Трансформация экосистем
Ecosystem Transformation

ISSN 2619-0931 Online
www.ecosysttrans.com

DOI: https://doi.org/10.23859/estr-240507
EDN: https://elibrary.ru/pzijjw
УДК 556.55

Научная статья

Современное экологическое состояние озера Банное (п. Соловецкий)

Н.С. Прилуцкая*, С.И. Климов, Т.Я. Воробьева, А.А. Чупакова, Т.И. Ловдина, М.В. Бурмагин, О.Ю. Морева

Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаверова УрО РАН, 163020, Россия, г. Архангельск, Никольский проспект, д. 20

**priluckaya.fickia@mail.ru*

Аннотация. Обобщены гидрологические, гидрохимические и гидробиологические характеристики мелководного оз. Банное (п. Соловецкий), испытывающего на себе высокую антропогенную нагрузку, за различные гидрологические периоды 2022–2024 гг. По количественным и качественным показателям гидробионтов и содержанию биогенных элементов оз. Банное относится к β-, α-мезотрофному водоему, переходящему в эвтрофный. Значение индекса Гуднайт-Уотлея вод характеризует оз. Банное как загрязненный водоем. В озере выявлена высокая концентрация минерального фосфора, а также превышение ПДК для объектов рыбохозяйственного значения по содержанию ионов аммония в придонном горизонте. Таким образом, в озере, возможно, присутствует сброс загрязненной воды от жилых домов и коммунально-производственных объектов, однако сток с озера не оказывает ощутимого воздействия на воды Бухты Благополучия.

Ключевые слова: Соловецкий архипелаг, эвтрофирование, биогенные элементы, растворенный органический углерод, бактериопланктон, фитопланктон, зоопланктон, зообентос

Финансирование. Исследования проведены при финансовой поддержке РНФ, проект № 22-14-20045 «Оценка современного состояния пресноводных экосистем Соловецкого архипелага (фундаментальный и прикладной аспекты)».

Благодарности. Авторы выражают благодарность за всестороннюю помощь в экспедиционном исследовании на Соловках А.В. Максимову, А.В. Пермагорскому, сотрудникам Соловецкого музея-заповедника А.Я. Мартынову и А.Н. Соболеву, а также рецензентам за конструктивные замечания, позволившие улучшить качество статьи.

ORCID:
Н.С. Прилуцкая, https://orcid.org/0009-0008-2985-8373
Т.Я. Воробьева, https://orcid.org/0000-0002-3410-0240
А.А. Чупакова, https://orcid.org/0000-0001-8234-3514
Т.И. Ловдина, https://orcid.org/0000-0003-2713-559X

М.В. Бурмагин, https://orcid.org/0009-0008-2645-0065
О.Ю. Морева, https://orcid.org/0000-0002-5114-8481

Для цитирования: Прилуцкая, Н.С. и др., 2025. Современное экологическое состояние озера Банное (п. Соловецкий). *Трансформация экосистем* **8** (4), 156–174. https://doi.org/10.23859/estr-240507

Поступила в редакцию: 07.05.2024
Принята к печати: 07.09.2024
Опубликована онлайн: 28.11.2025

DOI: https://doi.org/10.23859/estr-240507
EDN: https://elibrary.ru/pzijjw
UDC 556.55

Article

Current ecological state of Lake Bannoye (Solovetsky settlement)

N.S. Prilutskaya*, S.I. Klimov, T.Ya. Vorobyeva, A.A. Chupakova, T.I. Lovdina, M.V. Burmagin, O.Yu. Moreva

N. Laverov Federal Research Center for Integrated Arctic Studies, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Nikolsky prospect St. 20, Arkhangelsk, 163020 Russia

**priluckaya.fickia@mail.ru*

Abstract. Hydrological, hydrochemical and hydrobiological features of shallow Lake Bannoye (Solovetsky settlement), characterized by high anthropogenic loads, are summarized for various hydrological periods of 2022–2024. In terms of quantitative and qualitative indicators of aquatic organisms, as well as biogenic elements, Lake Bannoye is classified as a β-, α-mesotrophic water body transitioning to eutrophic. According to the Goodnight-Watley Index (GW), the lake is a “polluted” reservoir. The content of mineral phosphorus is high in the lake, and ammonium ions in the bottom layer exceed the maximum permissible concentrations for fisheries. Hence, the lake, obviously, receives polluted waters discharged by residential buildings and municipal-industrial facilities. However, runoff from the lake does not have a noticeable impact on the waters of Blagopoluchiya Bay.

Keywords: Solovetsky Archipelago, eutrophication, biogenic elements, dissolved organic carbon, bacterioplankton, phytoplankton, zooplankton, zoobenthos

Finding. The research was financially supported by the Russian Science Foundation, project No. 22-14-20045, "Assessment of the current state of freshwater ecosystems of the Solovetsky Archipelago (fundamental and applied aspects)."

Acknowledgements. The authors express their gratitude to A.V. Maksimov, A.V. Permagorsky for comprehensive assistance in the expeditionary research on Solovki. We also thank A.Ya. Martynov and

A.N. Sobolev, the staff members of the Solovetsky Museum-Reserve, as well as the reviewers for their valuable comments contributed to the substantial improvement of the manuscript.

ORCID:
N.S. Prilutskaya, https://orcid.org/0009-0008-2985-8373
T.Ya. Vorobyeva, https://orcid.org/0000-0002-3410-0240
A.A. Chupakova, https://orcid.org/0000-0001-8234-3514
T.I. Lovdina, https://orcid.org/0000-0003-2713-559X
M.V. Burmagin, https://orcid.org/0009-0008-2645-0065
O.Yu. Moreva, https://orcid.org/0000-0002-5114-8481

To cite this article: Prilutskaya, N.S. et al., 2025. Current ecological state of Lake Bannoye (Solovetsky settlement). *Ecosystem Transformation* **8** (4), 156–174. https://doi.org/10.23859/estr-240507

Received: 07.05.2024
Accepted: 07.09.2024
Published online: 28.11.2025

Введение

Уникальность природного комплекса Соловецкого архипелага связана с наличием большого количества пресноводных озер. Согласно Г.Л. Глицевской с соавторами (1972), всего на архипелаге насчитывается около 375 озер, из которых 337 – на Большом Соловецком острове. При этом озера отличаются необычным разнообразием по своему положению, рельефу дна, цвету воды, растительности, площади, генезису, глубине и форме очертания котловин. Очертания и лимнологические характеристики этих водоемов включают в себя практически все формы озер бореальной зоны, описанные в литературе (Грицевская и др., 1972; Шварцман и Болотов, 2007). Также озера отличаются и по степени антропогенного влияния на них.

Озеро Банное расположено на территории п. Соловецкий (Рис. 1) острова Большой Соловецкий. Озеро является мелководным водоемом и испытывает на себе антропогенное воздействие – на его берегу расположены жилые дома и коммунально-производственные объекты (современная баня (здание бывшей котельной), авторемонтная база). Вверх по ручью, впадающему в озеро, находится палаточный лагерь, туристы из которого в летний период используют воду из этого ручья в хозяйственно-бытовых целях. Кроме того, на берегу озера находятся здания Белецкой бани и Соловецкого филиала Архангельского опытного водорослевого комбината, которые в настоящий момент не используются. Несмотря на высокую проточность озера, в нем активно идут сукцессионные процессы. Ручей из озера впадает в залив Бухта Благополучия, но сток с озера не оказывает ощутимого воздействия на воды данного залива (средняя величина прилива в этом районе составляет около 1 м, и через сечение залива в месте впадения ручья за приливной цикл проходит объем воды, превышающий объем озера более чем в 2 раза).

По словам местных жителей, оз. Банное ранее было гораздо глубже (в 70-х гг. глубина составляла около 4-х м). В 1927 г., согласно А.А. Захваткину (1927), глубина озера достигала 5–6 м. Кроме того, в зимние периоды тех лет в озере наблюдались заморы, что может свидетельствовать о низкой проточности озера в прошлом. В настоящий момент, впадающий в озеро, ручей не замерзает, и содержание растворенного кислорода в его водах в конце марта 2024 года составляло более 13 мг/л.

Ранее на озере проводились разовые исследования, в которых изучались отдельные гидролого-гидрохимические показатели (Bespalaya et al., 2021; Titova et al., 2024). Целью настоящей статьи является изучение современного состояния мелководного озера на примере оз. Банное как экосистемы, находящейся на изолированных островных территориях в высоких широтах в условиях антропогенной нагрузки. Нами использованы данные, полученные за период 2022–2024 гг. по гидрологическим, гидрохимическим, микробиологическим параметрам. Также в статье обсуждаются данные по количественному и качественному составу фито- и зоопланктона, зообентоса (Novikova et al., 2023; Novoselov et al., 2024a, b).

Рис. 1. Оз. Банное.

Материалы и методы

Отбор проб

Образцы проб воды для гидрохимических анализов отбирались горизонтальным поликарбонатным батометром объемом 5 л с поверхностного и придонного горизонта в периоды установления наибольшей стратификации в 2022–2024 гг. (зимней: конец марта – начало апреля; летней: конец июля – начало августа). В 2023 г. пробы отбирали дополнительно в конце октября перед ледоставом. В 2022 г. проводились рекогносцировочные работы на одной станции зимой и летом (станция 1). В 2023 г. количество станций с целью оценки пространственной изменчивости было увеличено до трех: 1 – самая глубокая (реперная), 2 – рядом с баней, 3 – в месте впадения ручья. В 2024 г. исследования проводились в зимний период, при этом количество станций было увеличено до четырех (4 – в месте впадения второго ручья с восточной стороны), а также осуществлен отбор из ручья, вытекающего из озера в Бухту Благополучия. Точки отбора проб изображены на Рис. 2.

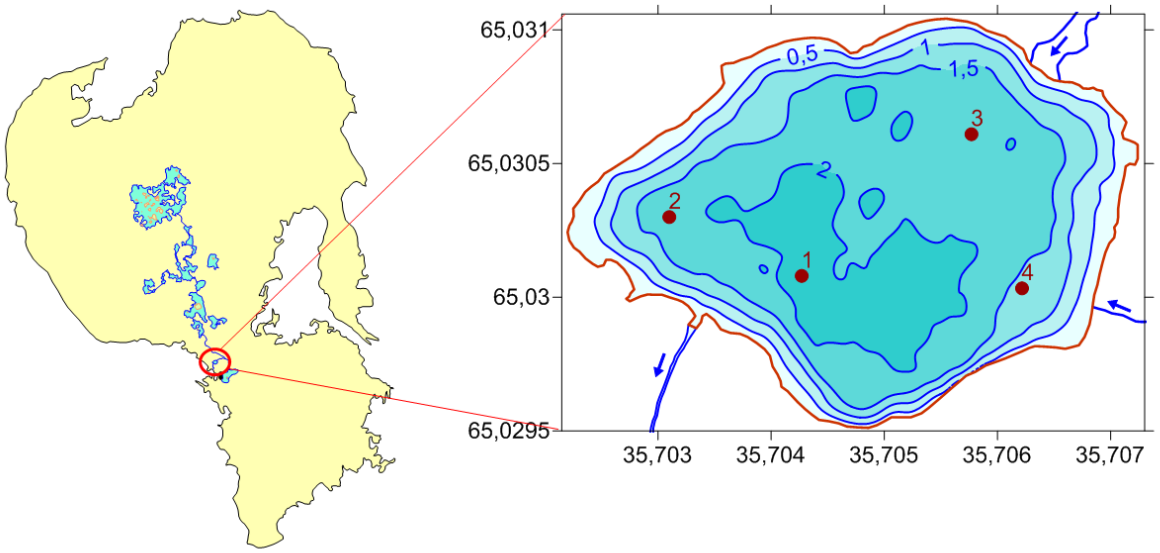

Рис. 2. Местоположение и батиметрическая карта оз. Банное. Красными точками обозначены станции отбора проб.

Методы исследования

Морфометрические характеристики водоема были определены по результатам батиметрической съемки с применением эхолота-картплоттера Humminbird Fishfinder 363 (США). Вертикальное распределение гидрологических (температура, электропроводность) и гидрохимических (pH, растворенный кислород) параметров *in situ* определялось многопараметрическим анализатором качества воды U-52G (Horiba, Япония) (зимой) и оксиметром WTW Oxi 330i (Германия) с датчиком DurOx 325 (Германия) (летом). При отборе проб в летние периоды измерялись величина водородного показателя (pH-метры Эксперт 002 (Россия), WTW ProfLine 3110 (Германия)) и удельная электропроводность (кондуктометр WTW 3110 (Германия)).

Для измерения концентрации биогенных элементов в пробах воды (нитритного азота $N\text{-}NO_2^-$, аммонийного азота $N\text{-}NH_4^+$, нитратного азота $N\text{-}NO_3^-$, общего азота N_{tot}, фосфат-ионов $P\text{-}PO_4^{3-}$, общего фосфора P_{tot}, кремния Si) использовались стандартные фотометрические методы[1] (Сапожников и др., 2003). Для определения содержания растворенного углерода пробы воды фильтровались через фильтры 0.22 мкм. В фильтратах измеряли концентрацию растворенного органического (РОУ) и растворенного неорганического углерода (РНУ) на анализаторе общего органического углерода Shimadzu TOC-Lscn (Япония). Спектральные характеристики определяли на сканирующем спектрофотометре ПЭ-5400УФ (Россия). Цветность измеряли фотометрическим методом с применением хром-кобальтовой шкалы[2].

Пробы для определения общего числа микроорганизмов отбирали в стерильные флаконы на 15 мл и фиксировали профильтрованным безбактериальным глутаровым альдегидом (с конечной концентрацией 2%). Общую численность микроорганизмов определяли на проточном цитофлуориметре Luminex Guava® EasyCyte 12HT (США) с окрашиванием флуорохромом DAPI и детекцией флуоресценции в синей области спектра (датчик Blu-V (450/45)).

Пробы зообентоса отбирались дночерпателем Экмана-Берджа с площадью захвата 0.04 м^2. Их промывка проводилась через мельничный газ № 23 с длиной стороны ячейки 0.333 мм. Отобранные организмы зообентоса фиксировались 4% раствором формалина, нейтрализованным тетраборатом натрия (для большей сохранности донных организмов, имеющих кальциевые скелетные элементы). Камеральная обработка собранного материала осуществлялась в соответствии со стандартными методами (Абакумов, 1992) Для таксономического определения организмов был использован стереоскопический микроскоп МБС–12 (Россия). Взвешивание каждой

[1] ПНД Ф 14.1:2.2.4–95. Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений массовой концентрации нитрат-ионов в природных и сточных водах фотометрическим методом с салициловой кислотой.

[2] ГОСТ 31868-2012, Вода. Методы определения цветности.

группы организмов проводилось на электронных весах «KERN EW» (Германия) с точностью до 0.001 г. В работе по определению донных животных использовались общепринятые определители (Цалолихин, 2016; Чертопруд и Чертопруд, 2011). Класс качества вод определялся согласно «Комплексной экологической классификации качества поверхностных вод суши»[3].

Для определения статистически значимых различий данных по содержанию биогенных элементов на разных станциях применялся непараметрический критерий Вилкоксона парных сравнений для зависимых выборок. Сравнение проводилось по сезонам по нормированным значениям содержания биогенных элементов за период исследования.

Физико-географическая характеристика оз. Банное

Оз. Банное расположено на территории п. Соловецкий в северо-восточной его части (N 65°01'49" E 35°42'21'). Согласно классификации П.В. Иванова (Теоретические вопросы..., 1993), водоем относится к категории очень малых озер. Озеро имеет овальную форму, его максимальная длина – 240 м, ширина – 165 м, площадь –25580 м^2, объем – 38290 м^3. Водоем неглубокий, средняя глубина составляет 1.5 м. В южной части озера находится небольшая котловина с максимальной глубиной 2.3 м (Рис. 2). Берег в основном высокий и сухой, на северо-востоке топкий. С юго-восточной стороны берег покрыт кустарником. Ложе озера имеет блюдцеобразную форму с ровным рельефом дна. Около берега дно песчаное, в центре илистое (Титова и др., 2023). Прозрачность воды небольшая – менее 1 м. С северо-востока в озеро втекает ручей из Питьевого канала, с востока – ручеек, вытекающий из небольшого безымянного заросшего озерка, находящегося в поселке. С юго-запада из озера вытекает ручей, который через 250 м впадает в Белое море.

Результаты и обсуждение

Гидрологические условия

В летний период вода озера хорошо перемешивается за счет ветрового воздействия, ночного выхолаживания, колебания температуры воздуха, а также теплового излучения при малой облачности. В 2022 г. гомотермия водного слоя была обусловлена конвективным перемешиванием в предшествующие измерениям ночи, когда температура понижалась от 18–19 °С до 10–13 °С при малой облачности. За счет инсоляции может возникать временная незначительная стратификация вод, как это наблюдалось нами в 2023 г. Изменение удельной электропроводности по вертикали незначительное – от 63–66 до 71–74 мкСм/см.

В зимний период гидрологический режим озера обусловлен погодными условиями осени. Осень 2021 г. отличалась частыми сильными ветрами, что привело к интенсивному перемешиванию вод озера. Зимой 2022 г. наблюдалась самая низкая придонная температура (0.40 °С) и электропроводность (92 мкСм/см) воды озера (Рис. 3**А**, **В**). Осенью 2022 г. ветра перед становлением льда были менее интенсивны, осенью же 2023 г. произошло раннее становление льда, что привело к формированию большего теплозапаса и высокой минерализации воды озера зимой 2023 и 2024 гг.; придонные значения температуры и удельной электропроводности составили соответственно 2.40 и 3.15 °С, 344 и 375 мкСм/см. В слое от 1 м и до дна отмечался резкий рост электропроводности с вертикальными градиентами 257 и 297 мкСм/см/м. В такие годы с момента становления ледового покрова начинается прогрев вод озера от дна, приводящий к росту их плотности. Воды ручья, более холодные и менее плотные, распространяются в поверхностном подледном слое. Увеличению плотностной стратификации способствует активное разложение легкоокисляемых осадков, вызывающих рост минерализации придонных вод, что приводит к относительно быстрой их изоляции.

Реакция среды воды в озере в основном слабокислая, в период увеличения интенсивности фотосинтетических процессов она меняется на нейтральную (pH может достигать 7.4). Зимой наблюдается незначительное увеличение pH у дна по сравнению с летом вследствие высокого содержания ионов аммония, образовавшихся в ходе минерализации органических веществ при недостаточном количестве растворенного кислорода.

[3] РД 52.24.309-2016. Организация и проведение режимных наблюдений за состоянием и загрязнением поверхностных вод суши.

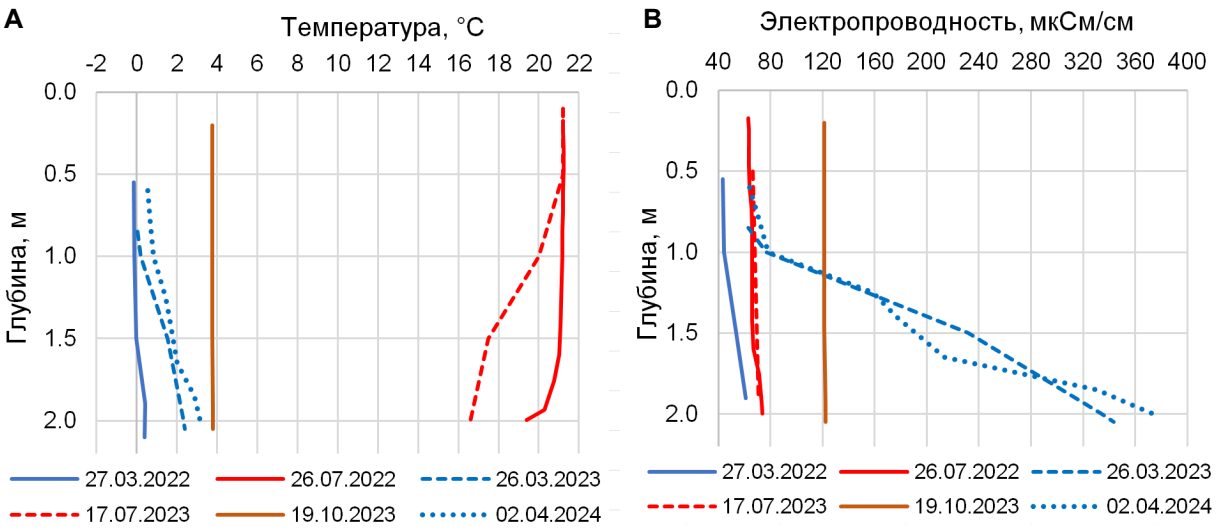

Рис. 3. Вертикальное распределение температуры (**A**) и электропроводности (**B**) в оз. Банное 2022–2024 гг.

Кислород

Одним из факторов, влияющих на гидрохимические и гидробиологические параметры, является содержание растворенного кислорода в воде. Для оз. Банное летом характерен благоприятный кислородный режим (Рис. 4**A**, **B**, **C**), однако в зимний период наблюдалось резкое уменьшение кислорода в придонном горизонте. Наименьшее содержание кислорода отмечалось на ст. 1 как в марте 2023 г., так и в марте 2024 г. (Рис. 4**A**, **B**)

В настоящее время заморы в подледном слое озера маловероятны в связи с впадением относительно мощного незамерзающего ручья, воды которого насыщены кислородом (до 13.6 мг/л, 95%). По одной из версий, данный ручей образовался при деградации Питьевого канала, что, как следствие, привело к бифуркации водного стока, когда часть его через прорыв дошла до мелиоративной системы около п. Соловецкий и соединилась с отводящим осушительным каналом, по которому течет к головному каналу и далее поступает в оз. Банное (Захаров, 2006). При размыве канала взвешенные наносы оседали в озере, что предположительно вызвало обмеление водоема.

Несмотря на небольшие размеры озера, вертикальное распределение кислорода между станциями может отличаться, что наблюдалось, например, в июле 2023 г. (Рис. 4**C**). Рост содержания кислорода у дна на ст. 2, возможно, связан с активными продукционными процессами, так как фотический слой достигает придонных горизонтов.

Согласно нормативам качества воды объектов рыбохозяйственного значения, содержание растворенного кислорода в зимний (подледный) период не должно опускаться ниже 6 мг/л для первой категории водного объекта рыбохозяйственого значения и 4 мг/л для второй категории[4]. Таким образом, микроаэрофильные условия в придонном слое данного водоема зимой ограничивают развитие аэрофильных гидробионтов.

Биогенные элементы

Распределение содержание минерального фосфора по вертикали в зимние периоды 2022–2024 гг. было различно (Рис. 5). В 2022 г. его количество уменьшалось по направлению ко дну, а в 2023 и 2024 гг. – увеличивалось вследствие более интенсивных процессов минерализации органических соединений фосфора. Распределение содержания валового фосфора по вертикали в зимние периоды 2022–2024 гг. было одинаково: происходило его увеличение с глубиной. Таким образом, в конце зимы 2022–2024 гг. на поверхности процессы минерализации протекали до конца, а в придонном слое в анаэробной зоне в 2022 г. шло большее накопление органических соединений по сравнению с 2023 и 2024 гг.

[4] Приказ Минсельхозоза России от 13.12.2016 № 552 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения».

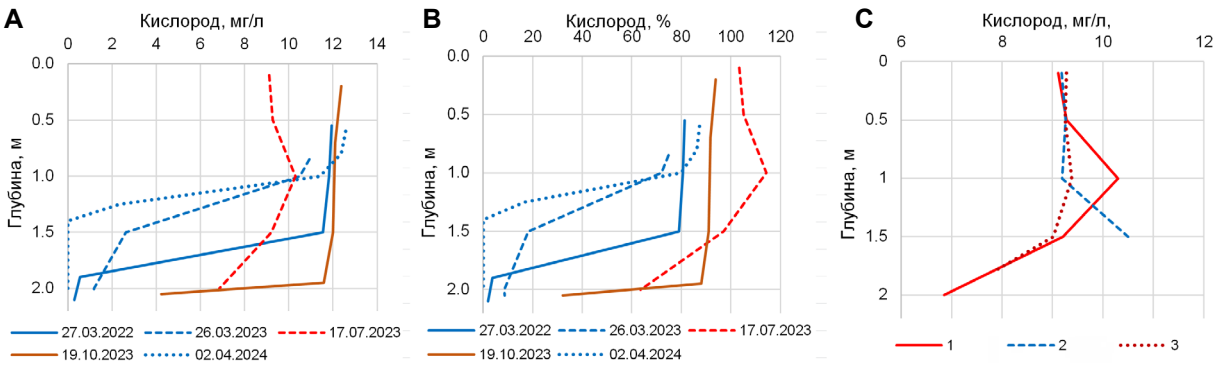

Рис. 4. Вертикальное распределение растворенного кислорода в оз. Банное в мг/л (**A**) и в % (**B**) в разные сезоны на станции 1; а также в июле 2023 г. на трех станциях в мг/л (**C**).

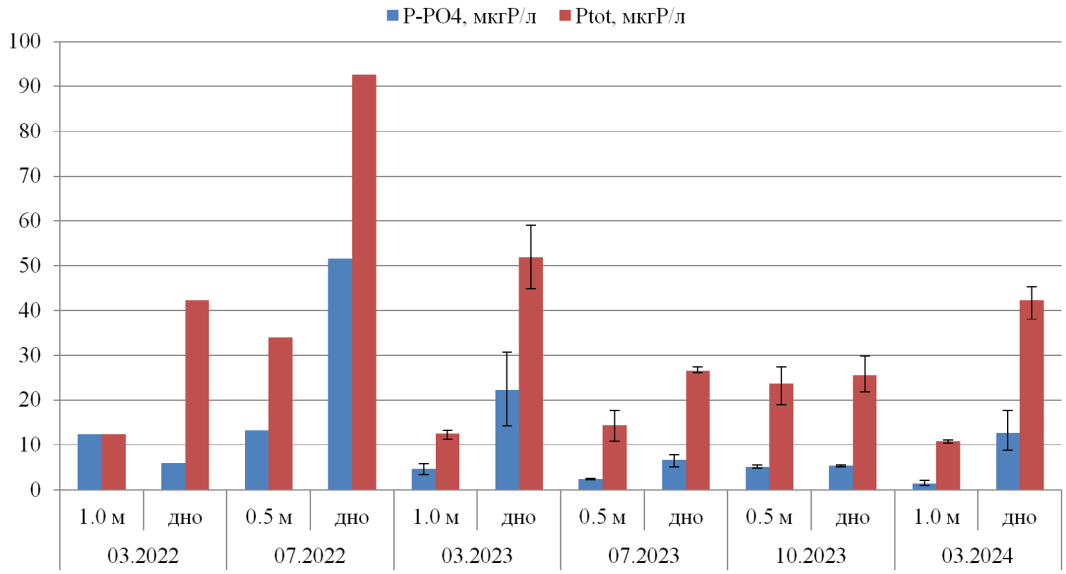

Рис. 5. Среднее содержание минерального ($P\text{-}PO_4^{3-}$) и общего (P_{tot}) фосфора в оз. Банное в 2022–2024 гг. Усы на гистограмме показывают минимальные и максимальные значения показателя.

Летом 2022 г. и 2023 г. содержание минерального и общего фосфора ко дну возрастало. В 2022 г. наблюдалось увеличение содержания минеральных форм фосфора к придонному слою более чем в 4 раза, а общего фосфора – в 2.7 раза. Высокие концентрации соединений фосфора в водоеме по вертикали, возможно, связаны с погодными условиями в данный период. За несколько дней перед отбором проб прошел сильный дождь (количество выпавших осадков – 17 мм (треть месячной нормы)), в результате обильные осадки привели к увеличению поступления соединений фосфора с поверхностными стоками[5]. Кроме того, возможно, было попадание в батометр вод из придонного слоя, содержащего органическое вещество планктонного детрита, богатого фосфором (Баранов, 2014). Летом 2023 г. при наличии незначительной стратификации таких высоких значений не наблюдалось: содержание минерального и валового фосфора было ниже, чем летом 2022 г.

В период осеннего перемешивания в 2023 г. наблюдалось равномерное распределение минерального и общего фосфора по глубине, при этом содержание минерального фосфора было в 4.5 раз ниже, чем общего.

[5] Архив погоды в Соловецком. Интернет-ресурс. URL: http://www.rp5.ru/Архив_погоды_в_Соловецком (дата обращения: 20.03.2024).

При оценке пространственной изменчивости содержания соединений фосфора, как неорганического, так и общего (Табл. 1) видно, что между станциями имеются различия, особенно заметные в осенний ($p < 0.05$) и зимний ($p < 0.1$) периоды. Более подробные сведения о статистически значимых различиях по содержанию биогенных элементов по станциям и сезонам приведены в Табл. 4.

В соответствии с ПДК для объектов рыбохозяйственного значения[6], содержание фосфат-ионов в пересчете на фосфор не должно превышать 0.2 мг/л. За исследуемый нами период не выявлено превышения ПДК по содержанию минерального фосфора. В то же время необходимо отметить, что как зимой (в связи с постоянным дефицитом кислорода на дне), так и летом идет формирование источников вторичного загрязнения фосфором, о чем свидетельствует трех-пятикратное различие между концентрациями минерального фосфора в поверхностных и придонных слоях. При этом в ручье, впадающем в Бухту Благополучия, зимой 2024 г. содержание минерального фосфора составляло 1.74 мкгР/л.

Азот, как один из важнейших биогенных элементов, в водных объектах содержится в трех основных растворенных формах: аммонийной, нитритной и нитратной. В распределении содержания минеральных соединений азота закономерностей в зависимости от сезона не наблюдалось (Рис. 6).

В 2022 г. в оз. Банное зимой и летом преобладал нитратный азот. Зимой 2023 г. на поверхности содержание нитратного и аммонийного азота было примерно одинаково. В придонном слое, где концентрация растворенного кислорода регистрировалась на уровне 1 мг/л, содержание аммонийного азота было в 4–7.5 раз выше, чем нитратного. Это указывает на поступление в придонный слой большого количества органических веществ, вследствие чего аммоний, образовавшийся в результате минерализации в условиях низкого содержания кислорода, не смог окислиться до нитратов. Как отмечалось выше, в придонном горизонте наблюдалась и самая высокая минерализация (удельная электропроводность составляла 340 мкСм/см), и достаточно высокое содержание фосфат-ионов. Зимой 2024 г. также наблюдалась тенденция преобладания в придонном слое аммонийного азота над нитратным.

В летний период 2023 г. содержание нитратного азота превышало концентрацию аммонийного в 1.2–1.5 раза, а в период осеннего перемешивания – в 2.9–3.8 раза. Это связано с достаточной концентрацией кислорода по вертикали, которая способствовала созданию условий для более полного окисления органических соединений азота, вследствие чего содержание ионов аммония стало меньше, а содержание нитрат-ионов больше.

Содержание нитритного азота было очень низким во все исследуемые сезоны и не превышало 6 мкгN/л.

Табл. 1. Пространственная изменчивость минерального и общего фосфора (мкгР/л) в оз. Банное в 2023 г. в поверхностном и придонном горизонтах.

Дата	Станция 1		Станция 2		Станция 3	
	Поверхность	Дно	Поверхность	Дно	Поверхность	Дно
			Минеральный фосфор			
Март 2023 г.	4.85	30.78	3.44	14.26	5.81	21.64
Июль 2023 г.	2.20	5.05	2.47	7.84	2.56	7.15
Октябрь 2023 г.	5.57	5.56	4.82	5.58	5.04	5.02
			Общий фосфор			
Март 2023 г.	13.24	44.95	11.31	51.45	13.37	59.10
Июль 2023 г.	14.76	26.29	17.63	27.44	10.84	26.16
Октябрь 2023 г.	24.62	25.13	18.91	21.86	27.49	29.87

[6] Приказ Минсельхозоза России от 13.12.2016 № 552 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения».

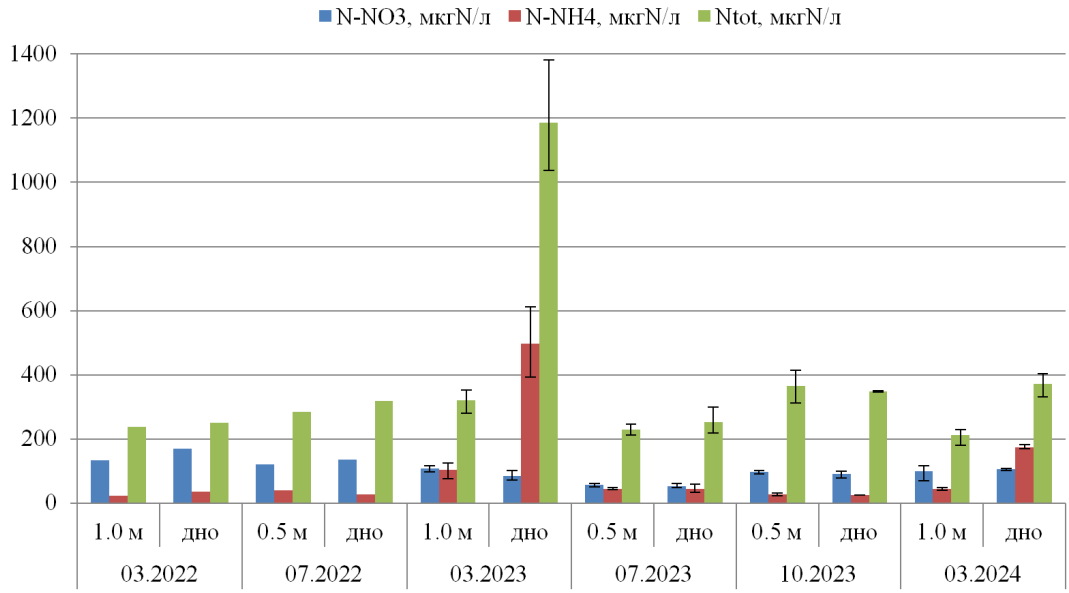

Рис. 6. Среднее содержание нитратного ($N\text{-}NO_3^-$), аммонийного ($N\text{-}NH_4^+$) и общего азота ($N_{общ}$) в оз. Банное в 2022–2024 г. Усы на гистограмме показывают минимальные и максимальные значения параметра.

Распределение содержания валового азота в зимние периоды с 2022 по 2024 гг. было примерно одинаковым. Наблюдалось его увеличение ко дну при дефиците кислорода. Зимой 2023 г. в придонном слое содержание валового азота достигало в среднем 1185 мкгN/л, что, возможно, связано с поступлением большого количества органических веществ. В зимние периоды 2022 г. и 2024 г. подобных концентраций в придонном слое не фиксировалось.

В летний период 2022 г., когда наблюдалась высокая концентрация соединений фосфора, содержание валового азота составляло 285.4 мкгN/л на поверхности и 318.8 мкгN/л в придонном слое. Летом 2023 г. при незначительной стратификации содержание валового азота было в 1.25 раза меньше, чем летом 2022 г. Такое снижение свидетельствует о наличии в его составе легкоутилизируемых органических веществ, которые после биохимической трансформации вовлекаются в биологический круговорот. В период осеннего перемешивания, когда происходит отмирание большей части биоты, начало подледной минерализации и накопление биогенных элементов, наблюдалось увеличение содержания валового азота примерно в 1.5 раза по сравнению с летом 2023 г.

При оценке пространственной изменчивости содержания соединений азота видно, что между станциями также имеются различия (Табл. 2) в осенний ($p < 0.05$) и зимний ($p < 0.1$) периоды (Табл. 4).

В соответствии с ПДК для объектов рыбохозяйственного значения[7], содержание нитрат-ионов не должно превышать 9.0 мг/л, нитрит-ионов – 0.02 мг/л, а ионов аммония – 0.4 мг/л (все данные в пересчете на азот). За исследуемый нами период выявлено превышение ПДК по содержанию аммонийного азота в придонном слое (Табл. 2). При этом в ручье, впадающем в Бухту Благополучия, зимой 2024 г. содержание аммонийного азота составляло 46.5 мкгN/л, а нитратного азота – 114.6 мкгN/л.

Ввиду наличия высоких концентраций минерального фосфора и превышения ПДК для объектов рыбохозяйственного значения по содержанию ионов аммония на глубине всего 1.5–2 метра (придонный слой), можно сделать вывод о возможном присутствии сброса загрязненной воды от жилых домов и коммунально-производственных объектов в озеро.

Содержание растворенных соединений кремния в оз. Банное зависит от гидрологического сезона (Рис. 7). В зимние периоды 2022–2024 гг. содержание кремния увеличивалось от поверхности ко дну, когда шло его накопление в связи с отмиранием большей части биоты. При этом зимой 2023 г. концентрация кремния была выше, чем зимой 2022 и 2024 гг., при наличии придон-

[7] Приказ Минсельхозоза России от 13.12.2016 № 552 Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения.

Табл. 2. Пространственная изменчивость соединений азота (мкгN/л) в оз. Банное в 2023 г.

Дата	Станция 1		Станция 2		Станция 3	
	Поверхность	Дно	Поверхность	Дно	Поверхность	Дно
			Аммонийный азот			
Март 2023 г.	125.1	612.0	76.	393.0	108.0	488.2
Июль 2023 г.	42.9	42.9	43.6	58.6	48.2	34.6
Октябрь 2023 г.	24.4	25.1	32.0	26.1	27.8	26.6
			Нитратный азот			
Март 2023 г.	116.5	81.1	97.0	103.0	112.7	71.9
Июль 2023 г.	62.4	60.7	51.7	48.8	57.2	48.8
Октябрь 2023 г.	96.8	94.4	91.6	79.5	103.0	99.2

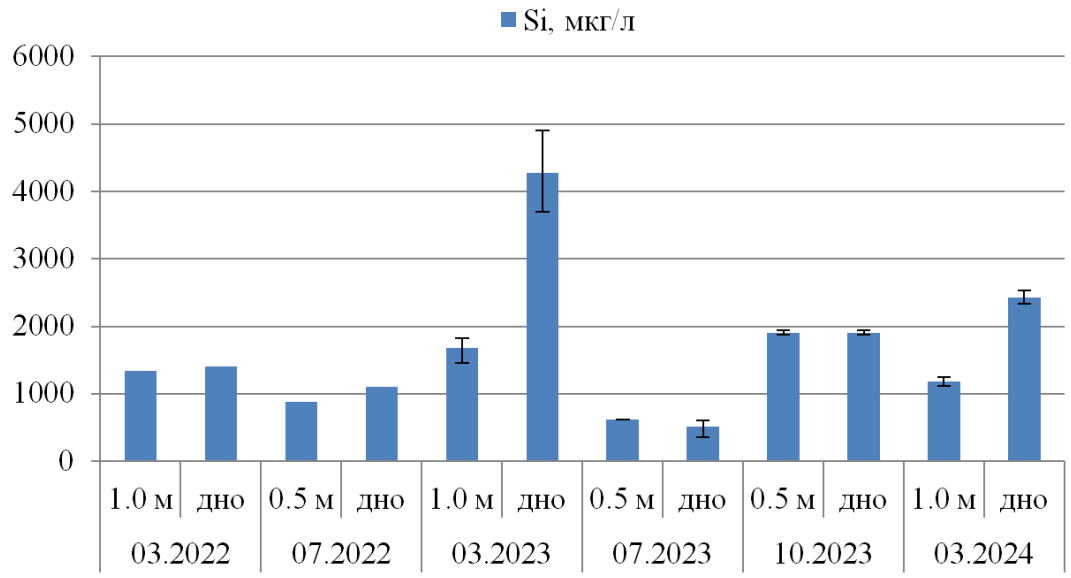

Рис. 7. Среднее содержание соединений кремния (Si) в оз. Банное в 2022–2024 г. Усы на гистограмме показывают минимальные и максимальные значения параметра.

ных слоев с низким содержанием кислорода во все три года исследования. Высокие величины данного показателя зимой 2023 г. говорят о более интенсивных процессах разложения органического вещества, так как температура воды в придонном слое в этот период была на 2 °С выше.

Летом кремний активно потребляется живыми организмами, поэтому его летняя концентрация ниже зимней. В период осеннего выхолаживания и перемешивания вод в 2023 г. содержание кремния составляло в среднем 1904 мкг/л.

Наглядно пространственная изменчивость содержания соединений кремния представлена в Табл. 3.

В летний период значимых различий по содержанию биогенных элементов между станциями нет, но отмечается статистически значимые отличия по ст.2 в осенний ($p < 0.05$) и зимний ($p < 0.1$) периоды (Табл. 4). Это может быть связано с формированием изолированных зон вследствие циркуляционных течений, вызванных высокой проточностью озера, либо с иными причинами, для выявления которых необходимы дополнительные исследования.

Табл. 3. Пространственная изменчивость кремния (мкг/л) в оз. Банное в 2023 г.

Дата	Станция 1		Станция 2		Станция 3	
	Поверхность	Дно	Поверхность	Дно	Поверхность	Дно
Март 2023 г.	1820	4910	1462	3695	1743	4199
Июль 2023 г.	620	607	622	358	618	565
Октябрь 2023 г.	1905	1903	1870	1874	1938	1938

Табл. 4. Результаты анализа выборок биогенных элементов по станциям и сезонам с помощью непараметрического критерия Вилкоксона для зависимых выборок, где N – длина выборки, T – статистика Вилкоксона, Z – значение критерия, p – уровень значимости критерия. Жирным шрифтом выделены значения $p < 0.1$.

Месяц	Станции сравнения	N	T	Z	p
март	1 и 2	10	10	1.78	**0.074**
	1 и 3	10	19	0.87	0.386
	2 и 3	10	9	1.89	**0.059**
июль	1 и 2	10	23	0.46	0.646
	1 и 3	10	20	0.76	0.445
	2 и 3	10	27	0.05	0.959
октябрь	1 и 2	10	8	1.99	**0.047**
	1 и 3	10	13	1.48	0.139
	2 и 3	10	8	1.99	**0.047**

Содержание РОУ и РНУ

Содержание РОУ и РНУ определялось только в марте и октябре 2023 г. на трех станциях. В зимний период (Рис. 8) наблюдалось увеличение концентраций РОУ и РНУ с глубиной на всех станциях. Содержание РОУ к придонному слою в среднем увеличивалось в 1.6 раза, а содержание РНУ – в 4.36 раза. В осенний период распределение РОУ и РНУ в толще воды на всех станциях было равномерным.

Таким образом, зимой и осенью наблюдалось в основном увеличение РНУ к придонному слою, что, в свою очередь, свидетельствует о преобладающих процессах минерализации растворенного и взвешенного органического вещества в эти сезоны. Максимальные концентрации РОУ и РНУ в зимний период наблюдались на ст. 1, а минимальные – на ст. 2.

Цветность воды в оз. Банное имело схожую с содержанием РОУ динамику (Рис. 8). Зимой наблюдалось увеличение цветности с глубиной на всех станциях, осенью – равномерное ее распределение. Зимой цветность в поверхностном горизонте составила в среднем 60.8°, в придонном горизонте – примерно увеличивалась в 1.8 раза. В осенний период цветность воды по глубине в среднем составляла 80.4°.

По данным оптических характеристик (Рис. 9**A, B, C**) вод оз. Банное рассмотрена структура растворенного органического вещества (РОВ). В период осеннего выхолаживания вод соотношения длин волн D_{254}/D_{436}, D_{254}/D_{365}, $SUVA_{254}$ (Helms et al., 2008; Ilina et al., 2014; Weishaar et al., 2003) свидетельствуют о поступлении лабильной (и потенциально биодоступной) фракции органического углерода, образующейся при отмирании планктона, при снижении роли аллохтонного орга-

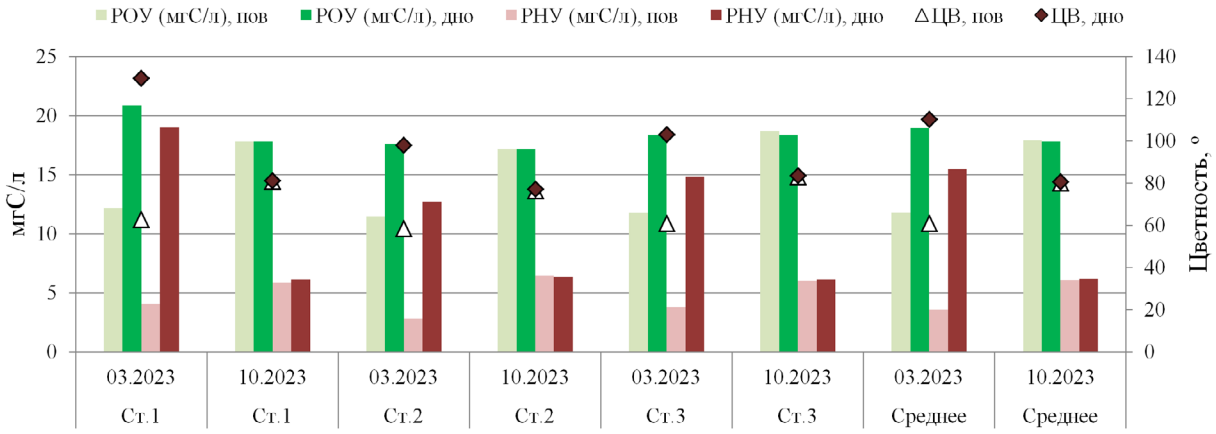

Рис. 8. Содержание РОУ, РНУ и цветность (ЦВ) в оз. Банное на станциях 1, 2, 3 в зимний и осенний периоды 2023 г. (пов. – поверхностный горизонт, дно – придонный горизонт).

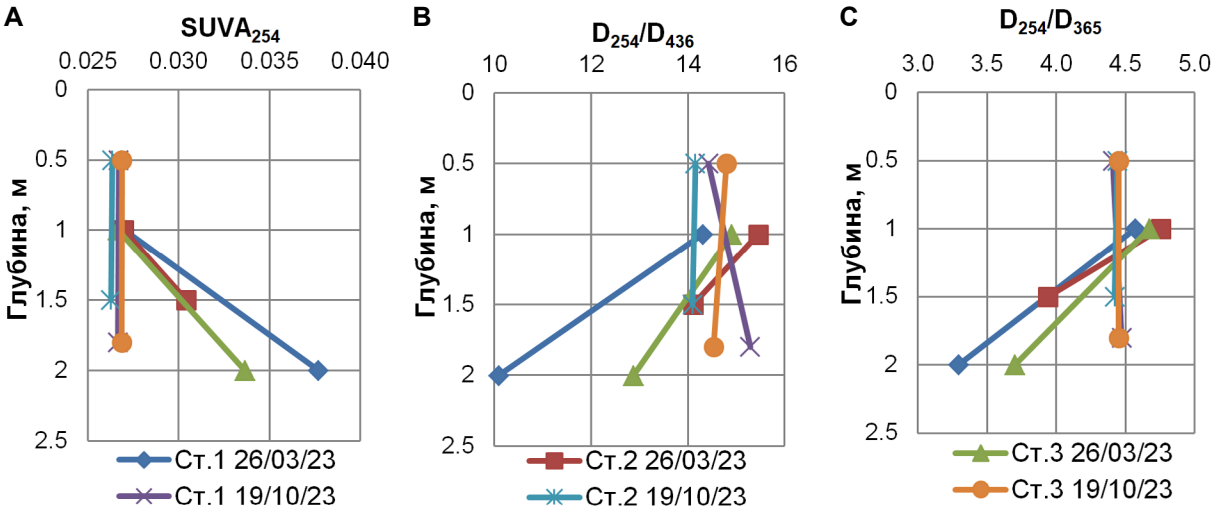

Рис. 9. Спектральные характеристики РОВ: соотношения длин волн $SUVA_{254}$ (**A**), D_{254}/D_{436} (**B**) и D_{254}/D_{365} (**C**).

нического вещества. В результате уменьшается роль конденсированных ароматических структур в составе РОВ и, как следствие, снижается количество высокомолекулярных гуминовых соединений. В период зимней стратификации в придонных горизонтах увеличивается доля аллохтонного органического вещества и идущих активно деструкционных процессов, где возрастает роль конденсированных ароматических структур в составе РОВ.

Бактериопланктон (БП)

В период зимней стратификации численность БП в поверхностном горизонте примерно в 10 раз была ниже по сравнению с придонными горизонтами (Табл. 5). При этом высокая численность БП на станциях 1 и 3 зимой 2023 г. в придонном слое указывает на активно идущие деструкционые процессы, что также подтверждается спектрами $SUVA_{254}$ (Рис. 9). Летом и осенью на станциях и горизонтах отбора БП был распределен равномерно. В июле численность БП в озере была практически равна во всех исследуемых точках. При этом в октябре в поверхностном горизонте озера значение показателя выше, чем в июле. Пробы воды по микробиологическим показателям в основном соответствовали «чистым» водам, но в марте в придонных горизонтах характеризовались как «загрязненные» (Абакумов, 1992).

Табл. 5. Общая численность бактериопланктона (млн мкл/мл) оз. Банное за 2023 г. (среднее значение со стандартным отклонением), прочерк – отсутствие данных.

Дата	Станция 1		Станция 2		Станция 3	
	Поверхность	Дно	Поверхность	Дно	Поверхность	Дно
Март 2023 г.	0.323 ± 0.010	5.552 ± 0.100	0.135 ± 0.003	2.297 ± 0.104	0.544 ± 0.000	4.890 ± 0.008
Июль 2023 г.	0.216 ± 0.001	0.279 ± 0.002	0.220 ± 0.001	0.239 ± 0.004	0.202 ± 0.000	0.192 ± 0.010
Октябрь 2023 г.	0.356 ± 0.001	–	0.368 ± 0.005	–	0.429 ± 0.007	–

Фитопланктон и зоопланктон

Исследуемые фитопланктонные сообщества в июле 2022 г. характеризовались низким таксономическим богатством планктона, структура и количественные показатели которого свидетельствовали о низкой устойчивости сообществ. Высокие значения численности и биомассы водорослей в оз. Банное свидетельствуют об эвтрофикации. Фитопланктон оз. Банное был бедным по видовому составу (в среднем 10 видов). Численность в среднем составила 12.3×10^{10} кл/м^3. Среднее значение биомассы – 80.4 г/м^3. Наибольшую долю в суммарной численности и биомассе имели представители зеленых водорослей. При анализе индикаторных видов и расчете индекса сапробности водам оз. Банное присвоен II класс качества, что характеризует их как «слабозагрязненные» (Novikova et al., 2023).

Зоопланктон оз. Банное в июле 2022 г. был представлен относительно малым числом видов (11) и характеризовался слабым количественным развитием. Основной фон зоопланктона как по качественному, так и количественному составу – кладоцерный с преобладанием в трофической структуре первичных фильтраторов, добывающих пищу в толще воды. Согласно рыбохозяйственной классификации (Пидгайко и др., 1968), уровень развития зоопланктона в оз. Банное позволяет отнести его к малокормным водным объектам. Воды озера в период проведения исследования соответствовали β-мезосапробному уровню (Novoselov et al., 2024b).

Зообентос

Исследования зообентоса оз. Банное проводились на трех точках в конце марта и в середине июля 2023 г., всего было собрано 6 проб. Также для анализа использовались результаты исследований А.П. Новоселова с соавторами (Novoselov et al., 2024a).

Всего в бентофауне озере было отмечено 4 таксона донных беспозвоночных, относящихся к 3 типам: Arthropoda, Annelida и Mollusca. (Табл. 6).

В июле 2022 г. (Novoselov et al., 2024a) наибольшее количество по численности составили олигохеты, по биомассе – водные личинки хирономид. В марте 2023 г. доминировали Chironomidae gen. sp., а в июле 2023 г. – Sphaeriidae gen. sp. Отметим, что Oligochaeta gen. sp. были обнаружены в пробах только зимой, а Ceratopogonidae gen. sp. – только летом.

В целом средние численность и биомасса донной фаузы оз. Банное в марте составляли 400.00 экз./м^2 и 8.50 г/м^2, в июле – 825.00 экз./м^2 и 6.40 г/м^2 соответственно. По уровню развития кормовой базы этот водоем может быть отнесен к категории от среднекормовых до высококормных для рыб-бентофагов (Китаев, 2007; Пидгайко и др, 1968). При анализе индекса Гуднайт–Уотлея (ОИ) летом 2022 г. на различных биотопах водоему присвоен I класс и VI класс качества вод, что в целом характеризует озеро как загрязненный водоем (Novoselov et al., 2024a). В марте 2023 г. индекс ОИ оз. Банное соответствовал III классу качества вод (загрязненный водоем). В июле 2023 г. индекс ОИ озера определить не удалось из-за отсутствия в пробах олигохет.

Табл. 6. Таксономический состав зообентоса и его количественные показатели в оз. Банное за март и июль 2023 г. Прочерк – отсутствие данных.

Таксономический состав	Март				Июль			
	Численность		Биомасса		Численность		Биомасса	
	экз./м²	%	г/м²	%	экз./м²	%	г/м²	%
Arthropoda								
Chironomidae gen. sp.	200.00	50.00	8.20	96.30	100.00	12.12	4.00	62.19
Ceratopogonidae gen. sp.	–	–	–	–	125.00	15.15	0.50	8.02
Annelida								
Oligochaeta gen. sp.	125.00	31.25	0.10	1.60	–	–	–	–
Mollusca								
Sphaeriidae gen. sp.	75.00	18.75	0.20	2.10	600.00	72.70	1.90	29.79
Итого	**400.00**	**100.00**	**8.50**	**100.00**	**825.00**	**100.00**	**6.40**	**100.00**
Олигохетный индекс Гуднайт–Уотлея	50.00				–			

Табл. 7. Соотношение общего азота и общего фосфора (N_{tot}/P_{tot}) в оз. Банное.

Дата	N_{tot}/P_{tot}	
	Поверхностный слой	Придонный слой
Июль 2022 г.	8.4	3.4
Июль 2023 г.	15.9	9.5
Октябрь 2023 г.	15.4	13.6

Определение трофического статуса озера по составу биогенных элементов

Содержание в воде биогенных веществ, таких как общий азот и общий фосфор, представляется очень эффективным показателем трофического состояния водоемов. Существенное значение имеет соотношение основных питательных элементов, используемых первичными продуцентами (Бикбулатов и Степанова, 2002; Богдановская, 2001; Redfild et al., 1963). Из Табл. 7, где представлены средние соотношения N_{tot}/P_{tot} для озера в летние и осенний сезоны, видно, что в поверхностном слое, в зависимости от года, лимитирующим элементов в развитии фитопланктонного сообщества может быть как фосфор, так и азот; в придонном же слое в качестве лимитирующего элемента выступает только азот.

По результатам проведенных исследований оз. Банное по содержанию биогенных элементов относятся к β-, α-мезотрофному типу, переходящему в эвтрофный (Китаев, 2007).

Заключение

Таким образом, по результатам исследований 2022–2024 гг. проведена оценка современного экологического состояния оз. Банное. В летний период воды озера перемешиваются до дна. Зимой с глубины 1 м может формироваться резкий хемоклин, вероятно, вызванный окислением органических осадков, приносимых ручьями. Летом и осенью 2022–2023 гг. для водоема характерен благоприятный кислородный режим. В подледный период наблюдалось уменьшение содержания кислорода до 0.5–1.0 мг/л в придонном слое. В период исследований реакция воды в основном была слабокислой, переходящей в нейтральную.

По микробиологическим показателям вода озера характеризовалась как «чистая», лишь в марте в придонных горизонтах она относилась к категории «загрязненных» вод. Уровень развития планктона, а также концентрация биогенных веществ в озере позволяют отнести водоем к β-, α-мезотрофному, переходящему в эвтрофный. Индекс Гуднайт-Уотлея характеризует оз. Банное как загрязненный водоем.

В озере выявлена высокая концентрация минерального фосфора, а также превышение ПДК для объектов рыбохозяйственного значения по содержанию ионов аммония в придонном слое. Таким образом, в озере, возможно, присутствует сброс загрязненной воды от жилых домов и коммунально-производственных объектов, однако сток с озера не оказывает ощутимого воздействия на воды Бухты Благополучия. Необходимо также отметить, что в озере отмечается обмеление в связи с оседанием наносов, приносимых ручьем.

Список литературы

Абакумов, В.А., 1992. Руководство по гидробиологическому мониторингу пресноводных экосистем. Гидрометеоиздат, Санкт-Петербург, Россия, 319 с.

Баранов, Е.Е., 2014. Трансформация соединений фосфора в водных системах на примере водоемов Волжского бассейна. *Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии* **23** (3), 160–166.

Бикбулатов, Э.С., Степанова, И.Э., 2002. Оценка трофности Рыбинского водохранилища с помощью потенциала регенерации биогенных элементов. *Водные ресурсы* **29** (6), 721–726.

Богдановская, В.В., 2001. Соотношение биогенных элементов в придонной и иловой воде прибрежных районов. *Океанология* **41** (1), 61–68.

Грицевская, Г.Л., Кябелева, Г.К., Николаева, Л.А., Семенов, В.Н., 1972. Гидрология и гидрохимия Соловецких озер. *Соловецкие острова: материалы по комплексному изучению озер (Труды СевНИОРХ. Т. 6)*. Издательство Карелия, Петрозаводск, Россия, 5–44.

Захаров, Ю.С., 2006. Озерно-канальные системы и гидротехнические сооружения Соловецких островов. В: Алексеева, Я.И., Боярский, П.В. (ред.), *Соловецкие острова. Духовное, культурное и природное наследие*. Российский НИИ природного и культурного наследия, Москва, Россия, 488–516.

Захваткин, А.А., 1927. Соловецкие озера: краткий гидробиологический очерк. Бюро печати УСЛОН, Соловки, Россия, 142с.

Китаев, С.П., 2007. Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. Карельский научный центр РАН, Петрозаводск, Россия, 395 с.

Пидгайко, М.Л., Александров, Б.М., Иоффе, Ц.И., Максимова, Л.П., Петров, В.В., Саватеева, Е.Б., Салазкин, А.А., 1968. Краткая биолого-продукционная характеристика водоемов Северо-Запада СССР. *Известия ГосНИОРХ* **67**, 205–225.

Сапожников, В.В., Агатова, А.И., Аржанова, Н.В., Мордасова, Н.В., Лапина, Н.М. и др., 2003. Руководство по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоемов и перспективных для промысла районов Мирового океана. ВНИРО, Москва, Россия, 202 с.

Теоретические вопросы классификации озер, 1993. Смирнов, Н.П. (ред.). Наука, Санкт-Петербург, Россия, 186 с.

Титова, К.В., Жибарева, Т.А., Слобода, А.А., Вахрамеева, Е.А., Кокрятская, Н.М., 2023. Геохимические исследования озер Большого Соловецкого острова. *Успехи современного естествознания* **9**, 63–70. https://doi.org/10.17513/use.38104

Цалолихин, С.Я, 2016. Определитель зоопланктона и зообентоса пресных вод Европейской России. Т. 2. Зообентос. Товарищество научных изданий КМК, Москва, Россия, 457 с.

Чертопруд, М.В., Чертопруд, Е.С., 2011. Краткий определитель беспозвоночных пресных вод центра Европейской России. Товарищество научных изданий КМК, Москва, Россия, 224 с.

Шварцман, Ю.Г., Болотов, И.Н., 2007. Природная среда Соловецкого архипелага в условиях меняющегося климата. Уральское отделение РАН, Екатеринбург, Россия, 184 с.

Bespalaya, Y.V., Aksenova, O.V., Bolotov, I.N., Aksenov, A.S., 2021. Freshwater mollusks in lakes of the Solovetsky Island (the White Sea). In: Pokrovsky, O.S. et al.,. (eds), *Lake water: Properties and uses (case studies of hydrochemistry and hydrobiology of lakes in northwest Russia)*. Nova Science Publishers, Inc., USA, 249–265.

Helms, J.R., Stubbins, A., Ritchie, J.D., Minor, E.C., Kieber, D.J., Mopper, K., 2008. Absorption spectral slopes and slope ratios as indicators of molecular weight, source, and photobleaching of chromophoric dissolved organic matter. *Limnology and Oceanography* **53** (3), 955–969. https://doi.org/10.4319/lo.2008.53.3.0955

Ilina, S.V., Drozdova, O.Y, Shirokova, L.S., Viers, J., Pokrovsky, O.S. et al., 2014. Size fractionation and optical properties of dissolved organic matter in the continuum soil solution-bog-river and terminal lake of a boreal watershed. *Organic Geochemistry* **66**, 14–24. https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2013.10.008

Novikova, Yu.V., Novoselov, A.P., Dvoryankin, G.A., Matveev, N.Yu., 2023. Phytoplankton in island and material lakes in the north of the Europian part of Russia according to summer development indicators. *Russian Journal of Ecology.* **54** (5), 454–457. https://doi.org/10.1134/s1067413623050077

Novoselov, A.P., Artemyev, S.N., Pryanichnikova, E.G., Dvoryankin, G.A., Matveev, N.Yu., Imant, E.N., 2024a. State of zoobenthic communities in lakes Bannoe (Solovetsky archipelago (Solovetsky Archipelago) and Kholmovskoe (Northern Dvina River basin). *Russian Journal of Ecology* **55** (4), 319–322. https://doi.org/10.1134/S1067413624601957

Novoselov, A.P., Imant, E.N., Dvoryankin, G.A., Matveev, N.Yu., 2024b. State of zooplankton communities in lakes Bannoe (Solovetsky Archipelago) and Kholmovskoe (Northern Dvina River basin). *Russian Journal* of *Ecology* **55** (2), 154–157. https://doi.org/10.1134/S1067413624020073

Redfild, A.C., Ketchum, B.H., Richards, F.A., 1963. The influence of organisms on the composition of sea water. *The Sea* **2** (2), 26–77.

Titova, K.V., Kokryatskaya, N.M., Popov, S.S., Moreva, O.Yu., Sloboda, A.A. et al., 2024 Hydrochemical characteristics of lakes of different types on the Bolshoi Solovetskii Island. *Water Resources* **51** (1), 61–71. https://doi.org/10.1134/S0097807823700641

Weishaar, J.L., Aiken, G.R., Bergamaschi, B.A., Fram, M.S., Fugii, R., Mopper, K., 2003. Evaluation of specific ultraviolet absorbance as an indicator of the chemical composition and reactivity of dissolved organic carbon. *Environmental Science and Technology* **37**, 4702–4708 https://doi.org/10.1021/es030360x

References

Abakumov, V.A., 1992. Rukovodstvo po gidrobiologicheskomu monitoringu presnovodnykh ekosistem [Guidelines for hydrobiological monitoring of freshwater ecosystems]. Hydrometeoizdat, Saint Petersburg, Russia, 319 p. (In Russian).

Baranov, E.E., 2014. Transformatsiia soedinenii fosfora v vodnykh sistemakh na primere vodoemov Volzhskogo basseina [Transformation of phosphorus compounds in aquatic systems on the example of reservoirs of the Volga basin]. *Samarskaia Luka: problemy regional'noi i global'noi ekologii [Samara Luka: Problems of Regional and Global Ecology]* **23** (3), 160–166. (In Russian).

Bespalaya, Y.V., Aksenova, O.V., Bolotov, I.N., Aksenov, A.S., 2021. Freshwater mollusks in lakes of the Solovetsky Island (the White Sea). In: Pokrovsky, O.S. et al.,. (eds), *Lake water: Properties and uses (case studies of hydrochemistry and hydrobiology of lakes in northwest Russia)*. Nova Science Publishers, Inc., USA, 249–265.

Bikbulatov, E.S., Stepanova, I.E., 2002. Otsenka trofnosti Rybinskogo vodokhranilishcha s pomoshch'iu potentsiala regeneratsii biogennykh elementov [Assessment of the trophicity of the Rybinsk reservoir using the potential of regeneration of biogenic elements]. *Vodnye resursy [Water Resources]* **29** (6), 721–726. (In Russian).

Bogdanovskaia, V.V., 2001. Sootnoshenie biogennykh elementov v pridonnoi i ilovoi vode pribrezhnykh raionov [The ratio of biogenic elements in the bottom and silt water of coastal areas]. *Okeanologiia [Oceanology]* **41** (1), 61–68. (In Russian).

Chertoprud, M.V., Chertoprud, E.S., 2011. Kratkii opredelitel' bespozvonochnykh presnykh vod tsentra Evropeiskoi Rossii [A brief key of invertebrate freshwater in the center of European Russia]. KMK Scientific Press Ltd, Moscow, Russia, 224 p. (In Russian).

Gritsevskaya, G.L., Kyabeleva, G.K., Nikolaeva, L.A., Semenov, V.N., 1972. Gidrologiia i gidrokhimiia Solovetskikh ozer [Hydrology and hydrochemistry of the Solovetsky Lakes]. *Solovetskie ostrova: materialy po kompleksnomu izucheniiu ozer (Trudy SevNIORKh. T. 6). [Solovetsky Islands: materials on the comprehensive study of lakes (Proceedings of Northern State Research Institute of Lake and River Fisheries. Vol.* 6). Karelia Publishing House, Petrozavodsk, Russia, 5–44. (In Russian).

Helms, J.R., Stubbins, A., Ritchie, J.D., Minor, E.C., Kieber, D.J., Mopper, K., 2008. Absorption spectral slopes and slope ratios as indicators of molecular weight, source, and photobleaching of chromophoric dissolved organic matter. *Limnology and Oceanography* **53** (3), 955–969. https://doi.org/10.4319/lo.2008.53.3.0955

Ilina, S.V., Drozdova, O.Y, Shirokova, L.S., Viers, J., Pokrovsky, O.S. et al., 2014. Size fractionation and optical properties of dissolved organic matter in the continuum soil solution-bog-river and terminal lake of a boreal watershed. *Organic Geochemistry* **66**, 14–24. https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2013.10.008

Kitaev, S.P., 2007. Osnovy limnologii dlia gidrobiologov i ikhtiologov [Fundamentals of limnology for hydrobiologists and ichthyologists]. Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Russia, 395 p. (In Russian).

Novikova, Yu.V., Novoselov, A.P., Dvoryankin, G.A., Matveev, N.Yu., 2023. Phytoplankton in island and material lakes in the north of the Europian part of Russia according to summer development indicators. *Russian Journal of Ecology.* **54** (5), 454–457. https://doi.org/10.1134/s1067413623050077

Novoselov, A.P., Artemyev, S.N., Pryanichnikova, E.G., Dvoryankin, G.A., Matveev, N.Yu., Imant, E.N., 2024a. State of zoobenthic communities in lakes Bannoe (Solovetsky archipelago (Solovetsky Archipelago) and Kholmovskoe (Northern Dvina River basin). *Russian Journal of Ecology* **55** (4), 319–322. https://doi.org/10.1134/S1067413624601957

Novoselov, A.P., Imant, E.N., Dvoryankin, G.A., Matveev, N.Yu., 2024b. State of zooplankton communities in lakes Bannoe (Solovetsky Archipelago) and Kholmovskoe (Northern Dvina River basin). *Russian Journal* of *Ecology* **55** (2), 154–157. https://doi.org/10.1134/S1067413624020073

Pidgaiko, M.L., Aleksandrov, B.M., Ioffe, Ts.I., Maksimova, L.P., Petrov, V.V., Savateeva, E.B., Salazkin, A.A., 1968. Kratkaia biologo-produktsionnaia kharakteristika vodoemov Severo-Zapada SSSR [Brief biological and production characteristics of reservoirs in the North-West of the USSR*]. Izvestiia GosNIORKh [News of State Research Institute of Lake and River Fisheries (GosNIORKh)]* **67**, 205–225. (In Russian).

Redfild, A.C., Ketchum, B.H., Richards, F.A., 1963. The influence of organisms on the composition of sea water. *The Sea* **2** (2), 26–77.

Shvartsman, Yu.G., Bolotov, I.N., 2007. Prirodnaia sreda Solovetskogo arkhipelaga v usloviiakh meniaiushchegosia klimata [Natural environment of the Solovetsky archipelago in a changing climate]. Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia, 184 p. (In Russian).

Sapozhnikov, V.V., Agatova, A.I., Arzhanova, N.V., Mordasova, N.V., Lapina, N.M. et al., 2003. Rukovodstvo po khimicheskomu analizu morskikh i presnykh vod pri ekologicheskom monitoringe rybokhoziaistvennykh vodoemov i perspektivnykh dlia promysla raionov Mirovogo okeana [Guidelines for the chemical analysis of marine and fresh waters in the environmental monitoring of fisheries reservoirs and areas of the World Ocean promising for fishing]. All-Russian Research Institute of Fisheries and Oceanography (VNIRO), Moscow, Russia, 202 p. (In Russian).

Teoreticheskie voprosy klassifikatsii ozer [Theoretical issues of lake classification], 1993. Smirnov, N.P. (ed.). Nauka, Saint Petersburg, Russia, 186 p. (In Russian).

Titova, K.V., Zhibareva, T.A., Sloboda, A.A., Vakhrameeva, E.A., Kokriatskaia, N.M., 2023. Geokhimicheskie issledovaniia ozer Bol'shogo Solovetskogo ostrova [Geochemical studies of the lakes of the Bolshoy Solovetsky Island]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniia [Achievements of Modern Natural Science]* **9**, 63–70. (In Russian). https://doi.org/10.17513/use.38104

Titova, K.V., Kokryatskaya, N.M., Popov, S.S., Moreva, O.Yu., Sloboda, A.A. et al., 2024 Hydrochemical characteristics of lakes of different types on the Bolshoi Solovetskii Island. *Water Resources* **51** (1), 61–71. https://doi.org/10.1134/S0097807823700641

Tsalolikhin, S.Ya., 2016. Opredelitel' zooplanktona i zoobentosa presnykh vod Evropeiskoi Rossii. T. 2. Zoobentos. [The key of zooplankton and zoobenthos of fresh waters of European Russia. Vol. 2. Zoobentos]. KMK scientific Press Ltd, Moscow, Russia, 457 p. (In Russian).

Weishaar, J.L., Aiken, G.R., Bergamaschi, B.A., Fram, M.S., Fugii, R., Mopper, K., 2003. Evaluation of specific ultraviolet absorbance as an indicator of the chemical composition and reactivity of dissolved organic carbon. *Environmental Science and Technology* **37**, 4702–4708 https://doi.org/10.1021/es030360x

Zakharov, Yu.S., 2006. Ozerno-kanal'nye sistemy i gidrotekhnicheskie sooruzheniia Solovetskikh ostrovov [Lake and canal systems and hydraulic structures of the Solovetsky Islands]. V: Alekseeva, Ya.I., Boyarskii, P.V. (eds.), *Solovetskie ostrova. Dukhovnoe, kul'turnoe i prirodnoe nasledie [Solovetsky Islands. Spiritual, cultural and natural heritage].* Russian Research Institute of Natural and Cultural Heritage, Moscow, Russia, 488–516. (In Russian).

Zakhvatkin, A.A., 1927. Solovetskie ozera: kratkii gidrobiologicheskii ocherk [Solovetsky Lakes: a brief hydrobiological essay]. Printing Bureau of the Administration of the Solovetsky Special Purpose Camps, Solovki, Russia, 142 p. (In Russian).