

УДК 550.47
DOI 10.17513/use.38104

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОЗЕР БОЛЬШОГО СОЛОВЕЦКОГО ОСТРОВА

Титова К.В., Жибарева Т.А., Слобода А.А., Вахрамеева Е.А., Кокрятская Н.М.

*Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени Н.П. Лаврова
Уральского отделения Российской академии наук, Архангельск, e-mail: ksyu_sev@mail.ru*

Проведены исследования семи озер Большого Соловецкого острова (Банное, Биосадское, Большое Куможье, Нижний Перт, Питьевое, Святое, Средний Перт). Отбор проб донных отложений осуществлен с помощью прямоточной ударной трубки в июле 2021 г. на глубоководных участках озер. Мощность колонки осадков не превышала 35 см. Проанализировано 40 образцов по апробированным авторами на других водных объектах методикам. Определены влажность, гранулометрический состав, содержание органического углерода, соединений серы и реакционноспособного железа. Отобранные пробы представляли собой илстые осадки с различным соотношением песчаной, алевритовой и пелитовой фракций. Среднее содержание серы в отложениях было сопоставимо с концентрациями в осадках антропогенно ненагруженных озер Кенозерского национального парка. Содержание органического углерода в отложениях исследованных озер в среднем составляло 15,47%; реакционноспособного железа – в среднем 2,68%, что меньше кларковых значений последнего элемента в литосфере. Наиболее активно восстановительные процессы протекали в отложениях оз. Банное, Святое и чуть менее активно – в оз. Биосадское (наибольшее количество сульфатной серы в них). Это обусловлено антропогенным воздействием на эти водоемы. Для оз. Биосадское оно также выразилось в заметном различии между верхними и нижними слоями осадков в гранулометрическом и элементном составе.

Ключевые слова: Архангельская область, Соловецкие острова, озера, донные отложения, соединения серы, железа, углерода

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (проект № 122011300473-4 «Изучение закономерностей биогеохимических процессов циклов серы и хлора в экосистемах Европейского Севера России»).

GEOCHEMICAL INVESTIGATIONS OF LAKES BIG SOLOVETSKY ISLAND

Titova K.V., Zhibareva T.A., Sloboda A.A., Vakhrameeva E.A., Kokryatskaya N.M.

*N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research Ural Branch Russian Academy of Sciences,
Arkhangelsk, e-mail: ksyu_sev@mail.ru*

Studies of seven lakes on the Bolshoy Solovetsky Island (Bannoe, Biosadskoe, Bolshoe Kumozh'e, Nizhniy Perth, Pit'evoe, Svyatoye, Sredniy Perth) were carried out. Sampling of bottom sediments was carried out using a direct-flow shock tube in July 2021 in the deep water areas of the lakes. The thickness of the sediment column did not exceed 35 cm. 40 samples were analyzed according to the methods we tested on other water bodies. Humidity, granulometric composition, content of organic carbon, sulfur compounds and reactive iron were determined. The samples taken were silty sediments with different ratios of sand, silt, and pelitic fractions. The average sulfur content in the sediments was comparable to the concentrations in the sediments of the anthropogenically unloaded lakes of the Kenozero National Park. The content of organic carbon in the sediments of the studied lakes averaged 15.47%; reactive iron – an average of 2.68%, which is less than the clark values of the last element in the lithosphere. The most active recovery processes proceeded in the sediments of the lake. Bannoe, Svyatoye and a little less active in the lake. Biosadskoe (the largest amount of sulfate sulfur in them). This is due to the anthropogenic impact on these reservoirs. For lake Biosadskoe it also manifested itself in a noticeable difference between the upper and lower layers of sediments in particle size distribution and elemental composition.

Keywords: Arkhangelsk region, Solovetsky Islands, lakes, bottom sediments, sulfur compounds, iron, carbon

The work was carried out with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (project No. 122011300473-4 “Study of the patterns of biogeochemical processes of sulfur and chlorine cycles in the ecosystems of the European North of Russia”).

Водные экосистемы от малых озер до глубоководных океанов играют важную роль в глобальном углеродном цикле. Долгосрочное связывание углерода происходит посредством различных механизмов в отложениях естественных и искусственных озер, водно-болотных угодий. Природный и антропогенный углерод также может хра-

ниться в виде растворенной неорганической или органической форм как в пресноводных, так и в морских системах.

Преобразование водосборов, трансграничные потоки, атмосферные выпадения, промышленные и хозяйственно-бытовые прямые сбросы, неорганизованные стоки приводят к изменению геохимических ци-

клов элементов в системе «водосбор-водоем», появлению токсичных компонентов в водной среде, эвтрофированию, закислению. Сейчас редко можно встретить водные объекты, не подверженные прямым или косвенным антропогенным изменениям [1].

В этой связи донные отложения водоемов рассматриваются как носители информации об изменениях, имеющих место на территории водосбора и в самом водоеме, как своеобразный архив данных о состоянии окружающей среды.

Формирование донных отложений озер происходит в результате сложного взаимодействия разнообразных природных процессов: климатических, гидрологических, физических, химических и биологических [2].

Гранулометрический состав отложений озерных экосистем является одним из основных параметров, характеризующих типы осадков, а также дающих возможность судить о механизме процесса седиментации и динамике водной среды [3].

Генезис донных отложений влияет на состав органического вещества. При этом небольшие озера, не подвергшиеся прямому загрязнению, могут использоваться в качестве индикаторов естественных геохимических условий водообразования [4]. Органическое вещество сапропеля с различным типом биогенного вклада может значительно различаться по элементному (CHNSO) составу [5].

На территории Большого Соловецкого острова есть объекты для исследования озер в качестве антропогенно нагруженных, так и не подвергающихся прямому воздействию.

Цель данной работы – изучить распределение гранулометрического и элементного состава донных отложений различных по воздействию озер Соловецкого острова.

Материалы и методы исследования

Современный Соловецкий архипелаг расположен в наиболее мелководной западной части Белого моря, в «устье» Онежского залива, образуя западный и восточный проходы в него (Западная и Восточная Соловецкие салмы). Архипелаг находится в 65 км от Карельского берега (г. Кемь) и примерно в 20 км от Летнего берега Онежского полуострова – между параллелями 64°57' и 65°12' северной широты и меридианами 35°30' и 36°17' восточной долготы, на 165 км (от пос. Соловецкий) южнее Полярного круга.

Озера расположены неравномерно: с одной стороны, имеется 3 компактные груп-

пы водоемов (западная, северо-восточная и юго-восточная), с другой стороны, центральная часть острова и его отдельные прибрежные районы почти лишены озер. В соответствии с орографией острова озера расположены ярусами. Благодаря этому наблюдается между близкорасположенными водоемами выраженный перепад высот [6]. Из всего многообразия озер Большого Соловецкого острова были выбраны озера Западной (Северной) озерно-канальной системы (Питьевое, Средний, Банное, Святое – проточные) и Восточной озерно-канальной системы (Биосадское – проточное), в настоящее время – в небольших локальных системах с соседними озерами (Бол. Куможье и Нижний Перт) и являющихся только сточными. Все они находились в пределах 2-3 км от центра пос. Соловецкий. Оз. Святое и Банное расположены в черте поселка. На северном берегу оз. Святое построены частные дома и гостиницы паломников, не имеющие централизованного водоотведения. Помимо этого, на оз. Банное, Биосадское и Святое было явно выраженное воздействие со взлетно-посадочной полосы, реконструкция которой проводилась с мая 2019 по ноябрь 2020 годов. В результате чего в осенне-весенний периоды поступило по каналам, проходящим вдоль полосы, и непосредственно с нее значительное количество песчаной взвеси в эти водоемы.

Отбор был осуществлен на семи озерах (табл.1) в июле 2021 года с помощью трубки ударного типа послойно на выбранных станциях. Мощность отложений не превышала 35 см.

Аналитические работы выполнялись по ранее апробированным авторами методом: *гранулометрический состав* донных отложений определяли ситовым и пипеточным методом согласно МИ 88-16365-010-2017; *органический углерод* – методом сухого сжигания на C,H,N-анализаторе фирмы «Hewlett-Packard», модель 185; *формы серы* – путем последовательного отделения из одной навески донных осадков: серу кислоторастворимых сульфидов определяли, обрабатывая навеску донных отложений натуральной влажностью разбавленной соляной кислотой с нагреванием до кипения и одновременной отдувкой инертным газом выделяющегося сероводорода. Окончание определения в зависимости от количества образующегося сероводорода йодометрическое или фотометрическое.

Таблица 1

Расположение и глубина станций отбора проб

Озеро	Координаты станций, град		Глубина станции отбора, м
	с.ш.	в.д.	
Банное	65.03007	35.70633	2,2
Биосадское	65.02717	35.75161	8,0
Большое Куможье	65.04244	35.64893	7,5
Нижний Перт	65.04308	35.67365	13,0
Питьевое	65.04195	35.69098	7,5
Святое	65.02560	35.715601	10,0
Средний Перт	65.05122	35.69176	7,5

Затем, экстрагируя осадок ацетоном, извлекали элементную серу и восстанавливали её до сероводорода раствором CrCl_2 (окончание определения фотометрическое). В осадке после экстракции определяли пиритную серу после восстановления ее раствором CrCl_2 до H_2S , количество которого определяли методом объемного йодометрического титрования. Оставшийся после определения пиритной серы осадок отмывали от ионов хрома, подвергали исчерпывающему окислению, переводя органическую серу, в сульфат, количество которого определяли гравиметрически; *реакционноспособные форм железа* (II и III) извлекали из осадка 3,5 N серной кислотой. Fe(II) определяли в аликвоте раствора титрованием $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, Fe(III) – из другой аликвоты, титрованием $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ выделившегося I2 после обработки KI. Содержание сульфидного железа рассчитывали по данным для сульфидной серы, исходя из формулы FeS ; пиритное железо – по содержанию пиритной серы.

Результаты исследования и их обсуждение

Перед проведением анализа отобранные пробы донных отложений были визуально охарактеризованы (табл. 2).

Как показано на рисунке 1, гранулометрический состав донных отложений озер имел свои особенности. Осадки озер отличались по содержанию песка от 0,22% в оз. Банное до 17,33% в оз. Банное в нижнем горизонте. Так же в оз. Святое выделялся верхний и нижний слой с содержанием пелитов 72,62 и 82,64%, соответственно. Интересна колонка оз. Биосадское, где на горизонте 10 см находился слой песчано-пелито-алевритового ила с содержанием песка 12,13%, а пелита всего 31,19%. Нижние слои ее представлены пелитовым илом с содержанием пелита более 90%. Но в целом значения гранулометрических фракций алевритов и пелитов в озерах близки (рисунок 1).

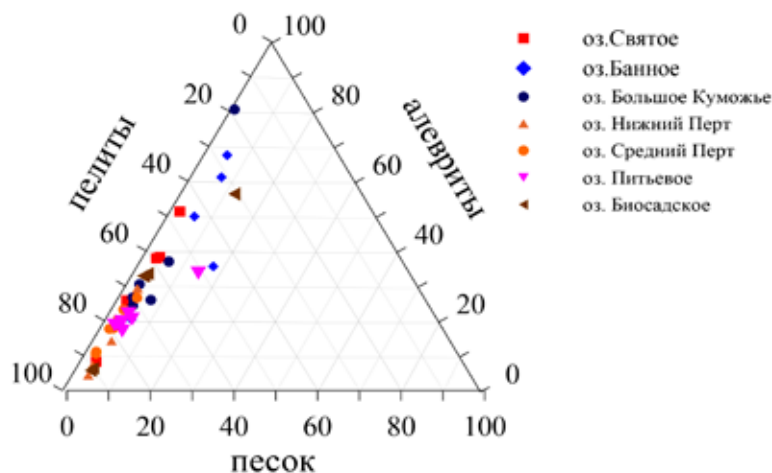


Рис. 1. Трехкомпонентная диаграмма гранулометрического состава донных отложений озер Большого Соловецкого острова

Таблица 2

Описание отобранных проб донных отложений Соловецких озер

Озеро	Горизонт, см	Описание
Питьевое	0–5	Темно-коричневый илистый осадок, без запаха
	5–10	
	10–15	
	15–20	
	20–25	
	25–30	
Средний Перт	0–5	Темно-коричневый илистый осадок, без запаха
	5–10	
	10–15	
	15–20	
	20–25	
	25–30	
Банное	0–5	Зеленовато-коричневый илистый осадок, без запаха
	5–10	
	10–15	
	15–20	
	20–23	Зеленовато-коричневый илистый, включение тонких корней или самих волос, запах нефтепродуктов
Святое	0–5	Зеленовато-коричневый (темный) илистый осадок с небольшими вкраплениями серой глины или песка, без запаха
	5–10	
	10–15	Зеленовато-коричневый илистый осадок с небольшими вкраплениями серого песка или глины, без запаха
	15–20	
	20–23,5	
Биосадское	0–3,5	Темный серо-коричневый плотный осадок, без запаха, вкрапления песка (или мелкая серая глина)
	3,5–7,5	Темно-серый (глинистый) плотный, без запаха
	7,5–11	Темно-серый плотный глинистый с коричневым илом, без запаха
	11–14,5	Темно-серый плотный (глинистый) с примесью коричневого ила осадок, без запаха
	14,5–16,5	Темно-коричневый густой илистый осадок, без запаха
	16,5–21,5	
Большое Куможье	0–5	Черный (темно-коричневый) рыхлый илистый осадок, без запаха
	5–10	
	10–15	
	15–20	
	20–25	
	25–30	
Нижний Перт	0–5	Зеленовато-коричневый густой илистый осадок, без запаха
	5–10	
	10–15	
	15–20	
	20–25	
	25–31,5	

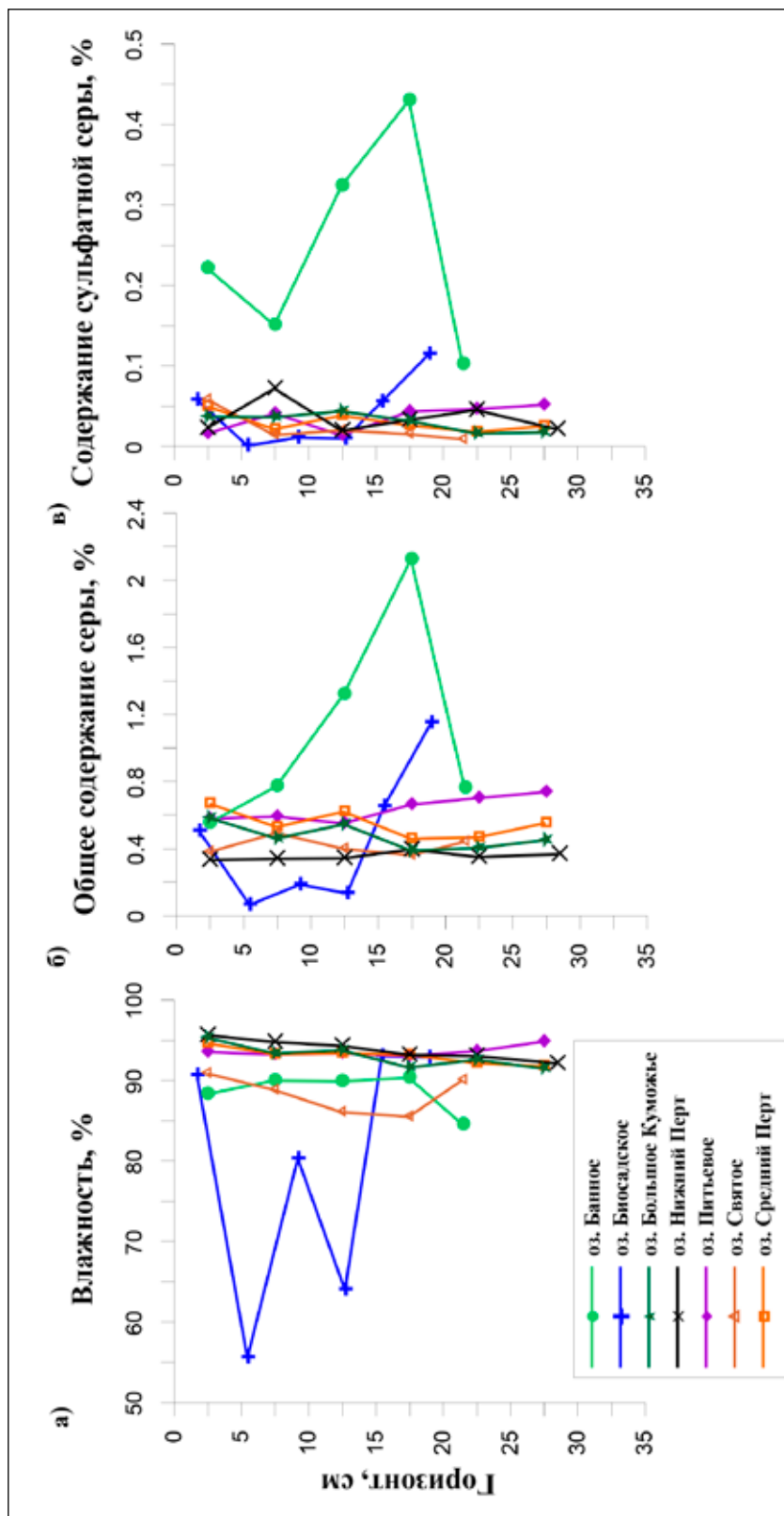


Рис. 2. Влажность и содержание серы в донных отложениях озер Большого Соловецкого острова

Влажность отобранных осадков в среднем составляла 90,18%, изменялась от 55,71 до 95,75%. Практически неизменным этот показатель был в осадках оз. Большое Куможье, Нижний и Средний Перт, Питьево. В этих же водоемах отложения были самыми обводненными (рис. 2 а). Для всех исследованных озер наибольшее количество влаги содержали верхние горизонты. Наибольшие различия во влажности отмечено в толще осадков оз. Биосадское.

Общее содержание серы в отобранных отложениях озер в среднем составляло 0,56% (все в расчете на абсолютно сухое вещество). Этот показатель по проведенным нами ранее исследованиям сопоставим с таковым для пресных антропогенно ненагруженных гидрокарбонат-кальциевых озер на территории Кенозерского национально-

го парка (Каргопольский район), в районе стационара Ротковец (Коношский район) и меньше, чем для озер с поступлением сульфатных подземных вод (Коношский район). Низкие концентрации серы отмечены для осадков оз. Нижний Перт при их незначительной вариации (от 0,34 до 0,40%) и оз. Святое (от 0,37 до 0,50%) (рис.2 б). Близки по содержанию серы были отложения двух соседних оз. Питьево и Средний Перт, входящих в Северную (Западную) озерно-канальную систему. Для всех исследованных озер, за исключением оз. Средний Перт и Бол. Куможье, общее содержание серы от поверхностных к нижним горизонтам осадкам увеличивается. Наибольшее изменение общего содержания серы выявлены для ДО оз. Биосадское (от 0,07 до 1,16%) и оз. Банное (от 0,56 до 2,13%).

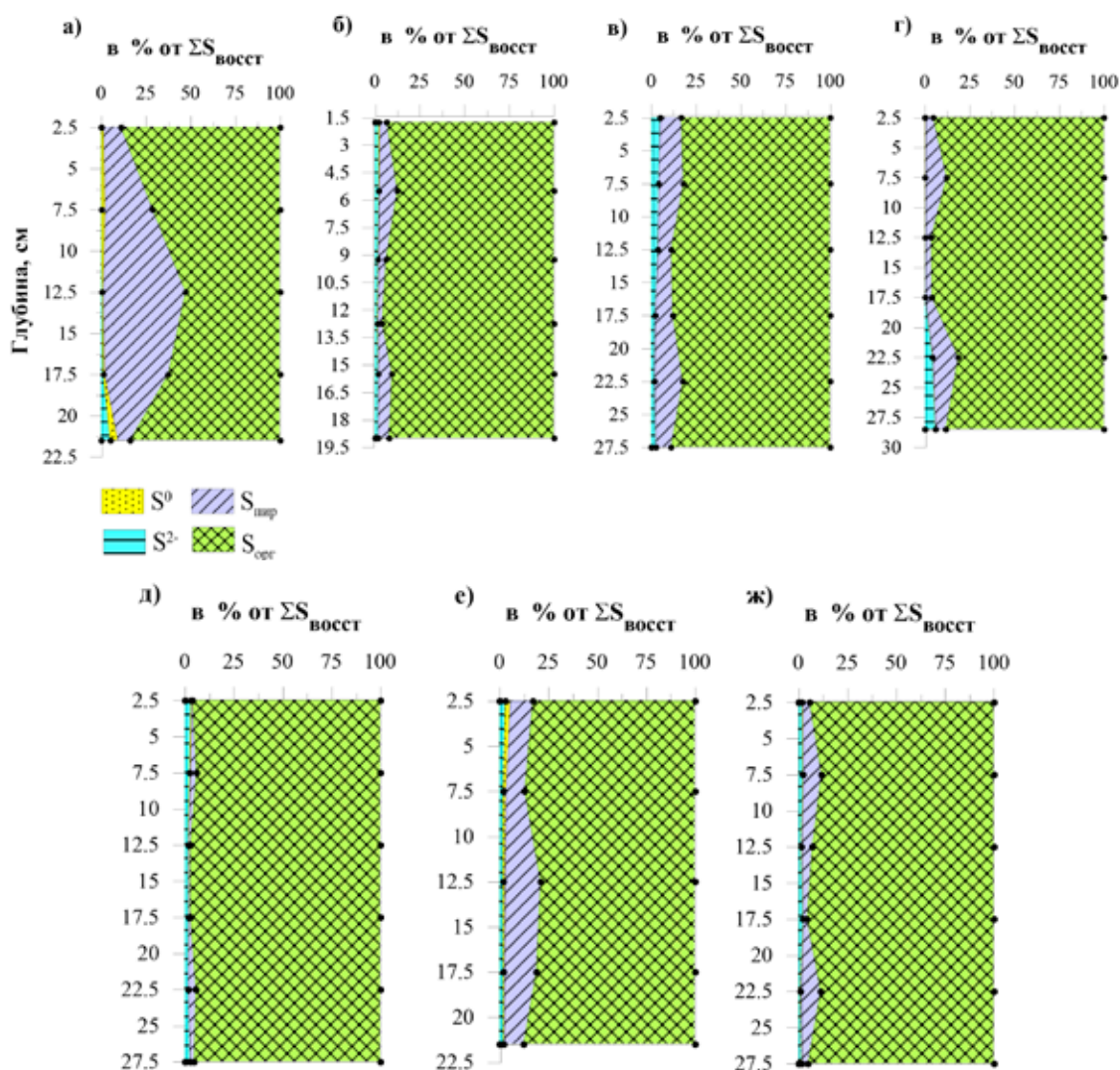


Рис. 3. Распределение форм серы в донных отложениях озер Большого Соловецкого острова: а) Банное; б) Биосадское; в) Бол. Куможье; г) Ниж. Перт; д) Питьево; е) Святое; ж) Ср. Перт

Концентрации сульфатной серы были наибольшими в отложениях всех исследованных нами озер Большого Соловецкого острова в среднем 0,03% (от 0,01 до 0,07%), что составляло около 6,8% от общего содержания серы в осадках (рис. 2 в). Заметные изменения этого показателя в толще отложений выявлены для оз. Биосадское (от 0,00 до 0,12%) и оз. Банное (от 0,10 до 0,43%). Вклад сульфатной серы в общее ее содержание соответственно то же был больше: оз. Биосадское – в среднем 8,0% и оз. Банное – 23,5%.

Соединения восстановленной серы ($\Sigma S_{восст}$) (производных сероводорода, образующегося в результате сульфатредукции) в донных отложениях представлены следующими формами: кислоторастворимыми сульфидами (S_2^-), пиритной ($S_{пир}$) и элементарной (S_0) и органической ($S_{орг}$). По содержанию и распределению этих форм можно судить о протекании процесса восстановления сульфатов и его активности. Среднее содержание соединений восстановленной серы в ДО исследованных озер составляло: Банное – 0,86%; Биосадское – 0,41%; Бол. Куможье – 0,44%; Ниж. Перт – 0,32%; Питывое – 0,61%; Святое – 0,40%; Ср. Перт – 0,52%.

Рассматривая помимо содержания форм серы так же данные рис. 3 б, д и ж с рас-

пределением, можно сказать, что в осадках этих водоемов анаэробный процесс сульфатредукции не столь активен в оз. Питывое, так как явно преобладала органическая составляющая. Из всех исследованных соловецких озер более активное восстановление сульфатов наблюдалось в оз. Святое и Банное, где был заметен вклад пиритной серы в $\Sigma S_{восст}$ до 18 и 45% соответственно (рис. 3 е и а).

Содержание органического углерода в отложениях исследованных озер в среднем составляло 15,47%. За исключением оз. Биосадское и Святое, этот показатель был минимальным в поверхностном горизонте осадков (рис. 4 а). Эти же два водоема отличаются минимальными количествами органической составляющей отложений в верхних горизонтах или во всей отобранной толще. Наибольшее содержание органического углерода отмечено для оз. Питывое. При этом почти во всех отложениях изученных озер этот показатель отличается по горизонтам не столь значительно, только в оз. Биосадское отмечено увеличение в 5 раз концентраций органического углерода к нижним слоям осадков (рис. 4 а). Что, скорее всего, связано с изменением условий осадконакопления во времени в этом водоеме.

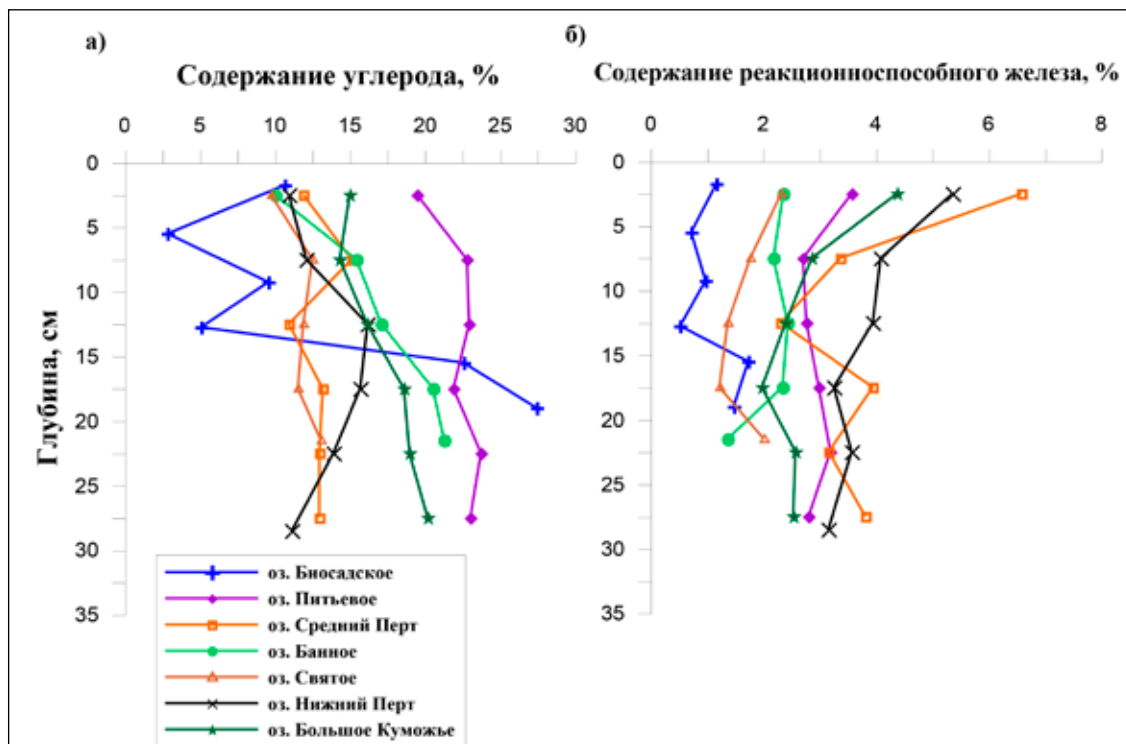


Рис. 4. Распределение углерода (а) и реакционноспособного железа (б) в донных отложениях озер Большого Соловецкого острова

Соотношение C/N для отложений всех исследованных озер изменялось от 12 до 40, что свидетельствует о значительной роли аллохтонной составляющей органического вещества, поступающего в большей степени с водосборов.

Содержание реакционноспособного железа (неорганических соединений этого элемента, принимающего участие в окислительно-восстановительных реакциях) в отложениях озер Большого Соловецкого острова составляло в среднем 2,68%, при этом кларковые количества этого элемента в литосфере – от 3,5 до 4,65. Для всех озер, за исключением Биосадское и Святое, содержание этой формы железа снижалось от поверхностных горизонтов осадков к нижним. Наибольшие количества железа зафиксированы в отложениях трех соседних водоемов Средний и Нижний Перт, Питьево (в среднем – 3,86, 3,90 и 3,00% соответственно (рис. 4 б)). Минимум отмечен в осадках оз. Биосадское (в среднем – 1,1%, от 0,52 до 1,73%). Восстановленная форма железа составляла 13-15% от общего количества реакционноспособного железа в отложениях оз. Средний и Нижний Перт, Питьево, Большое Куможье, 26% – в оз. Святое, 34-35% – оз. Банное и Биосадское. При этом в соседних первых трех озерах в придонных слоях воды не создавались анаэробные условия (содержание кислорода – до 3 мг/л); в оз. Банное водная толща была насыщена кислородом (даже на дне концентрация его была 8 мг/л) из-за его малой глубины и проточности; в оз. Биосадское содержание кислорода над осадками снизилось до 2 мг/л; в оз. Большое Куможье и Святое наблюдалось ко дну полное исчерпание кислорода.

Заключение

Гранулометрический состав донных отложений исследованных озер не столь разнообразен. Все же они отличались по содержанию всех определяемых фракций (песчаной, пелитовой и алевритовой). Влажность отобранных осадков в среднем составляла 90,18%, изменялась от 55,71 до 95,75%.

Содержание органического углерода в отложениях исследованных озер в среднем достигало 15,47%. Соотношение C/N для отложений всех исследованных озер из-

менялось от 12 до 40, что свидетельствует о значительной роли аллохтонной составляющей органического вещества, поступающего в большей степени с водосборов.

Общее содержание серы в отобранных отложениях озер в среднем составляло 0,56%. В осадках всех исследованных водоемов анаэробный процесс сульфатредукции не столь активен в оз. Питьево, так как явно преобладала органическая составляющая. Из всех исследованных соловецких озер более активное восстановление сульфатов наблюдалось в донных отложениях оз. Святое и Банное, где был заметен вклад пиритной серы. На эти водоемы оказывалось антропогенное воздействие, приводящее к усилению анаэробных процессов в донных отложениях.

Содержание реакционноспособного железа (неорганических соединений этого элемента, принимающего участие в окислительно-восстановительных реакциях) в отложениях озер Большого Соловецкого острова было в среднем 2,68%, что меньше кларковых значений этого элемента в литосфере.

Авторы выражают благодарность за всестороннюю помощь в экспедиционном исследовании на Соловках сотрудникам Соловецкого музея-заповедника А.Я. Мартынову, А.Н. Соболеву.

Список литературы

1. Хублярян М.Г., Моисеенко Т.И. Качество воды // Вестник Российской академии наук, 2009. Т. 79, № 5. С. 404–410.
2. Страхов Н.М. Избранные труды. Осадкообразование в современных водоемах. М.: Наука, 1993. 396 с.
3. Субетто Д.А., Назарова Л.Б., Пестрякова Л.А., Сырых Л.С., Андроников А.В., Бискаборн Б., Бикманн Б., Кузнецов Д.Д., Сапелко Т.В., Греков И.М. Палеолимнологические исследования в российской части северной Евразии: обзор // Сибирский экологический журнал. 2017. № 4. С. 369–380.
4. Moiseenko T.I., Gashkina N.A., Dinu M.I., Kremleva T.A., Khoroshavin V.Yu. Aquatic geochemistry of small lakes: Effects of environment changes // Geochemistry International. 2013. Vol. 51. P. 1031–1148.
5. Taran O.P., Boltenev V.V., Ermolaeva N.I., Zarubina E.Yu., Delii I.V., Romanov R.E., Strakhovenko V.D. Relations between the Chemical Composition of Organic Matter in Lacustrine Ecosystems and the Genesis of Their Sapropel // Geochemistry International, 2018. Vol. 56. P. 256–265. DOI: 10.1134/S0016702918030096.
6. Обоснование создания природного заказника «Соловецкий архипелаг» / Ред. Черенкова Н.Н., Черенков А.Е., Новиков В.С., Киселева К.В., Октябрева Н.Б., Варлыгина Т.И., Строганов А.Н. М.: Соловки, 2014. 183 с.