятий. Можно предположить, что основным источником поступления аммонийного азота служат неутилизированные комбикорма садкового комплекса. Концентрация нитратов меняется менее существенно. Самая неустойчивая форма – нитрит-ион – подвержена незначительным колебаниям.

Фосфор – основной эвтрофирующий элемент, высокая концентрация которого свидетельствует о низком качестве воды. По данным наблюдений, на фоне общей многолетней тенденции возрастания концентрации фосфора минерального в воде озера выявлены периоды пикового повышения концентрации в 1980 г., 1988–1989 гг. и 2022 г. (максимум – 0,111 мгР/дм<sup>3</sup>). В 1998 г. отмечен минимум (0,002 мгР/дм<sup>3</sup>) Постепенный рост концентрации фосфора объясняется тем, что реальная фосфорная нагрузка на озеро составляет 0,099 гР/м<sup>2</sup>, что совпадает с критической. На фоне превращения водоема в бессточный путем строительства плотины на р. Лукомка происходит постепенная аккумуляция

фосфора в воде и донных отложениях. Диапазоны многолетних колебаний концентрации минеральных форм биогенных элементов отражены на рис. 5.

Концентрация железа общего не превышает ПДК (0,1 мг/дм<sup>3</sup>).

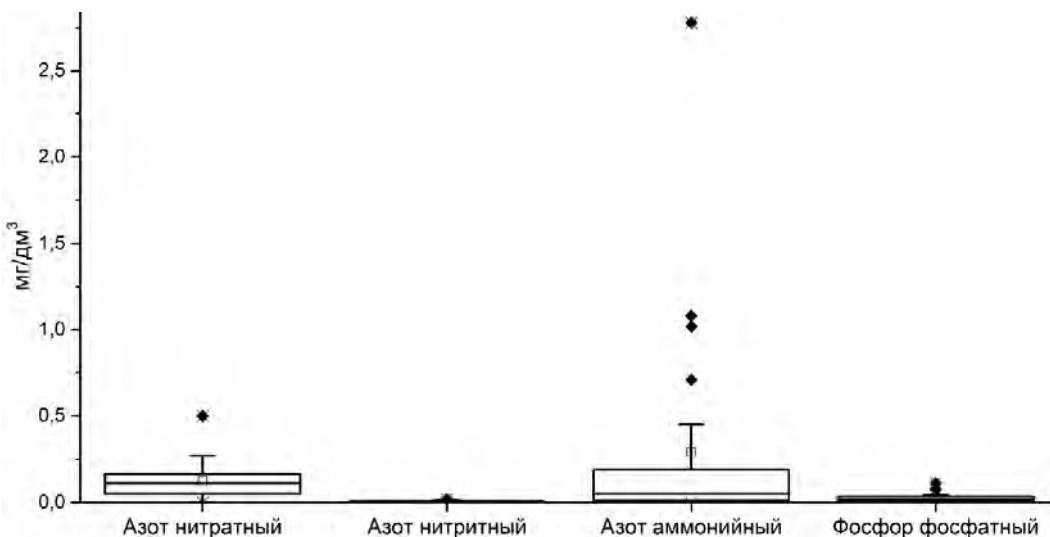


Рис. 5. Диапазоны колебаний концентраций биогенных элементов в зимний период в воде оз. Лукомское

Fig. 5. Ranges of fluctuations in concentrations of the biogenic elements in the water of Lake Lukomskoe in winter

Оптические свойства воды характеризуются такими основными параметрами, как прозрачность и цветность. Прозрачность воды по диску Секки в зимний период варьировала от 3 м в 2013 г. до 5,9 м в 2018 г. при среднем значении около 4,5 м. Для сравнения: в летний период этот показатель составлял от 0,9–1,3 м (в начале 2000-х годов и 2016 г.) до 3,6–4,6 м (в конце 1970-х – начале 1980-х годов). Цветность воды зимой меняется от 8° до 42°; в последние годы ее значения преобладают в диапазоне от около 11° до 14°. Водородный показатель в период зимних съемок колеблется от нейтрального (7,15) до щелочного (8,45). Ярко выраженные тренды в динамике этих показателей отсутствуют.

Таким образом, в ионной структуре отмечено, что наиболее высокой скоростью поступления и накопления в водной массе водоема характеризуются гидрокарбонаты, а также ионы магния, натрия и хлора при относительном снижении содержания сульфатов и кальция. Среди биогенных элементов наиболее устойчивый рост демонстрирует концентрация фосфора. Соединения азота постоянно переходят из одной формы в другую и выраженных односторонних трендов не имеют. Лишь в случае нитрит-иона можно говорить о снижении его концентрации в зимний период.

Гидробиологические исследования водоема-охладителя Лукомльской ГРЭС чаще всего приурочены к периоду открытой воды. Результаты исследований представлены в многочисленных статьях и монографии [8–13]. Зимний режим изучен в отдельные годы с конца февраля по начало марта, когда в большинстве озер умеренной зоны наблюдается минимум его развития. В исследуемый период формирование, существование и длительность ледового покрова значительно различаются и определяются как природно-климатическими условиями, так и антропогенным воздействием, в частности работой ГРЭС. Особенностью зимнего сезона 2019/20 гг. является полное отсутствие ледостава на водоеме-охладителе; в 2024 г. практически вся акватория была покрыта льдом, за исключением небольшого участка в районе сброса теплой воды.

В условиях низких температур и пониженного уровня освещенности складываются специфические альгоценозы, в которых преобладают диатомово-криптофитовые комплексы водорослей. Большинство криптофитовых и некоторые диатомовые способны к гетеротрофному типу питания в условиях ограниченного поступления света. Установлено, что в зимний период во многих озерах, расположенных в разных климатических зонах Европы, Азии и Северной Америки, в фитопланктоне развиваются именно флагелляты [14, 15]. Кроме того, развитие фитопланктона в подледный период в озерах умеренной зоны сходно с таковым в полярных и арктических озерах, полностью и постоянно покрытых ледяным панцирем, в планктоне которых также развиваются флагелляты, особенно криптофитовые [16].

Видовое разнообразие зимних альгоценозов значительно беднее, чем в другие сезоны. В разные годы в их составе насчитывалось от 6 (2018 г.) до 33 (2004 г.) таксонов, при среднем количестве 19 таксонов. В то время как в августе, число таксонов укладывалось в пределы 37–109 и в среднем по данным многолетних исследований составляло 78 таксонов.

За весь период исследований в зимнем планктоне идентифицировано 77 таксонов водорослей: 7 цианопрокариот, 22 зеленых, 24 диатомовых, 9 криптофитовых, 4 динофитовых, 7 золотистых, 3 эвгленовых, 1 желто-зеленая. Большинство обнаруженных видов вегетируют и в период открытой воды. Основу фитопланктона составляют эвритеческие виды.

Большинство вегетирующих подо льдом видов представлены немногочисленными популяциями. В заметных количествах обычно развиваются 1–4 вида. В 1970–80-е годы комплексы доминант или субдоминант возглавляли диатомовые рода *Cyclotella*, преимущественно *Cyclotella radiosa* (Grun.) Lemm. var. *radiosa* или *Cyclotella ocellata* Pant., которые в дальнейшем утратили свое доминирующее положение. Возрастание их роли вновь отмечено в 2022 г., когда относительная численность *C. radiosa* достигла 52 %. В настоящее время на долю циклопелл приходится 23 % всей численности фитопланктона.

Как отмечалось выше, преобладание жгутиковых форм, принадлежащих к разным отделам, в зимнем фитопланктоне характерно для озер разного трофического типа [17, 18]. В водоеме-охладителе Лукомльской ТЭС круглогодично наблюдается массовая вегетация мелкой криптофитовой водоросли *Rhodomonas pusilla* (Bachm.) Javor var. *pusilla*. Родомонас входит в число массовых видов и в подледном планктоне; его обилие в разные годы колебалось от 0,203 до 1,25 млн кл/дм<sup>3</sup>. До 2012 г. заметного развития достигала еще одна криптомонада – *Cryptomonas erosa* Ehr. с численностью, не превышающей 0,4 млн кл/дм<sup>3</sup>. Довольно часто обильными были золотистые водоросли, среди которых преобладал *Chrysisalis peritaphrena* J. Schiller. Данный вид замечен на протяжении всего года. В осенне-зимний период его активная вегетация отмечалась и в других озерах Беларуси [19]. Максимум развития хризидалиса отмечен в марте 2012 г. – 1,79 млн кл/дм<sup>3</sup>, что соответствует 40 % суммарного показателя.

Таким образом, в условиях низких температур воды и пониженного уровня освещенности в водоемах формируются специфические альгоценозы, в которых преобладают диатомово-криптофитовые комплексы водорослей. Большинство криптофитовых и некоторые диатомовые водоросли способны к гетеротрофному типу питания в условиях ограниченного поступления света. Наиболее типичный комплекс доминант зимнего фитопланктона водоема-охладителя выглядит следующим образом: криптомонада *Rh. pusilla*, один из видов диатомовых рода *Cyclotella* или *Asterionella formosa*, к которым часто присоединяется хризидалиса *Chr. peritaphrena*.

Теплолюбивые цианопрокариоты встречаются спорадически и представлены ограниченным числом видов, из которых чаще преобладает *Planktothrix agardhii* (Gom.) Anagn. et Kom. Численность планктонтрика не превышает 0,225 млн кл/дм<sup>3</sup>, и только в феврале 2020 г., в условиях отсутствия ледового покрова, массовое развитие данного вида (2,87 млн кл/дм<sup>3</sup>) вывело его в разряд доминант. В остальное время планктонтрикс отмечался единично, либо вовсе отсутствовал. В марте 2005 г. заметной была *Gloeocapsa minima* (Keissl) Hollerb. ampl. f. *minima* (0,366 млн кл/дм<sup>3</sup>).

По биомассе часто доминировали «случайные» виды, встречающиеся единично, за счет крупных размеров клеток. Обычно это представители криптофитовых рода *Cryptomonas*. К примеру, в 2022 г. максимальную биомассу формировал *Cryptomonas ovata* Her. (25 %), при этом его обилие не превышало 1 % суммарного значения.

Несмотря на то что подогрев воды за счет сброса с системы охлаждения электростанции увеличивает длительность вегетационного периода, в развитии фитопланктона водоема-охладителя наблюдается четко выраженная сезонная динамика. Как и в большинстве водоемов умеренной зоны, в сезонной динамике фитопланктона оз. Лукомское на этот период приходится зимний минимум вегетации водорослей. Соотношение значений количественных параметров сообщества в период летней стагнации и подледного периода в значительной степени характеризует экологическое состояние и степень трансформации продукции-деструкционных процессов в экосистеме. При интенсивном антропогенном эвтрофировании это соотношение достигает высоких значений. В отдельные годы численность летом была в 1,8–2,8 раза выше, чем зимой (1975, 2012 и 2020 г.); биомасса при этом могла отличаться незначительно. В периоды интенсификации антропогенного воздействия (повышение фосфорной нагрузки) эта разница была крайне высокой. Численность в летний период превышала таковую зимой в 38 раз (2005 г.), 50 раз (2004 г.), 130 раз (2018 г.), а биомасса – в 14, 17 и 53 раза соответственно. Исключением является 1989 г., когда годовой максимум численности и биомассы приходился на март при массовом развитии зеленой жгутиковой *Chlamidomonas* sp. Отсутствие более-менее четкой закономерности в сезонных изменениях свидетельствует о неустойчивости экосистемы водоема в условиях резкого и разнонаправленного действия антропогенных факторов.

В последние 20 лет колебания численности зимнего фитопланктона незначительны: максимальное значение превышает минимальное в 3 раза. Наиболее интенсивное развитие водорослей отмечено в 2020 г. при отсутствии ледостава. Суммарная численность достигла 4,77 млн кл/дм<sup>3</sup> в результате массовой вегетации цианопрокариоты *P. agardhii*, формирующей 6 % общего показателя. Близкое значение численности (4,52 млн кл./дм<sup>3</sup>) характерно и для марта 2012 г., когда в условиях гомотермии и температуре воды 3,5 °C, доминировали золотистая *Chr. peritaphrena* и криптофитовая *Rh. pusilla*.

Наименьшая плотность (0,34 млн кл/дм<sup>3</sup>) зафиксирована в 2018 г. при массовом развитии *A. formosa*, вклад которой в показатели суммарной численности и биомассы достигает 80 %. В последние две съемки уровень развития и структура численности сообщества были аналогичны (рис. 6).

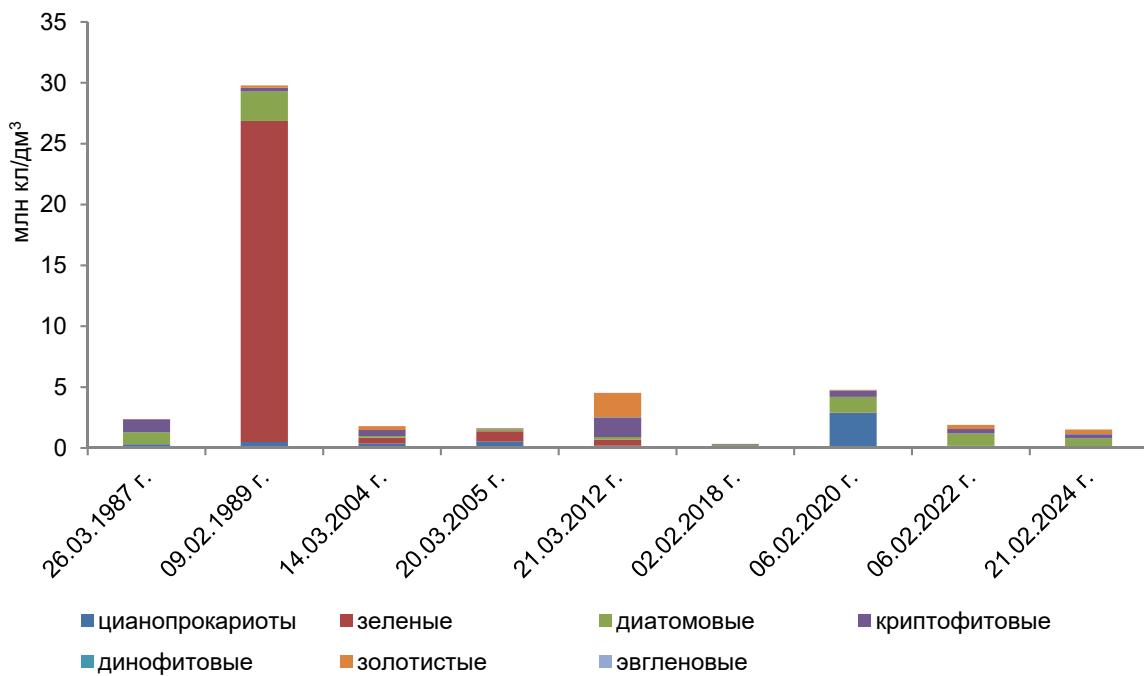


Рис. 6. Средняя численность пелагического фитопланктона в зимний период, млн кл/дм<sup>3</sup>

Fig. 6. Average abundance of pelagic phytoplankton in winter, million cells/dm<sup>3</sup>

Средняя биомасса, за редким исключением, не превышала 5 г/дм<sup>3</sup> (рис. 7). Ее многолетняя динамика практически совпадает с динамикой численности. С 2018 г. все большее значение в формировании биомассы приобретают диатомовые водоросли. Их вклад в общий показатель достигает 31–93 %, что в среднем составляет 62 %. В отдельные годы возрастает биомасса криптомонад. В последние 20 лет удельный вес представителей данного отдела составляет 17–75 %, в среднем – 36 %.

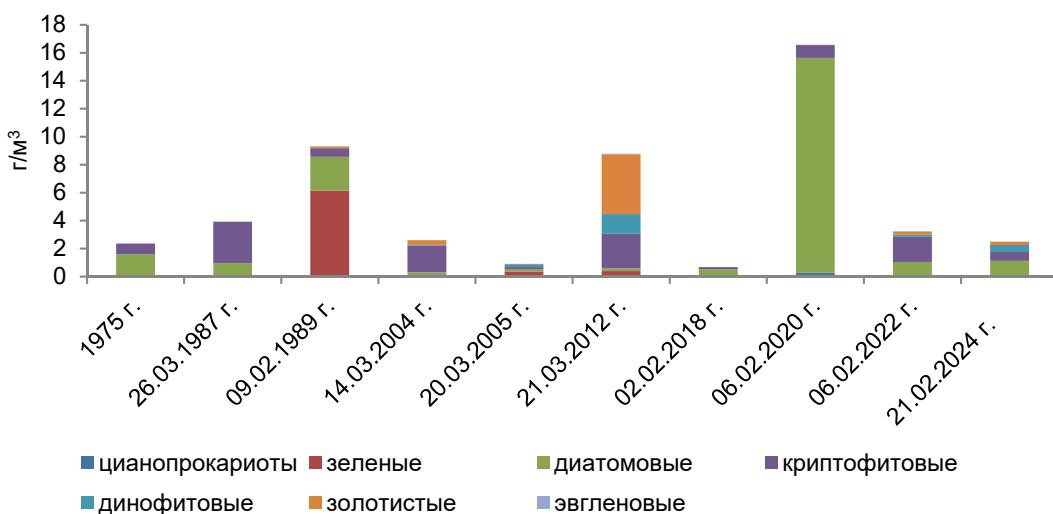


Рис. 7. Средняя биомасса пелагического фитопланктона в зимний период, г/дм<sup>3</sup>

Fig. 7. Average biomass of pelagic phytoplankton in winter, g/dm<sup>3</sup>

Таким образом, многолетние исследования зимнего фитопланктона водоема-охладителя свидетельствуют об относительном постоянстве структуры сообщества и его доминирующего комплекса. Вспышки развития водорослей в отдельные годы в значительной степени обусловлены погодными условиями.

Исследование зимнего зоопланктона проводили одновременно с фитопланктоном. Подледный планктон в феврале обычно беден в таксономическом плане и слабо развит количественно. В основном он сформирован холодолюбивым комплексом коловраток и веслоногих ракообразных. Ветвистоусые ракообразные в большинстве случаев развиваются летом, а на зиму выпадают из планктона.

После формирования ледостава в течение зимнего периода обычно идет постепенное повышение температуры воды, которое к концу ледостава инициирует развитие планкtonных организмов. В марте возрастают видовое разнообразие, обилие и биомасса за счет интенсификации развития веслоногих и коловраток.

В зоопланктоне оз. Лукомское по многолетним собственным данным за летний период на пелагических и литоральных станциях встречается 46 видов, из них 23 коловраток, 7 копепод и 16 кладоцер. За все время наблюдений зимой зарегистрирована только половина – 23 вида: 9 таксонов видового ранга *Rotifera* и по 7 таксонов *Copepoda* и *Cladocera*.

В некоторые годы наблюдений (2020 и 2022) в февральском планктоне отмечается слабое, вплоть до полного отсутствия, развитие коловраток (рис. 8). В марте 2004 г., как и в марте 2012 г., эта группа достигла наибольшего разнообразия и обилия. Отсутствие или малое развитие в планктоне коловраток в феврале, а затем рост количественных показателей в марте могли произойти по нескольким причинам. Во-первых – это зимний подледный минимум развития этой группы. Во-вторых, возможны миграции ротифер, обусловленные изменением условий обитания как в разные месяцы, так и в разные годы наблюдений (температура, содержание кислорода, время и продолжительность ледостава и т. п.).

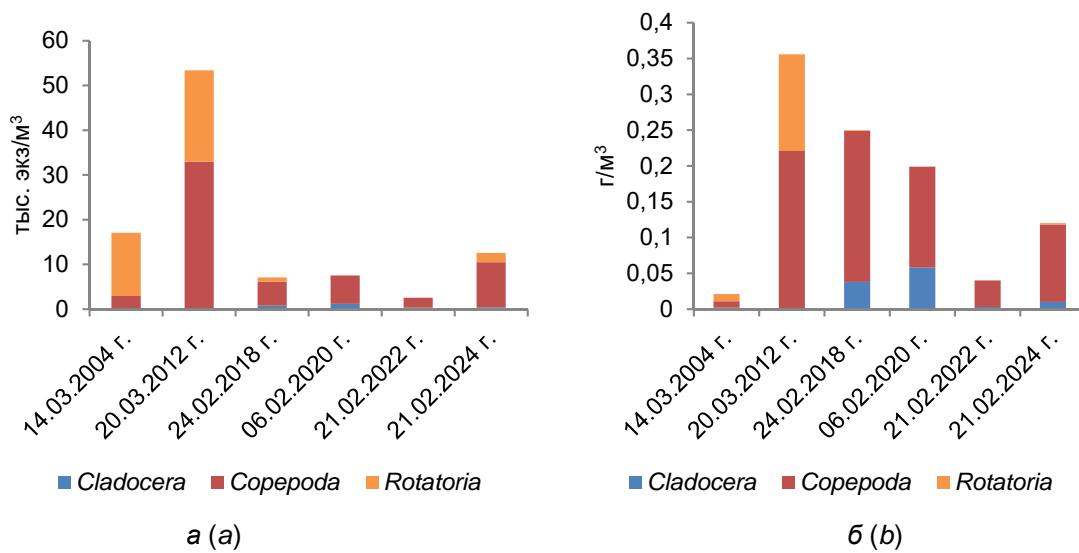


Рис. 8. Многолетняя динамика численности (а) и биомассы (б) подледного зоопланктона озера Лукомское

Fig. 8. Long-term dynamics of abundance (a) and biomass (b) of subglacial zooplankton in Lake Lukomskoe

В начальные годы наблюдений в зимний период коловратки были представлены круглогодичными холодолюбивыми или эвритеческими пелагическими видами: *Keratella cochlearis* (Lauterborn, 1898), *Keratella quadrata* (O. F. Müller, 1786), *Polyarthra euryptera* Wierzejski, 1891, *Synchaeta* sp., *Ascomorpha ecaudis* Perty, 1850 и *Brachionus angularis* Gosse, 1851. *B. angularis* является индикатором органического загрязнения и обычно развивается в массе летом при высокой температуре воды. Учитывая это обстоятельство, рост его численности в это время обусловлен заносом течением из подогретой зоны. Впоследствии этот вид не регистрировался, что может свидетельствовать о стабилизации экосистемы озера и возможном снижении уровня трофии. Также в зимнем планктоне в последние годы не встречается *Ascomorpha ecaudis*.

В последнее десятилетие в планктоне зарегистрировано несколько ранее не указанных видов коловраток: *Polyarthra dolichoptera dolichoptera* (Idelson, 1925), *Asplanchna priodonta priodonta* (Gosse, 1850), *Filinia terminalis* (Plate, 1886), *Notholca squamula squamula* (Müller, 1786) и *Synchaeta pectinata*

(Ehrenberg, 1832). Из перечисленного списка только *Notholca squamula* – холодолюбивый, приуроченный к зимнему времени вид, остальные являются круглогодичными обычными обитателями пелагического зоопланктона, и отсутствие которых в планктоне ранее могло быть результатом их низкой численности и межгодовых особенностей формирования зимнего сообщества.

Максимальную плотность в ранние годы исследований имела *K. cochlearis* (5,05 тыс. экз/м<sup>3</sup> в 2004 г. и 13,6 тыс. экз/м<sup>3</sup> в 2012 г.). Численность остальных коловраток укладывалась в пределы 0,2–4,7 тыс. экз/м<sup>3</sup>. В указанный период коловратки составляли 38–82 % всей численности. В марте 2004 г. относительная численность коловраток доходила до максимальных 94 % при доминировании *B. angularis* (51 тыс. экз/м<sup>3</sup>). В 2018 г. подо льдом встречалась уже только *Synchaeta* sp., доля которой в общей численности составила 14 %. С 2020 по 2022 г. коловратки практически отсутствовали в составе зимнего сообщества. В 2024 г. *Rotifera* вновь стали фиксироваться в февральском планктоне, возросло их разнообразие. По-прежнему доминируют *Keratella cochlearis*, а также *Synchaeta pectinata*; их средняя численность составляет 0,75 и 0,60 тыс. экз/м<sup>3</sup> соответственно. На долю коловраток приходится 16 % общей численности и 1,6 % биомассы сообщества. Таким образом, согласно многолетним данным, по группе коловраток наблюдается относительная стабильность экосистемы озера.

В раковом планктоне, как и зоопланктоне в целом, господствуют различные возрастные стадии развития веслоногих; их относительная численность находилась в пределах 62 % (2012 г.) – 87 % (2022 г.). Соотношение циклопид и диаптомид варьировало в разные годы; чаще преобладали циклопиды, в основном их наутилальные и копеподитные стадии. Личинки циклопов за период исследований в среднем составляли 56 % численности веслоногих, что свидетельствует об активном состоянии и размножении циклопов в подледный период. В 2024 г. численность циклопид достигла максимального значения (10,05 тыс. экз/м<sup>3</sup>) за весь период исследований. Они составляют 99,5 % всей численности веслоногих, в том числе 80 % приходится на неполовозрелые стадии.

До начала 2000-х годов единственным представителем циклопов в зимнем планктоне был *Cyclops strenuus* (Fischer, 1851). В марте 2004 г. он формировал 62 и 31 % общей численности и биомассы копепод соответственно. В последующие годы данный вид отсутствовал. Учитывая сложности в определении видового статуса в роде *Cyclops*, необходимо считать ранее определенный как *C. strenuus* ныне указываемый для озера *Cyclops kolensis* (Lilljeborg, 1901). Несмотря на многочисленные указания для самых разных водоемов *C. strenuus* все же больше привержен к обитанию во временных водоемах, прудах и является представителем тепловодного комплекса [20, 21]. Что касается *C. kolensis*, то это холодолюбивый вид, переживающий лето в придонных слоях воды или в пелагене в состоянии диапаузы, а зимой и ранней весной он активен и размножается сразу после таяния льда. Доля этого вида в планктоне ранее и сейчас в отдельные годы высокая, и логично, что исходя из жизненного цикла, она возрастает к концу февраля – марта за счет активности размножающихся особей.

В прибрежной зоне в небольшом количестве обитает *Cyclops vicinus* (Ujjanin, 1875), обычно появляющийся в весенний период. Кроме указанных видов впервые в водоеме обнаружен *Diacyclops bicuspidatus* (Claus, 1857). Указанный вид широко распространен в мелких пересыхающих водоемах, в лitorали озер и является типичным весенним видом [22].

В середине марта 2012 г., при наиболее высокой для данного периода температуре воды – 4,5–4,9 °C, зафиксированы взрослые *Mesocyclops leuckarti* (Claus, 1857) и *Thermocyclops oithonoides* (Sars, 1863), в сумме насчитывающие 1,72 тыс. экз/м<sup>3</sup>. С 2020 г. эти виды в зимнем планктоне не встречались. Это теплолюбивые формы южного происхождения, в летнее время обитающие в хорошо прогреваемом эпилимнионе димитических озер Беларуси [23]. Некоторая часть многочисленной популяции, сформировавшейся летом, перезимовывает во взрослом состоянии. Поэтому они являются редкими обитателями подледного планктона.

Постоянный и единственный представитель диаптомид *Eudiaptomus graciloides* (Lilljeborg, 1888) встречается в водоеме-охладителе круглогодично, в том числе и в подледном планктоне. Считается, что диаптомиды могут размножаться как летом, так и зимой. Зимний максимум у близкого и достаточно распространенного вида *Eudiaptomus gracilis* (Sars, 1863) наблюдался в марте – апреле [24–26]. Для эврибионтного *Eudiaptomus graciloides*, встречающегося в оз. Лукомское, все же характерна приуроченность к прогреваемому эпилимниону, а размножение – к поздней весне. Хотя ранее в подледном планктоне водоема количество взрослых особей было выше численности личиночных стадий и составляло 63–92 %, а в последние годы относительная численность варьировала от 0,3 до 30 %, очевидно, что это свидетельствует о наличии в планктоне зимой половозрелых особей осенней генерации, которые после вскрытия водоема и прогревания воды приступят к размножению весной. Колебание их численности и доля в подледном планктоне не показательны и в большинстве случаев зависят от особенностей развития в летний период и численности осенью.

Поэтому значительное влияние на состав и развитие популяций веслоногих зимой оказывают, прежде всего, развитие представителей этой группы летом, жизненный цикл, условия ледостава, температура воды и кислородный режим. В связи с этим возникают сложности с интерпретацией динамики их популяций, особенно в зимнее время. Исключением могут быть популяция *Cyclops kolensis*, развитие и размножение которой проходит в холодное время года.

Ветвистоусые в основном развиваются летом, в подледных условиях не отличаясь разнообразием и высокой численностью. В последние два десятилетия постоянным и наиболее многочисленным представителем ветвистоусых пелагиали была *Daphnia longispina* (O. F. Müller, 1785), обилие которой варьировало в пределах 0,02 тыс. экз/м<sup>3</sup> (2012 г.) – 1,2 тыс. экз/м<sup>3</sup> (2020 г.). Ранее отмеченные здесь *Daphnia cucullata* (Sars, 1862) и *Daphnia cristata* (Sars, 1862) сейчас не встречаются. Из рода *Bosmina* регистрируемые летом *B. obtusirostris* (Sars, 1862), *B. longirostris* (O. F. Müller, 1785) и *B. crassicornis* (P. E. Müller, 1867) в зимнее время выпадают из планктона, за исключением *B. longirostris*, которая встречается единично. Для этого вида босмин диапазон условий обитания очень широк. Нами неоднократно в летнее время регистрировались их скопления как в прогреваемом прибрежье, так и у дна дициклических озер при низкой температуре (5–6 °C) [23]. Другие найденные зимой виды, например, *Chydorus sphaericus* (O. F. Müller, 1785), встречаются в отдельные годы спорадически, поэтому динамику их численности зимой проследить не удается.

Наряду с низким таксономическим разнообразием, для подледного зоопланктона характерен и слабый уровень количественного развития. Средняя численность в пелагиали замерзающей части водоема постепенно снижалась: от 17,05 тыс. экз/м<sup>3</sup> (2004 г.) до 2,53 тыс. экз/м<sup>3</sup> (2022 г.); биомасса укладывалась в пределы 0,021 г/м<sup>3</sup> (2004 г.) – 0,25 г/м<sup>3</sup> (2018 г.). Исключение составил март 2012 г., когда в условиях наиболее высокой для данного периода температуры воды обилие и биомасса зоопланктона были максимально высокими и достигали 53,38 тыс. экз/м<sup>3</sup> и 0,36 г/м<sup>3</sup> соответственно. Более высокие значения обилия и биомассы зоопланктона на момент последнего исследования 2024 г. укладываются в пределы многолетних колебаний (см. рис. 8).

В многолетнем аспекте отмечено снижение роли коловраток в сообществе. Если в начале 2000-х годов их доля в общей численности достигала 78 %, а в 2018 г. – 14 %, то с 2020 г. обнаруживаются единичные особи. Основу сообщества формируют копеподы, относительная численность и биомасса которых неуклонно возрастают: от 17 до 87 % и от 43 до 93 % соответственно. Указанные особенности динамики численности свидетельствуют о некотором снижении количества зоопланктона в этом озере.

В целом, видовой состав и структура сообщества в настоящее время типичны для зимнего периода и соответствуют водоемам с низкой трофностью. Хотя по зимнему планкtonу сложно оценить как трофический статус водоема, так и тенденции его изменения, следует отметить, что сокращение общей численности за счет коловраток и рост биомассы, в значительной степени формируемой крупными ракообразными, свидетельствуют о снижении темпов эвтрофирования водоема-охладителя.

**Заключение.** Таким образом, в ионной структуре отмечено, что наиболее высокой скоростью поступления и накопления в водной массе водоема характеризуются гидрокарбонаты, а также ионы магния, натрия и хлора, при относительном снижении содержания сульфатов и кальция. Среди биогенных элементов наиболее устойчивый рост демонстрирует концентрация фосфора фосфатного, а снижение – концентрация нитрит-иона.

Многолетние исследования зимнего фитопланктона оз. Лукомское свидетельствуют об относительном постоянстве структуры сообщества и его доминирующего комплекса. Вспышки развития водорослей в отдельные годы в значительной степени обусловлены погодными условиями.

Видовой состав и структура сообщества зоопланктона озера в настоящее время типичны для зимнего периода. Хотя по зимнему планкtonу сложно оценить как трофический статус водоема, так и тенденции его изменения, следует отметить, что сокращение общей численности за счет коловраток и рост биомассы, в значительной степени формируемой крупными ракообразными, свидетельствуют о снижении темпов эвтрофирования водоема-охладителя.

Несмотря на общие тенденции к снижению антропогенной нагрузки на экосистему озера после ввода в эксплуатацию парогенераторной установки, необходимы природоохранные мероприятия, направленные на улучшение экологического состояния оз. Лукомское. Так, реальная фосфорная нагрузка на экосистему озера превышает расчетную допустимую в 2 раза и примерно равна критической. Поэтому необходимо проведение водоохранных мероприятий на водосборе, особенно в отношении объектов животноводства, которые являются основными источниками поступления фосфора.

**Благодарности.** Исследования выполнены при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (договор № Б23МС-001), филиала «Лукомльская ГРЭС» РУП «Витебскэнерго» (проекты 65993, 6549A), а также в рамках научно-исследовательских работ 1.05 «Выявить закономерности развития озерных бассейнов Беларуси с использованием геоинформационного моделирования и разработать меры по их адаптации к изменению природной среды и антропогенному воздействию» и 1.11 «Изучение особенностей накопления и распределения газов в воде и донных отложениях разнотипных озер Беларуси и их роль в формировании экологического состояния водоемов» государственной программы научных исследований «Природные ресурсы и окружающая среда».

**Acknowledgements.** The research is funded by the Belarusian Republican Fund for Fundamental Research (project Б23МС-001), the Lukoml SDPP, branch of RUE Vitebskenergo (projects 65993, 6549A), and within the framework of project 1.05 "To identify patterns of development of lake basins in Belarus using geoinformation modeling and to develop measures for their adaptation to changes in the natural environment and anthropogenic impact" and 1.11 "Study of the features of accumulation and distribution of gases in water and bottom sediments of different types of lakes in Belarus and their role in the formation of the ecological state of water bodies" of the State Program of Scientific Research "Natural Resources and Environment".

#### Список использованных источников

1. Озёра Беларуси : справочник / Б. П. Власов [и др.]. – Минск : Изд-во БГУ, 2004. – 284 с.
2. Государственный водный кадастр. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. – Минск, 1974–2021.
3. Руководство по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений. – Л. : Гидрометеоиздат, 1983. – 239 с.
4. Методические рекомендации по сбору и обработке материалов при гидробиологических исследованиях на пресноводных водоемах. Фитопланктон и его продукция. – Л., 1981. – 31 с.
5. Винберг, Г. Г. Методы определения продукции водных животных / Г. Г. Винберг. – Минск : Вышэйшая школа, 1968. – 248 с.
6. Балушкина, Е. В. Зависимость между длиной и массой тела планктонных ракообразных / Е. В. Балушкина, Г. Г. Винберг // Экспериментальные и полевые исследования биологических основ продуктивности озер : сборник. – Л. : ЗИН АН СССР, 1979. – С. 59–79.
7. Алекин, О. А. Основы гидрохимии / О. А. Алекин. – Л. : Гидрометеоиздат, 1970. – 440 с.
8. Продуктивность и перспективы использования экосистемы озера Лукомское – водоема-охладителя ТЭС / В. П. Ляхнович [и др.] // Экология. – 1987. – № 5. – С. 43–48.
9. Самойленко, В. М. Многолетние изменения фитопланктона водоема-охладителя / В. М. Самойленко, А. А. Свирид // Альгология. – 2014. – Т. 24, № 3. – С. 371–375.
10. Экосистема водоема-охладителя Лукомльской ГРЭС / П. А. Митрахович [и др.] ; Белорусский государственный университет. – Минск : Право и экономика, 2008. – 144 с.
11. Боровик, Е. А. Озера Белорусской ССР (ротапринт) / Е. А. Боровик. – Минск, 1964. – 380 с.
12. Власов, Б. П. Влияние тепловой электростанции на экосистему водоема-охладителя Лукомское / Б. П. Власов, В. М. Самойленко // География: развитие науки и образования : сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. «LXXIV Герценовские чтения», Санкт-Петербург, 21–23 апр. 2021 г. ; отв. редакц.: С. И. Богданов, Д. А. Субетто, А. Н. Паранина. – СПб. : Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена, 2021. – Т. 2. – С. 31–35.
13. Вежновец, Г. Г. Фитопланктон оз. Лукомского – охладителя ТЭС / Г. Г. Вежновец, В. М. Самойленко // Вестн. Белорус. гос. ун-та. – Сер. 2, Химия, биология, география. – 1995. – № 3. – С. 56–59.
14. Шкундина, Ф. Б. Сезонная динамика фитопланктона в некоторых озерах мира / Ф. Б. Шкундина // Гидробиологический журнал. – 1983. – Т. XIX, № 6. – С. 3–8.
15. Munawar, M. Phytoplankton Lake Superior 1973 / M. Munawar, I. Munawar // J. Great Lakes Res. – 1978. – № 4. – Р. 415–442.
16. Roberts, E. C. Mixotrophic cryptophytes and their predators in the Dry Valley lakes of Antarctica / E. C. Roberts, J. Laybourn-Parry // Freshwater Biology. – 1999. – Vol. 43. – P. 737–746.
17. Danilov, R. A. Phytoplankton communities at different depths in two eutrophic and two oligotrophic temperate lakes at higher latitude during the period of ice cover / R. A. Danilov, N. G. A. Ekelund // Acta Protozool. – 2001. – Vol. 40. – P. 197–201.
18. Seasonal dynamics of phytoplankton and planktonic protozoan communities in a Northern temperate humic lake: diversity in a dinoflagellate dominated system / J. M. Graham [et al.] // Microbial Ecology. – 2004. – Vol. 48, № 4. – P. 528–540. doi:10.1007/s00248-004-0223-3
19. Бюллетень экологического состояния озер Нарочь, Мястро, Баторино (2009 год). – Минск : Изд-во БГУ, 2010. – 86 с.
20. Вежновец, В. В. Ракообразные (Cladocera, Copepoda) в водных экосистемах Беларуси. Каталог. Определятельные таблицы / В. В. Вежновец. – Минск : Беларуская наука, 2005. – 150 с.
21. Монченко, В. И. Челюстноротые циклообразные. Циклопы (Cyclopidae) / В. И. Монченко // Фауна Украины. – Киев : Наукова думка, 1974. – Т. 27, вып. 3. – 452 с.
22. Diacyclops bicuspidatus Claus, 1857 (диациклиоп длиннохвостый) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://crustacea-g2n.mozello.com/copepoda/diacyclops-bicuspidatus/>. – Дата доступа: 06.06.2024.
23. Вежновец, В. В. Вертикальная структура зоопланктона в стратифицированных озерах Беларуси с разной степенью трофии / В. В. Вежновец, М. Д. Журавлев // Биология внутренних вод. – 2022. – № 6. – С. 725–733. doi:10.31857/S0320965222060195
24. Структура и функционирование пресноводных экосистем. – Л. : Наука, 1988. – 280 с.
25. Ривьер, И. К. Особенности функционирования зоопланктона сообществ водоемов различных типов / И. К. Ривьер // Структура и функционирование пресноводных экосистем. – Л. : Наука, 1988. – С. 80–112.
26. Ривьер, И. К. Холодноводный зоопланктон озер бассейна Верхней Волги / И. К. Ривьер ; отв. ред. В. Н. Яковлев ; Ин-т биологии внутр. вод им. И. Д. Папанина РАН. – Ижевск : Изд. Пермяков С. А., 2012. – 390 с.

## References

1. Vlasov B. P., e. a. *Ozyora Belarusi: spravochnik* [Lakes of Belarus. Handbook]. Minsk, 2004, 284 p. (in Russian)
2. *Gosudarstvennyj vodnyj kadastr. Ezhegodnye dannye o rezhime i resursah poverhnostnyh vod sushi* [State Water Cadastre. Annual data on the regime and resources of surface waters of land]. Minsk, 1964–2023. (in Russian)
3. *Rukovodstvo po metodam gidrobiologicheskogo analiza poverhnostnyh vod i donnyh otlozhenij*. [Guide to methods of hydrobiological analysis of surface waters and bottom sediments]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1983, 239 p. (in Russian)
4. *Metodicheskie rekomendacii po sboru i obrabotke materialov pri gidrobiologicheskikh issledovaniyah na presnovodnyh vodoemah. Fitoplankton i ego produkciya* [Methodological recommendations for collecting and processing materials during hydrobiological studies in freshwater bodies. Phytoplankton and its products]. Leningrad, 1981, 31 p. (in Russian)
5. Vinberg G. G. *Metody opredeleniya produkciyi vodnyh zhivotnyh* [Methods for determining aquatic animal production] / Minsk, Vyshejshaya Shkola Publ., 1968, 248 p. (in Russian)
6. Balushkina E. V., Vinberg G. G. *Zavisimost' mezhdu dlinoj i massoj tela planktonnyh rakoobraznyh*. Sbornik Eksperimental'nye i polevye issledovaniya biologicheskikh osnov produktivnosti ozer [Collection of Experimental and field studies of the biological basis of lake productivity]. Leningrad, Zoological Institute of the USSR Academy of Sciences Publ., 1979, pp. 59–79. (in Russian)
7. Alekin O. A. *Osnovy gidrohimii* [Basics of hydrochemistry]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1970, 440 p. (in Russian)
8. Lyahnovich V. P., Karataev A. Yu., Mitrahovich P. A., Gur'yanova L. V., Vezhnovec G. G. *Produktivnost' i perspektivy ispol'zovaniya ekosistemy ozera Lukomskoe – vodoema-ohladitelya TES* [Productivity and prospects for using the ecosystem of Lake Lukomskoye – the cooling reservoir of the thermal power plant]. *Ecology*, 1987, no. 5, pp. 43–48. (in Russian)
9. Samoilenco V. M., Svirid A. A. *Mnogoletnie izmeneniya fitoplanktona vodoema-ohladitelya* [Long-term changes in the phytoplankton of the cooling pond]. *Algology*, 2014, vol. 24, no. 3, pp. 371–375. (in Russian)
10. Mitrahovich P. A., e. a. *Ekosistema vodoema-ohladitelya Lukom'skoj GRES* [Ecosystem of the cooling pond at Lukomlskaya GRES]. Minsk, Pravo i Economika Publ., 2008, 144 p. (in Russian)
11. Borovik E. A. *Ozera Belorusskoj SSSR (rotaprint)* [Lakes of the Belarusian USSR (rotaprint)]. Minsk, 1964, p. 380. (in Russian)
12. Vlasov B. P., Samoilenco V. M. *Vliyanie teplovoj elektrostancii na ekosistemu vodoema-ohladitelya Lukomskoe* [The influence of a thermal power plant on the ecosystem of the Lukomskoye cooling pond]. *Geografiya: razvitiye nauki i obrazovaniya. Sbornik statej po materialam ezhegodnoj mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii "LXXIV Gercenovskie chteniya"* [Proc. Int. sci. and practical conf. "LXXIV Herzen ReadingGeography": development of science and education]. Saint Petersburg, 2021, pp. 31–35. (in Russian)
13. Vezhnovec G. G., Samoilenco V. M. *Fitoplankton oz. Lukomskogo – ohladitelya TES* [Phytoplankton of the lake Lukomsky – thermal power plant cooler]. *J. of the Belarusian State University Series 2. Chemistry. Biology. Geography*, 1995, no. 3. Minsk, 1995, pp. 56–59. (in Russian)
14. Shkundina F. B. *Sezonnaya dinamika fitoplanktona v nekotoryh ozerah mira* [Seasonal dynamics of phytoplankton in some lakes of the world]. *Hydrobiology* J., 1983, no. 6, pp. 3–8. (in Russian)
15. Munawar M., Munawar I. *Phytoplankton Lake Superior 1973*. *J. Great Lakes Res.*, 1978, no. 4, pp. 415–442.
16. Roberts E. C., Laybourn-Parry J. *Mixotrophic cryptophytes and their predators in the Dry Valley lakes of Antarctica*. *Freshwater Biology*, 1999, no. 43, pp. 737–746.
17. Danilov R. A., Ekelund N. G. A. *Phytoplankton communities at different depths in two eutrophic and two oligotrophic temperate lakes at higher latitude during the period of ice cover*. *Acta Protozool.*, 2001. vol. 40, pp. 197–201.
18. Graham J. M., e. a. *Seasonal dynamics of phytoplankton and planktonic protozoan communities in a Northern temperate humic lake: diversity in a dinoflagellate dominated system*. *Microbial Ecology*, 2004, vol. 48, no. 4, pp. 528–540. doi:10.1007/s00248-004-0223-3
19. *Byulleten' ekologicheskogo sostoyaniya ozer Naroch'*, Myastro, Batorino [Bulletin of the ecological state of lakes Naroch, Myastro, Batorino]. Minsk, 2010, 86 p. (in Russian)
20. Vezhnovec V. V. *Rakoobraznye (Sladocera, Copepoda) v vodnyh ekosistemah Belarusi. Katalog. Opredelitel'nye tablitsy* [Crustaceans (Cladocera, Copepoda) in aquatic ecosystems of Belarus. Catalog. Definitive tables]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2005, 150 p. (in Russian)
21. Monchenko V. I. *Chelyustnorotye cikloobraznye. Ciklopy (Cyclopidae)* [Cyclostomes. Cyclops (Cyclopidae)]. *Fauna Ukrayny*, 1974, no. 3. Kiev, Naukova dumka Publ., 452 p. (in Russian)
22. Diacyclops bicuspidatus Claus, 1857. Available at: <https://crustacea-g2n.mozello.com/copepoda/diacyclops-bicuspidatus/> (accessed 06 June 2024). (in Russian)
23. Vezhnovec V. V., Zhuravlev M. D. *Vertikal'naya struktura zooplanktona v stratificirovannyh ozerah Belarusi s raznoj stepen'yu trofii* [Vertical structure of zooplankton in stratified lakes of Belarus with different degrees of trophy]. *Biologiya vnutrennih vod*, 2022, no. 6, pp. 725–733. doi:10.31857/S0320965222060195 (in Russian)
24. *Struktura i funkcionirovaniye presnovodnyh ekosistem* [Structure and functioning of freshwater ecosystems]. Leningrad, Nauka Publ., 1988, 280 p. (in Russian)
25. Riv'er I. K. *Osobennosti funkcionirovaniya zooplanktonnyh soobshchestv vodoemov razlichnyh tipov. Struktura i funkcionirovaniye presnovodnyh ekosistem* [Features of the functioning of zooplankton communities of various types of water bodies. Structure and functioning of freshwater ecosystems]. Nauka Publ., 1988, pp. 80–112. (in Russian)
26. Riv'er I. K. *Holodnovodnyj zooplankton ozer bassejna Verhnej Volgi* [Cold-water zooplankton of lakes of the Upper Volga basin]. Izhevsk, 2012, 390 p. (in Russian)

### Информация об авторах

*Суховило Нина Юрьевна* – кандидат географических наук, заведующий научно-исследовательской лабораторией озероведения, факультет географии и геоинформатики, Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь). E-mail: SukhoviloNY@bsu.by

*Самойленко Вера Михайловна* – старший научный сотрудник, факультет географии и геоинформатики, Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь)

*Вежновец Василий Васильевич* – кандидат биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, ГНПО «НПЦ НАН Беларусь по биоресурсам» (ул. Академическая, 27, 220072, г. Минск, Беларусь). E-mail: vezhn47@mail.ru

### Information about the authors

*Nina Yu. Sukhovilo* – Ph. D. (Geography), Head of the Laboratory of Lake Research, faculty of geography and geoinformatics, Belarusian State University (Nezavisimosti Av., 4, 220030, Minsk, Belarus). E-mail: SukhoviloNY@bsu.by

*Vera M. Samoilanka* – Senior Researcher, faculty of geography and geoinformatics, Belarusian State University (Nezavisimosti Av., 4, 220030, Minsk, Belarus)

*Vasil V. Vezhnavets* – Ph. D. (Biology), Leading Researcher, State Scientific and Production Association "Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Bioresources" (Akademicheskaya Str., 27, 220072, Minsk, Belarus). E-mail: vezhn47@mail.ru