



DOI: <https://doi.org/10.23859/estr-240502>

EDN: <https://elibrary.ru/mtmkcb>

УДК 59.002;591.431.4;591.84

Научная статья

Исследование ультрапресного меромиктического водоема на Большом Соловецком острове

А.А. Чупакова*^{ID}, Т.Я. Воробьева^{ID}, С.И. Климов,
Н.С. Прилуцкая^{ID}, Е.И. Собко^{ID}, О.Ю. Морева^{ID},
С.Д. Прасолов^{ID}, Т.И. Ловдина^{ID}, К.В. Титова^{ID},
А.В. Чупаков^{ID}

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

**anna.a.ershova@gmail.com*

Аннотация. В статье приводятся результаты исследования озера Светленького, расположенного в центре острова Большой Соловецкий. Представлены гидролого-гидрохимические и гидробиологические характеристики водоема, доказывающие его меромиктический статус. Распределение по глубине значений удельной электропроводности, температуры, растворенного кислорода, pH, биогенных элементов (азот, фосфор, кремний), железа, основного ионного состава, растворенного органического углерода, метана, углекислого газа, общей численности микроорганизмов, пигментных характеристик фитопланктона отражают наличие слоев миксолимниона, монимолимниона и переходной зоны (хемоклина). Данная структура стабильна и зафиксирована во все основные гидрологические периоды, в том числе и осенний, когда в лимнических экосистемах происходит конвективное перемешивание вод. Особенностью озера является его низкая минерализация даже в горизонтах монимолимниона и, соответственно, ультрапресный статус. Высокое содержание двухвалентного железа в анаэробной зоне позволяет оценить озеро Светленькое как меромиктический водоем с ферругинозной аноксией.

Ключевые слова: меромиксия, ферругинозная аноксия, Соловецкие острова, гидрохимия, зоопланктон, общая численность микроорганизмов

Финансирование. Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 22-14-20045 «Оценка современного состояния пресноводных экосистем Соловецкого архипелага (фундаментальный и прикладной аспекты)».

Благодарности. Авторы выражают благодарность за всестороннюю помощь в экспедиционных исследованиях на Соловецких островах А.В. Максимова и сотруднику Соловецкого музея-заповедника А.Я. Мартынову, а также рецензентам за ценные замечания.

ORCID:

А.А. Чупакова, <https://orcid.org/0000-0001-8234-3514>
Т.Я. Воробьева, <https://orcid.org/0000-0002-3410-0240>
Н.С. Прилуцкая, <https://orcid.org/0009-0008-2985-8373>
Е.И. Собко, <https://orcid.org/0000-0003-3153-899X>
О.Ю. Морева, <https://orcid.org/0000-0002-5114-8481>
С.Д. Прасолов, <https://orcid.org/0009-0007-6826-9048>
Т.И. Ловдина, <https://orcid.org/0000-0003-2713-559X>
К.В. Титова, <https://orcid.org/0000-0001-7664-7706>
А.В. Чупаков, <https://orcid.org/0000-0001-6424-5582>

Для цитирования: Чупакова, А.А. и др., 2025. Исследование ультрапресного меромиктического водоема на Большом Соловецком острове. *Трансформация экосистем* 8 (3), 182–197. <https://doi.org/10.23859/estr-240502>

Поступила в редакцию: 02.05.2024

Принята к печати: 20.07.2024

Опубликована онлайн: 29.08.2025

DOI: <https://doi.org/10.23859/estr-240502>

EDN: <https://elibrary.ru/mtmkcb>

UDC 59.002;591.431.4;591.84

Article**Study of the ultra-fresh meromictic lake on Bolshoy Solovetsky Island**

А.А. Chupakova* , Т.Я. Vorobyeva , S.I. Klimov,
N.S. Prilutskaya , E.I. Sobko , O.Yu. Moreva ,
S.D. Prasolov , T.I. Lovdina , K.V. Titova ,
A.V. Chupakov 

N.P. Laverov Federal Research Center for Comprehensive Study of the Arctic, the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Nikolsky prospect 20, Arkhangelsk, 163020 Russia

*anna.a.ershova@gmail.com

Abstract. The article deals with the study results of Lake Svetlenkoye located in the heart of Bolshoy Solovetsky Island. Hydrological, hydrochemical and hydrobiological characteristics of the reservoir, proving its meromictic status, are presented. A bathymetric distribution of specific electrical conductivity, temperature, dissolved oxygen, pH, biogenic elements (nitrogen, phosphorus, silicon), iron, basic ionic composition, dissolved organic carbon, methane, carbon dioxide, total number of microorganisms, pigment characteristics of phytoplankton reflects the occurrence of mixolimnion and monimolimnion layers, as well as a transition zone (chemocline). Such a stable structure is recorded in all major

hydrological periods, including autumn when convective mixing of waters in limnic ecosystems takes place. The lake is distinguished by low mineralization even in the monimolimnion horizons and, accordingly, by its ultra-fresh status. The high content of ferrous iron in the anaerobic zone indicate that Lake Svetlenkoye is a meromictic water body with a ferruginous anoxia.

Keywords: meromixis, ferruginous anoxia, Solovetsky Islands, hydrochemistry, zooplankton, total number of microorganisms

Funding. The work was supported by the grant of the Russian Science Foundation (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 and A.Ya. Martynov, an employee of the Solovetsky Museum-Reserve, for their all-important assistance in the expeditionary research on Solovetsky Islands. They also thank the reviewers for valuable comments.

ORCID:

A.A. Chupakova, <https://orcid.org/0000-0001-8234-3514>

T.Ya. Vorobyova, <https://orcid.org/0000-0002-3410-0240>

N.S. Prilutskaya, <https://orcid.org/0009-0008-2985-8373>

E.I. Sobko, <https://orcid.org/0000-0003-3153-899X>

O.Yu. Moreva, <https://orcid.org/0000-0002-5114-8481>

S.D. Prasolov, <https://orcid.org/0009-0007-6826-9048>

T.I. Lovdina, <https://orcid.org/0000-0003-2713-559X>

K.V. Titova, <https://orcid.org/0000-0001-7664-7706>

A.V. Chupakov, <https://orcid.org/0000-0001-6424-5582>

To cite this article: Chupakova, A.A. et al., 2025. Study of the ultra-fresh meromictic lake on Bolshoy Solovetsky Island. *Ecosystem Transformation* 8 (3), 182–197. <https://doi.org/10.23859/estr-240502>

Received: 02.05.2024

Accepted: 20.07.2024

Published online: 29.08.2025

Введение

Меромиктические озера – особенные объекты, отличительной чертой которых является отсутствие полного перемешивания. В структуре водоема по глубине выделяют следующие слои (Ecology of meromictic lakes, 2017; Lampert and Sommer, 2007):

- 1) миксолимнион – аэробная зона, в которой происходит циркуляция воды;
- 2) монимолимнион – анаэробная зона, не перемешивающийся слой, который не имеет контакта с атмосферой, здесь идут процессы разложения органического вещества;
- 3) хемоклин – переходная зона, где происходит скачок гидролого-гидрохимических показателей на границе обоих слоев и формируется сложное микробное сообщество.

В сравнительно небольшом слое воды хемоклина активно протекают различные биогеохимические процессы. Наличие в водной толще резких градиентов окислительно-восстановительных условий и химического состава, отсутствие контакта нижних слоев воды с атмосферой и т.д. делают их уникальными объектами исследования для гидрохимии, микробиологии, палеоолимологии и других наук (Stewart et al., 2009).

К. Валкер и Г. Ликенс (Walker and Likens, 1975) выделили два класса меромиксии:

- класс А – экзогенная, обусловленная внешними факторами по отношению к бассейну озера;
- класс В – эндогенная, прежде всего связанная с внутренними факторами.

Внутри класса А авторы описали три типа меромиксии:

I – слоистая структура водоема возникает при попадании соленой воды в пресноводное озеро либо, наоборот, пресной воды – в соленое озеро (Ia – континентальные озера, Ib – прибрежные озера);

II – различия в плотности воды возникают из-за поверхностного притока вод с высоким содержанием взвешенных веществ (например, после расчистки лесного водосбора);

III – расслоение водной массы по плотности обусловлено подземным притоком пресной или соленой воды.

К классу В авторы отнесли два типа:

IV – меромиксия обусловлена морфометрическими особенностями формы котловины озера и окружающим рельефом (как правило, это небольшие глубокие водоемы);

V – плотностная стратификация вызвана накоплением в придонном слое солей, выпадающих в результате вымораживания при ледоставе.

Пресные меромиктические озера привлекательны для исследователей с климатической точки зрения, так как очень чувствительны к изменениям окружающей среды. В низкоминерализованных водах градиент плотности между водой в миксолимнионе и монимолимнионе незначителен, что делает структуру озера менее устойчивой и более уязвимой к внешнему воздействию. Межгодовые изменения глубины хемоклина в озерах могут служить интегральной характеристикой действия осеннего температурного и ветрового режима и выступать маркером изменения климата. В озерах малых размеров на механизме перемешивания вод могут сказываться локальные факторы, которые в более крупных водоемах маскируются влиянием других обстоятельств.

Экосистемы меромиктических озер уникальны для понимания как современных, так и древних водных экосистем. Они должны быть взяты под охрану как объекты с особыми гидрологическими, гидрохимическими и гидробиологическими условиями.

Меромиктические озера – редкий тип водоемов. Большинство их обнаружено в Северной Америке и Европе, так как эти два региона наиболее изучены в данном аспекте (Ecology of meromictic lakes, 2017). В работах Е.Д. Красновой (2021a, b), посвященных экологии меромиктических озер в России, были собраны доступные в научной литературе данные о российских меромиктических водоемах. В пределах границ России на 2020 г. выявлено 54 меромиктических водных объекта: 31 прибрежный водоем морского происхождения, 12 карстовых озер, 5 ледниковых, 4 бессточных соленых меромиктических водоема, искусственный пруд и Черное море – самый большой меромиктический водоем в мире. Однако действительное их количество неизвестно в силу малой изученности большинства озер.

Большой Соловецкий остров расположен в Онежском заливе Белого моря. На территории Соловецкого архипелага насчитывается около 370 озер (Шварцман и Болотов, 2007), преимущественно это малые озера, причем 90% из них расположены на Большом Соловецком острове, озерность которого достигает 11.63%. Данный показатель достаточно высок для Северо-Запада России (Измайлова, 2018).

Под воздействием климатических и антропогенных факторов в природных комплексах Севера, в том числе и на Соловецком архипелаге, происходят существенные трансформации. Одним из самых важных и уязвимых природных компонентов Соловецкого архипелага являются его пресноводные экосистемы, во многом определяющие неповторимость природы островов, а также саму возможность проживания и осуществления хозяйственной деятельности.

Ранее на Соловецком архипелаге было описано одно меромиктическое озеро экзогенного типа (Класс А, тип Ib) (Краснова, 2021a). В работе С.И. Климова и Т.Я. Воробьевой (2025) по расчетным характеристикам выявлено 19 вероятно меромиктических озер, в том числе оз. Светленькое. В силу удаленности от пос. Соловецкий и труднодоступности данный водоем не подвержен прямому антропогенному воздействию, что позволяет рассматривать его как естественную лабораторию для изучения сложных гидрохимических и гидробиологических взаимосвязей в уникальных условиях хемоклина и монимолимниона.

Целью данной работы является доказательство меромиктического статуса оз. Светленькое на Большом Соловецком острове и его первичная гидролого-гидрохимическая и гидробиологическая характеристика.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования является озеро Светленькое (N 65.0915° E 35.6795°), расположенное на Большом Соловецком острове (Рис. 1).

Измерения параметров водоема проводились в летний, зимний и осенний периоды 2022–2024 гг. Основные гидрологические характеристики озера представлены в Табл. 1.

Согласно классификации П.В. Иванова (Смирнов, 1993), по площади зеркала оз. Светленькое относится к озерам и является глубоководным слабо открытым водоемом с высокой прозрачностью (Китаев, 2007), достигающей по диску Секки 6 м в летний период. На Рис. 2 представлена батиметрическая карта озера Светленькое.

Морфометрические характеристики озерной котловины были установлены по результатам батиметрической съемки с использованием эхолота-картплоттера. Вертикальные профили распределения температуры, удельной электропроводности, водородного показателя (pH), окислительно-восстановительного потенциала (ОВП), растворенного кислорода измеряли с помощью многопараметрического анализатора качества воды U-52G (Horiba, Япония). Некоторые температурные профили были получены вместе с данными о содержании кислорода с применением зонда-оксиметра WTW Oxi 330i (Германия) с датчиком DurOx 325 (Германия).

Отбор проб воды для гидрохимических и микробиологических анализов осуществляли с дискретных горизонтов от поверхности ко дну в самой глубокой точке озера с использованием предварительно очищенного поликарбонатного горизонтального батометра (Aquatic Research Co, ID, USA). Пробы воды для определения концентрации сероводорода в момент отбора консервировали ацетатом цинка, далее осуществляли фотометрическое определение с N,N-диметил-парафенилендиамин¹. Для определения концентрации метана (CH₄) и углекислого газа (CO₂) пробы отбирали в флаконы объемом 60 мл по методике, описанной С.А. Забелиной и др. (Zabelina et al., 2021). Для фиксации проб во флаконы немедленно добавляли 0.2 мл насыщенного раствора HgCl₂. Концентрацию CH₄ и CO₂ определяли на газовом хроматографе "Хроматэк–Кристалл 5000" (Россия) с пламенно-ионизационным детектором и метанатором для определения CO₂. Концентрацию в жидкой фазе рассчитывали с использованием удельной растворимости (Weiss, 1974; Yamamoto et al., 1976).

Содержание растворенного органического углерода (POУ) определяли на анализаторе общего органического углерода Shimadzu (Япония) серии TOC-Lcsn по методу каталитического окисления при 680 °С, предварительно при отборе пробы воды пропускали через фильтр 0.22 мкм. Ионный состав (концентрации сульфат-ионов (SO₄²⁻), хлорид-ионов (Cl⁻), катионов натрия (Na⁺), калия (K⁺), магния (Mg²⁺), кальция (Ca²⁺)) определяли методом ВЭЖХ на хроматографе Shimadzu LC-20 Prominence (Япония) с кондуктометрическим детектором². Содержание гидрокарбонат-ионов (HCO₃⁻) определяли двухточечным потенциометрическим титрованием (Лозовик и др., 2017). При отборе проб воды для определения растворенного железа (Fe²⁺ и Fe_{общ}) минимизировали их контакт с кислородом воздуха. Далее пробы консервировали концентрированной соляной кислотой. Содержание Fe²⁺ и Fe_{общ} в воде анализировали фотометрическим методом с использованием феррозина в модификации с аскорбиновой кислотой (Кононец и др., 2002; Титова и Кокрятская, 2013). Концентрацию основных биогенных элементов (азот, фосфор, кремний) определяли стандартными фотометрическими методами (Лозовик и др., 2017).

Определение пигментных характеристик фитопланктона проводили по ГОСТ 17.1.04.02-90³.

Для подсчета общего числа микроорганизмов пробы 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 детектированием флуоресценции в синей области спектра (датчик Blu-V (450/45)).

Таксономическое разнообразие микроорганизмов определяли с помощью молекулярно-генетических методов. Отбор проб воды для изучения микробных сообществ производили в сте-

¹ РД 52.24.450-2010. Массовая концентрация сероводорода и сульфидов в водах. Методика выполнения измерений фотометрическим методом с N,N-диметил-п-фенилендиамин.

² ПНД Ф 14.1:2.4.132-98. Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений массовой концентрации анионов: нитрита, нитрата, хлорида, фторида, сульфата и фосфата в пробах природной, питьевой и сточной воды методом ионной хроматографии.

³ ГОСТ 17.1.04.02-90. Вода. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла а.

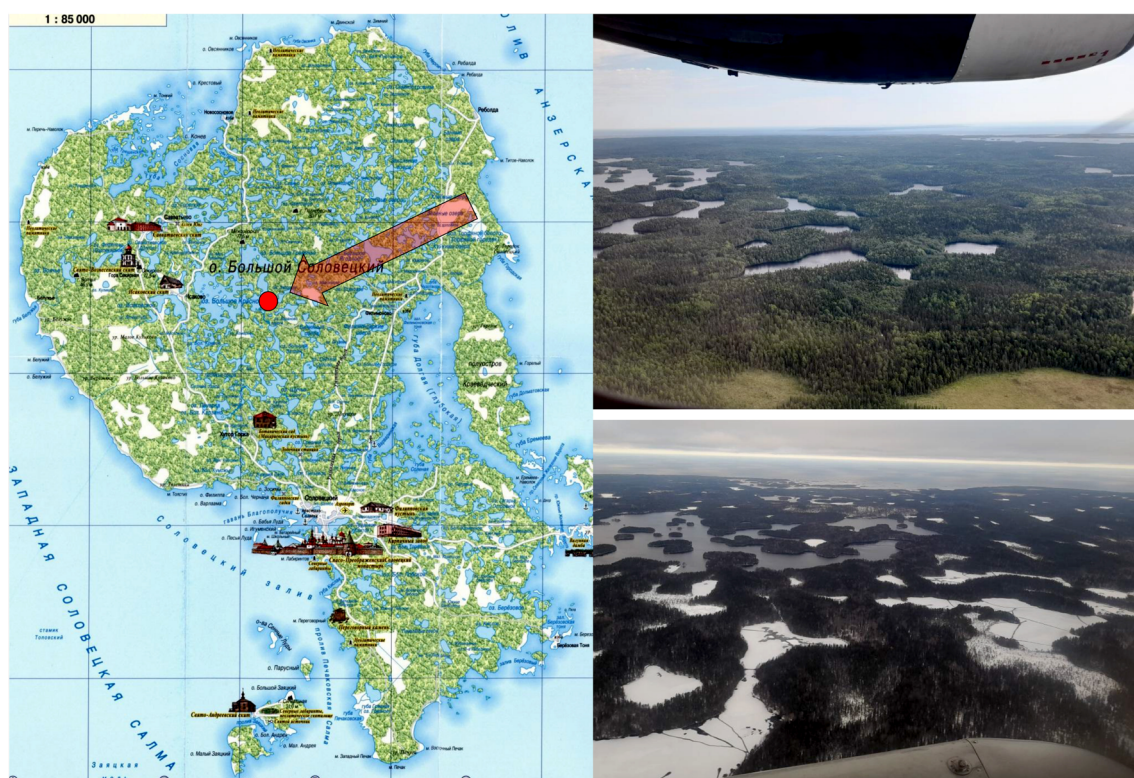


Рис. 1. Карта-схема Большого Соловецкого острова и фотографии острова для оценки озерности. Красной точкой обозначено расположение озера Светленькое.

Табл. 1. Основные гидрологические характеристики оз. Светленькое.

Характеристика	Оз. Светленькое
Площадь зеркала, км ²	0.01643
Объем, км ³	0.0001667
Длина, м	210
Ширина максимальная, м	120
Глубина максимальная, м	22.0
Глубина средняя, м	10.1
Показатель относительной глубины, α	40.9
Z (относительная глубина), %	15.8
Площадь водосбора, км ²	0.07073
Показатель условного водообмена, год ⁻¹	0.11
Время водообмена, лет	8.5

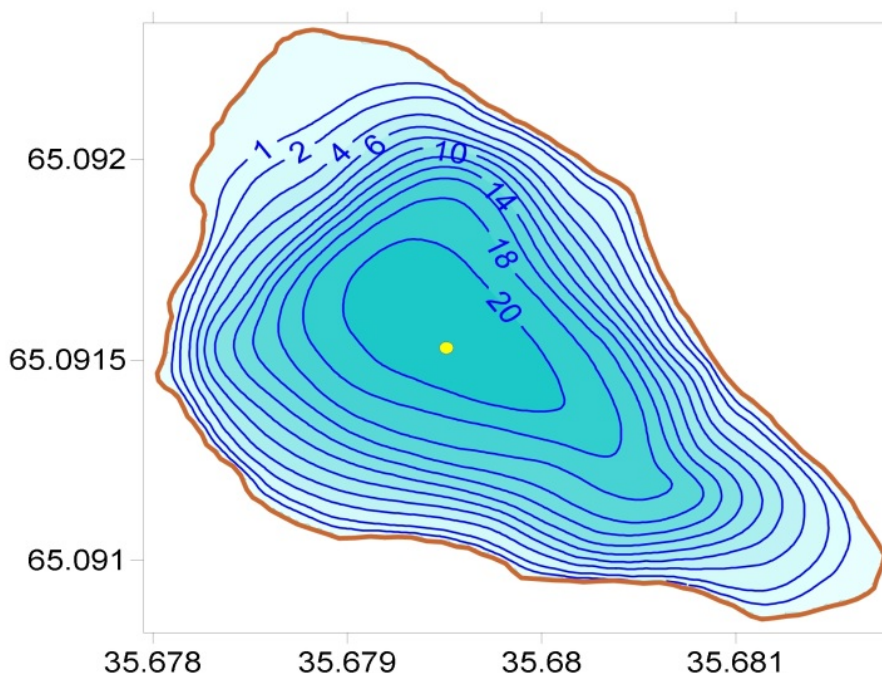


Рис. 2. Батиметрическая карта оз. Светленькое.

рильные емкости и транспортировали в лабораторию, где концентрировали микробные клетки на мембранных фильтрах с диаметром пор 0.22 мкм (GSWP, Millipore) с помощью предварительно стерилизованных поликарбонатных фильтрационных установок Sartorius. Тотальную ДНК воды озер выделяли в ЦКП «Геномные технологии и клеточная биология» ФГБНУ ВНИИСХМ РАСХН (г. Пушкин) с использованием модифицированного СТАВ метода (Rahimah et al., 2006). Разрушение микроорганизмов осуществляли с помощью шарикового гомогенизатора Precellys 24 (Bertin Technologies, Франция) со скоростью 6000 встряхиваний в минуту два раза по 30 сек. ПЦР проводили с универсальными праймерами для бактерий и архей F515/R806 на вариабельный участок гена 16SpPHK-v4 (GTGCCAGCMGCCGCGGTAA / GGACTACVSGGGTATCTAAT) (Bates et al., 2010). ПЦР продукты очищали по рекомендованной Illumina методике с использованием AMPureXP (Beckman Coulter, США). Подготовку библиотек для прибора Illumina MiSeq (Illumina, США) проводили с использованием набора реактивов MiSeq ReagentKit v3 (600 cycle) с двусторонним чтением (2 × 300 н). Обработку полученных данных проводили аналогично (Мельничук и др., 2019).

Отбор проб на определение качественного и количественного состава зоопланктона производили планктонной сетью Джеди с отсекаателем (диаметр входного отверстия 18 см, размер ячеек 74 мкм) в миксолимнионе (0–2.5 м, 2.5–5 м, 5–14 м), хемоклине (14–16 м) и монимолимнионе (16–20 м). Дополнительно протягивали слой от дна до поверхности. Пробы фиксировали 4% раствором формальдегида. Обработку проб проводили с помощью микроскопов МБС-10 (Россия) и Альтами ЛЮМ 1 (Россия). Для определения видовой принадлежности зоопланктона использовали определитель В. Р. Алексеева (2010). Сырую биомассу зоопланктона рассчитывали по уравнению связи длины тела и сырой массы (Балушкина и Винберг, 1979; Ruttner-Kolisko, 1977).

Результаты и обсуждение

Гидролого-гидрохимическая характеристика

В летний и зимний периоды в структуре миксолимниона оз. Светленькое наблюдалась соответственно прямая и обратная температурная стратификация с выделением характерных слоев – эпилимниона и металимниона. В летний период эпилимнион развивался до глубин от 2.5 до 3.0 м, металимнион – до 7 м (Рис. 3). В 2022 и 2023 гг. максимальные вертикальные градиенты температуры составляли 10.5 °C/м в слое 3.0–3.5 м и 7.2 °C/м в слое 3.5–4.0 м соответственно. Ниже до хемоклина в летне-осенний период наблюдалось плавное уменьшение температуры

воды. В зимний период формировался подледный термоклин до глубин 3.0–3.5 м, на которых температура воды составляла 3.4–4.2 °С, далее отмечался плавный рост температуры ко дну. Ниже глубины 12 м амплитуда изменений температуры воды за период наблюдений не превышала 0.5 °С, придонные значения температуры варьировали от 4.0 до 4.4 °С.

Удельная электропроводность за время наблюдения изменялась в поверхностном слое от 42 до 49 мкСм/см и от 46 до 50 мкСм/см над хемоклином, в мониомолимнионе в слое от 18 до 20 м – от 73 до 96 мкСм/см (Рис. 3). Характеристики хемоклина представлены в Табл. 2.

В водоеме установлено наличие постоянной анаэробной зоны ниже глубины 15–16 м в зависимости от сезона (Рис. 3).

Вертикальный профиль водородного показателя в толще воды имеет следующую структуру: миксолимнион – от 5.6 до 7.8, хемоклин – небольшое уменьшение рН с последующим увеличением до дна (Рис. 3).

Измерения окислительно-восстановительного потенциала, проведенные в марте и октябре 2023 г., показали, что его значения были положительными от поверхности до глубины 17 м и отрицательными в более глубоких слоях, достигая значений –100 мВ в придонном горизонте. Резкое снижение ОВП наблюдалось, начиная с 15 м зоны хемоклина.

Таким образом, полученные данные свидетельствуют о структуре, характерной для меромиктического водоема: выделяются зоны миксолимниона, мониомолимниона и хемоклина, а также отмечается изменение рН в зоне хемоклина (вероятно, связанное с деятельностью микробного сообщества).

Как в миксолимнионе, так и в мониомолимнионе оз. Светленькое вода относится к ультрапресным, очень мягким водам (минерализация < 100 мг/л, жесткость < 1.5 ммоль/л). В миксолимнионе преобладают хлорид- и натрий-ионы, что связано с влиянием морских аэрозолей. Таким образом, воды миксолимниона можно отнести к хлоридному классу натриевого типа. В воде, отобранной из мониомолимниона озера, среди макрокомпонентов преобладают гидрокарбонат-ион и катион натрия. Концентрации ионов магния, натрия, калия и хлорида существенно не меняются с глубиной, а содержание сульфат-ионов уменьшается. Резкое снижение концентрации сульфат-ионов при незначительном изменении содержания хлорид-ионов указывает на протекание процесса сульфатредукции и генерации сероводорода (Рис. 4).

Гидрохимический состав исследованных слоев озера по формуле Курлова (Лозовик, 2017) представлен следующим образом:

$$\text{миксолимнион: } M\ 23.86\ Ж\ 0.1\ \frac{Cl\ 64\ SO_4\ 24\ HCO_3\ 12}{Na\ 66\ Mg\ 22\ Ca\ 12}\ pH\ 6.35,$$

$$\text{мониомолимнион: } M\ 44.45\ Ж\ 0.2\ \frac{HCO_3\ 57\ Cl\ 41}{Na\ 35\ Ca\ 13\ Mg\ 13}\ pH\ 6.40,$$

где М – минерализация, мг/л, Ж – жесткость, ммоль/л.

Меромиктическая структура озера проявляется также в распределении биогенных элементов (соединений азота, фосфора и кремния). Наблюдается их накопление в придонных горизонтах, обусловленное, с одной стороны, анаэробной деструкцией седиментационного материала, а с другой – потоком данных элементов из донных отложений (Рис. 5).

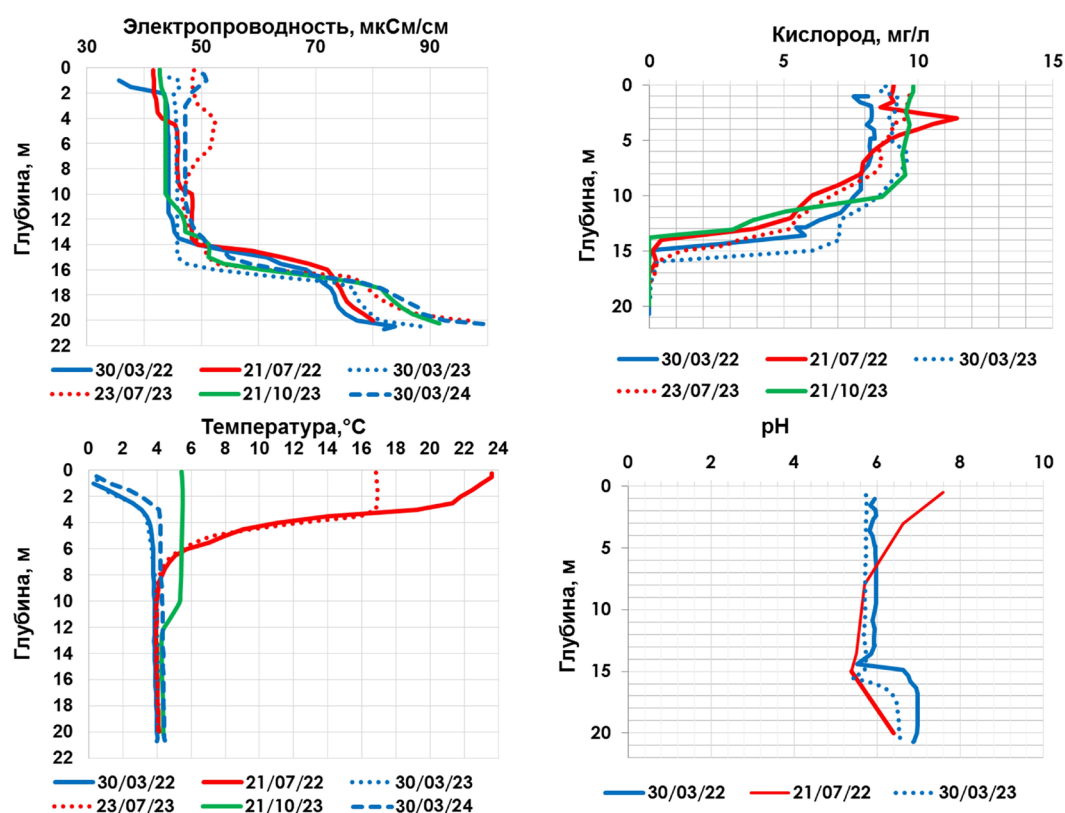
В бескислородной зоне озера наблюдается постоянно высокая концентрация общего растворенного железа. Большая его часть в анаэробной зоне озера представлена двухвалентной формой железа (до 98%) (Рис. 6). Отмечено преобладание концентрации железа над концентрацией сероводорода и биогенных элементов в зоне мониомолимниона.

Меромиктическая структура прослеживается и в распределении показателей цикла углерода. В мониомолимнионе происходит анаэробная минерализация органического вещества и, возможно, метаногенез.

Вертикальное распределение РОУ имеет тенденцию к увеличению концентрации от поверхности к придонным горизонтам со скачкообразным возрастанием значений в зоне хемоклина. Концентрация CH_4 в миксолимнионе озера снижается от поверхности к хемоклину (от 7.41 мкл/л до 1.36 мкл/л), а в мониомолимнионе, наоборот, с глубиной растет. Концентрация CO_2 в воде растет с глубиной от поверхности до дна (Рис. 7).

Табл. 2. Положение хемоклина и слоя с максимальными значениями вертикального градиента удельной электропроводности в оз. Светленькое.

Дата	30.03.22	21.07.22	30.03.23	23.07.23	21.10.23	30.03.24
Глубина хемоклина, м	13.5–16.0	14.0–16.0	15.5–17.0	15.5–17.0	15.0–17.5	15.0–17.5
Градиент электропроводности, мкСм/см/м	8.9	11.3	14.7	17.3	12.1	10.7
Слой с максимальным градиентом, мкСм/см	14.5–15.0	14.0–14.5	16.5–17.0	16.0–16.5	16.0–16.5	16.5–17.0
Максимальный градиент электропроводности, мкСм/см/м	28.0	37.4	45.7	58.0	36.9	29.7

**Рис. 3.** Вертикальное распределение удельной электропроводности, содержания кислорода, температуры и pH в оз. Светленькое.

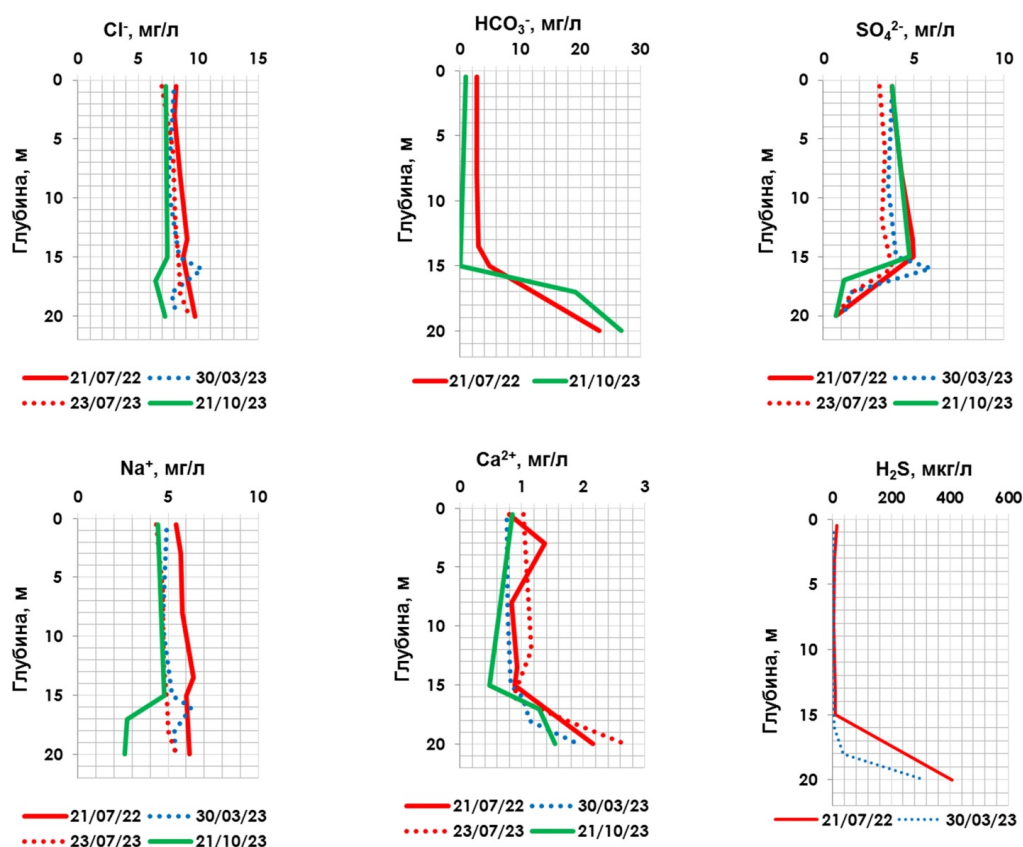


Рис. 4. Вертикальное распределение хлорид-ионов Cl^- , гидрокарбонат-ионов HCO_3^- , сульфат-ионов SO_4^{2-} , катионов натрия Na^+ , кальция Ca^{2+} , а также сероводорода H_2S .

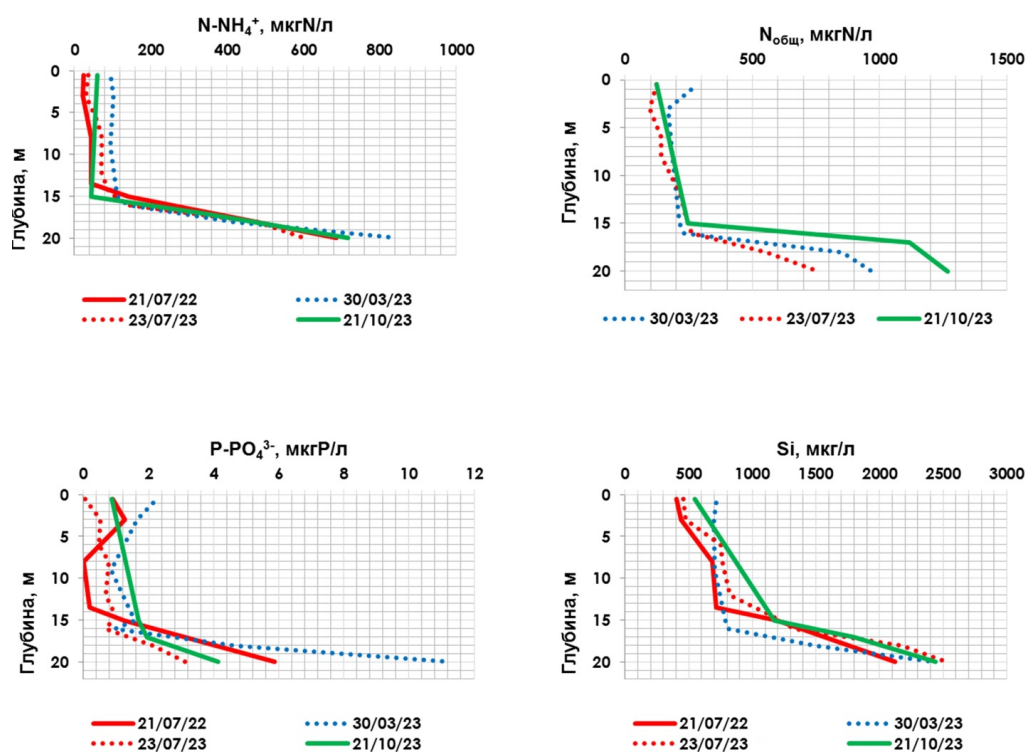
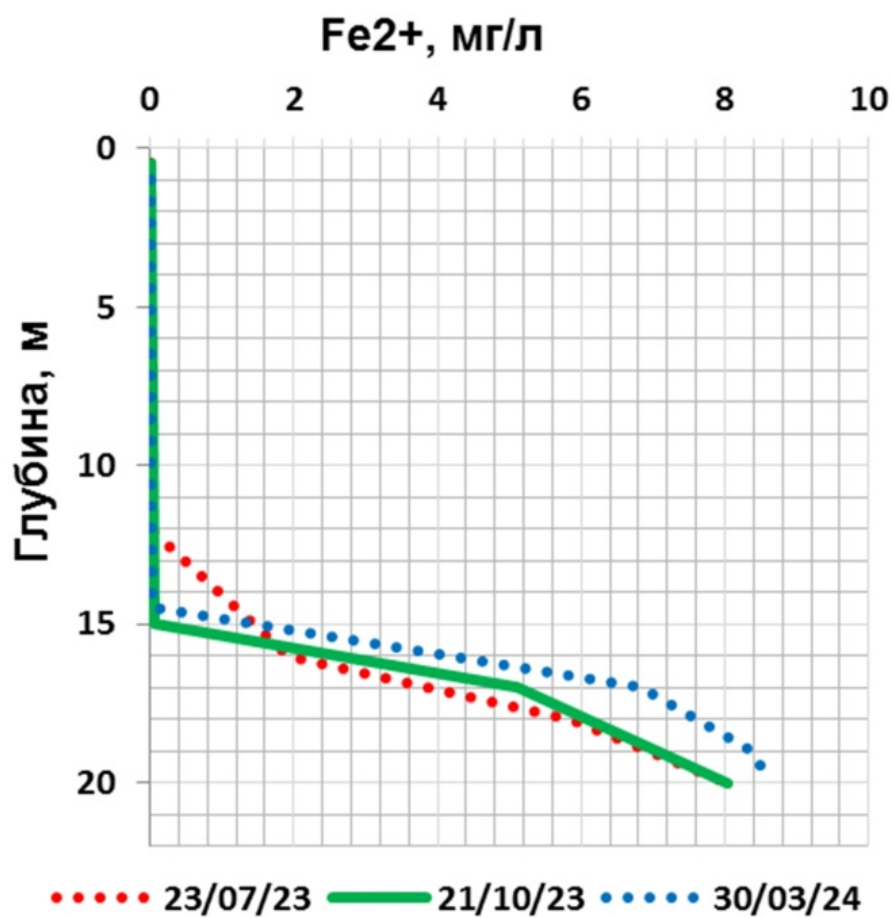
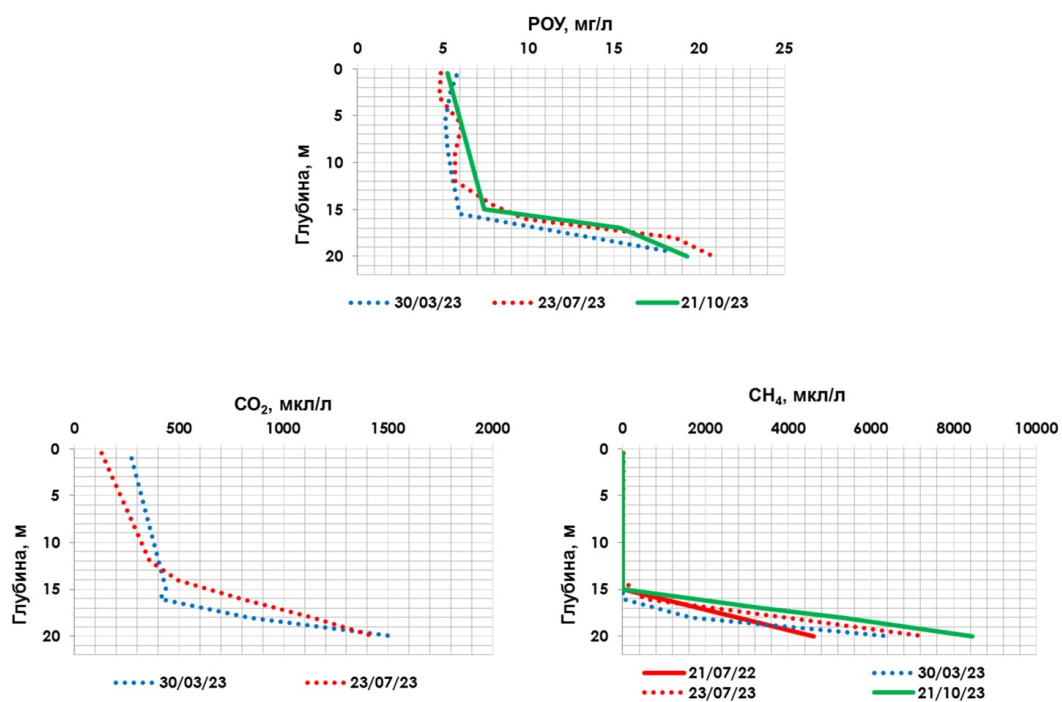


Рис. 5. Вертикальное распределение аммонийного азота (N-NH_4^+), общего азота ($\text{N}_{\text{общ}}$), фосфатов (P-PO_4^{3-}), кремния (Si).

Рис. 6. Вертикальное распределение растворенного железа Fe²⁺.Рис. 7. Вертикальное распределение растворенного органического углерода (POC), углекислого газа (CO₂) и метана (CH₄).

Гидробиологическая характеристика

Определение пигментных характеристик фитопланктона проводилось в июле 2022 г. Зафиксированные концентрации хлорофилла *a* в миксолимнионе были < 1 мкг/л, что в целом характерно для олиготрофных водоемов (Китаев, 2007). На основе полученных данных невозможно провести четкую дифференциацию фитопланктонного сообщества по специфическим хлорофиллам (Хл *b* и Хл *c*) и дать оценку его состояния по пигментным индексам. В зоне хемоклина данные по пигментным характеристикам отсутствуют.

Изучение видового разнообразия прокариотических сообществ в озере показало, что в хемоклине и монолимнионе помимо бактерий присутствуют также археи, число прочтений которых составляет около 5% от числа идентифицированных прокариот. Археи в незначительных количествах идентифицированы на глубине 13.5 м; в придонном слое на глубине 20 м число их прочтений выше в несколько раз.

Общая численность бактериопланктона от поверхности до глубины 13 м во все сезоны была постоянной и варьировала от 0.054 ± 0.003 млн кл/мл до 0.144 ± 0.004 млн кл/мл (Рис. 8). С увеличением глубины численность прокариот резко возрастала в 8 раз: с 0.167 ± 0.004 млн кл/мл на глубине 16 м до 1.351 ± 0.058 млн кл/мл на 18 м. Однако еще глубже, в монолимнионе (20 м), значения общей численности снизились практически в 2 раза до 0.764 ± 0.003 млн кл/мл. Аналогичная тенденция складывалась в октябре. Верхняя граница хемоклина в этот сезон обнаружена на глубине 15 м. Резкое увеличение численности бактериопланктона в 4 раза отмечалось с 15 до 17 м и составляло 0.286 ± 0.006 млн кл/мл и 1.086 ± 0.004 млн кл/мл соответственно. Как и в марте, значения показателя резко уменьшались в монолимнионе и на глубине 20 м равнялись 0.903 ± 0.008 млн кл/мл. В июле верхняя граница хемоклина соответствовала глубине 15 м, где общая численность бактериопланктона составляла 0.805 ± 0.003 млн кл/мл, что в 4 раза выше относительно их численности на горизонте 13 м.

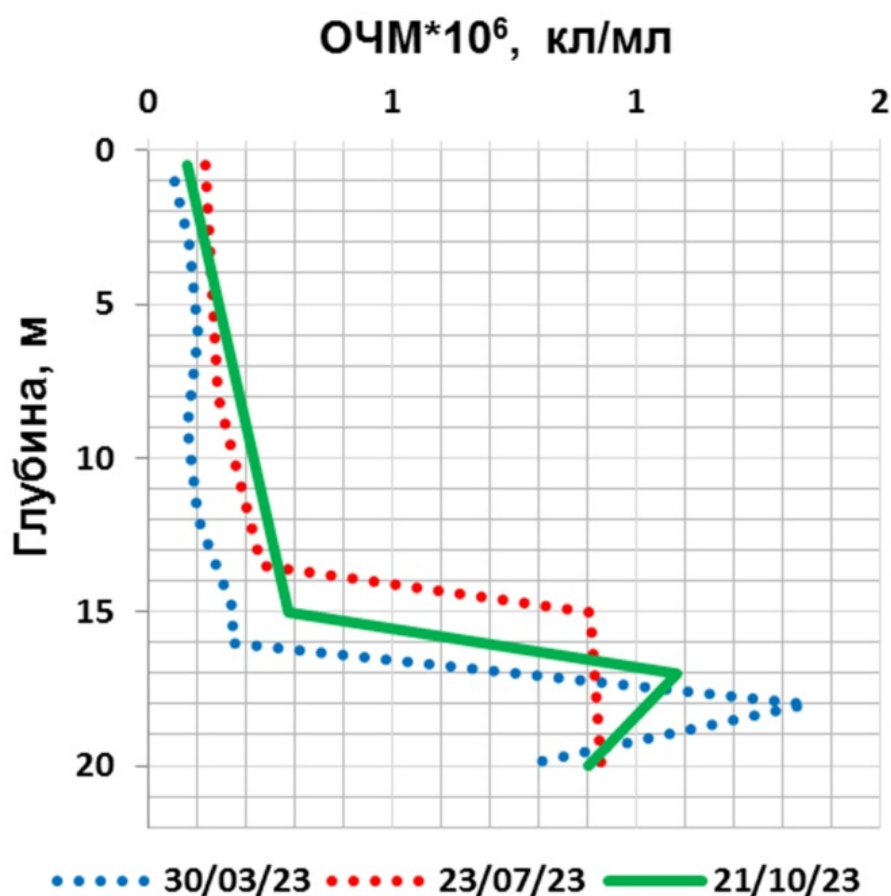


Рис. 8. Вертикальное распределение общей численности микроорганизмов.

Зоопланктонное сообщество водоема представлено в основном палеарктическими и голарктическими видами. В зоопланктоне озера обнаружено 14 видов беспозвоночных: 7 видов Cladocera, 3 – Copepoda и 4 – Rotifera.

Структурообразующий комплекс представлен 5 видами: *Kellicottia longispina* (Kellicott, 1879), *Polyarthra dolichoptera* Idelson, 1925, *Keratella cochlearis* (Gosse, 1851), *Mesocyclops leuckarti* (Claus, 1857), *Bosmina longirostris* (O.F. Muller, 1785).

По численности в зооценозе доминировали коловратки (63%), по биомассе – копеподы (60%). Значительный вклад в общую численность вносили виды *K. longispina* – 36–56%, *M. leuckarti* – 10–26%, *P. dolichoptera* – 10–18%. Основу биомассы определяли *M. leuckarti* – 47–58%, *Diaphanosoma brachyurum* (Lievin, 1848) – 11–25%, *B. longirostris* – 11–18%. Средняя численность и биомасса зоопланктона за период исследований составляла 28300 экз./м³ и 0.3 г/м³ соответственно.

Вертикальное распределение зоопланктона определялось температурным и кислородным режимами. Максимальные показатели количественных характеристик гидробионтов были отмечены в верхних хорошо насыщенных кислородом слоях миксолимниона, а также в слое температурного скачка (2–9 м), где численность зоопланктона составляла 73.9 ± 23 тыс экз/м³, а биомасса – 0.3 ± 0.09 г/м³ соответственно. С глубиной численность и биомасса зоопланктона снижались. Различные группы зоопланктона по вертикали распределялись неравномерно. Наибольшая численность коловраток наблюдалась в миксолимнионе на глубине 3–5 м, с глубиной их количество снижалось. Максимальное количество копепод отмечено на горизонте 16–20 м. Ветвистоусые ракообразные преобладали над границей аэробной и анаэробной зон (13 м).

Заключение

Выявление и исследование на острове Большой Соловецкий меромиктических озер, являющихся уникальными природными объектами, необходимо для изучения как локальной эволюции экосистем Соловецкого архипелага, так и глобальных изменений климата в прошлом и настоящем.

В оз. Светленькое наблюдается устойчивая стратификация с выделением в водоеме слоев воды, характерных для меромиктических водоемов. В хемоклине начало анаэробной зоны сопровождается резким возрастанием величины удельной электропроводности. Гидрохимический состав воды в мимомимлинионе свидетельствует о протекании процессов анаэробной минерализации органического вещества, сульфатредукции и метаногенеза. Распределение по глубине биогенных элементов (резкое увеличение концентраций в зоне хемоклина водоема) также соответствует меромиктической структуре водоема. Увеличение содержания железа по глубине и его преобладание над сероводородом и биогенными элементами в зоне мимомимлиниона говорит о ферругинозном («железном») типе анокии в водоеме. Несмотря на свой меромиктический статус и близкое расположение к морю, оз. Светленькое является ультрапресным водоемом, минерализация которого не превышает 50 мг/л. Таким образом, озеро относится к эндогенным меромиктическим водоемам IV типа (Walker and Likens, 1975).

Ввиду того, что оз. Светленькое труднодоступно для туристов и местных жителей, его можно рассматривать как фоновый объект мониторинга водоемов Большого Соловецкого острова и «естественную лабораторию» для исследований процессов, протекающих в хемоклине и мимомимлинионе меромиктических водоемов с ферругинозным типом меромиксии.

Список литературы

- Алексеев, В.Р., 2010. Определитель зоопланктона и зообентоса пресных вод Европейской России. Т. 1. Товарищество научных изданий КМК, Москва – Санкт-Петербург, Россия, 495с.
- Балушкина, Е.В., Винберг, Г.Г., 1979. Зависимость между массой и длиной тела у планктонных ракообразных. В: Винберг, Г.Г. (ред.), *Общие основы изучения водных экосистем*. Наука, Санкт-Петербург, СССР, 169–172.
- Измайлова, А.В., 2018. Озера России. Закономерности распределения, ресурсный потенциал. Папирус, Санкт-Петербург, Россия, 288 с.
- Китаев, С.П., 2007. Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. Карельский научный центр РАН, Петрозаводск, Россия, 395 с.

- Климов, С.И., Воробьева, Т.Я., 2025. Оценка стабильности меромиктических и димиктических озер острова Большой Соловецкий. *Метеорология и гидрология* **1**, 82–88.
- Кононец, М.Ю., Пахомова, С.В., Розанов, А.Г., Проскурнин, М.А., 2002. Определение растворенных форм железа в морской воде с помощью феррозина. *Журнал аналитической химии* **57** (7), 704–708.
- Краснова, Е.Д., 2021а. Экология меромиктических озер России. 1. Прибрежные морские водоемы. *Водные ресурсы* **48** (3), 322–333. <https://doi.org/10.31857/S0321059621030093>
- Краснова, Е.Д., 2021b. Экология меромиктических озер России. 2. Континентальные водоемы. *Водные ресурсы* **48** (4), 451–460. <https://doi.org/10.31857/S032105962104009X>
- Лозовик, П.А., Ефременко, Н.А., 2017. Аналитические, кинетические и расчетные методы в гидрохимической практике. Нестор-История, Санкт-Петербург, Россия, 272 с.
- Мельничук, Т.Н., Еговцева, А.Ю., Абдурашитов, С.Ф., Андронов, Е.Е., Абдурашитова, Э.Р., Радченко, А.Ф., Радченко, Л.А., 2019. Микробные сообщества ризосферы *Triticum aestivum* L. черноземов южного и выщелоченного. *Таверический вестник аграрной науки* **3**, 94–105.
- Смирнов, Н.П., 1993. Теоретические вопросы классификации озер. Наука, Санкт-Петербург, Россия, 186 с.
- Титова, К.В., Кокрятская, Н.М., 2013. Оптимизация методики определения растворенного железа с использованием феррозина в пресноводных озерах. *Вода: химия и экология* **10**, 85–89.
- Шварцман, Ю.Г., Болотов, И.Н., 2007. Природная среда Соловецкого архипелага в условиях меняющегося климата. Уральское отделение РАН, Екатеринбург, Россия, 184 с.
- Bates, S.T., Berg-Lyons, D., Caporaso, J.G., Walters, W.A., Knight, R., Fierer, N., 2011. Examining the global distribution of dominant archaeal populations in soil. *The ISME journal* **5** (5), 908–917. <https://doi.org/10.1038/ismej.2010.171>
- Ecology of meromictic lakes, 2017. Gulati, R.D. et al. (eds.), Springer International Publishing, Switzerland, 405 p.
- Lampert, W., Sommer, U., 2007. Limnoecology: the ecology of lakes and streams. Oxford University Press, Oxford, UK, 324 p.
- Rahimah, A.B., Cheah, S.C., Rajinder, S., 2006. Freeze-drying of oil palm (*Elaeis guineensis*) leaf and its effect on the quality of extractable DNA. *Journal of Oil Palm Research* **18**, 296–304.
- Ruttner-Kolisko, A., 1977. Suggestions for biomass calculation of plankton rotifers. *Archiv für Hydrobiologie. Beihefte* **8**, 71–76.
- Stewart, K.M., Walker, K.F., Likens, G.E., 2009. Meromictic lakes. In: Likens, G.E. (ed.), *Encyclopedia of Inland Waters*. Academic Press, Amsterdam, Netherlands, 589–602.
- Walker, K.F., Likens, G.E., 1975. Meromixis and recognized typology of the lake circulation patterns. *Verhandlungen des Internationalen Verein Limnologie* **19**, 442–458. <https://doi.org/10.1080/03680770.1974.11896084>
- Weiss, R.F., 1974. Carbon dioxide in water and seawater: the solubility of a non-ideal gas. *Marine Chemistry* **2** (3), 203–215. [https://doi.org/10.1016/0304-4203\(74\)90015-2](https://doi.org/10.1016/0304-4203(74)90015-2)

Yamamoto, S., Alkauskas, J.B., Crosier, T.E., 1976. Solubility of methane in distilled water and seawater. *Journal of Chemical and Engineering Data* **21** (1), 78–80. <https://doi.org/10.1021/je60068a029>

Zabelina, S.A., Shirokova, L.S., Klimov, S.I., Chupakov, A.V., Lim, A.G. et al., 2021. Carbon emission from thermokarst lakes in NE European tundra. *Limnology and Oceanography* **66** (S1), 216–230. <https://doi.org/10.1002/lno.11560>

References

Alekseev, V.R., 2010. *Opredelitel' zooplanktona i zoobentosa presnykh vod Evropeiskoi Rossii*. T. 1 [Key to zooplankton and zoobenthos in fresh waters of European Russia. Vol. 1]. KMK Scientific Press Ltd., Moscow – Saint Petersburg, Russia, 495 p. (In Russian).

Balushkina, E.V., Vinberg, G.G., 1979. Zavisimost' mezhdu massoi i dlinoi tela u planktonnykh rakoobraznykh [Correlation between body mass and length in planktonic crustaceans]. In: Vinberg, G.G. (ed.), *Obshchie osnovy izucheniia vodnykh ekosistem [General fundamentals of studying aquatic ecosystems]*. Nauka, Saint Petersburg, USSR, 169–172. (In Russian).

Bates, S.T., Berg-Lyons, D., Caporaso, J.G., Walters, W.A., Knight, R., Fierer, N., 2011. Examining the global distribution of dominant archaeal populations in soil. *The ISME journal* **5** (5), 908–917. <https://doi.org/10.1038/ismej.2010.171>

Ecology of meromictic lakes, 2017. Gulati, R.D. et al. (eds.), Springer International Publishing, Switzerland, 405 p.

Izmailova, A.V., 2018. *Ozera Rossii. Zakonomernosti raspredeleniia, resursnyi potentsial* [Lakes of Russia. Distribution patterns, resource potential]. Papirus, Saint Petersburg, Russia, 288 p. (In Russian).

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

Klimov, S.I., Vorob'eva, T.Ia., 2025. Otsenka stabil'nosti meromikticheskikh i dimikticheskikh ozer ostrova Bol'shoi Solovetskii [Assessment of the stability of meromictic and dimictic lakes of the Bolshoi Solovetsky Island]. *Meteorologiya i gidrologiya [Meteorology and Hydrology]* **1**, 82–88. (In Russian).

Kononets, M.Yu., Pakhomova, S.V., Rozanov, A.G., Proskurnin, M.A., 2002. Opreделение rastvorenykh form zheleza v morskoi vode s pomoshch'iu ferrozina [Determination of dissolved forms of iron in sea water using ferrozine]. *Zhurnal analiticheskoi khimii [Journal of Analytical Chemistry]* **57** (7), 704–708. (In Russian).

Krasnova, E.D., 2021a. Ecology of meromictic lakes of Russia. 1. Coastal marine waterbodies. *Water Resources* **48**, 427–438. <https://doi.org/10.1134/S009780782103009X>

Krasnova, E.D., 2021b. The ecology of meromictic lakes in Russia. 2. Continental water bodies. *Water Resources* **48**, 588–597. <https://doi.org/10.1134/S0097807821040096>

Lampert, W., Sommer, U., 2007. *Limnoecology: the ecology of lakes and streams*. Oxford University Press, Oxford, UK, 324 p.

Lozovik, P.A., Efremenko, N.A., 2017. *Analiticheskie, kineticheskie i raschetnye metody v gidrokhimicheskoi praktike* [Analytical, kinetic and computational methods in hydrochemical practice]. Nestor-Istoriia, Saint Petersburg, Russia, 272 p. (In Russian).

- Mel'nichuk, T.N., Egovtseva, A.Yu., Abdurashitov, S.F., Andronov, E.E., Abdurashitova, E.R., Radchenko, A.F., Radchenko, L.A., 2019. Mikrobnye soobshchestva rizosfery *Triticum aestivum* L. chernozemov iuzhnogo i vyshchelochennogo [Microbial communities of the rhizosphere of *Triticum aestivum* L. of southern and leached chernozems]. *Tavrisheskii vestnik agrarnoi nauki [Tauride Bulletin of Agrarian Science]* **3**, 94–105. (In Russian).
- Rahimah, A.B., Cheah, S.C., Rajinder, S., 2006. Freeze-drying of oil palm (*Elaeis guineensis*) leaf and its effect on the quality of extractable DNA. *Journal of Oil Palm Research* **18**, 296–304.
- Ruttner-Kolisko, A., 1977. Suggestions for biomass calculation of plankton rotifers. *Archiv für Hydrobiologie. Beihefte* **8**, 71–76.
- Shvartsman, Yu.G., Bolotov, I.N., 2007. Prirodnaia sreda Solovetskogo arhipelaga v usloviakh meniaiushchegosia klimata [Natural environment of the Solovetsky archipelago in a changing climate]. Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russia, 184 p. (In Russian).
- Smirnov, N.P., 1993. Teoreticheskie voprosy klassifikatsii ozer [Theoretical issues of lake classification]. Nauka, Saint Petersburg, Russia, 186 p. (In Russian).
- Stewart, K.M., Walker, K.F., Likens, G.E., 2009. Meromictic lakes. In: Likens, G.E. (ed.), *Encyclopedia of Inland Waters*. Academic Press, Amsterdam, Netherlands, 589–602.
- Titova, K.V., Kokriatskaia, N.M., 2013. Optimizatsiia metodiki opredeleniia rastvorennogo zheleza s ispol'zovaniem ferrozina v presnovodnykh ozerakh [Optimization of the method for determining dissolved iron using ferrozine in freshwater lakes]. *Voda: khimiia i ekologiia [Water. Chemistry and Ecology]* **10**, 85–89. (In Russian).
- Walker, K.F., Likens, G.E., 1975. Meromixis and recognized typology of the lake circulation patterns. *Verhandlungen des Internationalen Verein Limnologie* **19**, 442–458. <https://doi.org/10.1080/03680770.1974.11896084>
- Weiss, R.F., 1974. Carbon dioxide in water and seawater: the solubility of a non-ideal gas. *Marine Chemistry* **2** (3), 203–215. [https://doi.org/10.1016/0304-4203\(74\)90015-2](https://doi.org/10.1016/0304-4203(74)90015-2)
- Yamamoto, S., Alkauskas, J.B., Crosier, T.E., 1976. Solubility of methane in distilled water and seawater. *Journal of Chemical and Engineering Data* **21** (1), 78–80. <https://doi.org/10.1021/jc60068a029>
- Zabelina, S.A., Shirokova, L.S., Klimov, S.I., Chupakov, A.V., Lim, A.G. et al., 2021. Carbon emission from thermokarst lakes in NE European tundra. *Limnology and Oceanography* **66** (S1), 216–230. <https://doi.org/10.1002/lno.11560>