

ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-4-534-554>
УДК 550.47



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

РАННИЙ ДИАГЕНЕЗ ДОННЫХ ОСАДКОВ
ПРЕСНОВОДНЫХ ОЗЕР ОСТРОВА ВАЙГАЧ

Н.М. КОКРЯТСКАЯ¹*, В.П. ШЕВЧЕНКО², К.В. ТИТОВА¹, Е.А. ВАХРАМЕЕВА¹,
Р.А. АЛИЕВ³, В.А. ГРИГОРЬЕВ⁴, Л.А. САВЕЛЬЕВА⁴, Ф.Е. МАКСИМОВ⁴, В.Ю. КУЗНЕЦОВ^{4,5}

¹ — Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики
им. академика Н.П. Лаверова УрО РАН, Архангельск, Россия

² — Институт океанологии им. П.П. Шириова РАН, Москва, Россия

³ — Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

⁴ — Институт наук о Земле, Санкт-Петербургский государственный университет,
Санкт-Петербург, Россия

⁵ — Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена,
Санкт-Петербург, Россия

*nkokr@yandex.ru

Резюме

Приведены результаты комплексных исследований процессов диагенетического преобразования донных осадков пресноводных озер о. Вайгач – Талатинское и Тундровое. Установлено (по данным спорово-пыльцевого анализа), что формирование донных отложений оз. Талатинское происходило в современных климатических условиях тундры. Показано, что отсутствие закономерностей в распределении всех изучаемых параметров и невозможность определения скорости осадконакопления, обусловлены перемешиванием отложений обоих озер в ходе сезонного замерзания–оттаивания. Данные о количественных характеристиках параметров сульфатредукции (соединений восстановленной серы, форм реакционноспособного железа, органического вещества), их распределении и трансформации свидетельствуют о низкой интенсивности редокс–процессов в осадках вследствие малой доступности органического вещества для микроорганизмов и суровости среды их обитания.

Ключевые слова: Арктика, биогеохимические процессы, восстановленная сера, донные отложения, озера, органический углерод, остров Вайгач, реакционноспособное железо, скорости осадкообразования, спорово-пыльцевой анализ.

Для цитирования: Кокрятская Н.М., Шевченко В.П., Титова К.В., Вахрамеева Е.А., Алиев Р.А., Григорьев В.А., Савельева Л.А., Максимов Ф.Е., Кузнецов В.Ю. Ранний диагенез донных осадков пресноводных озер острова Вайгач // Проблемы Арктики и Антарктики. 2020. Т. 66. № 4. С. 534–554. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-4-534-554>.

Поступила 06.07.2020

После переработки 04.09.2020

Принята 09.09.2020

EARLY DIAGENESIS OF BOTTOM SEDIMENTS OF FRESHWATER LAKES OF THE VAYGACH ISLAND

NATALIA M. KOKRYATKAYA^{1*}, VLADIMIR P. SHEVCHENKO², KSENIA V. TITOVA¹,
ELENA A. VAKHRAMEEVA¹, RAMIZ A. ALIEV³, VASILY A. GRIGORIEV⁴,
LARISA A. SAVELIEVA⁴, FEDOR E. MAKSIMOV⁴, VLADISLAV YU. KUZNETSOV^{4,5}

¹ — N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences, Arkhangelsk, Russia

² — Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

³ — National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

⁴ — Institute of Earth Sciences, St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

⁵ — Herzen State Pedagogical University of Russia, St Petersburg, Russia

**nkokr@yandex.ru*

Summary

The paper presents results of studying the diagenetic transformation of bottom sediments from two freshwater lakes — Talatinskoe and Tundrovoe — in the Vaigach Island. The study of biogeochemical processes in the conditions of present-day climate instability is especially important for Arctic water ecosystems, since their environmental sustainability is extremely low, and the effects of global warming are most significant. According to available climate forecasts, the Vaigach Island is located in the zone of maximum changes in natural complexes. The lake-river systems of the island are unique island geosystems, but to date they are poorly understood.

Our aim was to carry out comprehensive research on the biogeochemical processes of the sulfur cycle as the geochemical aspect of the bacterial sulfate reduction process, which involves the conjugation of the cycles of carbon, sulfur and iron, participating in redox processes that play an important role in sedimentation and early diagenesis. In order to achieve this goal, a multi-method (hydrochemical, geochemical, etc.) approach was developed using standard generally approved laboratory practices adapted to the study goals.

Based on the pollen data, it was found that the formation of the bottom sediments of Lake Talatinskoe occurred in the current climatic conditions of the tundra. The data on the distribution of grain size fractions allow us to conclude that the sediment sequences of both lakes undergo regular destruction and mixing during seasonal freezing-thawing. This was reflected in the random distribution of all the parameters studied and in the impossibility of determining the sedimentation rate. The data obtained on the quantitative characteristics of sulfate reduction parameters (reduced compounds, forms of reactive iron, the amount of organic matter and its qualitative composition), their distribution and transformation indicate a low intensity of redox processes in precipitation. The most likely reason for this is the high degree of humification of the terrigenous organic matter and the low temperatures of the microorganisms' habitat.

Keywords: biogeochemical processes, bottom sediments, lakes, organic carbon, reactive iron, reduced sulfur, sedimentation rates, pollen stratigraphy, the Arctic, Vaygach Island.

For Citation: Kokryatkaya N.M., Shevchenko V.P., Titova K.V., Vakhrameeva E.A., Aliev R.A., Grigoriev V.A., Savelieva L.A., Maksimov F.E., Kuznetsov V.Yu. Early diagenesis of bottom sediments of freshwater lakes of the Vaygach island. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2020, 66 (4): 534–554. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-4-534-554>.

Received 06.07.2020

Revised 04.09.2020

Accepted 09.09.2020

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования биогеохимических процессов, протекающих в водоемах субарктического и арктического регионов, определяется прежде всего нестабильностью их экологического состояния, особенно в условиях современных

изменений климата [1]. Динамика природных процессов последних десятилетий свидетельствует об изменении климата [2], последствия которого затрагивают все природные и антропогенные системы Земли. Особые опасения вызывают изменения в Арктике, где естественная устойчивость экосистем низка, а возможное повышение температур может достигнуть 4–6 °С [3, 4].

В течение тысяч лет арктическая тундра накапливала органическое вещество, являясь стоком углерода для атмосферы [5]. Потепление в высоких широтах способствует уменьшению продолжительности снежного покрова и таянию многолетнемерзлых пород в целом, при этом законсервированное в криолитозоне органическое вещество (ОВ) начинает поступать в глобальный кругооборот, воздействуя на локальные и региональные биогеохимических циклы химических элементов, что актуализирует исследование биогеохимических процессов, протекающих в водных экосистемах субарктических и арктических регионов.

Остров Вайгач является небольшой изолированной типично арктической территорией, которая попадает в зону максимальных изменений природных комплексов, согласно имеющимся климатическим прогнозам [6, 7]. Остров Вайгач расположен на границе между Баренцевым и Карским морями. От материка он отделен проливом Югорский Шар, а от Новой Земли — проливом Карские Ворота. Площадь острова составляет 3,4 тыс. км². В рельефе острова выделяются прибрежная равнина, окаймляющая в виде полосы весь остров, и грядовые возвышенности, занимающие его большую часть [8]. Высота холмов и гряд достигает 150 м (г. Болванская — 157 м). Климат острова характеризуется как морской арктический, суровый. Поскольку при годовой сумме осадков 300–350 мм количество испаряемой влаги не превышает ее поступление, климат избыточно влажный [9]. Лето холодное, с частыми морозящими дождями, положительные средние суточные температуры поддерживаются в течение 114 дней [8, 9]. Высота снежного покрова не превышает 40–50 см, с продолжительностью залегания 230–240 дней.

На острове расположено множество малых рек и коротких речек, которые длительное время покрыты льдом, а зимой промерзают до дна [9]. Многолетняя мерзлота характеризуется сплошным распространением. Мощность мерзлых толщ возрастает от 15 м в прибрежной зоне до 180 м в центральной зоне острова. Мерзлые породы подстилаются мощной, до 100–150 м, пачкой охлажденных пород с минерализованными водами. На поверхности многолетнемерзлых пород формируется активный слой ежегодного сезонного замерзания–оттаивания. Глубина сезонного протаивания на острове Вайгач составляет 0,2–0,3 м в торфе и достигает максимума 1,5–1,7 м в песках.

На о. Вайгач находится более 4000 озер, различающихся по размерам, морфометрии и генезису. Однако до настоящего времени эти озера изучены слабо — почти нет сведений об их водном балансе и водообмене, внутриводоемных процессах и трофности. Совершенно отсутствуют сведения о процессах, происходящих в донных осадках (ДО) водоемов острова.

Озерно-речные системы о. Вайгач, представляющие собой уникальные островные геосистемы, должны рассматриваться как природное наследие России и остро нуждаются во всестороннем изучении. Это очень важно еще и потому, что в последнее время появились сведения о высыхании арктических озер, которые являются чувствительными индикаторами климатических изменений [8].

Озеро Талатинское, одно из крупнейших на острове (максимальные длина и ширина — 2,2 и 1,6 км соответственно; площадь 1,3 км², водосборная площадь 49,5 км²), является мелким водоемом (в среднем глубина не превышает 1 м), относится к бассейну р. Талата-Карская (водосборный бассейн Карского моря) и находится на территории государственного регионального комплексного Природного заповедника Вайгач. Озеро расположено в пределах Вайгачского хребта, протянувшегося вдоль восточного побережья острова, и считается «высокогорным» — урез воды находится на высоте 87 м над уровнем моря. Водосбор заболочен, что характерно для бассейна верхнего и среднего течения р. Талата-Карская [10]. Озеро расположено на пологохолмистой равнине, сформированной на рыхлом покрове четвертичных отложений, и относится к термокарстовым [9]. На этой территории преобладают кочкарные редковиянковые осоково-моховые тундры на перегнойно-глееземных почвах. Озеро имеет ярко выраженное атмосферно-снеговое питание. В водном балансе озера преобладает поверхностный сток во время интенсивного таяния снега весной и в начале лета. Безледный период длится 2,5–3 месяца с начала июля до конца сентября.

Известно, что донные осадки озер являются природным архивом, содержащим информацию об изменениях природной среды [11–14]. Важное значение при изучении ДО имеет выявление закономерностей протекания биогеохимических процессов таких геохимически подвижных элементов, как углерод, сера и железо. Органическое вещество, поступающее в водоем из различных источников, трансформируясь в ходе седиментации, концентрируется в донных осадках, где происходит его аэробная минерализация. Позже, по мере накопления донных осадков, аэробные условия сменяются на анаэробные (восстановительный диагенез). На этом этапе ОВ участвует в формировании осадочных пород. При этом происходит изменение форм химических элементов и формируется новый аутигенный комплекс железа [15–18].

Одним из важнейших процессов анаэробной минерализации органического вещества является сульфатредукция — восстановление микроорганизмами сульфатов до сероводорода [15]. Это окислительно-восстановительный процесс, в котором сульфат используется в качестве конечного акцептора электронов при окислении органических веществ или водорода. В результате энергия органического вещества, законсервированная в анаэробной зоне водоема, мобилизуется, переносится в аэробную зону и вновь включается в продукционный процесс [15]. В ходе этого процесса происходит взаимодействие углерода, серы, железа и многих других элементов, участвующих в редокс-процессах, играющих важную роль в процессах седиментации и раннего диагенеза [16–20]. Среди многих факторов, влияющих на процесс сульфатредукции и, как следствие, на характер накопления соединений восстановленной серы, в которые трансформируется образующийся сероводород, можно выделить следующие: содержание сульфатов (акцепторы электронов), скорость осадконакопления, количество и качество органического вещества (доноры электронов), активность микробного сообщества, содержание реакционноспособных форм железа, т. к. железо может связывать образующий сероводород, что приводит к образованию и накоплению сульфидных форм серы в донных осадках, и др. Все эти факторы определяются не только естественными причинами, но и антропогенной нагрузкой. В связи с этим актуальной задачей является изучение геохимического проявления сульфатредукции, а именно, накопления соединений восстановленной

серы — производных бактериального сероводорода, их взаимосвязи с реакционноспособным железом, количеством органического вещества и его качественным составом.

Целью настоящей работы является выявление в донных осадках озер о. Вайгач параметров процесса сульфатредукции в совокупности с данными о гранулометрическом составе донных отложений, их элементном составе, скорости осадконакопления, условиях образования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Пробы донных осадков для исследования отобраны в августе 2010 г. в ходе Северной комплексной экспедиции Института экологических проблем Севера УрО РАН.

В оз. Талатинское керн донных отложений для исследования отобран в точке с координатами $70^{\circ}13,3''$ с. ш., $59^{\circ}13,4'$ в. д. Рядом с оз. Талатинское, но видимых связей с ним не имеющее, чуть выше на небольшом склоне находится маленькое (длина и ширина не более 10–15 м) термокарстовое озерко глубиной около 1 м, названное нами Тундровым. В нем отобраны пробы в точке с координатами $70^{\circ}13,3'$ с. ш., $59^{\circ}12,1'$ в. д.

Пробы в обоих водоемах отбирались на середине акватории (рис. 1) пробатором гравитационного типа с вакуумным клапаном на глубине 0,9–1,0 м. Мощность отобранных колонок ограничивалась толщиной оттаявшего слоя донных отложений и составила 23 и 18 см соответственно для оз. Талатинское и Тундровое. Сразу после отбора керны были разделены на слои и в виде образцов герметично упакованы в пластиковые пакеты.

Гранулометрический состав донных осадков был определен по методике [22] в лаборатории экоаналитических исследований ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН, потери при прокаливании согласно [23].

Для оценки скорости осадконакопления был применен метод неравновесного ^{210}Pb [24]. Определение содержания ^{210}Pb в отдельных слоях керна донных осадков производилось альфа-спектрометрически по удельной активности ^{210}Po , выделенного из проб с использованием двух независимых аналитических методик — возгонки в вакууме с последующим осаждением на медном диске [25] в 2012 г. (анализ вы-

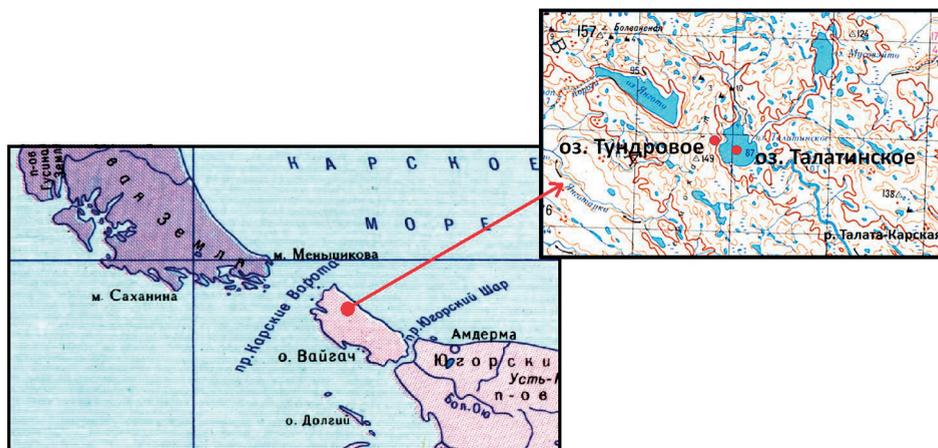


Рис. 1. Точки отбора проб донных отложений в изученных озерах на о. Вайгач

Fig. 1. Sediment sampling points in the Vaigach Island lakes studied

полнен в Радиевом институте им. В.Г. Хлопина, Санкт-Петербург) и с применением современной методики полного растворения пробы с последующим селективным выделением из раствора на никелевом диске [26, 27] в 2016 г. (анализ выполнен в лаборатории геоморфологических и палеогеографических исследований полярных регионов и Мирового океана, СПбГУ).

Активность ^{137}Cs определяли (на химическом факультете МГУ им. М.В. Ломоносова) гамма-спектрометрически по линии 661,6 кэВ с помощью спектрометра с коаксиальным полупроводниковым детектором из сверхчистого германия GR 3818 (Canberra). Калибровку проводили по интеркалибровочному препарату МАРЕР 97 S 4 4 [28].

Методом спорово-пыльцевого анализа в лаборатории геоморфологических и палеогеографических исследований полярных регионов и Мирового океана (СПбГУ) изучено 7 образцов из толщи озерных отложений оз. Талатинское. Предварительная подготовка проб выполнена по стандартной методике [29]. Вес сухой пробы составлял порядка 6 г.

Содержание Al, Si и P было определено фотометрическим методом [30] в Институте океанологии им. П.П. Ширшова РАН.

Количественные характеристики параметров процесса сульфатредукции получены в лаборатории экоаналитических исследований ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН. Общий и органический углерод/азот определяли на СНН-анализаторе фирмы «Хьюлетт Паккард» методом сухого сжигания с последующим газохроматографическим разделением продуктов пиролиза [31]. Определение содержания гуминовых веществ (ГВ) проводили после извлечения их из высушенного и тонко растертого осадка раствором 0,5 %-ной NaOH [32]. Разделение щелочного раствора осуществлялось при его подкислении: гуминовые кислоты (ГК) в этих условиях выпадают в осадок, а в надосадочной жидкости остаются фульвовые кислоты (ФК). Отметим, что в кислом растворе помимо ФК находятся и индивидуальные органические вещества. Количество ГК и ФК оценивалось по содержанию органического углерода (дихроматное окисление со спектрофотометрическим окончанием) [32]. Реакционноспособное железо извлекали из осадка натуральной влажности экстракцией 3,5 N H_2SO_4 , затем из аликвоты полученного раствора определяли трехвалентное железо йодометрическим титрованием; двухвалентное — из другой аликвоты дихроматным методом [33]. Различные формы серы определяли методом систематического фазового анализа [34], позволяющего определять их из одной пробы осадка.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Гидрохимические исследования

При проведении экспедиционных работ на о. Вайгач в августе 2010 г. в ходе Северной комплексной экспедиции Института экологических проблем Севера УрО РАН в оз. Талатинское равномерно по его акватории были отобраны пробы воды, для которых выполнен ряд гидрохимических исследований [21]. Показано, что для вод оз. Талатинское в период проведения полевых работ наблюдались повышенные величины рН — от 7,50 до 7,90 (в среднем 7,79, количество определений $n = 14$), обусловленные, скорее всего, влиянием карбонатных подстилающих пород. Однако сдвиг рН в щелочную сторону, кроме того, может быть связан и с жизнедеятельностью населяющих озеро организмов в прогретых летом и насыщенных кислородом

водах. Биогенные вещества, стимулирующие развитие первичных продуцентов, могли попасть в озеро также и с птичьими экскрементами, наличие которых визуально отмечалось участниками экспедиции. Величина электропроводности (максимально 277 мкСм/см) и сумма основных ионов (без гидрокарбонатов), равная 103,6 мг/л, свидетельствуют о невысокой минерализации озерных вод; среди катионов преобладает кальций (в среднем 38,3 мг/л), количества которого близки к имеющимся данным для пресных вод острова — 20,4–47,9 мг/л [9].

Содержание сульфатных ионов составляло в среднем 31,7 мг/л (от 28,3 до 36,1 мг/л), что несколько выше данных из работы [9] — 22,2 мг/л, так же, как и содержание хлорид-ионов — 13,9 и 6,8 мг/л соответственно. Содержание хлорид-ионов в водах оз. Талатинское относительно невелико, сопоставимо с данными для пресных вод, приведенных в работе [8], — 5–30 мг/л. Это свидетельствует о незначительном влиянии морского аэрозоля в формировании солевого состава вод оз. Талатинское.

Гранулометрический состав

Донные осадки обоих озер представляют собой довольно плотные глинистые илы коричневатого-серого цвета с влажностью для оз. Тундровое от 20,0 до 25,7 % (22,0 % в среднем), для оз. Талатинское — от 27,8 до 41,3 % (34,6 % в среднем). По мере углубления в толщу отложений их влажность уменьшается незначительно.

Гранулометрический состав донных отложений озерных экосистем является одним из основных параметров, характеризующих типы осадков, а также дает возможность судить о механизме процесса седиментации и динамике водной среды [35]. По данным гранулометрического анализа образцов донных отложений обоих изученных озер преобладают пелито-алевритовые фракции с содержанием алеврита до 63,49 % (оз. Талатинское) и 54,17 % (оз. Тундровое). Основное различие между ними заключается в содержании грубодисперсной фракции — песка, количество которого составляет в среднем 0,25 % в оз. Талатинское и 17,38 % в оз. Тундровое (рис. 2).

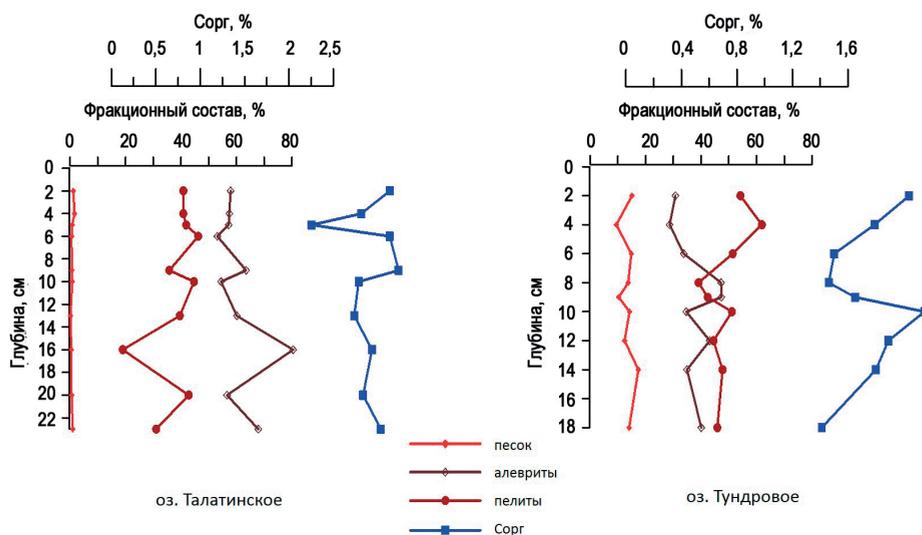


Рис. 2. Распределение гранулометрических фракций донных осадков озер о. Вайгач

Fig. 2. Distribution of granulometric fractions of the bottom sediments of the Vaigach Island lakes

Определение скорости осадконакопления

Авторами были предприняты попытки оценить скорость осадконакопления для донных осадков оз. Талатинское. Экспоненциального снижения удельной активности ²¹⁰Pb от поверхности в глубь толщи осадков, которое может свидетельствовать о правомерности применения метода неравновесного ²¹⁰Pb для определения скорости осадконакопления, не наблюдается (табл. 1), что, скорее

Таблица 1

Содержание ²¹⁰Pb в отдельных слоях разреза донных отложений (оз. Талатинское, о. Вайгач)

Table 1

The ²¹⁰Pb content in layers along the bottom sediment' sequence (Lake Talatinskoe, the Vaigach Island)

| Слой, см | Содержание ²¹⁰ Pb, Бк/кг (08.2012)* | Содержание ²¹⁰ Pb, Бк/кг (03.2016)** |
|----------|--|---|
| 0–1 | 25,7±1,8 | 56,10±3,61 |
| 1–2 | 24,9±1,5 | 57,96±3,41 |
| 2–3 | 32,0±2,7 | 49,35±3,65 |
| 4–5 | 20,4±1,0 | – |
| 5–6 | 29,0±1,8 | – |
| 6–7 | – | 68,73±4,12 |
| 7–8 | 33,2±1,5 | – |
| 8–9 | 37,7±2,6 | – |
| 9–10 | 27,0±1,2 | 55,28±2,31 |

Примечания: * — результаты получены В.Н. Струковым по радиохимической методике (1), Радиевый институт им. В.Г. Хлопина (август 2012 г.); ** — результаты получены В.А. Григорьевым по радиохимической методике (2), Санкт-Петербургский государственный университет (март 2016 г.); «—» — нет данных

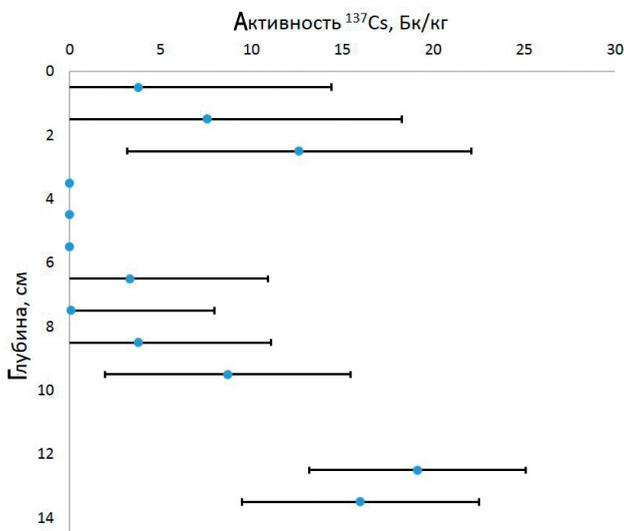


Рис. 3. Распределение активности ¹³⁷Cs в донных осадках оз. Талатинское по глубине

Fig. 3. Vertical distribution of ¹³⁷Cs activity in the bottom sediments of Lake Talatinskoe

всего, является следствием перемешивания слоев донных отложений этого водоема. Пониженные значения удельной активности этого изотопа в образцах, анализированных по методике 2012 г., предполагает возможную неполноту выделения ^{210}Po из проб, в отличие от методики 2016 г., предполагающей определение всего содержания этого изотопа (и равновесного с ним ^{210}Pb) в образце. Тем не менее близкий характер вертикального распределения ^{210}Pb в обоих случаях свидетельствует о нарушении хронологической последовательности слоев в изученной осадочной колонке.

Относительно повышенные значения активности радионуклида ^{137}Cs , отмеченные на глубине 12–14 см в разрезе донных отложений оз. Талатинское (рис. 3), могут быть связаны с выпадением этого радионуклида из атмосферы после испытаний ядерного оружия в атмосфере в начале 1960-х гг.

Спорово-пыльцевой анализ донных отложений

Методом спорово-пыльцевого анализа изучено 7 образцов с интервалом от 1 до 7 см из верхней (0–23 см) толщи отложений оз. Талатинское. Наблюдалась высокая насыщенность препаратов пыльцой. В каждом образце было подсчитано от 230 до 370 зерен пыльцы. Кроме пыльцы и спор в препаратах были обнаружены остатки пресноводных зеленых водорослей *Pediastrum*, *Botryococcus*, *Zygnemataceae*, а также цисты динофлагеллят и углистые частицы.

В полученных спорово-пыльцевых спектрах пыльца древесно-кустарниковой группы и трав представлена в равных количествах. Доминирует пыльца *Betula sect. Nanae* (20–30 %), *Cyperaceae* (8–26 %) и *Poaceae* (10–30 %). В небольшом количестве присутствует пыльца *Pinus* (5–15 %), *Alnus fruticosa* (4–8 %), *Salix* (3–6 %) и *Picea* (1–4 %). Группа травянистых растений представлена пыльцой типично тундровых элементов флоры: *Artemisia*, *Chenopodiaceae*, *Caryophyllaceae*, *Asteraceae*, *Rosaceae*, *Ranunculaceae*, *Polemonium sp.*, *Polygonum bistorta* и др. Среди споровых растений преобладают споры *Sphagnum* и *Polypodiaceae*, обнаружены единичные зерна *Lycopodium clavatum*, *Equisetum* и *Selaginella selaginoides*.

Современная растительность и флора большей части о. Вайгач относится к подзоне арктических тундр, и только южная его оконечность — к подзоне северных гипоарктических тундр [36, 37]. Во флоре преобладают такие семейства, как *Poaceae*, *Asteraceae*, *Cyperaceae*, *Brassicaceae*, *Caryophyllaceae*, *Ranunculaceae*, *Saxifragaceae* и *Rosaceae* [37]. Кроме того, в списке видового состава сосудистых растений острова зафиксировано 10 видов рода *Salix* и *Betula nana* [37].

В целом полученные фоссильные спорово-пыльцевые спектры отражают состав современной растительности, в них представлена пыльца основных представителей тундровой флоры острова. Исключение составляет пыльца таких древесных пород, как сосна, ель, береза и ольха, которая является дальнезаносной.

Таким образом, согласно результатам спорово-пыльцевого анализа, формирование донных отложений оз. Талатинское происходило в современных климатических условиях тундры. Наличие пыльцы хвойных и спор дочетвертичного возраста (от 3 до 10 %) по всему разрезу может свидетельствовать об эрозионных процессах на прилегающей к озеру территории и поступлении в него аллохтонного материала. Присутствие пресноводных зеленых водорослей, среди которых доминируют колонии *Pediastrum* (около 20 %), указывает на относительно мелководные условия формирования изученных донных отложений.

Содержание алюминия, кремния и фосфора в донных осадках

По данным химического элементного анализа в составе донных осадков обоих изученных озер преобладает литогенный материал. Содержание Al, являющегося индикатором литогенного вещества, в ДО оз. Талатинское варьирует от 2,76 до 7,47 % (6,36 % в среднем), в оз. Тундровое — от 7,28 до 8,88 % (8,15 % в среднем), что близко к среднему содержанию Al в верхней части континентальной земной коры (8,15 %) [38]. Здесь и далее содержания даны в расчете на сухой осадок. Содержание Si в донных отложениях оз. Талатинское варьирует от 12,27 до 32,33 % (22,74 % в среднем), оз. Тундровое — от 20,03 до 26,48 % (23,0 % в среднем), а в верхней части континентальной земной коры — 31,12 % [38]. Отношение среднего содержания Si к среднему содержанию Al в ДО оз. Талатинское равно 3,58, в ДО оз. Тундровое — 2,82, а в верхней части континентальной земной коры — 3,82, что свидетельствует о литогенном источнике кремния и отсутствии значимых примесей биогенного кремнезема.

Содержание P в ДО оз. Талатинское находится в пределах от 0,03 до 0,07 % (0,06 % в среднем), оз. Тундровое — от 0,04 до 0,07 % (0,05 % в среднем). Среднее содержание P в верхней части континентальной земной коры составляет 0,066 % [38]. Отношение среднего содержания P к среднему содержанию Al в ДО оз. Талатинское равно 0,005, в ДО оз. Тундровое — 0,006, а в верхней части континентальной земной коры — 0,008, что свидетельствует об отсутствии дополнительных значимых источников фосфора в экосистеме изученных озер.

Органические углерод и азот

В изученных озерах в общем содержании углерода в ДО преобладает органическая составляющая ($C_{орг}$), составляющая в среднем 70–80 % от общего его содержания ($C_{общ}$). Можно отметить, что ДО оз. Талатинское более обогащены органическим веществом по сравнению с оз. Тундровое. Содержание $C_{орг}$ в ДО оз. Тала-

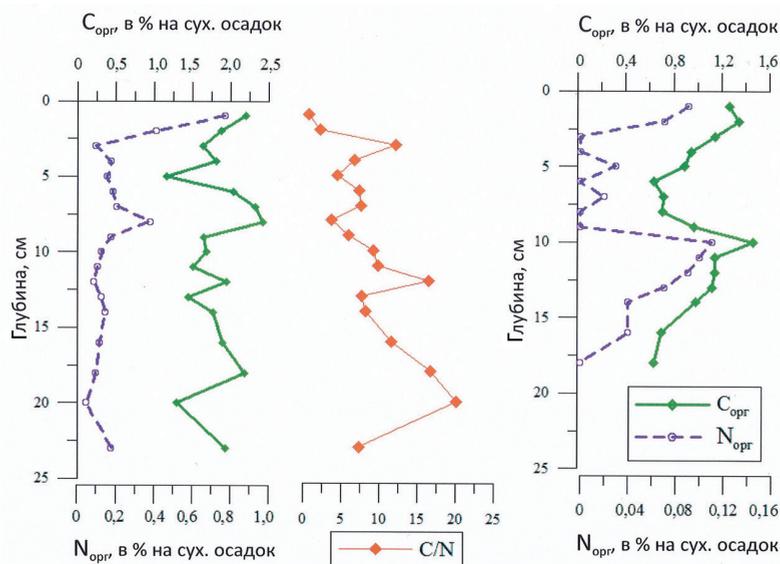


Рис. 4. Распределение органических углерода и азота в донных осадках озер о. Вайгач

Fig. 4. Distribution of organic carbon and nitrogen in the bottom sediments from the Vaigach Island lakes

тинское составляет 1,16–2,43 % (1,82 % в среднем) и 0,64–1,47 % (0,99 % в среднем) в оз. Тундровое (здесь и далее все концентрации даны в расчете на сухой осадок).

Повышенное содержание ОВ характерно для верхних слоев осадков в обоих озерах (рис. 4). В глубь по разрезу ДО в обоих озерах закономерных изменений $C_{\text{орг}}$ не выявлено. С распределением $C_{\text{орг}}$ в толще ДО хорошо согласуется вертикальный профиль органического азота ($N_{\text{орг}}$). Так, в осадках оз. Талатинское его количество максимально в самом верхнем слое отложений — 0,77–0,41 %; здесь же отмечены самые низкие значения C/N-отношения (2,9–4,6) для этой колонки. Ниже по разрезу ДО содержание азота резко снижается и практически не выходит за границы интервала 0,10–0,18 %, при среднем значении 0,15 % (величина C/N изменяется от 7 до 26, составляя в среднем 13,5). В донных отложениях оз. Тундровое содержание азота более чем на порядок меньше, чем в ДО оз. Талатинское, а его распределение по колонке ДО в целом также совпадает с распределением $C_{\text{орг}}$, причем со значимым коэффициентом корреляции ($r = 0,75$ при $n = 16$). Величина C/N-отношения (для горизонтов, где содержание азота выше предела определения прибора) изменяется от 11,5 до 36,0 при среднем значении 19,5.

Гуминовые вещества

В отложениях оз. Талатинское мощностью до 16 см было определено содержание одной из основных и наиболее устойчивых к минерализации групп соединений ОВ — гумусовых веществ (среди них только — гуминовые и фульвовые кислоты). Образование их возможно под действием микроорганизмов и абиотических факторов среды, таких как температура, влага и содержание кислорода [39].

Количество гумусовых веществ (ГК + ФК), оцененное по содержанию органического углерода, в донных осадках оз. Талатинское составляет в среднем 0,43 % или 23 % от общего содержания органического углерода (рис. 5). В среднем соотношение

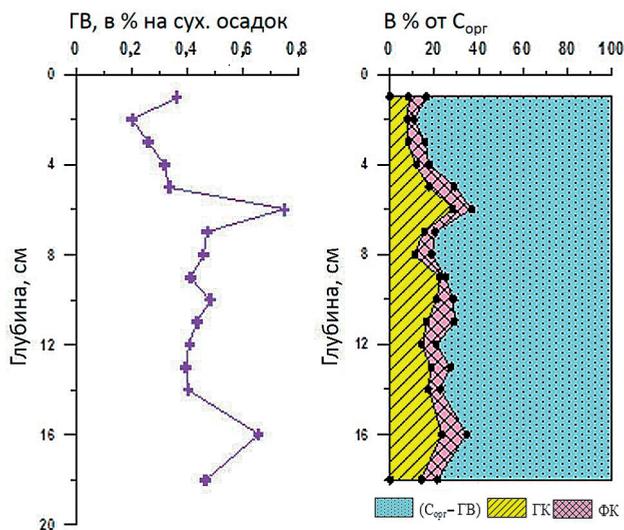


Рис. 5. Распределение гумусовых веществ и соотношение ГК и ФК в составе органического углерода в донных осадках оз. Талатинское

Fig. 5. Distribution of humic substances and the ratio of HA and FA in the composition of organic carbon in the bottom sediments of Lake Talatinskoe

ГК:ФК определяется как 0,29:0,13 (~ 2:1), что свидетельствует о доминировании гуминовых кислот над фульвовыми. При этом, как известно [32, 39], ФК могут быть как предшественниками, так и продуктами трансформации ГК и обладают большей гидрофильностью и, следовательно, большей растворимостью и миграционной способностью в жидкой фазе отложений. В распределении в ДО как гуминовых, так и фульвовых кислот явно выраженных закономерностей нами не выявлено. Однако по мере углубления в толщу ДО намечается тенденция к увеличению содержания ГК — от 0,18 % в первых до 0,35 % в последних 5 см керна соответственно. Эти результаты в совокупности с данными по C/N, значение которого увеличивается вглубь по разрезу ДО от 4 до 22, могут свидетельствовать о протекании процессов трансформации ОВ в сторону создания более устойчивых его соединений.

Сравнивая полученные данные по составу ОВ для отложений оз. Талатинское с результатами проведенных нами исследований для оз. Масельгское (Каргапольский район Архангельской области) [40–42], расположенного в зоне с умеренным климатом и гумидным типом седиментогенеза, можно отметить намного меньшее в целом содержание органического углерода в ДО арктического оз. Талатинское (1,8 %) по сравнению с 9–13 % бореального оз. Масельгское и меньший вклад гумусовых веществ в общее содержание $C_{\text{орг}}$ — 23 % (ДО оз. Талатинское) и 40 % (ДО оз. Масельгское), а также доминирование в составе ГВ бореального водоема фульвовых кислот (67 % от ГВ).

Реакционноспособное железо

Если органическое вещество можно назвать движущей силой сульфатредукции, как и других восстановительных процессов, то реакционноспособное железо — это основной связывающий сероводород компонент ДО. С другой стороны, известно, что процесс восстановления Fe(III) значительно опережает сульфатредукцию в окислительно-восстановительных процессах диагенеза. Содержание реакционноспособного железа ($Fe_{\text{реакц}}$), т. е. наиболее подвижная в процессах диагенеза часть общего

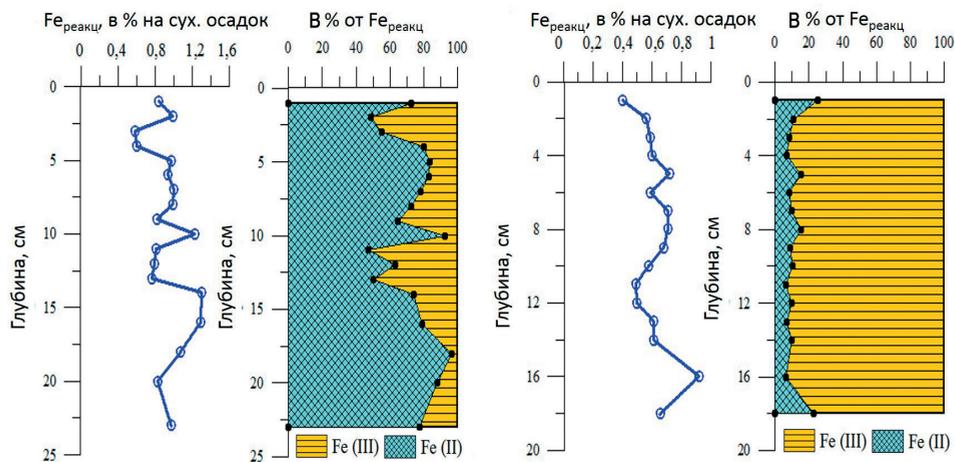


Рис. 6. Распределение форм реакционноспособного железа и их соотношение в составе $Fe_{\text{реакц}}$ в донных осадках изученных озер о. Вайгач

Fig. 6. Distribution of reactive iron forms and their ratio in the composition of $Fe_{\text{реакц}}$ in bottom sediments from the Vaigach Island lakes

количества железа осадков [16, 33], не только определяет уровень накопления в ДО восстановленной серы, но по соотношению его форм можно судить о направленности протекающих в ДО редокс-процессов. Для донных отложений обоих изученных озер количество $Fe_{реакц}$ изменяется в интервале 0,40–1,30 % при среднем значении 0,79 %. Причем различия в величине этого показателя для исследованных озер не велики: для ДО оз. Талатинское — от 0,58 до 1,30 % (в среднем 0,93 %), для ДО оз. Тундровое — от 0,40 до 0,92 % (в среднем 0,62 %). Основной вклад в состав $Fe_{реакц}$ (рис. 6) по всей длине колонки оз. Талатинское вносит несulfидное Fe(II) — 62,0 % от $Fe_{реакц}$ (52,9–66,3 %); Fe(III) — 28,9 % (17,4–41,3 %). Доля железа, связанного с серой (моносulfидной в сумме с пиритной), максимальна в подповерхностном горизонте (17,5 %), при том, что в остальной части разреза ДО она изменяется в интервале 4–6 % от $Fe_{реакц}$. В ДО оз. Тундровое, напротив, преобладает Fe(III) — 88,7 % от $Fe_{реакц}$ (75,0–93,9 %), т. е. они более окислены по сравнению с осадками оз. Талатинское. Закономерных изменений в вертикальном распределении как двух-, так и трехвалентного железа для обоих озер не проявляется.

Соединения восстановленной серы

В ДО оз. Талатинское было определено содержание соединений восстановленной серы — производных бактериального сероводорода [16, 17], составляющих в сумме ($\sum S_{H2S}$) не менее 80 % от общего количества серы (рис. 7). Соединения восстановленной серы (моносulfидная, пиритная, элементная и органическая) присутствовали в отложениях по всей исследованной глубине ДО (16 см). Это объясняется тем, что, несмотря на присутствие кислорода в придонной воде (глубина озера 1 м), внутри и на поверхности частиц органического детрита, поступающего в осадок, возникают микроочаги анаэробных условий, благоприятные для существования сульфатредуцирующих бактерий.

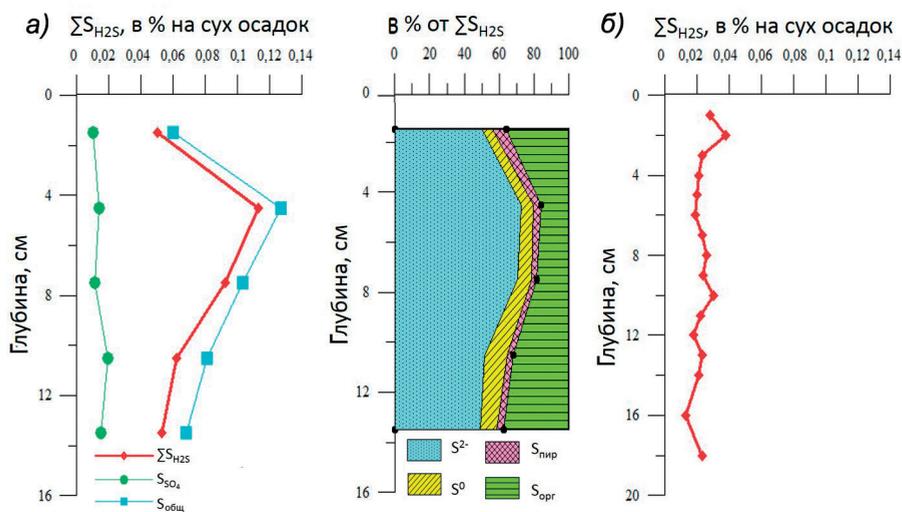


Рис. 7. Распределение различных соединений серы в донных осадках изученных озер о. Вайгач и соотношение форм серы в составе $\sum S_{H2S}$ в ДО озер Талатинское и Тундровое

Fig. 7. Distribution of various sulfur compounds in bottom sediments from the Vaigach Island lakes and the ratio of sulfur forms in the composition of $\sum S_{H2S}$ in the bottom sediments of Lake Talatinsкое and Tundrovое

Основной формой восстановленной серы в исследованных осадках (рис. 7а) являются кислоторастворимые моносulfиды железа (S^{2-}), составляющие 50–70 % от $\sum S_{H_2S}$, или в абсолютных концентрациях 0,025–0,085 % (в среднем 0,046 %). Элементарная сера (S^0) может образовываться только в результате окисления сероводорода или sulfидов микробиологическим и/или химическим путем. Содержание ее в ДО оз. Талатинское невелико — в среднем 0,006 % (0,003–0,008 %), или 8,6 % от $\sum S_{H_2S}$ (6,0–12,9 %). Доля пиритной серы ($S_{\text{пир}}$) в составе $\sum S_{H_2S}$ составляет всего 4,5 % (3,2–8,0 %), или в абсолютных концентрациях 0,003 % (0,002–0,005 %). Известно [16], что в ДО с достаточно хорошо развитым процессом sulfатредукции пирит — основная минеральная форма накопления восстановленной серы [16, 17], а доминирование в осадках моносulfидной серы (что наблюдается в осадках оз. Талатинское) обычно характерно для осадков с низкой интенсивностью процесса sulfатредукции [16].

В исследованной колонке ДО оз. Талатинское органическая сера вносит второй по значимости вклад в $\sum S_{H_2S}$ — 28,1 % от (15,9–37,7 %) или в абсолютных концентрациях — от 0,017 до 0,020 % (в среднем 0,019 %). Однако надо учитывать, что, поскольку мы рассматриваем поверхностный слой донных осадков с низкой интенсивностью sulfатредукции (судя по соотношению sulfидных форм серы и невысокому уровню накопления общей восстановленной серы), в составе органической серы ($S_{\text{орг}}$) может быть высока доля биогенной (прижизненно накопленной) серы исходного ОВ.

Общее содержание восстановленной серы в ДО оз. Талатинское изменялось от 0,050 до 0,113 %, составляя в среднем 0,075 %. Наиболее высокие значения $\sum S_{H_2S}$ отмечены на глубине ДО 3–6 см и обусловлены максимальным накоплением sulfидных форм серы (моносulfидной и пиритной) (рис. 7а), образование которых происходит при взаимодействии бактериального сероводорода с реакционноспособным железом. Можно предполагать, что именно на этой глубине — в контактных условиях аэробно-анаэробного диагенеза — процесс sulfатредукции протекает наиболее интенсивно. Как рассматривалось выше, в ДО этого озера доминирующей формой $Fe_{\text{реакц}}$ является $Fe(II)$, т. е. в исследованном довольно тонком слое отложений лабильное органическое вещество расходуется главным образом на восстановление трехвалентного железа, а не серы, поскольку в ходе диагенетического преобразования донных отложений реакции перехода Fe^{3+} в Fe^{2+} по времени опережают sulfатредукцию.

В ДО оз. Тундровое определено только общее количество серы ($S_{\text{общ}}$), содержание которой изменялось от 0,013 до 0,038 %, составляя в среднем 0,023 %, что почти в четыре раза меньше, чем в ДО оз. Талатинское (0,088 %). В вертикальном распределении $S_{\text{общ}}$ (рис. 7б) выделяются два максимума — на горизонте 1–2 см (0,038 %) и на горизонте 9–10 см (0,030 %), совпадающие с наиболее высокими значениями $C_{\text{орг}}$ в осадках (рис. 4), хотя корреляционная зависимость между ними слабая ($r = 0,41$, $n = 16$).

В целом полученные нами данные по накоплению восстановленной серы в донных осадках двух озер о. Вайгач можно характеризовать как относительно низкие, свидетельствующие о вялости протекающих в них редокс-процессов. Низкий уровень накопления соединений серы, вероятно, можно объяснить высокой степенью минерализации ОВ в донных отложениях и, как следствие, недоступностью его для sulfатредуцирующих бактерий. В ДО оз. Талатинское, кроме того, значительная часть лабильного ОВ рас-

ходуетея на восстановление трехвалентного железа, опережающее по времени сульфатредукцию в ходе диагенетического преобразования донных отложений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе изучения процессов трансформации вещества донных осадков получены новые данные об особенностях их диагенетического преобразования для двух пресноводных озер о. Вайгач — одного из крупнейших на острове оз. Талатинское и расположенного рядом с ним небольшого термокарстового оз. Тундровое.

Согласно результатам спорово-пыльцевого анализа, формирование донных отложений оз. Талатинское происходило в современных климатических условиях тундры. Эрозионные процессы способствовали поступлению аллохтонного материала в относительно мелководное озеро.

Коричневато-серые отложения озер Талатинское и Тундровое по данным гранулометрического анализа представлены довольно плотными пелито-алевритовыми илами. Данные по распределению гранулометрических фракций позволяют заключить, что изученный слой донных отложений обоих озер подвергается регулярному разрушению и перемешиванию в ходе сезонного замерзания–оттаивания. Это нашло отражение в беспорядочном распределении всех изучаемых параметров и сказалось, прежде всего, в невозможности определения скорости осадконакопления по распределению радиоизотопов свинца и цезия в донных отложениях изученных озер.

В составе донных осадков преобладает литогенный материал. Содержание алюминия, являющегося индикатором литогенного вещества, а также кремния и фосфора близко к их среднему количеству в верхней части континентальной земной коры.

В общем содержании углерода донных осадков обоих озер преобладает органическая составляющая. Повышенное содержание органического вещества характерно для верхних слоев осадков обоих озер. Донные осадки оз. Талатинское более обогащены ОВ по сравнению с оз. Тундровое — содержание $C_{\text{орг}}$ составляет в среднем 1,82 % и 0,99 % соответственно. Содержание органического азота в ДО оз. Талатинское составляет в среднем 0,18 %, а в ДО оз. Тундровое его более чем на порядок меньше. Величина C/N отношения свидетельствует о преобладании терригенного вещества в составе донных отложений обоих озер.

В осадках оз. Талатинское определено содержание гумусовых веществ (ГК + ФК), оцененное по содержанию органического углерода. Их количество составляет в среднем 0,43 %, или 23 % от общего содержания органического углерода в ДО. В составе ГВ доминируют гуминовые кислоты (соотношение ГК:ФК ~ 2:1). Полученные данные о низком содержании ГК + ФК, как и в целом невысокое содержание органического углерода, свидетельствуют о значительном отличии ОВ донных отложений арктических озер Талатинское и Тундровое от исследованных нами ранее ДО бореального озера Масельгское, расположенного в зоне с умеренным климатом и гумидным типом седиментогенеза.

Количество реакционноспособного железа в осадках обеих станций сопоставимо и изменяется в интервале 0,40–1,30 % при среднем значении 0,79 %. Основной вклад в состав $Fe_{\text{реакц}}$ по всей длине колонки ДО оз. Талатинское вносит несulfидное Fe(II) — 62,0 % от $Fe_{\text{реакц}}$. В ДО оз. Тундровое, напротив, преобладает Fe(III) — 88,7 % от $Fe_{\text{реакц}}$, т. е. они более окислены.

Общее содержание серы в ДО оз. Талатинское составляло 0,088 %, что в четыре раза выше, чем для ДО оз. Тундровое. Суммарное содержание соединений

восстановленной серы в ДО оз. Талатинское невелико и составляет в среднем около 0,075 % (80 % от общего количества серы в осадках). Вклад отдельных форм в их суммарное содержание соответствует соотношению $S^{2-}:S^{0}:S_{\text{пир}}:S_{\text{орг}} = 59:9:4:28$. Доминирование в составе $\sum S_{\text{H}_2\text{S}}$ кислоторастворимых моносльфидов железа (50–70 % от $\sum S_{\text{H}_2\text{S}}$) свидетельствует о низкой интенсивности процесса сульфатредукции в исследованных ДО.

В целом полученные данные по накоплению восстановленной серы в осадках оз. Талатинское можно характеризовать как относительно низкие, свидетельствующие о вялости протекающих в них редокс-процессов. Причиной этого, скорее всего, является как невысокое содержание ОВ в донных отложениях, так и высокая степень его минерализации и, как следствие, недоступность для сульфатредуцирующих бактерий. Кроме того, лабильная часть ОВ в ДО расходуется на восстановление трехвалентного железа, опережающее по времени сульфатредукцию в ходе диагенетического преобразования донных отложений.

Для озера Талатинское на основании балансовых уравнений расхода органического вещества [35], согласно которым на восстановление 1 % $\sum S_{\text{H}_2\text{S}}$ требуется 0,75 % $C_{\text{орг}}$, а на восстановление 1 % Fe(III) требуется 0,05 % $C_{\text{орг}}$, рассчитан ориентировочный расход органического углерода в диагенетическом процессе, согласно которому он составляет 0,07 %, или 3,8 % от $C_{\text{орг}}$ (1,82 %) в ДО этого озера.

Таким образом, обобщая результаты исследований, можно констатировать, что диагенез в ДО изученных озер острова Вайгач замедлен, что связано прежде всего с низкими температурами среды осадкообразования (вплоть до промерзания первых сантиметров донных отложений), и по выявленному ряду признаков (таких, как расположение острова в Арктической зоне РФ, господство в течение года отрицательных температур воздуха и преобладание количества выпадающих осадков над испарением) его можно отнести к нивальному типу.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Работа выполнена в рамках госзадания ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН № АААА-А18-118012390167-1.

Благодарности. Авторы благодарны И.Н. Болотову и С.А. Игловскому за предоставление проб донных осадков, Р.Б. Ивахновой за определение содержания углерода и азота, [А.Б. Исаевой] и Е.О. Золотых за определение содержания алюминия, кремния и фосфора.

Competing interests. The authors have no competing interests.

Funding. This work was carried out as part of the state assignment of the Federal State Budgetary Institution FITSKIA UrB RAS No. АААА-А18-118012390167-1.

Acknowledgments. The authors are grateful to I.N. Bolotov and S.A. Iglovsky for providing samples of bottom sediments, R.B. Ivakhnova for determining the content of carbon and nitrogen, [A.B. Isaeva] and E.O. Zolotykh for determining the content of aluminum, silicon and phosphorus.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cubasch U., Meehl G.A., Boer G.J., Stouffer R.J., Dix M., Noda A., Senior C.A., Raper S., Yap K.S. Projections of future climate change // Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change: Cambridge, U.K.; New York: Cambridge University Press, 2001. P. 525–582.

2. Котляков В.М. О причинах и следствиях современных изменений климата // Солнечно-земная физика. 2012. Вып. 21. С. 110–114.
3. Алексеев Г.В. Проявление и усиление глобального потепления в Арктике // Фундаментальная и прикладная климатология. 2015. № 1. С. 11–26.
4. Box J.E., Colgan W.T., Christensen T.R., Schmidt N.M., Lund M., Parmentier F.-J.W., Brown R., Bhatt U.S., Euskirchen E.S., Romanovsky V.E., Walsh J.E., Overland J.E., Wang M., Corell R.W., Meier W.N., Wouters B., Mernild S., Mård J., Pawlak J., Olsen M.S. Key indicators of Arctic climate change: 1971–2017 // Environmental Research Letters. 2019. V. 14. P. 1–18.
5. Walter B.P., Heimann M., Matthews E. Modeling modern methane emissions from natural wetlands 1. Model description and results // Journal of Geophysical Research. Atmospheres. 2001. № D24. P. 34189–34206.
6. Лавриненко И.А., Лавриненко О.В., Ануфриев В.В., Глазов П.М., Давыдов А.Н. Изучение влияния климатических изменений на состояние природных экосистем и коренного населения острова Вайгач: Отчет WWF 2010. М., 2010. 216 с.
7. Бызова Н.М., Стишов М.С., Суткайтис О.К., Липка О.Н., Кокорин А.О., Никифоров В.В., Постнова А.И., Уваров С.А. Динамика экосистем острова Вайгач под воздействием изменений климата и антропогенной нагрузки // Вестник Северного (Арктического) федерального университета. Сер. Естественные науки. 2013. № 3. С. 5–15.
8. Вайгач. Остров арктических богов / Под общей редакцией П.В. Боярского. М.: Paulsen, 2011. 576 с.
9. Отчет о НИР в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы по теме «Воздействие на природные комплексы острова Вайгач естественных и антропогенных изменений климата, включая прогноз на ближайшие 30 лет». URL:<http://libed.ru/knigi-nauka/891027-1-vsemirnyy-fond-prirodi-udk-91504-gosregistracii-01201280731-inv-02201358172-utverzhdayu-direktor-kandidat-biol.php> (дата обращения 18.11.2020)
10. Вехов Н.В. Озера и реки острова Вайгач // География и природные ресурсы. 2000. № 6. С. 67–74.
11. Smol J.P. Pollution of lakes and rivers: A paleoenvironmental perspective. London: Arnold, 2002. P. 280.
12. Williamson C.E., Saros J.E., Vincent W.F., Smol J.P. Lakes and reservoirs as sentinels, integrators, and regulators of climate change // Limnol. Oceanogr. 2009. V. 54 (6, part 2). P. 2273–2282.
13. Субетто Д.А., Шевченко В.П., Лудикова А.В. и др. Хронология изоляции озер Соловецкого архипелага и скорости современного озерного осадконакопления // Доклады Академии наук. 2012. Т. 446. № 2. С. 183–190.
14. Шевченко В.П., Любас А.А., Стародымова Д.П., Болотов И.Н., Аксенова О.В., Алиев Р.А., Гофаров М.Ю., Игловский С.А., Кокрятская Н.М. Особенности геохимии тяжелых металлов в донных осадках малых озер урочища Пымвапор (Большеземельская тундра) // Успехи современного естествознания. 2017. № 1. С. 105–110.
15. Заварзин Г.А. Лекции по природоведческой микробиологии. М.: Наука, 2004. 348 с.
16. Волков И.И. Геохимия серы в осадках океана. М.: Наука, 1984. 272 с.
17. Остроумов Э.А. О формах соединений серы в отложениях Черного моря // Тр. Ин-та океанологии АН СССР. 1953. Т. 7. С. 70–90.
18. Иванов М.В. Распространение и геохимическая деятельность бактерий в осадках океана // Океанология. Химия океана. Т. 2. Геохимия донных осадков. М.: Наука, 1979. С. 312–349.
19. Розанов А.Г., Волков И.И., Кокрятская Н.М., Юдин М.В. Марганец и железо в Белом море: осадконакопление и диагенез // Литология и полезные ископаемые. 2006. № 5. С. 539–558.
20. 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. V. 55 (3). P. 1338–1352.

21. *Bespalaya Yu.* Molluscan fauna of an Arctic lake is dominated by a cosmopolitan *Pisidium* species // *Journal of The Molluscan Studies*. 2015. V. 81. Is. 2. P. 294–298.
22. МИ № 88–16365–010–2017. Донные отложения водоемов. Определение гранулометрического состава ситовым и пипеточным методами. Введена 2017–12–26. Архангельск, 2017. 12 с.
23. *Heiri O., Lotter A., Lemeke G.* Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results // *Journal of Paleolimnology*. 2001. V. 25. P. 101–110.
24. *Кунцов В.М.* Абсолютная геохронология донных осадков океанов и морей. М.: Наука, 1986. 271 с.
25. *Амтелогова Н.И.* Радиохимия полония. М.: Атомиздат, 1976. 144 с.
26. *Григорьев В.А.* Методологические аспекты установления скоростей осадконакопления в глубоководных котловинах Среднего и Южного Каспия (по данным радиоизотопного датирования донных отложений) // Пути эволюционной географии: Материалы Всероссийской научной конференции, посвященной памяти профессора А.А. Величко (Москва, 23–25 ноября 2016 г.). М.: Институт географии РАН, 2016. С. 74–77.
27. *Blanchard R.L.* Rapid determination of Lead-210 and Polonium-210 in Environmental samples by deposition on Nickel // *Anal. Chem.* 1966. V. 38. P. 189–192.
28. *Aliev R.A., Bobrov V.A., Kalmykov S.N., Melgunov M.S., Vlasova I.E., Shevchenko V.P., Novigatsky A.N., Lisitzin A.P.* Natural and artificial radionuclides as a tool for sedimentation studies in the Arctic region // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2007. V. 274. № 2. P. 315–321.
29. *Berglund B.E., Ralska-Jasiewiczowa M.* Pollen analysis and pollen diagram // *Handbook of Holocene Palaeoecology and Palaeohydrology* / B.E. Berglund (ed). New York: Wiley Interscience, 1986. P. 455–484.
30. *Гельман Е.М., Старобина И.З.* Фотометрические методы определения породообразующих элементов в рудах, горных породах и минералах. М.: ГЕОХИ АН СССР, 1976. 69 с.
31. Методы количественного органического элементного микроанализа / Под ред. Н.Э. Гельмана. М.: Химия, 1987. 296 с.
32. Методы исследования органического вещества в океане. М.: Наука, 1980. 343 с.
33. *Соколов В.С.* Определение реакционноспособных форм железа и марганца в морских осадках // *Химический анализ морских осадков*. М.: Наука, 1980. С. 28–42.
34. *Волков И.И., Жабина Н.Н.* Методы определения различных соединений серы в морских осадках // *Химический анализ морских осадков*. М.: Наука, 1980. С. 5–27.
35. *Страхов Н.М.* Основы теории литогенеза. Т. 1. Типы литогенеза и их размещение на поверхности Земли. М.: Наука, 1960. 231 с.
36. *Юрцев Б.А., Толмачев А.И., Ребристая О.В.* Флористическое ограничение и разделение Арктики // *Арктическая флористическая область*. Л.: Наука, 1978. С. 9–104.
37. *Кулиев А.Н.* Флора острова Вайгач // *Ботанический журнал*. 2007. Т. 2. № 12. С. 1874–1885.
38. *Rudnick R.L., Gao S.* Composition of the continental crust // *Treatise on Geochemistry*. V. 3: The crust. Amsterdam: Elsevier, 2003. P. 1–64.
39. *Попов А.И.* Гуминовые вещества: свойства, строение, образование. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2004. 248 с.
40. *Кокрятская Н.М., Титова К.В., Забелина С.А., Чупаков А.В., Филина К.В.* Биогеохимические процессы цикла серы в деструкции органического вещества в малых озерах (Архангельская область) // Материалы Всероссийского симпозиума с международным участием «Органическое вещество и биогенные элементы во внутренних водоемах и морских водах» 10–14 сентября 2012 г., Петрозаводск, Республика Карелия. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2012. С. 387–391.

41. Титова К.В., Кокрятская Н.М. Соединения серы в озерах на территории Кенозерского национального парка (Каргопольский район, Архангельская область) // Вопросы естествознания. 2018. № 4 (18). С. 67–74.
42. Титова К.В., Кокрятская Н.М., Жибарева Т.А., Вахрамеева Е.А. Распределение соединений серы как результат протекания процесса сульфатредукции в пресноводном озере Святое // Труды Карельского НЦ. Сер. Лимнология. 2017. № 10. С.28–37.

REFERENCES

1. Cubasch U., Meehl G.A., Boer G.J., Stouffer R.J., Dix M., Noda A., Senior C.A., Raper S., Yap K.S. Projections of future climate change. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, U.K.; New York: Cambridge University Press, 2001: 525–582.
2. Kotlyakov V.M. On the causes and consequences of modern climate change. *Solnechno-zemnaya fizika*. Solar-terrestrial physics. 2012, 21: 110–114. [In Russian].
3. Alekseev G.V. The manifestation and intensification of global warming in the Arctic. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*. Fundamental and Applied Climatology. 2015, 1: 11–26. [In Russian].
4. Box J.E., Colgan W.T., Christensen T.R., Schmidt N.M., Lund M., Parmentier F.-J.W., Brown R., Bhatt U.S., Euskirchen E.S., Romanovsky V.E., Walsh J.E., Overland J.E., Wang M., Corell R.W., Meier W.N., Wouters B., Mernild S., Mård J., Pawlak J., Olsen M.S. Key indicators of Arctic climate change: 1971–2017. *Environmental Research Letters*. 2019, 14: 1–18.
5. Walter B.P., Heimann M., Matthews E. Modeling modern methane emissions from natural wetlands 1. Model description and results. *Journal of Geophysical Research. Atmospheres*. 2001, 24: 34189–34206.
6. Lavrinenko I.A., Lavrinenko O.V., Anufriev V.V., Glazov P.M., Davydov A.N. *Izucheniye vliyaniya klimaticheskikh izmeneniy na sostoyaniye prirodnykh ekosistem i korennoy naseleniya ostrova Vaygach*. Study of the Climate Change Impact on the Natural Ecosystems and Indigenous Population of the Vaygach Island. Report WWF 2010. Moscow, 2010: 216 p. [In Russian].
7. Byzova N.M., Stishov M.S., Sutkaytis O.K., Lipka O.N., Kokorin A.O., Nikiforov V.V., Postnova A.I., Uvarov S.A. Vaygach Island Ecosystems dynamics due to climate change and anthropogenic pressures. *Vestnik Severnogo Arkticheskogo Federal'nogo universiteta. Seriya estestvennye nauki*. Vestnik of Northern (Arctic) Federal University. Editorial Panel of Natural Sciences. 2013, 3: 5–15. [In Russian].
8. *Vaygach. Ostrov arkticheskikh bogov*. Vaygach. An Island of Arctic Gods. Moscow: Paulsen, 2011: 576 p. [In Russian].
9. *Otchet o NIR v ramkakh federal'noy tselevoy programmy Nauchnyye i nauchno-pedagogicheskiye kadry innovatsionnoy Rossii na 2009–2013 gody po teme Vozdeystviye na prirodnyye komplekсы ostrova Vaygach yestestvennykh i antropogennykh izmeneniy klimata, vklyuchaya prognoz na blizhayskiye 30 let*. *Rukovoditel' temy Stishov M.S.* Report on research in the framework of the federal target program Scientific and scientific-pedagogical personnel of innovative Russia for 2009–2013 under the theme The impact on natural complexes of Vaygach Island natural and anthropogenic climate change, including the forecast for the next 30 years. Available at: <http://libed.ru/knigi-nauka/891027-1-vsemirniy-fond-prirodi-udk-91504-gosregistracii-01201280731-inv-02201358172-utverzhdayu-direktor-kandidat-biol.php> (accessed 18.11.2020).
10. Vekhov N.V. Lakes and rivers of Vaygach Island. *Geografiya i prirodnye resursy*. Geography and natural resources 2000, 6: 67–74. [In Russian].
11. Smol J.P. Pollution of lakes and rivers: A paleoenvironmental perspective. London: Arnold, 2002: 280 p.
12. Williamson C.E., Saros J.E., Vincent W.F., Smol J.P. Lakes and reservoirs as sentinels, integrators, and regulators of climate change. *Limnol. Oceanogr.* 2009, 4 (6, part 2): 2273–2282.

13. Subetto D. A., Shevchenko V. P., Ludikova A. V., Kuznetsov D.D., Sapelko T.V., Lisitsyn A.P., Yevzerov V.Ya., van Beyek P., Suo M., Subetto G.D. Chronology of the isolation of the lakes of the Solovki archipelago and the speed of modern lake sedimentation. *Doklady Akademii nauk*. Reports of the Academy of Sciences. 2012, 446 (2): 183–190. [In Russian].
14. Shevchenko V.P., Lyubas A.A., Starodymova D.P., Bolotov I.N., Aksenova O.V., Aliev R.A., Gofarov M.Yu., Iglovsky S.A., Kokryatskaya N.M. Features of the geochemistry of heavy metals in bottom sediments of small lakes of the Pymvashor tract (Bolshezemelskaya tundra). *Uspekhi sovremennoyo yestestvoznaniya*. The successes of modern science. 2017, 1: 105–110. [In Russian].
15. Zavarzin G.A. *Lekcii po prirodovedcheskoi mikrobiologii*. Lectures on natural microbiology. Moscow: Science, 2004: 348 p. [In Russian].
16. Volkov I.I. *Geokhimiya sery v osadkah okeana*. Geochemistry of sulfur in the ocean sediments. Moscow: Science, 1984: 272 p. [In Russian].
17. Ostroumov E.A. On the forms of sulfur compounds in the Black Sea sediments. *Trudy Instituta okeanologii AN SSSR*. Institute proceedings of Oceanology Academy of Sciences of the USSR. 1953, 7: 70–90. [In Russian].
18. Ivanov M.V. *Rasprostranenie i geokhimicheskaya deyatel'nost bakterii v osadkah okeana*. *Geokhimiya donnih osadkov*. *Okeanologia. Khimiya okeana*. The spread and geochemical activity of bacteria in ocean sediments. V. 2. Bottom sediment geochemistry. Oceanology. Ocean chemistry. Moscow: Science, 1979: 312–349. [In Russian].
19. Rozanov A.G., Volkov I.I., Kokryatskaya N.M., Yudin M.V. Manganese and iron in the White Sea: sedimentation and diagenesis. *Litologiya i poleznye iskopayemye*. Lithology and Mineral Resources. 2006, 5: 539–558. [In Russian].
20. 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.
21. Bespalaya Yu. Molluscan fauna of an Arctic lake is dominated by a cosmopolitan *Pisidium* species. *Journal of The Molluscan Studies*. 2015, 81 (2): 294–298.
22. MI № 88-16365-010-2017. *Donnyye otlozheniya vodoyemov. Opredeleeniye granulometricheskogo sostava sitovym i pipetochnym metodami*. Bottom sediments of water bodies. Determination of granulometric composition by sieve and pipetting methods. Accepted 2017–12–26. Arkhangelsk, 2017: 12 p. [In Russian].
23. Heiri O., Lotter A., Lemeke G. Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results. *Journal of Paleolimnology*. 2001, 25: 101–110.
24. Kuptsov V.M. *Absolutnaya geokhronologiya donnykh osadkov okeanov i morej*. Absolute geochronology of bottom sediments of the oceans and seas Moscow: Nauka, 1986: 271 p. [In Russian].
25. Ampelogova N.I. *Radiokhimiya poloniya*. Radiochemistry of Polonium. Moscow: Atomizdat, 1976: 144 p. [In Russian].
26. Grigoriev V.A. Sedimentation rates in the deep basins of the Middle and Southern Caspian Sea according to radioisotope dating: methodological aspects. *Puti evolyutsionnoy geografii. Materialy Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii, posvyashchennoy pamyati professora A.A. Velichko (Moskva, 23–25 noyabrya 2016 g.)*. Ways of evolutionary geography. Materials of the All-Russian Scientific Conference dedicated to the memory of Professor A.A. Velichko (Moscow, November 23–25, 2016). Moscow: Institute of Geography RAS. 2016: 74–77. [In Russian].
27. Blanchard R.L. Rapid determination of Lead - 210 and Polonium - 210 in environmental samples by deposition on Nickel. *Anal. Chem.* 1966, 38: 189–192.
28. Aliev R.A., Bobrov V.A., Kalmykov S.N., Melgunov M.S., Vlasova I.E., Shevchenko V.P., Novigatsky A.N., Lisitzin A.P. Natural and artificial radionuclides as a tool for sedimentation studies in the Arctic region. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2007, 274 (2): 315–321.

29. Berglund B.E., Ralska-Jasiewiczowa M. Pollen analysis and pollen diagram. In: B.E. Berglund (ed). Handbook of Holocene Palaeoecology and Palaeohydrology. New York: Wiley Interscience, 1986: 455–484.
30. Gelman E.M., Starobina I.Z. *Fotometricheskie metody opredeleniya porodoobrazuyushchih elementov v ryдах, gornih porodah i mineralah*. Photometric methods for determining rock-forming elements in ores, rocks and minerals. Moscow: GEOKHI AS USSR, 1976: 69 p. [In Russian].
31. *Metody kolichestvennogo organicheskogo elementnogo mikroanaliza*. Methods of quantitative organic elemental microanalysis. Moscow: Chemistry, 1987: 296 p. [In Russian].
32. *Metody issledovaniya organicheskogo veshchestva v okeane*. Methods of research of organic matter in the ocean. Moscow: Science, 1980: 343 p. [In Russian].
33. Sokolov V.S. Determination of reactive forms of iron and manganese in marine sediments. *Chimicheskii analiz morskikh osadkov*. Chemical analysis of marine sediments. Moscow: Science, 1984: 28–42. [In Russian].
34. Volkov I.I., Zhabina N.N. Methods for the determination of various sulfur compounds in marine sediments. *Chimicheskii analiz morskikh osadkov*. Chemical analysis of marine sediments. Moscow: Science, 1980: 5–27. [In Russian].
35. Strakhov N.M. *Osnovy teorii litogeneza. T.1. Tipy litogeneza i ikh razmeshcheniye na poverkhnosti Zemli*. Fundamentals of the theory of lithogenesis. V.1. Types of lithogenesis and their placement on the surface of the Earth. Moscow: Science, 1960: 231 p. [In Russian].
36. Yurtsev B.A., Tolmachev A.I., Rebristaya O.V. *Floristicheskoye ograniicheniye i razdeleniye Arktiki*. Floristic restriction and division of the Arctic. *Arkticheskaya floristicheskaya oblast'*. Arctic floristic region. Leningrad: Science, 1978: 9–104. [In Russian].
37. Kuliev A.N. Flora Island Vaigach. *Bot. zhurn.* Bot. Journ. 2007. 2(12): 1874–1885. [In Russian].
38. Rudnick R.L., Gao S. Composition of the continental crust. Treatise on Geochemistry. V.3: The crust. Amsterdam: Elsevier, 2003: 1–64.
39. Popov A.I. *Guminovyye veshchestva: svoystva, stroeniye, obrazovaniye*. Humic substances: properties, structure, formation. St. Petersburg: Publishing house of St. Petersburg State University, 2004: 248 p. [In Russian].
40. Kokryatskaya N.M., Titova K.V., Zabelina S.A., Chupakov A.V., Filina K.V. Biogeochemical processes of the sulfur cycle in the destruction of organic matter in small lakes (Arkhangelsk region). *Materialy vserossiyskogo simpoziuma s mezhdunarodnym uchastiyem Organicheskoye veshchestvo i biogennyye elementy vo vnutrennikh vodoyemakh i morskikh vodakh 10-14 sentyabrya 2012 g., Petrozavodsk, Respublika Kareliya*. Organic matter and nutrients in inland and marine waters: Materials of the All-Russian Symposium (Petrozavodsk, Sept. 10–14, 2012). Petrozavodsk: Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences, 2012: 387–391. [In Russian].
41. Titova K.V., Kokryatskaya N.M. Compounds of sulfur in lakes on the territory of the Kenozero National Park (Kargopol district, Arkhangelsk region). *Voprosy yestestvoznaniya*. Natural sciences. 2018, 4 (18): 67–74. [In Russian].
42. Titova K.V., Kokryatskaya N.M., Zhibareva T.A., Vakhrameyeva E.A. The distribution of sulfur compounds as a result of the process of sulfate reduction in the freshwater lake Svyatoye. *Trudy Karel'skogo NTS. Seriya Limnologiya*. Proceedings of the Karelian Scientific Center. Series Limnology. 2017, 10: 27–38. [In Russian].