

УДК 556.314 : 550.47

## СУЛЬФАТРЕДУКЦИЯ В ВОДЕ И ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ОЗЕРА БЕЛОЕ (АРХАНГЕЛЬСКАЯ ОБЛАСТЬ)

К. В. Титова\*, Н. М. Кокрятская, Т. А. Жибарева

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

Представлены результаты исследования сульфатредукции в воде и донных отложениях малого пресноводного озера Белое (Коношский район Архангельской области) за период с 2009 по 2017 год. Воды озера относятся к гидрокарбонатному типу кальциевой группы по классификации Алекина. В зимний период во все годы исследования отмечалось наличие анаэробных условий в воде оз. Белое вплоть до полного исчерпания кислорода по всему водному столбу. Несколько повышенные концентрации сульфатов в воде исследуемого водоема (до 30 мг/л) наблюдаются в зимний период. Данная обстановка повлияла на протекание сульфатредукции в воде и донных отложениях. Наблюдалась межсезонная и межгодовая изменчивость показателей сульфатредукции в озере. Максимально установленная концентрация сероводорода в воде в подледный период составляла 405 мкг/л (при ПДК<sub>рх</sub> 5 мкг/л), а наибольшее количество соединений восстановленной серы (производных сероводорода) в донных отложениях – 7,33 % (в расчете на сухое вещество осадков), или 73 % от общего количества серы. В летний период в воде сероводород не был зафиксирован из-за аэрации водной толщи этого неглубокого водоема. На активность сульфатредукции в оз. Белое указывает и расход органического углерода: так, расход на образование соединений восстановленной серы составил в среднем 1,42 % по сравнению с расходом на восстановление железа – 0,14 %.

Ключевые слова: биогеохимические процессы; восстановление сульфатов; реакционноспособное железо; донные отложения; малые озера

Для цитирования: Титова К. В., Кокрятская Н. М., Жибарева Т. А. Сульфатредукция в воде и донных отложениях озера Белое (Архангельская область) // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 2. С. 51–61. doi: 10.17076/lim1974

Финансирование. Исследование выполнено в рамках госзадания ФИЦКИА УрО РАН.

### K. V. Titova\*, N. M. Kokryatskaya, T. A. Zhibareva. SULFATE REDUCTION IN WATER AND SEDIMENTS OF LAKE BELOYE (ARKHANGELSK REGION)

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

The article presents the results of a study of sulfate reduction in the water and sediments of a small freshwater Lake Beloye (Konoshsky district, Arkhangelsk region)

for the period from 2009 to 2017. The lake water belongs to the bicarbonate type of the calcium group according to Alekin's classification. In winter, anoxic conditions were observed in the water of Lake Beloye in all years of the study, up to total oxygen depletion throughout the water column. The slightly elevated concentrations of sulfates in the lake water (up to 30 mg/l) in winter are due to the inflow of water draining the underlying sulfate rocks. This situation affected the process of sulfate reduction both in the water and in sediments of the lake. Sulfate reduction indices showed interseasonal and interannual variations. The highest recorded concentration of hydrogen sulfide in water during the ice-covered period was 405 µg/l (the maximum permissible concentration for fisheries reservoirs being 5 µg/l), and the highest amount of reduced sulfur compounds (hydrogen sulfide derivatives) in sediments was 7.33 % (based on sediment dry matter) or 73 % of the total sulfur. No hydrogen sulfide was detected in water during the summer due to aeration of the water column of this shallow lake. The activity of sulfate reduction in Lake Beloye is also indicated by the consumption of organic carbon, which amounted to an average of 1.42 % for the formation of reduced sulfur compounds versus 0.14 % consumption for iron reduction.

**Keywords:** biogeochemical processes; sulfate reduction; reactive iron; sediments; small lakes

For citation: Titova K. V., Kokryatskaya N. M., Zhibareva T. A. Sulfate reduction in water and sediments of Lake Beloye (Arkhangelsk Region). *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2025. No. 2. P. 51–61. doi: 10.17076/lim1936

**Funding.** The study was carried out under state assignment to FCIAR UB RAS.

## Введение

Формирование донных отложений озер происходит в результате сложного взаимодействия разнообразных природных процессов: климатических, гидрологических, физических, химических и биологических, протекающих во времени как на водосборной площади, так и в самом озере [Дауальтер, 2012]. Донные отложения неглубоких, небольших по площади слабопроточных водоемов характеризуются накоплением значительной органической составляющей. Летом озера хорошо прогреваются и в них интенсивно развивается жизнь. Летом и осенью при отмирании планктона пополняется органическое вещество (ОВ). В прибрежных участках донные отложения пополняются ОВ также за счет высшей растительности. В результате деятельности некоторых групп микроорганизмов ОВ в грунтах подвергаются деструкции и минерализации. В том случае, когда при стагнации в нижних слоях воды и донных отложениях создаются анаэробные условия, ОВ подвергается деструкции определенными видами бентосного микробного сообщества, в основном бродильщиками, сульфатредукторами и метаногенами. Преобладание того или иного процесса в деструкции определяется внутриводоемными особенностями, и в первую очередь наличием определенных доноров и акцепторов электронов

для разных видов конкурирующих анаэробных организмов. Сульфатредуцирующие бактерии представляют собой анаэробные микроорганизмы, которые повсеместно распространены в бескислородных местах обитания, где присутствуют сульфаты. В пресноводных средах с низким содержанием сульфатов эти бактерии играют важную роль в ферментации и анаэробном окислении органических соединений, при этом они могут использовать сульфаты в качестве конечного акцептора электронов, в результате чего образуется сероводород. Восстановление сульфата может происходить и при относительно низких концентрациях сульфатов, характерных для пресных вод [Lovley, 1983], так как пресноводные штаммы сульфатредуцирующих бактерий обладают высоким сродством к сульфатам [Ingvorsen et al., 1981; Ingvorsen, Jørgensen, 1984; Li et al., 1996]. Поэтому указанные бактерии также играют важную роль в пресноводных водоемах, благодаря активному циклу серы в них [Holmer, Storkholm, 2001; Muyzer, Stams, 2008].

Исследование процесса сульфатредукции в малых пресноводных озерах начато коллективом авторов в 2007 году. За это время полученные результаты показали, что данный процесс протекает в той или иной мере во всех изученных водоемах Архангельской области. Среди многих факторов, влияющих на процесс сульфатредукции и, как следствие, на характер

накопления восстановленных соединений серы, можно выделить следующие [Волков, 1984; Holmer, Storkholm, 2001]:

1) содержание сульфатов (акцепторы электронов);

2) количество ОВ и его качественный состав (доноры электронов);

3) содержание реакционноспособных форм железа, так как железо может связывать образующий сероводород, что приводит к образованию и накоплению сульфидных форм серы в донных отложениях.

Изучение восстановления сульфатов в воде и/или донных отложениях разнотипных водоемов проводилось как отечественными, так и зарубежными исследователями [Матвеев и др., 1990; Волков, Демидова, 2003; Кокрятская и др., 2003; Пашкаускас и др., 2005; Каллистова и др., 2006; Борзенко, Замана, 2008; Jørgensen, Parkes, 2010; Кревш, Кучинскене, 2012]. Однако в указанных работах почти не затрагивался вопрос анаэробной минерализации ОВ в пресноводных маломинерализованных водоемах, подверженных антропогенному влиянию без прямого воздействия промышленных предприятий. Сульфатредукция в пресноводных озерах также редко становилась предметом лимнологических исследований, при этом даже при минимально обнаруживаемых концентрациях сульфатов этот процесс имел место [Li et al., 1996; Holmer, Storkholm, 2001].

Авторами работы ранее были исследованы маломинерализованные озера, в которых сульфатредукция протекала довольно активно (оз. Светлое, Нижнее, Масельское) [Титова, Кокрятская, 2013; Кокрятская и др., 2019; Титова и др., 2019]. При этом выделены водоемы, в которых фактором, сдерживающим интенсивное протекание процесса, выступали низкие концентрации сульфатов и недостаточное количество доступных для сульфатредуцирующих бактерий низкомолекулярных органических соединений [Титова, Кокрятская, 2014, 2018; Титова и др., 2023].

Целью настоящих исследований являлось изучение изменения активности процесса сульфатредукции в воде и донных отложениях малого пресноводного озера с повышенным содержанием сульфатов по накоплению соединений восстановленной серы в период с 2009 по 2017 год.

## Материалы и методы

Лимнологические исследования проводились на территории Коношского района Архангельской области. По стратиграфической

шкале слоев пород на территории Коношского района выделяют казанский ярус пермской системы  $P_2kz$  (270 млн лет назад), представленный карбонатными породами, в частности известняками. В состав четвертичных отложений на территории района входят ледниковые, водно-ледниковые, аллювиальные и болотные отложения от нижнечетвертичных до современных. Суммарная мощность отложений на некоторых участках достигает 100 м и определяется главным образом рельефом поверхности дочетвертичных пород [Атлас..., 1976].

Коношский район находится на древней (дорифейской) Русской (Восточно-Европейской) платформе. В геоморфологическом отношении территория района лежит в юго-западной части Онего-Двинско-Мезенской равнины. Рельеф района сложился в результате деятельности ледников в четвертичный период (около 1 млн лет назад). Сточки зрения геоморфологии преобладающими типами рельефа на данной местности являются плоская и волнистая моренная и озерно-ледниковая равнины, местами ледниковый и холмисто-грядовый моренный рельеф. Из моренных холмов и гряд сложена и Коношко-Няндомская возвышенность, которая тянется с юга на север со средней высотой 160 м. К востоку местность повышается. Наибольшая высота составляет 244 м над уровнем моря [Атлас..., 1976; Схема..., 2013]. Территория района расположена на водоразделе трех больших рек – Северной Двины, Онеги и Кубены. Водораздел между водосборами Онеги и Северной Двины (бассейн Белого моря) проходит в пгт Коноша [Схема..., 2013].

Почвенный покров территории представлен сильноподзолистыми почвами и подзолами, местами торфянисто-подзолисто-глеевыми, сформированными на суглинистой карбонатной морене [Атлас..., 1976].

Рельеф применительно к грунтовому водоносному комплексу определяет всю гидродинамическую обстановку: приуроченность областей преимущественной инфильтрации атмосферных осадков к водораздельным участкам; движение в направлении к долинам рек и котловинам озер, являющимся областями дренирования вод. Согласно гидрогеологическому районированию территория района приурочена к Северодвинскому артезианскому бассейну, подземные воды в разной степени распространены во всех генетических типах четвертичных отложений и в дочетвертичных породах. Воды типа «верховодки» содержатся в отложениях болотного и озерного генезиса, а также в песчаных линзах, развитых на ледниковых отложениях с поверхности,

и создают условия для широкого заболачивания местности. Водоносный горизонт верхне-казанских отложений приурочен к известнякам различной степени кавернозности и трещиноватости, развитых повсеместно с глубины 70–100 м [Схема..., 2013]. Мощность зоны пресных подземных вод на территории Коношского района преимущественно около 100 м, в долинах рек – около 50 м и местами до 25 м. В настоящее время эксплуатация водоносных комплексов осуществляется шахтными колодцами глубиной 5–20 м и скважинами глубиной от 40 до 70 м, реже до 100 м. Углубление скважин ниже указанных глубин не рекомендуется, так как снизу могут поступать воды с повышенной минерализацией и высокой жесткостью. Подземные воды на территории Коношского района пресные, гидрокарбонатные кальциевые. В неглубоких колонках и колодцах концентрация сульфатов не превышает 10 мг/л. В ряде скважин данной территории на глубине 100–140 м водовмещающие породы представлены гипсами, доломитами, ангидридами. Воды приобретают другой состав, а содержание сульфатов в них может увеличиваться до 1000 мг/л [Подземные..., 1968].

В областях с гумидным климатом, к которым относится и данная территория, влияние рельефа на химический состав грунтовых вод сказывается через гидродинамические и гидрогеологические показатели; так, сильная расчлененность рельефа обуславливает короткие пути фильтрации и высокую степень возобновляемости грунтовых вод, а это приводит к удалению из пород хорошо растворимых

веществ и поступление их в котловины озер [Схема..., 2013].

Объект исследования – оз. Белое, находится недалеко от д. Климовская Коношского района Архангельской области (рис. 1). Озеро относится к категории малых водоемов с площадью водного зеркала менее 1 км<sup>2</sup>: длина около 1,30 км, ширина – 0,22 км. Расположено на высоте 132 абс. м. Среднее озеро в системе Глубокое→Белое→Назаровское, соединено протоками с соседними водоемами.

По протеканию продукционно-деструкционных процессов, содержанию биогенных элементов показано, что на момент начала исследований на функционирование экосистемы оз. Белое оказывают воздействие только природные факторы, прямого антропогенного влияния не обнаружено [Широкова и др., 2008].

Глубоководные участки озера выделяли по результатам батиметрической съемки. Наибольшая глубина водоема не превышала 2,5 м.

Образцы донных отложений отбирались согласно требованиям [ГОСТ 17.1.5.01-80] в марте и июле 2009–2017 гг. на участке с максимальной глубиной, находящемся примерно посередине озера, в зимний период – со льда, в летний – с использованием лодки. Применялась гравитационная трубка диаметром 60 мм, погружающаяся в осадок до 1 м под действием собственного веса или специальных утяжеляющих грузов. Мощность отобранных отложений не превышала 50 см. Колонка осадков делилась сразу после отбора на слои по 5 см. Воды отбиралось не менее 3 образцов за сезон, донных отложений (слоев) – от 5 до 10 за сезон.

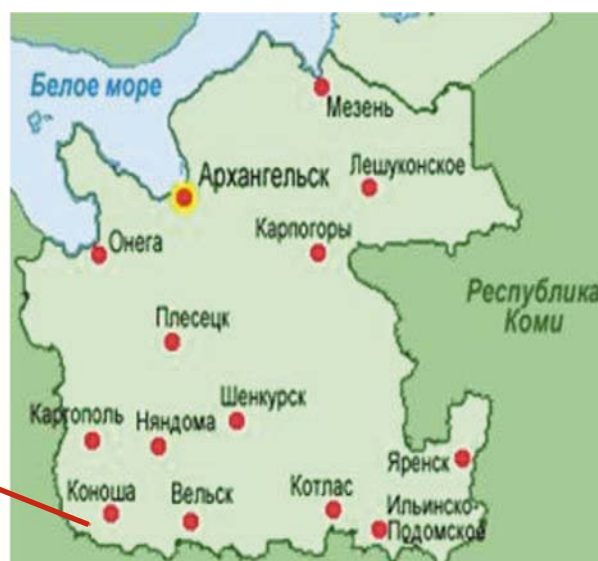
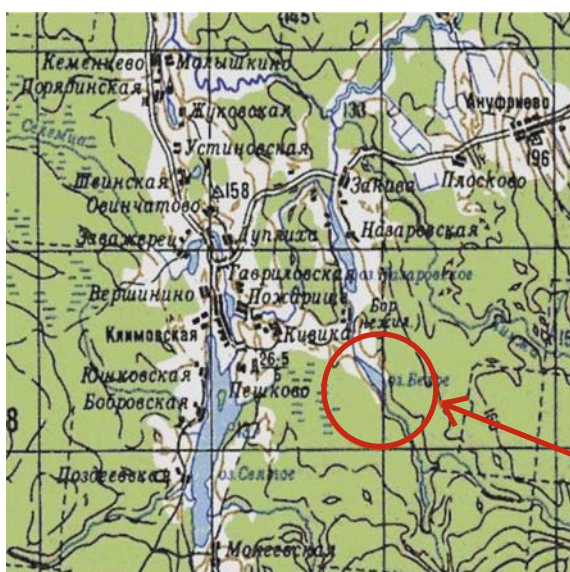


Рис. 1. Расположение объекта исследования

Fig. 1. Location of the study object



Определение органического углерода и азота проводили методом сухого сжигания с последующим газохроматографическим разделением газовой смеси на CHN-анализаторе фирмы «Hewlett-Packard» [Гельман и др., 1987]. Разделение продуктов пиролиза проводили на медной колонке, заполненной Порапаком-Q, с последующим детектированием по теплопроводности. Расчет процентного содержания органического углерода и органического азота в анализируемой пробе проводили с использованием градуировочных коэффициентов стандартных образцов.

Измерение растворенного в воде кислорода осуществлялось портативным оксиметром HQ30D.99 (Hach Lange) с люминесцентным датчиком начиная с 2014 года, до этого его содержание устанавливали скляночным методом Винклера. Отбор проб воды осуществлялся в соответствии с [ГОСТ 31861-2012], определение главных ионов, в том числе сульфатов – по [ПНД Ф 14.1:2:4.132-98].

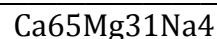
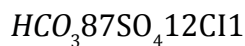
Определение различных форм серы проводили по методике систематического фазового анализа, разработанной в лаборатории геохимии Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН [Волков, Жабина, 1980]. Методика предусматривает определение сульфидной (кислоторастворимой), элементной, пиритной и органической форм серы из одной навески донных осадков. Расчет проводился на абсолютно сухое вещество. Определение реакционноспособных форм  $\text{Fe}^{2+}$  и  $\text{Fe}^{3+}$  проводили после извлечения их из осадка 3,5 N серной кислотой.  $\text{Fe(III)}$  определяли из аликвоты раствора титрованием 0,01 N  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  выделившегося  $\text{I}_2$  после взаимодействия  $\text{KI}$  с  $\text{Fe}^{3+}$ .  $\text{Fe(II)}$  – из другой аликвоты титрованием 0,01 N  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ . Содержание сульфидного железа рассчитывали по данным для сульфидной серы, исходя из формулы  $\text{FeS}$ ; пиритное железо – по содержанию пиритной серы. Содержание реакционноспособного железа ( $\text{Fe}_{\text{реакц}}$ ) получали в результате сложения вышеперечисленных форм [Соколов, 1980]:  $\text{Fe}_{\text{реакц}} = \text{Fe(II)} + \text{Fe(III)} + \text{Fe}_{\text{сульфид}} + \text{Fe}_{\text{пирит}}$ .

## Результаты и обсуждение

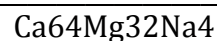
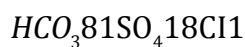
### Гидрохимические показатели

Минерализация воды оз. Белое в среднем составляла 160 мг/л, то есть данный водоем относится к категории ультрапресных. Показатель изменялся по сезонам (мг/л): зимой – 175 (161–200), летом – 153 (151–156); от поверхности ко дну наблюдалось увеличение солесодержания. Гидрохимический состав отражен в формулах:

Март: М 175; Ж 2,60; pH 6,0



Июль: М 153; Ж 1,71; pH 7,2



По распределению главных ионов вода оз. Белое относится к гидрокарбонатному классу группы кальция. В зимний период концентрации основных ионов, за исключением сульфатов, были выше летних. Концентрации хлоридов и натрия мало изменялись по сезонам. Заметно увеличение от поверхности ко дну концентраций гидрокарбонатов (от 180 до 230 мг/л), сульфатов (от 13 до 30 мг/л) и кальция (от 23 до 30 мг/л). Существенным было различие в жесткости воды: в среднем 2,65 ммоль/л в марте и 1,5 ммоль/л в июле. Содержание сульфатов в среднем составляло 13 мг/л зимой и 19 мг/л летом. Отмеченный максимум в придонных слоях – 30 мг/л. Для сравнения, в водах озер Кенозерского национального парка концентрация сульфатов составляет около 1 мг/л [Титова и др., 2018, 2023], озер Коношского района – 3,8 (оз. Святое) и 4,1 (оз. Нижнее) мг/л [Титова, Кокрятская, 2014].

В марте в воде оз. Белое наблюдалось исчерпание кислорода по всему водному столбу. В июле в разные годы содержание кислорода отличалось: в поверхностных слоях оно составляло 8–9 мг/л и постепенно снижалось в придонном слое до 2–3 мг/л. Полного исчерпания кислорода летом не наблюдалось из-за ветрового перемешивания водных масс этого мелководного водоема.

Зависимое от содержания кислорода и ОВ количество сероводорода также имело сезонные различия (мкг/л): зимой – 227 (от 160 до 405), летом – 6 (от 2 до 10). При этом концентрации органического углерода по сезонам отличались не столь значительно (мг/л): зимой – 18,66, уменьшаясь от поверхности ко дну с 18,85 до 18,57; летом – 17,88, увеличиваясь ко дну от 17,28 до 17,93.

Цветность воды зимой была выше, чем летом: 73,3 и 62,3 градуса соответственно. В марте ее изменение не носило согласованного характера с содержанием органического углерода, а летом взаимосвязь этих параметров была значима. В зимнюю межень в значение цветности воды ощутим вклад растворенного железа (в среднем его концентрация достигала 880 мкг/л), летом же из-за наличия

кислорода по всему водному столбу практически все растворенное железо (остаточное количество около 50 мкг/л) окислилось и в результате седиментации малорастворимых его соединений поступило в донные отложения.

Стоит отметить, что в исследуемые периоды практически не проявились сезонные различия в концентрации в воде озера взвешенных веществ (мг/л): 1,48 (1,43–1,65) в марте и 1,75 (1,64–1,90) в июле. В придонном горизонте они закономерно возрастали.

В зимний период углерод ( $C_{\text{орг}}$ ) и азот ( $N_{\text{орг}}$ ) имели тенденцию к снижению по водному столбу ( $C_{\text{орг}}$  и  $N_{\text{орг}}$  соответственно): 44 и 6 % в поверхностном слое → 36 и 2 % в среднем → 32 и 15 % в придонном слое, что свидетельствует о деструкции растворенного и взвешенного ОВ. Содержание ОВ в водорослях на сухое вещество составляло 30–32 %  $C_{\text{орг}}$ ,  $N_{\text{орг}}$  – 2 %. Это указывает на тот факт, что при отмирании водорослей ОВ в их составе также может вносить в донные отложения значительный вклад.

Донные отложения

Донные отложения озера представлены темно-коричневыми илами, верхний слой которых содержит слаборазложившиеся растительные остатки. Влажность осадков варьировала от 76 до 99 % (в среднем 88 %) и практически не отличалась по сезонам.

Донные отложения содержали в среднем  $12,32 \pm 5,48$  % ОВ в пересчете на  $C_{\text{орг}}$ . Верхние слои отложений (глубиной до 15 см) можно отнести к категории сапропелей (ОВ более 15 %) [Косов, 2008]. Содержание органического углерода незначительно отличалось по сезонам

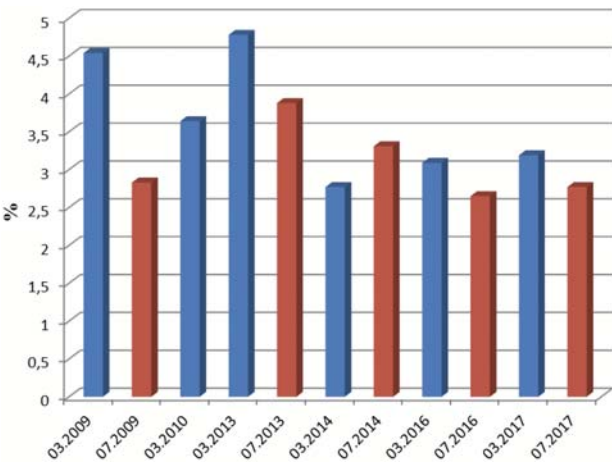


Рис. 2. Общее содержание серы в донных отложениях оз. Белое по сезонам

Fig. 2. Total sulfur content in the bottom sediments of Lake Beloye by seasons

исследования: март –  $13,16 \pm 6,02$  %, июль –  $12,28 \pm 4,76$  %. В поверхностном 0–5-см слое отложений его содержание было на 1–4 % ниже, чем на глубине 5–10 см.

Остаточное лабильное органическое вещество ( $C_{\text{лаб}}$ ) было определено в слое 0–5 см по остатку  $C_{\text{орг}}$  после экстракции образца 0,5 %  $H_2SO_4$  в течение 2 часов на водяной бане [Rovira, Vallejo, 2002] (табл.).

Остаточное лабильное ОВ (%) в донных отложениях оз. Белое

Residual labile organic matter (%) in the bottom sediments of Lake Beloye

| Сезон<br>Season      | $C_{\text{лаб}}$<br>$C_{\text{lab}}$ | $C_{\text{лаб}}$ от $C_{\text{орг}}$<br>$C_{\text{lab}}$ from $C_{\text{орг}}$ |
|----------------------|--------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| Март / March<br>2016 | 4,51                                 | 65                                                                             |
| Июль / July<br>2016  | 12,49                                | 72                                                                             |
| Март / March<br>2017 | 18,50                                | 70                                                                             |
| Июль / July<br>2017  | 7,65                                 | 43                                                                             |

Содержание соединений восстановленной серы ( $\Sigma SH_2S$ ) (кислоторастворимые сульфиды, элементная, пиритная и органическая сера) [Волков, 1984] в среднем за все время наблюдений составляло около 47 % от общего ее количества в донных отложениях, или в среднем 1,90 % в расчете на сухое вещество осадка, в том числе 1,60 % зимой, 2,09 % летом.

Изменения этого показателя в межгодовом и межсезонном аспекте были значительны (рис. 3). В зимний период содержание  $\Sigma SH_2S$  было в среднем несколько выше, чем в летний. При этом вклад был больше летом – 48 и 66 % зимой и летом соответственно. Исключение составил летний период 2014 года, когда наблюдалась противоположная тенденция.

В содержание восстановленной серы за весь период исследования основной вклад (90–95 %) вносили сера пирита и органических соединений. В зимний период 2009, 2010, 2014 и 2017 годов соотношение этих форм было примерно 1:1. В марте 2013 и 2016 годов преимущественным был вклад пиритной серы (около 70 %). В июле во все годы исследования доминировала только пиритная сера (до 80 %), лишь в июле 2014 года пиритной и органической серы было примерно по 50 %, с небольшим перевесом в пользу первой. Максимальное количество серы пирита отмечено в марте 2009 (7,60 %) и 2013 (7,94 %) годов; летом эти величины были несколько меньше и приходились на те же годы исследований – 5,22 и 4,06 % соответственно.

Как видно из данных рис. 4, накопление соединений восстановленной серы в оба сезона исследований связано со снижением концентрации сульфатной серы, что связано с протеканием процесса сульфатредукции. Об активности и постоянстве восстановления сульфатов свидетельствует тот факт, что в пресноводном антропогенно ненагруженном озере в донных отложениях фиксируется наличие в значительных количествах пиритной серы как результата взаимодействия элементарной серы (появляется в процессе окисления образующегося сероводорода) с кислоторастворимыми сульфидами (результат взаимодействия образующегося сероводорода с металлами, в основном с железом). Для других исследованных авторами пресноводных озер на материковой территории Архангельской области содержание этой формы серы и ее вклад в общее количество восстановленной серы были невелики [Титова, Кокрятская, 2013, 2014; Титова и др., 2017].

Содержание реакционноспособного железа в донных отложениях оз. Белое составляло в среднем 2,09 %. Железо в большей степени находилось в составе пирита – около 45 % от общего содержания  $Fe_{\text{реакц}}$ , далее – в составе оксидов и гидроксидов железа, фосфатов (III) – около 36 %, в виде карбонатов – 18 %, и небольшой вклад вносило сульфидное железо – около 1 %. Минимальное количество отмечено в оба сезона исследований в отложениях, залегающих на глубине 50 см и более – 0,46 %, что связано со снижением содержания и окисленной, и восстановленной его форм.

Максимальные концентрации  $Fe_{\text{реакц}}$  зафиксированы в зимний период 2009 года в подповерхностном горизонте отложений – 12,52 %, а также в летний период 2013 года в поверхностном горизонте осадков – 11,36 %. При этом наблюдалось разное распределение форм железа (рис. 5). В зимний период чуть больше половины железа было в составе пирита,

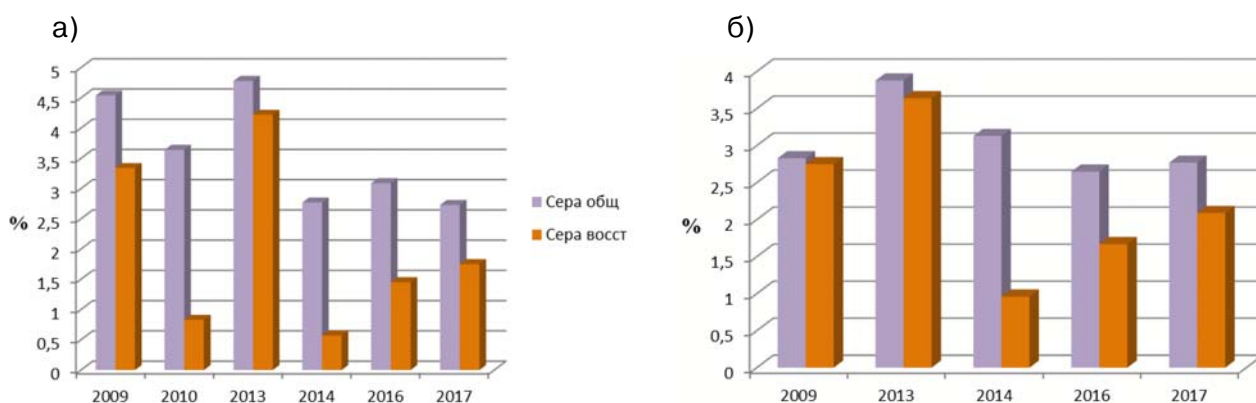


Рис. 3. Содержание общей и восстановленной серы в донных отложениях оз. Белое по сезонам: а) март, б) июль

Fig. 3. Total and reduced sulfur content in the bottom sediments of Lake Beloye by seasons: а) March, б) July

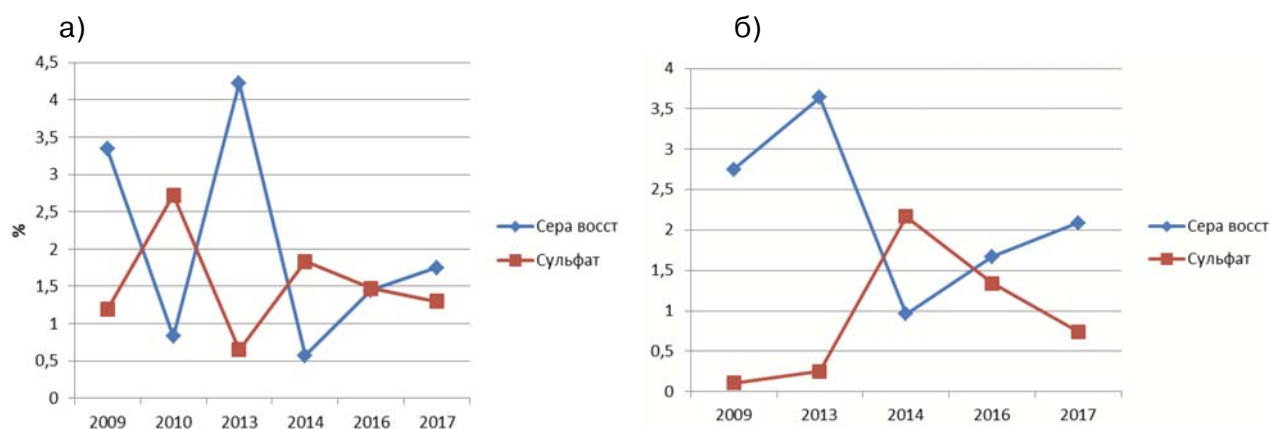


Рис. 4. Содержание восстановленной и сульфатной серы в донных отложениях оз. Белое по сезонам: а) март; б) июль

Fig. 4. Reduced and sulfate sulfur content in the bottom sediments of Lake Beloye by seasons: а) March; б) July

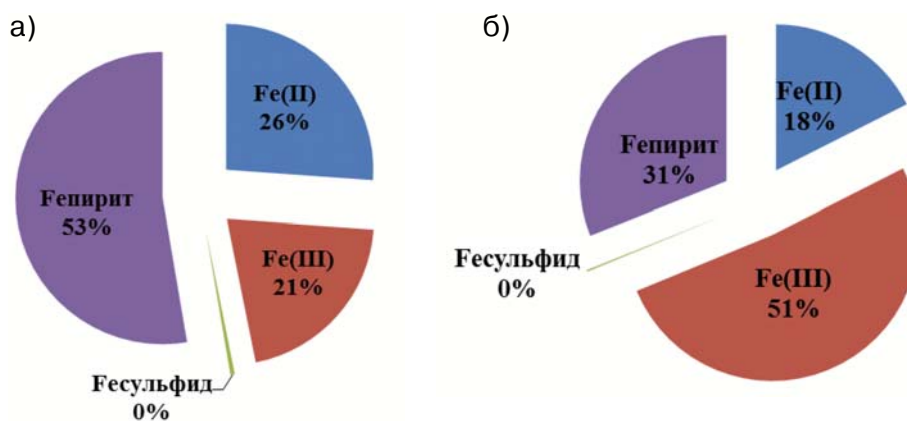


Рис. 5. Распределение форм реакционноспособного железа в донных отложениях оз. Белое: а) март 2009; б) июль 2013

Fig. 5. Distribution of reactive iron forms in the bottom sediments of Lake Beloye: а) March 2009; б) July 2013

с небольшой разницей вносили вклад остальные соединения железа – (II) и (III) (рис. 5, а). Летом картина была несколько иной. Больше половины железа находилось в составе отложений в виде Fe (III), что связано с его окислением в условиях перемешивания водной толщи до дна вследствие небольшой глубины озера. В оба сезона практически отсутствовало железо в составе кислоторастворимых сульфидов.

С использованием балансовых уравнений [Страхов, 1976] вычислен расход органического углерода на восстановление железа и серы. На первый процесс в донных отложениях оз. Белое в среднем было затрачено 0,14 %  $C_{org}$ , во втором случае – 1,42 %  $C_{org}$  на сухое вещество осадков.

## Заключение

Проведенные исследования показали, что в малом неглубоком пресноводном оз. Белое могут складываться благоприятные условия для протекания восстановительных процессов. Причиной образования анаэробных условий в подледный период являлась деструкция органического вещества, поступающего в водоем с водосбора и продуцируемого в нем.

Несмотря на гидрокарбонатно-кальциевый тип вод в изученном озере, в них существенен вклад сульфатов и кальция. Активизация сульфатредукции была отмечена как в водной толще водоема по количеству определенного сероводорода, так и в донных отложениях по количеству и распределению форм восстановленной серы.

В донных осадках оз. Белое восстановленная форма железа была доминирующей

(в среднем 75 % от общего количества реакционноспособного железа и в большей степени связанного в пирит), а соединения восстановленной серы вносили вклад, составляющий меньше половины от общего содержания серы в отложениях. При этом расход органического углерода на образование соединений восстановленной серы был намного выше, чем на восстановление железа.

Выявленные особенности протекания сульфатредукции в воде и донных отложениях оз. Белое Коношского района Архангельской области показали, что восстановление сульфатов в этом водоеме осуществлялось активнее, чем в других пресноводных озерах на территории региона.

Авторы благодарят Р. Б. Ивахнову за определение органического углерода в донных отложениях.

## Литература

- Атлас Архангельской области / Отв. ред. Н. А. Моргунова. М.: ГУГК, 1976. 72 с.
- Борзенко С. В., Замана Л. В. Сульфатредукция как фактор формирования содовых вод озера Доронинское (Восточное Забайкалье) // Вестник Томского государственного университета. 2008. № 7. С. 188–193.
- Волков И. И. Геохимия серы в осадках океана. М.: Наука, 1984. 272 с.
- Волков И. И., Демидова Т. П. Соединения восстановленной неорганической серы в водах Балтийского моря // Океанология. 2003. Т. 43, № 6. С. 855–861.
- Волков И. И., Жабина Н. Н. Методы определения различных соединений серы в морских осадках // Химический анализ морских осадков. М.: Наука, 1980. С. 5–27.



- Гельман Н. Э., Терентьева Н. А., Шанина Т. М. Методы количественного органического элементного микроанализа. М.: Химия, 1987. 296 с.
- ГОСТ 17.1.5.01-80. Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к отбору проб донных отложений водных объектов для анализа на загрязненность. Введен 1982-01-01. Переиздан 2015-04-06.
- ГОСТ 31861-2012. Вода. Общие требования к отбору проб. Введен 2014-01-01.
- Даувальтер В. А. Геоэкология донных отложений. Мурманск: Изд-во МГТУ, 2012. 242 с.
- Каллистова А. Ю., Кевбрина М. В., Пименов Н. В., Русанов И. И., Рогозин Д. Ю., Верли Б., Ножевникова А. Н. Сульфатредукция и метаногенез в меромиктических озерах Ширы и Шунет (Хакасия) // Микробиология. 2006. Т. 75, № 6. С. 828–835.
- Кокрятская Н. М., Волков И. И., Демидова Т. П., Мурзина Т. С. Соединения серы и реакционноспособное железо в донных осадках устья Северной Двины // Актуальные проблемы океанологии. М.: Наука, 2003. С. 475–494.
- 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 железомарганцевого пресноводного озера Светлое (Архангельская область) // Журнал Сибирского федерального университета. Сер. Биология. 2019. Т. 12, № 2. С. 147–159. doi: 10.17516/1997-1389-0036
- Косов В. И. Сапропель. Ресурсы, технологии, геоэкология. СПб.: Наука, 2007. 224 с.
- Кревш А., Кучинскене А. Микробная деструкция органического вещества в донных осадках малых озер урбанизированного ландшафта (Литва) // Микробиология. 2012. Т. 81, № 4. С. 517–523.
- Матвеев А. А., Кучинскене А. А., Резников С. А. Об интенсивности процесса сульфатредукции в донных отложениях Ладожского озера // Гидрохимические материалы. Т. CVIII. Л.: Гидрометеиздат, 1990. С. 153–157.
- Пашкаускас Р., Кучинскене А., Жвикас А. Сульфатредуцирующие бактерии в озерах гипсового карста на севере Литвы // Микробиология. 2005. Т. 74, № 6. С. 823–830.
- 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.
- Подземные воды СССР. Обзор подземных вод Архангельской области. Гидрогеологический очерк. Т. I. М., 1968. 421 с.
- Соколов В. С. Определение реакционноспособных форм железа и марганца в морских осадках // Химический анализ морских осадков / Под ред. Э. А. Остроумова. М.: Наука, 1980. С. 28–41.
- Страхов Н. М. Проблемы геохимии современного океанского литогенеза. М.: Наука, 1976. 159 с.
- Схема территориального планирования Коношского муниципального района Архангельской области. СПб., 2013. 138 с.
- Титова К. В., Кокрятская Н. М., Жибарева Т. А. Процесс сульфатредукции в пресноводных озерах (Белое, Нижнее, Святое) Коношского района Архангельской области // Вестник МГОУ. Естественные науки. 2017. № 4. С. 123–134. doi: 10.18384/2310-7189-2017-4-123-134
- Титова К. В., Кокрятская Н. М., Жибарева Т. А., Захарова Е. Е. Особенности сульфатредукции и накопления соединений восстановленной серы в пресноводном неглубоком озере Назаровское (Архангельская область) // Принципы экологии. 2019. Т. 8, № 4. С. 69–80. doi: 10.15393/j1.art.2019.8722
- Титова К. В., Кокрятская Н. М., Попов С. С., Морева О. Ю., Брагин А. В. Изучение процесса сульфатредукции в воде озер на территории национального парка «Кенозерский» // Труды Карельского научного центра РАН. 2023. № 6. С. 53–65. doi: 10.17076/lim1744
- Титова К. В., Кокрятская Н. М. Соединения серы в воде и донных осадках малых озер юго-запада Архангельской области // Вестник Московского государственного областного университета. Естественные науки. 2013. № 2. С. 101–105.
- Титова К. В., Кокрятская Н. М. Соединения серы в озерах на территории Кенозерского национального парка (Каргопольский район, Архангельская область) // Вопросы естествознания. Науки о Земле. 2018. № 4(18). С. 67–74.
- Титова К. В., Кокрятская Н. М. Сульфатредукция в донных отложениях озера Святое (юг Архангельской области) // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2014. № 1(84). С. 52–56.
- 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.
- Holmer M., Storkholm P. Sulphate reduction and sulphur cycling in lake sediments: a review // Freshwat. Biol. 2001. Vol. 46, no. 4. P. 431–451.
- Ingvorsen K., Jørgensen B. B. Kinetics of sulphate uptake by freshwater and marine species of *Desulfovibrio* // Arch. Microbiol. 1984. Vol. 139. P. 61–66.
- Ingvorsen K., Zeikus J. G., Brock T. D. Dynamics of bacterial sulfate reduction in a eutrophic lake // Appl. Environ. Microbiol. 1981. Vol. 42, no. 6. P. 1029–1036.
- Jørgensen B. B., Parkes R. J. Role of sulfate reduction and methane production by organic carbon degradation in eutrophic fjord sediments (Limfjorden, Denmark) // Limnol. Oceanogr. 2010. Vol. 55(3). P. 1338–1352.
- Li J. H., Takii S., Kotakemori R., Hayashi H. Sulfate reduction in profundal sediments in Lake Kizaki, Japan // Hydrobiologia. 1996. Vol. 33. P. 201–208.
- Lovley D. R., Klug M. J. Sulfate reducers can outcompete methanogens at freshwater sulfate concentrations // Appl. Environ. Microbiol. 1983. Vol. 45. P. 187–192.
- Muyzer G., Stams A. J. M. The ecology and biotechnology of sulphate-reducing bacteria // Nature Reviews Microbiology. 2008. No. 6. P. 441–454.
- Rovira P., Vallejo V. R. Labile and recalcitrant pools of carbon and nitrogen in organic matter decomposing at different depths in soil: an acid hydrolysis approach // Geoderma. 2002. Vol. 107. P. 109–141.

## References

- Borzenko S. V., Zamana L. V. Sulfate reduction as a factor in the formation of soda waters of Lake Doroninskoye (eastern Transbaikalia). *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of Tomsk State University*. 2008;7:188–193. (In Russ.)
- Dauval'ter V. A. Geocology of bottom sediments. Murmansk: MGTU; 2012. 242 p. (In Russ.)
- Gel'man N. E., Terent'eva N. A., Shanina T. M. Methods of quantitative organic elemental microanalysis. Moscow: Khimiya; 1987. 296 p. (In Russ.)
- GOST 17.1.5.01-80. Nature protection. Hydrosphere. General requirements for sampling of bottom sediments of water objects for their pollution analysis. Introduced on 01.01.1982. Reissued on 04.06.2015. Moscow: IPK Standard publishing house; 2002. 5 p. (In Russ.)
- GOST 31861-2012. Water. General requirements for sampling. Introduced on 01.01.2014. Moscow: Standartinform; 2013. 36 p. (In Russ.)
- Groundwater in the USSR. A review of groundwater in the Arkhangelsk Region. Hydrogeological essay. Vol. I. Moscow; 1968. 421 p. (In Russ.)
- Holmer M., Storkholm P. Sulphate reduction and sulphur cycling in lake sediments: a review. *Freshwat. Biol.* 2001;46(4):431–451.
- Ingvorsen K., Jørgensen B. B. Kinetics of sulphate uptake by freshwater and marine species of *Desulfovibrio*. *Arch. Microbiol.* 1984;139:61–66.
- Ingvorsen K., Zeikus J. G., Brock T. D. Dynamics of bacterial sulfate reduction in a eutrophic lake. *Appl. Environ. Microbiol.* 1981;42(6):1029–1036.
- Jørgensen B. B., Parkes R. J. Role of sulfate reduction and methane production by organic carbon degradation in eutrophic fjord sediments (Limfjorden, Denmark). *Limnol. Oceanogr.* 2010;55(3):1338–1352.
- Kallistova A. Yu., Kevbrina M. V., Pimenov N. V., Rusanov I. I., Rogozin D. Yu., Verli B., Nozhevnikova A. N. Sulfate reduction and methanogenesis in meromictic Lakes Shira and Shunet (Khakassia). *Mikrobiologiya = Microbiology*. 2006;75(6):828–835. (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 the meromictic iron-manganese freshwater Lake Svetloe (Arkhangelsk Region). *Zhurnal Sibirskogo Federal'nogo Universiteta. Biologiya = Journal of the Siberian Federal University. Biology Series*. 2019;12(2):147–159. (In Russ.). doi: 10.17516/1997-1389-0036
- Kokryatskaya N. M., Volkov I. I., Demidova T. P., Murzina T. S. Sulfur compounds and reactive iron in bottom sediments of the Northern Dvina estuary. *Aktual'nye problemy okeanologii = Topical issues of oceanology*. Moscow: Nauka; 2003. P. 475–494. (In Russ.)
- Kosov V. I. Sapropel. Resources, technologies, geocology. St. Petersburg: Nauka; 2007. 224 p. (In Russ.)
- Krevsh A., Kuchinskiene A. Microbial destruction of organic matter in bottom sediments of small lakes of urbanized landscape (Lithuania). *Mikrobiologiya = Microbiology*. 2012;81(4):517–523. (In Russ.)
- Li J. H., Takii S., Kotakemori R., Hayashi H. Sulfate reduction in profundal sediments in Lake Kizaki, Japan. *Hydrobiologia*. 1996;33:201–208.
- Lovley D. R., Klug M. J. Sulfate reducers can out-compete methanogens at freshwater sulfate concentrations. *Appl. Environ. Microbiol.* 1983;45:187–192.
- Matveev A. A., Kuchinskene A. A., Reznikov S. A. On the intensity of the sulfate reduction process in the bottom sediments of Lake Ladoga. *Gidrokhimicheskie materialy = Hydrochemical materials*. 1990;CVIII: 153–157. (In Russ.)
- Morgunova N. A. (ed.). Atlas of the Arkhangelsk Region. Moscow: GUGK; 1976. 72 p. (In Russ.)
- Muyzer G., Stams A. J. M. The ecology and biotechnology of sulphate-reducing bacteria. *Nat. Rev. Microbiol.* 2008;6:441–454.
- Pashkauskas R., Kuchinskene A., Zhvikas A. Sulphate-reducing bacteria in gypsum karst lakes in northern Lithuania. *Mikrobiologiya = Microbiology*. 2005;74(6):823–830. (In Russ.)
- PND F 14.1:2.4.132-98. Quantitative chemical analysis of waters. Methodology for measuring the mass concentration of anions: nitrite, nitrate, chloride, fluoride, sulfate and phosphate in samples of natural drink and waste water by ion chromatography. Introduced 04.02.1998. Reissued 01.01.2008. (In Russ.)
- Rovira P., Vallejo V. R. Labile and recalcitrant pools of carbon and nitrogen in organic matter decomposing at different depths in soil: an acid hydrolysis approach. *Geoderma*. 2002;107:109–141.
- Scheme of the territorial planning of the Konosha Municipal District in the Arkhangelsk Region. St. Petersburg; 2013. 138 p. (In Russ.)
- Shirokova L. S., Vorob'eva T. Ya., Zabelina S. A., Moreva O. Yu., Klimov S. I. Characterization of production/mineralization processes in small lakes of the Arkhangelsk Region. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya = Modern Problems of Science and Education*. 2008;5:17–24. (In Russ.)
- Sokolov V. S. Determination of reactive forms of iron and manganese in marine sediments. *Khimicheskii analiz morskikh osadkov = Chemical analysis of marine sediments*. Moscow: Nauka; 1980. P. 28–41. (In Russ.)
- Strakhov N. M. Problems of geochemistry of modern oceanic lithogenesis. Moscow: Nauka; 1976. 159 p. (In Russ.)
- 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 Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2023;6:53–65. (In Russ.). doi: 10.17076/lim1744
- Titova K. V., Kokryatskaya N. M. Sulfate reduction in bottom sediments of Lake Svyatloe (south of the Arkhangelsk Region). *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Irkutsk State Technical University*. 2014;1(84):52–56. (In Russ.)
- Titova K. V., Kokryatskaya N. M. Sulfur compounds in lakes on the territory of the Kenozersky National Park (Kargopol District, Arkhangelsk Region). *Voprosy estestvoznaniya. Nauki o Zemle = Issues of Natural Science. Geosciences*. 2018;4(18):67–74. (In Russ.)

Titova K. V., Kokryatskaya N. M. Sulfur compounds in water and bottom sediments of small lakes in the southwest of the Arkhangelsk Region. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta. Estestvennye nauki = Bulletin of the Moscow State Regional University. Natural Science Series*. 2013;2: 101–105. (In Russ.)

Titova K. V., Kokryatskaya N. M., Zhibareva T. A. The process of sulfate reduction in freshwater lakes (Beloye, Nizhnee, Svyatoye) of the Konosha District of the Arkhangelsk Region. *Vestnik MGOU. Estestvennye nauki = Bulletin of Moscow State Regional University. Series: Natural Sciences*. 2017;4:123–134. (In Russ.). doi: 10.18384/2310-7189-2017-4-123-134

Titova K. V., Kokryatskaya N. M., Zhibareva T. A., Zakharova E. E. Features of sulfate reduction and accumulation of reduced sulfur compounds in the freshwater shallow Lake Nazarovskoe (Arkhangelsk Region). *Principles of Ecology*. 2019;8,4:69–80. (In Russ.). doi: 10.15393/j1.art.2019.8722

Volkov I. I., Demidova T. P. Compounds of reduced inorganic sulfur in the waters of the Baltic Sea. *Okeanologiya = Oceanology*. 2003;43(6):855–861. (In Russ.)

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

Volkov I. I., Zhabina N. N. Methods for determining various sulfur compounds in marine sediments. *Khimicheskii analiz morskikh osadkov = Chemical analysis of marine sediments*. Moscow: Nauka; 1980. P. 5–27. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 16.10.2024; принята к публикации / accepted: 14.01.2025.  
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.-минер. наук, заведующая лабораторией  
экоаналитических исследований

e-mail: nkokr@yandex.ru

### Жибарева Татьяна Александровна

младший научный сотрудник лаборатории  
экоаналитических исследований

e-mail: ostrivok.vi\_nt@mail.ru

## CONTRIBUTORS:

### Titova, Ksenia

Cand. Sci. (Geogr.), Senior Researcher

### Kokryatskaya, Natalia

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

### Zhibareva, Tatiana

Junior Researcher