

УДК 556.314

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА СУЛЬФАТРЕДУКЦИИ В ВОДЕ ОЗЕР НА ТЕРРИТОРИИ НАЦИОНАЛЬНОГО ПАРКА «КЕНОЗЕРСКИЙ»

К. В. Титова^{1*}, Н. М. Кокрятская¹, С. С. Попов¹, О. Ю. Морева¹,
А. В. Брагин²

¹ Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики
имени академика Н. П. Лаверова УрО РАН (пр. Никольский, 20, Архангельск,
Россия, 163020), *ksyu_sev@mail.ru

² ФГБУ «Национальный парк «Кенозерский» (наб. Северной Двины, 78, Архангельск,
Россия, 163000)

В ходе экспедиционных работ в марте 2022 года отобраны образцы воды на трех озерах – Масельгское, Пежихерьё и Лёкшмозеро. Проведены исследования образцов методами жидкостной хроматографии, фотоколориметрии, кондуктометрии, потенциометрии. По результатам исследований вода этих озёр по усредненным значениям минерализации отнесена к категории ультрапресных (<100 мг/л). Полученными данными подтвердили принадлежность вод исследованных водоемов к гидрокарбонатному классу, кальциевой группе. На всех глубоководных станциях водная толща была стратифицирована по содержанию кислорода. Граница смены аэробных условий на анаэробные приходилась для оз. Масельгское на глубину 14–14,5 м, оз. Пежихерьё – 16–16,5 м, оз. Лёкшмозеро – 21–21,5 м. За прошедшие с момента предыдущего исследования 10 лет расположение этого пограничного слоя не изменилось. В озерах Масельгское и Пежихерьё наблюдаемая концентрация сероводорода в анаэробной зоне превышает его ПДК для водоемов рыбохозяйственного назначения, в оз. Лёкшмозеро его количество минимально и близко к допустимым значениям. Распространению сероводорода по всей толще воды препятствует наличие аэробной зоны. В придонном слое оз. Масельгское обнаружена высокая концентрация растворенного железа (до 17 000 мкг/л), что сопоставимо с его содержанием в оз. Светлое (Приморский район Архангельской области), которое является уникальным меромиктическим водоемом со специфическим железо-марганцевым типом. По содержанию биогенных элементов подтвержден мезотрофный тип водоемов. При этом отмечено некоторое увеличение концентрации фосфатов и аммония в придонном слое оз. Масельгское в многолетнем аспекте, что может свидетельствовать о протекании активных процессов анаэробной минерализации органического вещества.

Ключевые слова: Архангельская область; национальный парк «Кенозерский»; озера; органическое вещество; соединения серы; железо

Для цитирования: Титова К. В., Кокрятская Н. М., Попов С. С., Морева О. Ю., Брагин А. В. Изучение процесса сульфатредукции в воде озёр на территории национального парка «Кенозерский» // Труды Карельского научного центра РАН. 2023. № 6. С. 53–65. doi: 10.17076/lim1744

Финансирование. Работа выполнена на основании госзадания за счет средств Минобрнауки РФ, проект № FUUW-2022-0026 «Изучение закономерностей биогеохимических процессов циклов серы и хлора в экосистемах Европейского Севера России».

**K. V. Titova^{1*}, N. M. Kokryatskaya¹, S. S. Popov¹, O. Yu. Moreva¹, A. V. Bragin².
STUDYING THE PROCESS OF SULFATE REDUCTION IN THE WATER OF LAKES
IN THE KENOZERSKY NATIONAL PARK**

¹ *N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research, Ural Branch, Russian Academy of Sciences (20 Nikolsky Ave., 163020 Arkhangelsk, Russia), *ksyu_sev@mail.ru*

² *Kenozersky National Park (78 Nab. Severnoy Dviny, 163000 Arkhangelsk, Russia)*

During fieldwork in March 2022 water samples were taken from three lakes: Maselgskoye, Pezhikherie, and Lyokshmozero. The samples were studied by liquid chromatography, photocolourimetry, conductometry, and potentiometry. Based on the results, the water of these lakes was classified as ultra fresh (average TDS <100 mg/l). The data obtained confirm that water in the studied reservoirs belongs to the calcium hydrogen carbonate class. At all deep-water sampling sites, the water column was stratified by the oxygen content. The oxic-anoxic interface was found at 14–14.5 m depth in Lake Maselgskoye, at 16–16.5 m in Lake Pezhikherie, and at 21–21.5 m in Lake Lyokshmozero. Over the past 10 years since the previous study, the position of this boundary layer has not changed. In lakes Maselgskoye and Pezhikherie, the observed concentration of hydrogen sulfide in the anoxic zone exceeded its MPC for fishery water bodies. The level of this compound in Lyokshmozero was minimal and close to acceptable values. The spreading of hydrogen sulfide throughout the entire water column is prevented by the presence of an oxic zone. The near-bottom layer of Lake Maselgskoye contained a high concentration of dissolved iron (up to 17 000 µg/l), which is comparable to its content in Lake Svetloye (Primorsky District, Arkhangelsk Region), which is a unique meromictic reservoir of a specific iron-manganese type. According to the content of nutrients, the lakes are classified as mesotrophic. That said, we detected a slight increase in the concentration of phosphates and ammonium in the near-bottom layer of Lake Maselgskoye over a long term, which may point to ongoing active anaerobic mineralization of organic matter.

Keywords: Arkhangelsk Region; Kenozersky National Park; lakes; organic matter; sulfur compounds; iron

For citation: Titova K. V., Kokryatskaya N. M., Popov S. S., Moreva O. Yu., Bragin A. V. Studying the process of sulfate reduction in the water of lakes in the Kenozersky National Park. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2023. No. 6. P. 53–65. doi: 10.17076/lim1744

Funding. The activities were carried out under state order funded by the Ministry of Science and Higher Education Russia, project # FUUW-2022-0026 “Investigation of patterns in the biogeochemical cycling of sulphur and chlorine in ecosystems of North European Russia”.

Введение

Актуальность исследования биогеохимических процессов, протекающих в водных объектах арктической, субарктической и бореальной природных зон Европейского Севера России, определяется прежде всего важностью этих процессов для экологического состояния водоемов. В силу замедленного метаболизма экосистемы северных территорий особенно чувствительны к внешним воздействиям. В этих условиях изучение биогеохимических процессов (их особенностей, закономерностей для морских и пресноводных экосистем) при-

обретает особое значение, однако имеющаяся информация о подобных исследованиях по-прежнему является довольно ограниченной и недостаточной.

Как известно [Кузнецов, 1952; Беляев и др., 1981; Волков, 1984], одним из важнейших процессов анаэробной минерализации органического вещества наряду с метаногенезом является микробное восстановление сульфатов до сероводорода (сульфатредукция). Генерируемый в ходе этого процесса сероводород крайне токсичен, является сильнейшим восстановителем, то есть способен влиять на окислительно-восстановительную обстановку в водо-

еме, что, в свою очередь, влияет на состояние (например, токсичность и подвижность) многих других элементов. Интенсивность сульфатредукции определяется содержанием сульфатов, скоростью осадконакопления, количеством и доступностью для микроорганизмов органического вещества, активностью микробного сообщества и др., то есть параметрами, определяемыми не только естественными, природными причинами, но и антропогенной нагрузкой.

Важное экологическое значение сульфатредукторов связано с их участием в процессе деструкции органического вещества и продуцировании химически активного вещества H_2S [Намсараев, Земская, 2000]. Содержание сероводорода в значительной мере зависит от наличия кислорода в водной толще. Поэтому его образование в основном локализовано в донных осадках и частично в придонных слоях воды. Особенно опасным является накопление сероводорода в придонных слоях, где находятся нерестилища некоторых видов рыб. Для оценки возможных токсических эффектов восстановленных сернистых веществ необходимо знать пределы их токсических влияний.

В растворенном состоянии сульфиды могут находиться в ионной форме и в молекулярной форме в виде сероводорода. Соотношение этих форм зависит от значения pH. Знание фактического содержания сероводорода в растворенной молекулярной форме необходимо, потому что токсичность его намного выше, чем у ионных форм, что, вероятно, связано с его сильными восстановительными свойствами. Предполагают, что сероводород может нарушать дыхательный процесс рыб. Он также является токсичным и для других гидробионтов [Тимофеева и др., 1991]. Установлена ПДК для вод рыбохозяйственного назначения, равная $0,005 \text{ мг/дм}^3$ [Приказ..., 2016]. Сульфид-ион отнесен к категории «сан-токс» – санитарно-токсикологический (действие вещества на водные биологические ресурсы и санитарные показатели водных объектов рыбохозяйственного назначения); к 3 классу опасности [Приказ..., 2016]. По санитарно-гигиеническим нормам [СанПиН 2.1.4.1074-01] сероводород в воде водоемов питьевого назначения относится к 4 классу опасности – умеренно опасные вещества (величина норматива – $0,003 \text{ мг/л}$).

В подавляющем большинстве случаев процессы образования сероводорода и его окисления находятся в равновесии, за счет чего его токсическое действие в водной толще не проявляется [Тимофеева и др., 1991].

Часто водоемы подвергаются антропогенному воздействию, которое не ограничивается

увеличением содержания сульфатов в воде и ее подкислением. В ряде случаев наблюдается комбинированное загрязнение водных объектов сернистыми соединениями и органическими веществами, а также соединениями азота и фосфора, что приводит к активизации цепочки биологических процессов, включающей первичную продукцию органического вещества, расход кислорода на окисление избыточного органического вещества, к эвтрофикации водоемов, а также к образованию сероводорода в больших количествах за счет активизации деятельности сульфатредуцирующих бактерий в возникших анаэробных условиях [Глобальный..., 1983].

До тех пор, пока в водоеме имеется ресурс реакционноспособного железа, образующийся H_2S связывается нацело на месте. При интенсивном процессе восстановления сульфатов запаса реакционноспособного железа может не хватать [Волков, 1984]. В подобной ситуации сероводород при отсутствии других связывающих элементов и полном исчерпании кислорода в водной толще (особенно в период зимней стагнации) может выходить на поверхность водоема и распространяться в воздушной среде.

Целью данной работы было продолжение комплексных исследований поведения элементов биогеохимического цикла серы в водоемах Европейского Севера России, проведенных нами с 2007 по 2012 г. на территории Кенозерского национального парка.

Материалы и методы

Объект исследования

Национальный парк «Кенозерский» (Кенозерский национальный парк, КНП, НП «Кенозерский») расположен в юго-западной части Архангельской области на стыке Плесецкого и Каргопольского административных районов, его западная граница проходит по границе с Республикой Карелия [Кенозерский...]. На территории парка находится большое количество озер, рек и ручьев, в совокупности представляющих собой существенную и очень важную часть водосборного бассейна рек Онеги и Водлы. По величине водосборной площади 90 % территории парка относится к бассейну Белого моря и лишь 10 % – к бассейну Балтийского. Граница водораздела проходит по поросшей лесом гряде Масельга [Шатковская и др., 2002]. Областью нашего исследования были озера Каргопольского сектора КНП, где проходит граница раздела бассейнов морей.

Озеро Лёкшозеро (водосборный бассейн Белого моря) – второй по величине водоем на

территории КНП и пятый на водосборе р. Онеги. Форма котловины близка к овальной. Береговая линия изрезана очень слабо. Дно ровное, без резких перепадов глубин. Район больших глубин вытянут в виде борозды, смещенной к восточному берегу.

Озеро Масельгское (водосборный бассейн Балтийского моря) – узкий по форме водоем со слабоизрезанной береговой линией, вытянутый в северо-западном направлении. Южная часть озера мелководна, наибольшие глубины отмечаются в северо-восточной и относительно изолированной северо-западной (*Пежихерье*) частях озера. Для рельефа дна оз. Масельгское характерно чередование отмелей и понижений [Воробьева и др., 2013].

Географическое место отбора проб фиксировалось с помощью спутникового определителя координат GPS-навигатора Garmin Etrex10, глубина – с применением эхолота Fishfinder 140. Коллегами из Института экологических проблем Севера (ныне ФИЦКИА УрО РАН) в ходе исследований с 2007 г. определены и установлены морфометрические характеристики изучаемых в настоящей работе озер Масельгское/Пежихерье и Лёкшмозеро. По предоставленным ими координатам мы в марте 2022 г. вышли на самые глубоководные участки указанных водоемов. Расположение станций отбора приведено в таблице 1.

Отбор проб воды и их химический анализ

Пробы воды в марте 2022 г. отбирались послойно на выбранных станциях исследуемых озер с помощью горизонтального поликарбонатного батометра объемом 5 л согласно [ГОСТ 31861-2012]. Объем проб варьировал в зависимости от аликвоты, необходимой для анализа и достаточной для проведения повторного определения. Вода помещалась в емкости из различного материала согласно требованиям хранения определяемых в ней компонентов (растворенный сероводород – в стекло; ионный состав, щелочность, цветность, биогенные эле-

менты, растворенное железо и углерод – в пластик). При отборе воды на анализ растворенного железа по формам создавались условия минимизации контакта с кислородом воздуха. Ввиду отсутствия возможности незамедлительного установления концентраций вышеуказанных соединений их было необходимо консервировать (сероводород – предварительным добавлением ацетата цинка; растворенное железо – подкислением до pH менее 2). Всего в 2022 г. отобрано 144 пробы с шести горизонтов трех озер на различные виды анализа.

Температура и содержание кислорода измерены по всей глубине, начиная подо льдом и до дна, через 0,5 м, с помощью портативного оксиметра HQ30D.99 Nach Lange с люминесцентным датчиком LDO. На основании этих данных были выбраны шесть горизонтов для отбора проб на каждом озере. Гидрохимические показатели (pH, электропроводность) измерены с помощью pH-метра HI 83141 (Hanna) и кондуктометра HI 8733 (Hanna). Определение сероводорода и сульфидов проводили фотометрическим методом на спектрофотометре UNICO 1201. Предел обнаружения составляет 2 мкг/л [РД 52.24.450-2010]. Определение ионного состава (сульфатов, хлоридов, натрия, калия, магния, кальция) проводилось хроматографически на жидкостном хроматографе LC-20 Prominence с кондуктометрическим детектором [ПНД Ф 14.1:2:4.132-98], щелочности и гидрокарбонатов – по [ГОСТ 31957-2012], цветности – по [ГОСТ 31868-2012]. Жесткость определялась сложением эквивалентных концентраций кальция и магния. Содержание растворенного железа в воде анализировалось фотометрическим методом с феррозином на спектрофотометре UNICO 1201. В качестве восстановителя применялась аскорбиновая кислота. Предел обнаружения составляет 0,05 мкг/л [Кононец и др., 2002; Титова, Кокрятская, 2013]. Содержание биогенных элементов (аммония, нитритов, нитратов, фосфатов, кремния) определяли колориметрическим мето-

Таблица 1. Расположение станций отбора проб воды в озерах на территории НП «Кенозерский»

Table 1. Location of stations for sampling water and bottom sediments in lakes on the territory of the Kenozersky National Park

| Озеро Lake | Станция Station | Координаты Coordinates | Высота над уровнем моря, м Height above sea level, m | Глубина, м Depth, m |
|----------------------------|--------------------|----------------------------|---|------------------------|
| Масельгское Maselga | MG | 61.82848° N 38.03080° E | 164 | 19,5 |
| Пежихерье Pezhikherie | PG | 61.82196° N 37.99727° E | 167 | 20,0 |
| Лёкшмозеро Lyokshmozero | LG | 61.73413° N 38.08414° E | 156 | 25,0 |

дом на спектрофотометре UNICO-1201 [Руководство..., 2003]. Минерализация воды (мг/л) для озер рассчитана сложением концентраций главных ионов. Для определения класса воды произведен перерасчет концентраций в мг-экв/л для каждого иона, а также вычислено их процентное соотношение.

Результаты и обсуждение

Протекание биогеохимических процессов цикла серы в воде озер зависит от ряда факторов: морфометрических характеристик водоема (площади, глубины), высоты над уровнем моря; цветности; минерализации и ионного состава, в частности содержания сульфатов; количества органического вещества, растворенного железа и биогенных веществ [Драбкова, Сорокин, 1979; Глобальный..., 1983].

Особенности формирования гидролого-гидрохимических режимов озер обусловлены факторами, связанными с их морфометрическими и гидрографическими характеристиками [Воробьева и др., 2013].

Отношение площади водосбора к площади зеркала С. В. Григорьев [Драбкова, Сорокин, 1979] назвал удельным водосбором. Этот показатель характеризует степень возможного влияния водосбора на жизнь озера и его режим. Условный водообмен (α) представляет собой отношение среднегодового притока с водосбора в озеро к объему самого озера. Он выражает степень приточности вод на режим озера. Малые значения α указывают на слабую роль притока в жизни озера и, как следствие этого, на развитие автохтонного режима в озере, высокие – на

формирование аллохтонного режима, зависящего от водосбора [Драбкова, Сорокин, 1979]. Исследуемые озера являются верховыми, относятся к сточным водоемам с низким коэффициентом условного водообмена и малым удельным водосбором [Воробьева и др., 2013], в них преобладают внутриводоемные гидрохимические процессы [Широкова и др., 2008].

По классификации П. В. Иванова [1948] изученные нами озера по величине их площади (км²) [Морева и др., 2007], располагая классы водоемов в геометрической прогрессии со знаменателем, равным 10, можно отнести к категориям: малые (1–10) – Масельское/Пезихерье (3,44) и средние (10–100) – Лёкшмозеро (53,8).

Величина максимальной глубины (м) озер классифицируется как повышенная (12,5–25): Масельское/Пезихерье (19,5/20) < Лёкшмозеро (25). Сопоставляя максимальную глубину с площадью исследованных нами озер, можно отметить небольшое ее увеличение при значительной разнице в размерах водоемов.

Высота водного зеркала озер над уровнем моря (табл. 1) подтверждает расположение озер на возвышенности, при этом разница между водоемами бассейнов разных морей составляет 8–11 м (водоемы, относящиеся к Балтийскому морю, выше связанных с Белым морем). Значительного снижения уровня воды в изучаемых озерах в 2022 г. не установлено – максимальные глубины схожи с определенными в ходе батиметрических исследований предыдущих лет (с 2007 по 2012 г.).

Во всех озерах наблюдалась обратная температурная стратификация (рис. 1), когда температура поверхностного слоя выше придонного

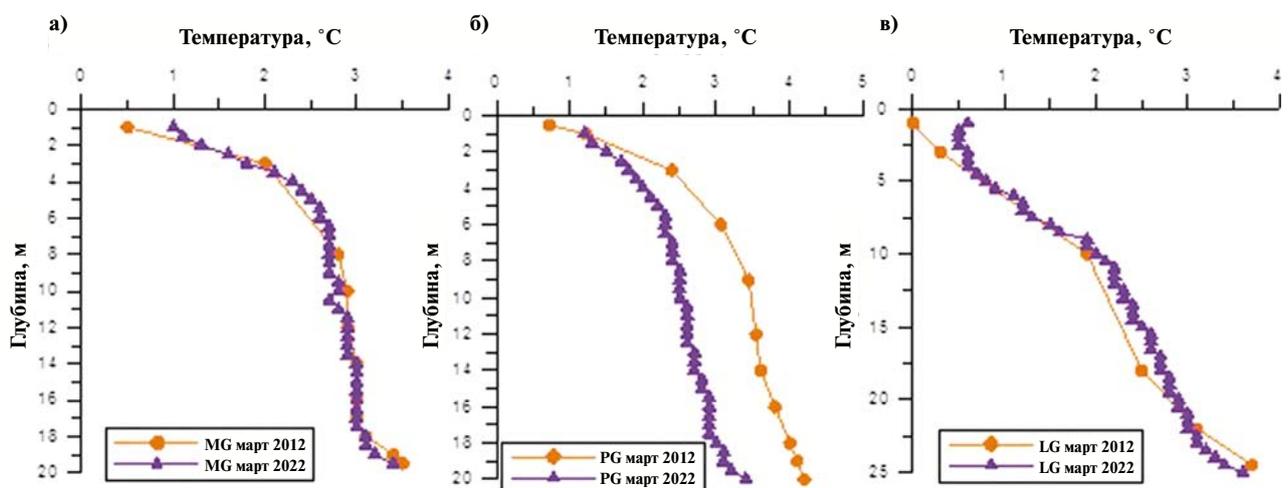


Рис. 1. Вертикальное распределение температуры в воде озер. Здесь и на рис. 2–5: а) Масельское, б) Пезихерье, в) Лёкшмозеро

Fig. 1. Vertical temperature distribution in lake water.

Here and in Fig. 2–5: а) Maselga, б) Pezhikherie, в) Lyokshmozero

[Хатчинсон, 1969]. Значения температуры и ее изменения по столбу воды были близкими в оба периода исследований для оз. Масельгское и Лёкшмозеро. На градус теплее была вода в оз. Пежихерье в 2012 г. по сравнению с 2022 г., но и это различие незначительное.

Все глубоководные станции исследованных нами озер были так же, как и по температуре, стратифицированы по содержанию кислорода – оно уменьшалось от поверхности ко дну с появлением анаэробных условий (практически полное исчерпание кислорода) (рис. 2).

Граница аэробно-анаэробной зоны для оз. Масельгское приходилась на глубину 14–14,5 м, при этом в 2012 г. остаточное количество кислорода (до 1,5 мг/л) сохранялось в придонном слое воды (рис. 2, а), тогда как в 2022 г. наблюдалось полное его исчерпание. В оз. Пежихерье отмечены идентичные вертикальные изменения содержания кислорода в сравниваемые периоды с его полным исчерпанием на уровне 16–16,5 м (рис. 2, б). Для оз. Лёкшмозеро в 2022 г. переходным горизонтом служила глубина 21–21,5 м, в 2012 г. кислород у самого дна сохранялся в количестве 2 мг/л (рис. 2, в).

Существуют исследования, говорящие о том, что воды озер, расположенных в районах с плоским рельефом и моренным ландшафтом, ледниково-речные и ледниково-озерные образования которого уже по своему происхождению являются хорошо перемытыми, обладают низкой минерализацией [Драбкова, Сорокин, 1979]. По классификации С. П. Китаева [2007] воды исследованных нами озер по усредненным значениям минерализации (мг/л) отнесены к категории «ультрапресные» (<100): Пежихерье (31,5) < Масельгское (38,0) < Лёкшмо-

зеро (72,1). Во всех исследованных озерах содержание главных ионов увеличивалось от поверхностных слоев воды к придонным: оз. Пежихерье – от 32 до 44 мг/л; оз. Масельгское – от 27 до 49 мг/л; наиболее существенные различия выявлены для воды оз. Лёкшмозеро – от 66 до 132 мг/л. Результаты измерения электропроводности подтверждают различия в минерализации воды озер между собой и по водному столбу (табл. 2).

Как следует из данных табл. 2, для всех исследуемых озер доминирующими ионами были гидрокарбонаты (около 90 %) и кальций (около 60 %), что позволяет отнести их воды к гидрокарбонатному классу, кальциевой группе [Алекин, 1953]. Среди анионов в малых количествах отмечены хлориды и сульфаты. Вторым по значимости катионом был магний (32 %). Наименьшая по усредненному значению жесткость воды установлена для оз. Пежихерье (0,54 ммоль/л), несколько выше – для оз. Масельгское (0,60 ммоль/л) и почти в 2 раза больше – для оз. Лёкшмозеро (1,17 ммоль/л). Для хозяйственного применения допустима вода с жесткостью, не превышающей 7 ммоль/л [СанПиН 2.1.4.1074-01], и по данному показателю воды исследованных озер относятся к категории «очень мягкие» (до 1,5 ммоль/л). Так как содержание почти всех ионов и их суммы (минерализация) увеличивалось от поверхности водоема к его дну, в вертикальном распределении величины жесткости обнаружена аналогичная закономерность. При этом для оз. Масельгского/Пежихерье обе эти величины изменялись по столбу воды незначительно (на 10 мг/л и 0,10 ммоль/л), а для оз. Лёкшмозеро минерализация увеличилась в два раза и жесткость – на 0,5 ммоль/л. Из полученных дан-

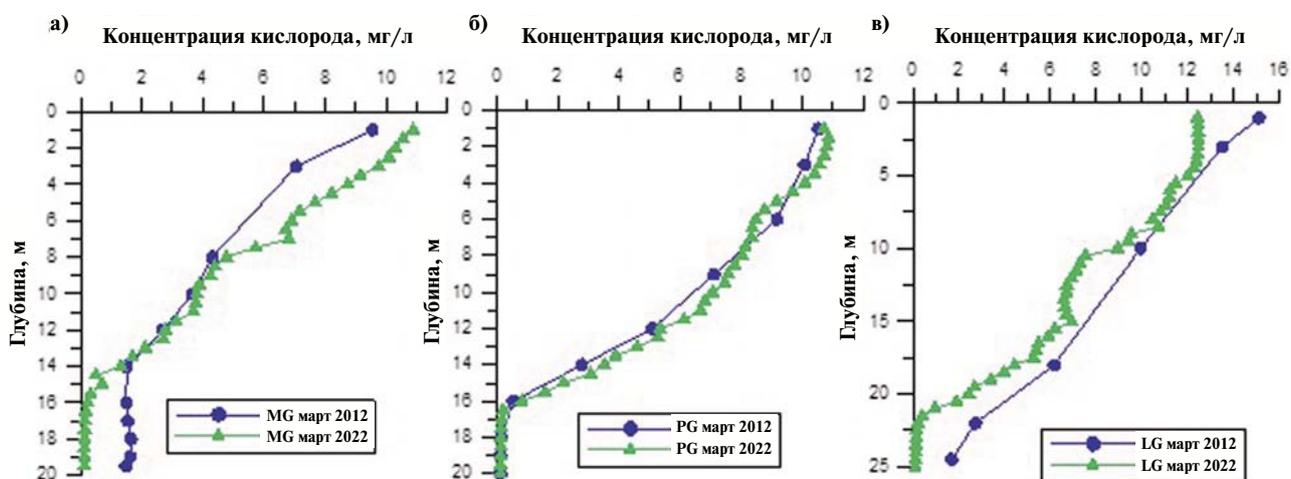


Рис. 2. Вертикальное распределение содержания кислорода в воде озер

Fig. 2. Vertical distribution of oxygen content in lake water

ных следует, что для оз. Лёкшозеро существенным в зимний период является грунтовое питание – разгрузка подземных вод в ложе озера, скорее всего, в виде выхода родников, ключей.

Единственным ионом, содержание которого снижается от поверхностных слоев воды к придонным, являлись сульфаты.

Распределение сульфатов в воде изученных озер (за исключением оз. Пижихерье) показывает некоторое снижение их концентрации к придонным слоям в оба периода исследований (рис. 3). Содержание сульфатов было практически одинаковым для озер Пижихерье и Лёкшозеро (рис. 3, б, в). Для воды

Таблица 2. Концентрация основных ионов в воде исследуемых озер в марте 2022 г.

Table 2. Concentration of the main ions in the water of the studied lakes in March 2022

| Озеро Lake | Единицы измерения Units | HCO ₃ ⁻ | Cl ⁻ | SO ₄ ²⁻ | Na ⁺ | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | K ⁺ | Минерализация, мг/л Mineralization, mg/l |
|--------------------------|----------------------------|-------------------------------|--------------------------|-------------------------------|--------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------|---|
| Масельгское Maselga | мг/л mg/l | 24,70* 18,91-34,16 | 0,49 0,45-0,63 | 1,15 0,52-1,26 | 1,08 0,99-1,23 | 7,74 7,20-9,89 | 2,56 2,45-2,78 | 0,46 0,42-0,60 | 38,18 |
| | мг-экв/л mg-eq/l | 0,40 0,31-0,56 | 0,01 0,01-0,02 | 0,02 0,01-0,03 | 0,05 0,04-0,05 | 0,39 0,36-0,49 | 0,21 0,20-0,23 | 0,01 0,01 | |
| | %-экв** | 91,55 88,84-92,55 | 3,12 2,63-3,78 | 5,33 2,15-7,52 | 7,24 5,52-8,32 | 58,66 56,95-63,38 | 32,32 29,69-32,52 | 1,76 1,41-2,43 | |
| Пижихерье Pezhikherie | мг/л mg/l | 19,22 14,60-35,04 | 0,43 0,42-0,51 | 1,16 0,73-1,37 | 1,01 0,94-1,06 | 6,99 6,73-8,36 | 2,34 2,24-2,39 | 0,46 0,40-0,58 | 31,61 |
| | мг-экв/л mg-eq/l | 0,32 0,24-0,58 | 0,01 0,01 | 0,02 0,02-0,03 | 0,04 0,04-0,05 | 0,35 0,34-0,42 | 0,20 0,19-0,20 | 0,01 0,01 | |
| | %-экв | 89,96 84,83-95,55 | 3,47 1,95-5,08 | 6,57 2,51-10,09 | 7,21 6,44-7,92 | 58,52 57,81-61,88 | 32,28 29,48-32,62 | 1,95 1,70-2,20 | |
| | %-eq | | | | | | | | |
| Лёкшозеро Lyokshozero | мг/л mg/l | 47,58 43,31-100,04 | 0,64 0,53-0,97 | 1,23 0,71-1,40 | 1,93 1,84-2,85 | 15,18 13,83-19,71 | 4,99 4,57-7,10 | 0,55 0,50-0,67 | 72,1 |
| | мг-экв/л mg-eq/l | 0,78 0,71-1,64 | 0,02 0,01-0,03 | 0,03 0,01-0,03 | 0,09 0,08-0,12 | 0,76 0,69-0,99 | 0,42 0,38-0,59 | 0,01 0,01-0,02 | |
| | %-экв | 94,80 93,95-97,50 | 2,05 1,62-2,50 | 3,15 0,88-3,56 | 6,70 6,44-7,22 | 59,60 57,41-59,65 | 32,60 32,36-34,46 | 1,10 0,91-1,27 | |
| | %-eq | | | | | | | | |

Примечание. *В числителе – среднее значение (медиана), в знаменателе – минимальное-максимальное значения; **%-экв рассчитан от суммы анионов и катионов раздельно.

Note. *In the numerator – average value (median), in the denominator – minimum-maximum values; **%-eq is calculated from the sum of anions and cations separately.

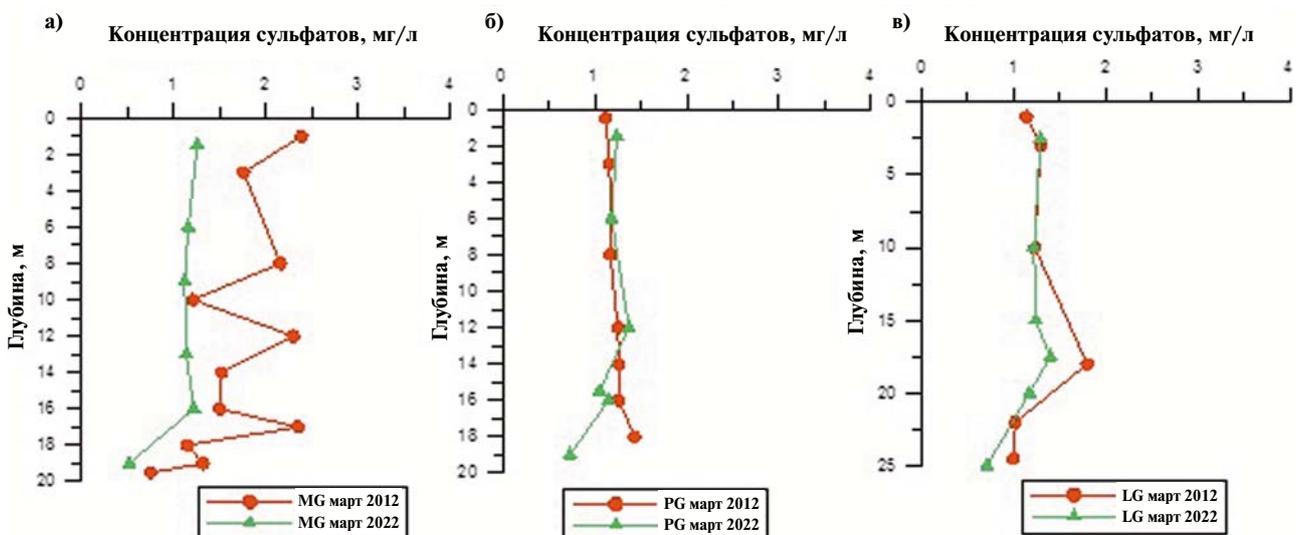


Рис. 3. Вертикальное распределение содержания сульфатов в воде озер

Fig. 3. Vertical distribution of sulfate content in lake water

оз. Масельгское отмечены чуть большие концентрации сульфатов в 2012 г. и неравномерное изменение их содержания по столбу воды (рис. 1, а). Небольшое увеличение отмечено для горизонтов 12 и 17 м в 2012 г. и 16 м в 2022 г.

Стоит упомянуть, что на уровне 12 м в оз. Масельгское зафиксирован максимум содержания сульфатов по сравнению с прилегающими слоями водной толщи, в 2 раза превышающий среднюю концентрацию этих ионов в верхних слоях воды данной глубоководной станции. Эта особенность связана, предположительно, с деятельностью фототрофных серных бактерий, окисляющих диффундирующий сероводород, в том числе и до сульфатов. Подтверждением может служить тот факт, что в проведенных нами ранее исследованиях для глубоководной станции оз. Масельгское зафиксировано присутствие небольшого количества элементарной серы в аэробной зоне. Эта форма серы образуется непосредственно в результате окисления сероводорода. Указанный горизонт воды расположен между аэробной и анаэробной зонами (микроаэрофильная зона) и служит нижней границей фотического слоя, то есть здесь создаются условия, оптимальные для развития данного вида микроорганизмов. Для оз. Лёкшмозеро таким горизонтом является глубина 16 м. В обоих случаях над граничными слоями наблюдалось некоторое снижение содержания кислорода и отклонение тенденции исчерпания кислорода от прямой линии (рис. 2, а, в). Так как в ходе исследований отмечено наличие анаэробных

условий в нижних слоях воды всех исследованных озер и снижение количества сульфатов, то в них можно ожидать протекание процесса сульфатредукции.

Значения pH воды всех исследованных нами озер близки к нейтральной среде (в среднем от 6,90 до 6,95). Такие условия благоприятствуют жизнедеятельности сульфатредуцирующих бактерий [Волков, 1984]. В аэробной зоне концентрация сероводорода была минимальная (рис. 4), что вполне закономерно, поскольку сульфатредуцирующие бактерии осуществляют свою жизнедеятельность в анаэробных условиях. ПДК этого показателя для водоемов рыбохозяйственного назначения составляет 5 мг/л [Приказ..., 2016]. В бескислородных условиях изученных озер в 2022 г. отмечено следующее содержание сероводорода: оз. Масельгское – до 50 мг/л, оз. Пижихерье – до 100 мг/л и небольшое количество в оз. Лёкшмозеро – до 12 мг/л (рис. 4). Для глубоководных станций озер Масельгское и Пижихерье не отмечено снижения количества сероводорода в придонных слоях, в оз. Лёкшмозеро его количество за прошедший период осталось незначительным.

На протекание микробиологических процессов существенное влияние также оказывает цветность воды. Этот показатель для оз. Лёкшмозеро изменялся незначительно, от 3 до 10 градусов вплоть до дна, для оз. Масельгское и Пижихерье изменения окраски воды были от 27 до 54 и от 30 до 38 градусов соответственно. Исследованные нами озера по степени окрашенности (град.) их вод

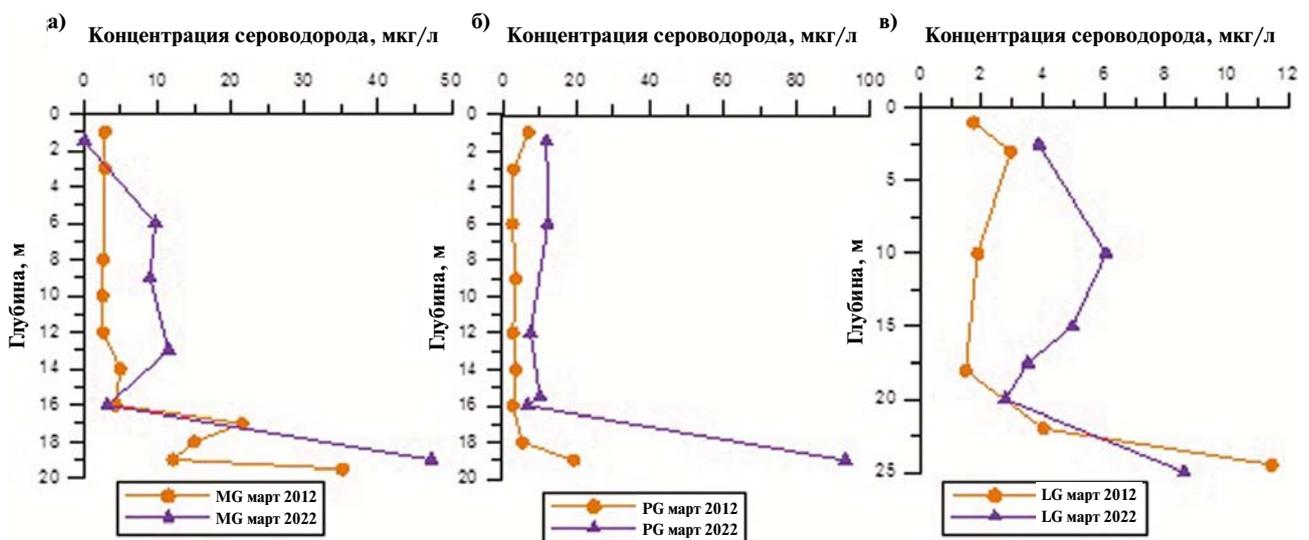


Рис. 4. Вертикальное распределение содержания сероводорода в воде озер
Fig. 4. Vertical distribution of hydrogen sulfide content in lake water

без учета придонных слоев по [Фортунатов, 1959] относились к следующим группам: почти лишённые окраски (0–19) – озеро Лёкшмозеро; слабоокрашенные (20–40) – оз. Пижихерье, среднеокрашенные (40–59) – оз. Масельгское. Но в придонных слоях цветность воды озера Масельгское и Пижихерье значительно возрастала – до 205 и 100 градусов соответственно, и такие воды можно отнести уже к категориям: темноокрашенные (100–199) – оз. Пижихерье и исключительно темноокрашенные (более 200) – оз. Масельгское. Таким образом, наиболее окрашенными были воды оз. Масельгское. Как известно, цветность воды определяется в основном содержанием органического вещества (гуминовых кислот) и железа. По общему содержанию растворенного органического углерода, по которому оценивалась величина содержания органического вещества, воды всех исследованных нами озер относились к категориям с низким и средним его содержанием [Китаев, 2007]. При этом во всех озерах наблюдалось увеличение концентраций углерода (мг/л) от поверхностных слоев к придонным: от 5 до 9 (среднее содержание 4,50) в оз. Лёкшмозеро, от 8 до 12 (9,48) в оз. Масельгское, от 9 до 12 (9,87) в оз. Пижихерье. Рассматривая корреляционную взаимосвязь между цветностью и содержанием органического вещества, можно отметить, что наименьшее влияние этот показатель оказывает на окраску воды оз. Лёкшмозеро ($r^2 = 0,50$), существенное влияние – оз. Масельгское ($r^2 = 0,89$) и почти полностью обуславливает цвет воды оз. Пижихерье ($r^2 = 0,97$);

остальной вклад в цветность вносят соединения железа.

Концентрация растворенного железа во всех озерах в аэробной зоне не превышала 400 мкг/л (рис. 5), при этом в анаэробной зоне содержание железа резко возрастало и практически на 100 % было представлено восстановленной его формой. Максимальное количество железа зафиксировано в придонном слое оз. Масельгское (рис. 5, а) в оба периода исследований. В 2012 г. эта величина достигала 38 000 мкг/л. Возможно, в это значение вносят вклад некие методические ошибки отбора, например, попадание в растворенную фракцию более крупных коллоидных частиц, но доминирование в этой величине восстановленной формы железа все-таки говорит о близости результата к достоверному. В 2022 г. эта величина снизилась до 17 000 мкг/л, но все еще остается очень большой. Для оз. Пижихерье содержание железа в придонном слое, напротив, увеличилось от 2000 до 5500 мкг/л (рис. 5, б). В оз. Лёкшмозеро концентрация растворенного железа достигала значений 1250 мкг/л (рис. 5, в). Во всех исследованных нами озерах Архангельской области содержание железа не превышало 1000 мкг/л. Значительное количество (до 6000 мкг/л) его было обнаружено в воде оз. Нижнее (Коношский район), испытывающего антропогенное воздействие, результатом которого является создание строго анаэробных условий в придонном слое воды [Титова и др., 2015], и оз. Светлое, где в придонных слоях (глубина 39 м) содержание железа возрастает до 12 000 мкг/л [Кокрятская и др., 2019],

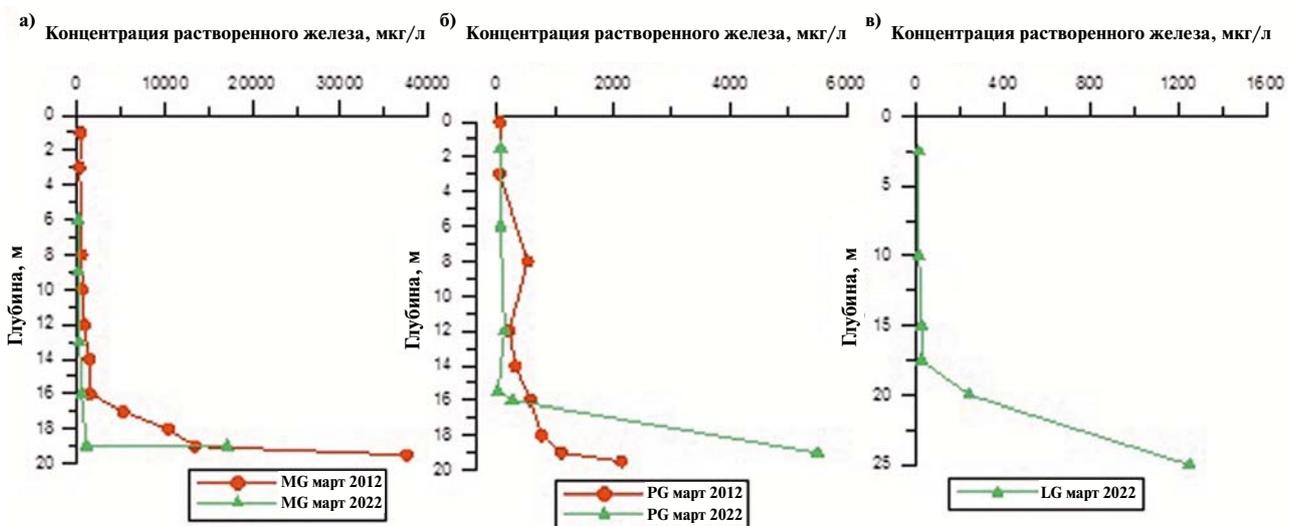


Рис. 5. Вертикальное распределение содержания растворенного железа в воде озер
 Fig. 5. Vertical distribution of dissolved iron content in lake water

но этот водоем является уникальным меромиктическим специфического железо-марганцевого типа [Чупаков и др., 2013].

В ходе гидрохимических исследований 2007–2012 гг. установлено, что в воде исследованных озер Кенозерского национального парка существует довольно устойчивая пространственно-временная цикличность динамики содержания соединений азота [Воробьева и др., 2012]. Значения средневзвешенных концентраций общего азота и фосфора колеблются в пределах, характерных для мезотрофных водоемов [Воробьева и др., 2013].

Среднее содержание минерального фосфора в марте 2022 г. было наименьшим в оз. Пежихерье – 3 мкг/л, немного выше в оз. Лёкшмозеро – 5 мкг/л (для обоих озер изменялось незначительно по водному столбу) и в оз. Масельгское – 9 мкг/л, но в придонном слое этого водоема его количество достигало 49 мкг/л. В озерах Пежихерье и Лёкшмозеро почти весь фосфор был связан с органическим веществом, на долю минерального фосфора (фосфатов) приходилось 7 и 16 % от общего его содержания даже в придонных слоях воды. В оз. Масельгское в аэробной зоне около 50 % фосфора связано с органическим веществом, а в анаэробном слое почти весь фосфор был в минеральной форме (96 %). Согласно [Приказ..., 2016] в водоемах рыбохозяйственного назначения количество фосфатов не должно превышать 50 мкг/л (для олиготрофных водоемов) и 150 мкг/л (для мезотрофных), следовательно, превышения ПДК не зафиксировано. По максимальному содержанию общего фосфора (мкг/л) [Китаев, 2007, 2012] трофность исследуемых нами озер классифицируется следующим образом: олиготрофные (6,25–25) – оз. Лёкшмозеро, Пежихерье; α -мезотрофные (25–49) – оз. Масельгское.

Общее содержание минеральных форм азота (как и их составляющих) в воде всех исследованных озер увеличивалось от поверхностных горизонтов к придонным (мкгN/л): для оз. Лёкшмозеро – от 104 до 1373, оз. Масельгское – от 360 до 1500 и оз. Пежихерье – от 157 до 404. В аэробных условиях всех озер доминирующей формой среди минеральных соединений выступали нитраты. В придонных бескислородных слоях отмечена тенденция увеличения содержания ионов аммония – в озерах Пежихерье и Лёкшмозеро его концентрация была немного меньше по сравнению с нитратами, а для оз. Масельгское – почти в 2 раза больше (790 и 420 мкгN/л соответственно). Во всех исследованных озерах в направлении ко дну снижается содержание

органических форм азота и его доля от общего содержания азота в воде, при этом доля минеральных форм возрастает до 80–93 %.

Используя максимальное содержание общего азота (мкгN/л) в качестве критерия, исследованные водоемы по уровню трофности можно классифицировать так [Китаев, 2007, 2012]: α -мезотрофные (650–1300) – оз. Пежихерье (1100); эвтрофные (1300–2600) – оз. Масельгское и Лёкшмозеро (1500 и 1470). По усредненным значениям этого показателя озера относятся к мезотрофным водоемам. Содержание кремния также увеличивается к придонным слоям, при этом в оз. Лёкшмозеро его количество у дна почти в 2 раза выше, чем в озерах Масельгское и Пежихерье (4600 и 2100 мкг/л соответственно).

Заключение

В ходе исследований, направленных на выявление специфики поведения элементов биогеохимического цикла серы в воде озер Кенозерского национального парка в зимний период, получены следующие результаты. Границы аэробно-анаэробных зон в воде озер и трофический статус водоемов после завершения исследований 2007–2012 гг. практически не изменились. В межгодовом аспекте увеличилось содержание сероводорода в придонных слоях озер Масельгское и Пежихерье. Отмечено протекание процессов анаэробной минерализации органического вещества по содержанию сероводорода и аммония, наиболее активны они в придонных слоях оз. Масельгское. Для сохранения экосистем исследованных озер в таком же состоянии и во избежание ухудшения ситуации следует обратить внимание на глубоководные участки оз. Масельгское и проводить периодические исследования.

Авторы благодарят директора национального парка «Кенозерский» Е. Ф. Шатковскую за возможность проведения исследований и пользования ресурсами парка, а также сотрудников парка за помощь в экспедиционных работах.

Литература

Алекин О. А. Основы гидрохимии. Л.: Гидрометеоиздат, 1953. 296 с.

Беляев С. С., Леин А. Ю., Иванов М. В. Роль метанообразующих и сульфатредуцирующих бактерий в процессах деструкции органического вещества // Геохимия. 1981. № 3. С. 437–445.

Волков И. И. Геохимия серы в осадках океана. М.: Наука, 1984. 272 с.

Воробьева Т. Я., Морева О. Ю., Собко Е. И., Широкова Л. С., Забелина С. А., Климов С. И., Шорина Н. В., Покровский О. С., Ершова А. А., Чулаков А. В. Оценка экологического состояния озер Кенозерского национального парка (Архангельская область) // Известия Самарского научного центра РАН. 2013. Т. 15, № 3(2). С. 825–831.

Воробьева Т. Я., Ершова А. А., Морева О. Ю., Чулаков А. В., Забелина С. А., Климов С. И. Микробиологические и гидрохимические аспекты круговорота азота в озерах Кенозерского национального парка // Вестник САФУ. 2012. № 4. С. 13–21.

Глобальный биогеохимический цикл серы и влияние на него деятельности человека / Ред. акад. Г. К. Скрябин. М.: Наука, 1983. 424 с.

ГОСТ 31861–2012. Вода. Общие требования к отбору. Введен 2012-11-25. М.: Стандартинформ, 2013. 36 с.

ГОСТ 31868–2012. Вода. Методы определения цветности. Введен 2014–01–01. М.: Стандартинформ, 2019. 12 с.

ГОСТ 31957–2012. Вода. Методы определения щелочности и массовой концентрации карбонатов и гидрокарбонатов. Введен 2014–01–01. М.: Стандартинформ, 2013. 30 с.

Драбкова В. Г., Сорокин И. Н. Озеро и его водосбор – единая природная система. Л.: Наука, 1979. 195 с.

Иванов П. В. Классификация озер по величине и по их средней глубине // Вестник ЛГУ. 1948. № 21. С. 29–36.

Кенозерский национальный парк. Общая информация. [Электронный ресурс] URL: <http://www.kenozero.ru/o-parke/materialy/obshchaya-informatsiya/> (дата обращения: 15.12.2022).

Китаев С. П. Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2007. 395 с.

Китаев С. П. Типизация озерных экосистем по трофическому статусу // Органическое вещество и биогенные элементы во внутренних водоемах и морских водах: Мат-лы всерос. симпоз. с междунар. участием (Петрозаводск, 10–14 сентября 2012 г.). Петрозаводск, 2012. С. 387–391.

Кокрятская Н. М., Чулаков А. В., Титова К. В., Чулакова А. А., Забелина С. А., Морева О. Ю., Неверова Н. В., Жибарева Т. А. Гидролого-гидрохимические характеристики меромиктического железо-марганцевого пресноводного озера Светлое (Архангельская область) // Журнал Сибирского федерального университета. Сер. Биол. 2019. Т. 12, № 2. С. 147–159. doi: 10.17516/1997-1389-0036

Кононец М. Ю., Пахомова С. В., Розанов А. Г., Проскурнин М. А. Определение растворенных форм железа в морской воде с помощью феррозина // Журнал аналитической химии. 2002. Т. 57, № 7. С. 704–708.

Кузнецов С. И. Роль микроорганизмов в круговороте веществ в озерах. М.: Изд-во АН СССР, 1952. 300 с.

Морева О. Ю., Климов С. И., Воробьева Т. Я. Гидролого-гидрохимические исследования озер южной части Кенозерского национального пар-

ка // Проблемы региональной экологии в условиях устойчивого развития: Мат-лы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием: в 2 ч. Вып. 5. (Киров, 27–29 ноября 2007 г.). Киров, 2007. С. 59–63.

Намсараев Б. Б., Земская Т. И. Микробиологические процессы круговорота углерода в донных осадках озера Байкал. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2000. 160 с.

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. Введен 1998-04-02. Переиздан 2008-01-01. М.: Гос. комитет РФ по охране окр. среды, 2008. 21 с.

Приказ Минсельхоза 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». (Зарегистрировано в Минюсте России 13.01.2017 N 45203). М.: Минсельхоз, 2016. 91 с.

РД 52.24.450-2010. Массовая концентрация сероводорода и сульфидов в водах. Методика выполнения измерений фотометрическим методом с N,N-диметил-п-фенилендиамином. Ростов-на-Дону: Росгидромет, 2010. 50 с.

Руководство по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоемов и перспективных для промысла районов Мирового океана. М.: Изд-во ВНИРО, 2003. 202 с.

СанПиН 2.1.4.1074–01. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. Введен впервые 2002-01-01. М.: Минздрав РФ, 2001. 61 с.

Тимофеева С. С., Ошаров А. Б., Бейм А. М. Экологическая химия сернистых соединений. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 1991. 134 с.

Титова К. В., Кокрятская Н. М. Оптимизация методики определения растворенного железа с использованием феррозина в пресноводных озерах // Вода. Химия и экология. 2013. № 10. С. 85–89.

Титова К. В., Кокрятская Н. М., Панова Т. А. Процесс сульфатредукции в воде гидрографически связанных озер Нижнее и Верхнее (Архангельская область), отличающихся степенью антропогенной нагрузки // Современные проблемы гидрохимии и мониторинга качества поверхностных вод: Мат-лы науч. конф. с междунар. участием. Часть 1. (Ростов-на-Дону, 8–10 сент. 2015 г.). Ростов-на-Дону, 2015. С. 127–131.

Фортунатов М. А. Цветность и прозрачность воды Рыбинского водохранилища как показатель его режима // Труды Ин-та биологии водохранилищ АН СССР. 1959. Вып. 2(25). С. 246–357.

Хатчинсон Д. Лимнология: Географические, физические и химические характеристики озер / Пер. с англ. Г. В. Цыцарина и Г. Г. Шинкар. М.: Прогресс, 1969. 592 с.

Чупаков А. В., Покровский О. С., Широкова Л. С., Воробьева Т. Я., Забелина С. А., Кокрятская Н. М., Морева О. Ю., Ершова А. А., Шорина Н. В., Климов С. И. Гидрохимические особенности пресноводного меромиктического оз. Светлое (Архангельская область) // Вестник САФУ. 2013. № 1. С. 20–31.

Шатковская Е. Ф., Торхов С. В., Тормосов Д. В., Синяговский С. А., Козыкин А. В., Болотов И. Н., Хохлова Т. Ю. Природное и культурное наследие Кенозерского национального парка: сб. науч. ст. Петрозаводск: ПетроПресс, 2002. 175 с.

Широкова Л. С., Воробьева Т. Я., Забелина С. А., Морева О. Ю., Климов С. И. Характеристика продукционно-деструкционных процессов малых озер Архангельской области // Современные проблемы науки и образования. 2008. № 5. С. 17–24.

References

Alekin O. A. Fundamentals of hydrochemistry. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1953. 296 p. (In Russ.)

Belyaev S. S., Lein A. Yu., Ivanov M. V. The role of methane-forming and sulfate-reducing bacteria in the processes of organic matter degradation. *Geokhimiya = Geochemistry*. 1981;3:437–445. (In Russ.)

Chupakov A. V., Pokrovskii O. S., Shirokova L. S., Vorob'eva T. Ya., Zabelina S. A., Kokryatskaya N. M., Moreva O. Yu., Ershova A. A., Shorina N. V., Klimov S. I. Hydrochemical features of freshwater meromictic Lake Svetloe (Arkhangelsk Region). *Vestnik SAFU = Bulletin of NArFU*. 2013;1:20–31. (In Russ.)

Drabkova V. G., Sorokin I. N. The lake and its catchment are a single natural system. Leningrad: Nauka; 1979. 195 p. (In Russ.)

Fortunatov M. A. Chromaticity and transparency of the water of the Rybinsk Reservoir as an index of its regime. *Trudy In-ta biologii vodokhranilishch AN SSSR = Transactions of the Institute of Biology of Water Reservoirs of the USSR Academy of Sciences*. 1959;2(25):246–357. (In Russ.)

GOST 31861–2012. Water. General requirements for sampling. Introduced 25.11.2012. Moscow: Standartinform; 2013. 36 p. (In Russ.)

GOST 31868–2012. Water. Methods for determination of colour. Introduced 01.01.2014. Moscow: Standartinform; 2019. 12 p. (In Russ.)

GOST 31957–2012. Water. Methods for determination of alkalinity and mass concentration of carbonates and hydrocarbonates. Introduced 01.01.2014. Moscow: Standartinform; 2013. 30 p. (In Russ.)

Guidance on the chemical analysis of marine and fresh waters in the ecological monitoring of fishery reservoirs and promising areas for fishing in the World Ocean. Moscow: VNIRO; 2003. 202 p. (In Russ.)

Hutchinson D. Limnology: Geographical, physical and chemical characteristics of lakes. Moscow: Progress; 1969. 592 p. (In Russ.)

Ivanov P. V. Classification of lakes by size and by their average depth. *Vestnik LGU = Bulletin of Leningrad State University*. 1948;21:29–36. (In Russ.)

Kenozersky National Park. General information. URL: <http://www.kenozero.ru/o-parke/materialy/obshchaya-informatsiya> (accessed: 12.15.2022). (In Russ.)

Kitaev S. P. Fundamentals of limnology for hydrobiologists and ichthyologists. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2007. 395 p. (In Russ.)

Kitaev S. P. Typification of lake ecosystems by trophic status. *Organicheskoe veshchestvo i biogennye elementy vo vnutrennikh vodoemakh i morskikh vodakh: Mat-ly vseros. simp. s mezhdunar. uchastiyem (Petrozavodsk, 10-14 sent. 2012 g.) = Organic matter and biogenic elements in inland waters and marine waters: Proceedings of the All-Russian symposium with international participation (Petrozavodsk, Sept. 10-14, 2012)*. Petrozavodsk; 2012. P. 387–391. (In Russ.)

Kokryatskaya N. M., Chupakov A. V., Titova K. V., Chupakova A. A., Zabelina S. A., Moreva O. Yu., Neverova N. V., Zhibareva T. A. Hydrological and hydrochemical characteristics of meromictic iron-manganese freshwater Lake Svetloe (Arkhangelsk Region). *Zhurnal Sibirskogo Federal'nogo Universiteta. Ser. Biologiya = Journal of the Siberian Federal University. Biology Series*. 2019;12(2):147–159. doi: 10.17516/1997-1389-0036 (In Russ.)

Kononets M. Yu., Pakhomova S. V., Rozanov A. G., Proskurnin M. A. Determination of dissolved forms of iron in sea water using ferrozine. *Zhurnal analiticheskoi khimii = Journal of Analytical Chemistry*. 2002;57(7):704–708. (In Russ.)

Kuznetsov S. I. The role of microorganisms in the cycle of substances in lakes. Moscow: USSR Academy of Sciences; 1952. 300 p. (In Russ.)

Moreva O. Yu., Klimov S. I., Vorobieva T. Ya. Hydrological and hydrochemical studies of the lakes of the southern part of the Kenozersky National Park. *Problemy regional'noi ekologii v usloviyakh ustoychivogo razvitiya: Mat-ly vseros. nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiyem: v 2 ch. Vyp. 5. (Kirov, 27-29 noyabrya 2007 g.) = Problems of regional ecology in the context of sustainable development: Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference with international participation: in 2 parts. Iss. 5. (Kirov, 2007, Nov. 27-29, 2007)*. Kirov; 2007. P. 59–63. (In Russ.)

Namsaraev B. B., Zemskaya T. I. Microbiological processes of carbon cycle in the bottom sediments of Lake Baikal. Novosibirsk: SO RAN, Geo; 2000. 160 p. (In Russ.)

Order of the Ministry of Agriculture of Russia N 552 dated December 13, 2016 'On approval of water quality standards water bodies of fishery significance, including the standards for maximum permissible concentrations of harmful substances in the waters of water bodies of fishery significance' (Registered in the Ministry of Justice of Russia on January 13, 2017 N 45203). Moscow: Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation, 2016. 91 p.

PND F 14.1:2:4.132-98. Quantitative chemical analysis of water. Methods for measuring the mass concentration of anions: nitrite, nitrate, chloride, fluoride, sulfate and phosphate in samples of natural, drinking and waste water using ion chromatography. Introduced 02.04.1998-04-02. Rev. 01.01. 2008. Moscow; 2008. 21 p. (In Russ.)

RD 52.24.450-2010. Mass concentration of hydrogen sulfide and sulfides in waters. Methods of measurement using photometric method with N, N-dimethyl-

n-phenylenediamine. Rostov-on-Don: Roshydromet, 2010. 50 p. (In Russ.)

SanPiN 2.1.4.1074–01. Drinking water. Hygienic regulations of the water quality of centralized drinking water supply system. Quality control. Sanitary and epidemiological rules and regulations. Introduced 01.01.2002. Moscow: Ministry of Health of the RF, 2001. 61 p. (In Russ.)

Shatkovskaya E. F., Torkhov S. V., Tormosov D. V., Sinyagovskii S. A., Kozykin A. V., Bolotov I. N., Khokhlova T. Yu. Natural and cultural heritage of the Kenozersky National Park: collected papers. Petrozavodsk: Petro-Press; 2002. 175 p. (In Russ.)

Shirokova L. S., Vorob'eva T. Ya., Zabelina S. A., Moreva O. Yu., Klimov S. I. Description of production-destructive processes of small lakes in the Arkhangelsk Region. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* = *Current Issues of Science and Education*. 2008;5: 17–24. (In Russ.)

Skryabin G. K. (ed). Global biogeochemical cycle of sulfur and the impact of human activity on it. Moscow: Nauka; 1983. 424 p. (In Russ.)

Timofeeva S. S., Osharov A. B., Beim A. M. Ecological chemistry of sulfur compounds. Irkutsk: Irkutsk Univ.; 1991. 134 p. (In Russ.)

Titova K. V., Kokryatskaya N. M. Optimization of the method for determining dissolved iron in freshwater lakes with the use of ferrozine. *Voda. Khimiya i ekologiya* = *Water. Chemistry and Ecology*. 2013;10:85–89. (In Russ.)

Titova K. V., Kokryatskaya N. M., Panova T. A. The process of sulfate reduction in the water of hydrographically connected Lakes Lower and Upper (Arkhangelsk Region), differing in the degree of anthropogenic load. *Sovremennye problemy gidrokhimii i monitoringa kachestva poverkhnostnykh vod: Mat. nauch. konf. s mezhdunar. uchastiyem. Chast' 1. (Rostov-na-Donu, 8-10 sent. 2015 g.)* = *Current issues of hydrochemistry and monitoring of surface water quality: Proceedings scientific conference with international participation. Part 1. (Rostov-on-Don, Sept. 8-10, 2015)*. Rostov-on-Don; 2015. P. 127–131. (In Russ.)

Volkov I. I. Geochemistry of sulfur in ocean sediments. Moscow: Nauka; 1984. 272 p. (In Russ.)

Vorob'eva T. Ya., Ershova A. A., Moreva O. Yu., Chupakov A. V., Zabelina S. A., Klimov S. I. Microbiological and hydrochemical aspects of the nitrogen cycle in the lakes of the Kenozero National Park. *Vestnik SAFU = Bulletin of NArFU*. 2012; 4:13–21. (In Russ.)

Vorob'eva T. Ya., Moreva O. Yu., Sobko E. I., Shirokova L. S., Zabelina S. A., Klimov S. I., Shorina N. V., Pokrovskii O. S., Ershova A. A., Chupakov A. V. Evaluation of the ecological state of the lakes of the Kenozersky National Park (Arkhangelsk Region). *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk = Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2013;15(3-2): 825–831. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 30.01.2023; принята к публикации / accepted: 27.04.2023.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Титова Ксения Владимировна

канд. геогр. наук, старший научный сотрудник
лаборатории экоаналитических исследований

e-mail: ksyu_sev@mail.ru

Кокрятская Наталья Михайловна

канд. геол.-мин. наук, заведующая лабораторией
экоаналитических исследований

e-mail: nkokr@yandex.ru

Попов Сергей Сергеевич

младший научный сотрудник лаборатории
экоаналитических исследований

e-mail: sergey.sergeevich20@gmail.com

Морева Ольга Юрьевна

научный сотрудник лаборатории пресноводных
и морских экосистем

e-mail: mapycr1@yandex.ru

Брагин Альберт Владимирович

начальник отдела изучения и интерпретации историко-
культурного наследия

e-mail: birdkenozero@gmail.com

CONTRIBUTORS:

Titova, Ksenia

Cand. Sci. (Geogr.), Senior Researcher, Eco-analytics
Laboratory

Kokryatskaya, Natalia

Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Head of Eco-analytics Laboratory

Popov, Sergey

Junior Researcher, Eco-analytics Laboratory

Moreva, Olga

Researcher, Laboratory of Freshwater and Marine Ecosystems

Bragin, Albert

Head of the Department for the Study and Interpretation of
Historical and Cultural Heritage