

УДК 551.583.7
DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4403
Шифр специальности ВАК: 1.6.5

Минеральный состав донных отложений озера Сабакты как индикатор палеоклимата, Южный Урал, Россия

А.Р. Юсупова[✉], Н.Г. Нургалиева, А.М. Рогов

Казанский федеральный университет, Россия, г. Казань

[✉]i@ajusupova.ru

Аннотация. Реконструкция климатических изменений по донным отложениям современных озер позволяет выявить климатические тренды и события в позднечетвертичное время. Урал рассматривается как один из климато-разделов, поэтому исследования условий озерного седиментогенеза, в том числе климатических, актуальны на данной территории, где из многочисленных озер изучены лишь единичные. **Цель:** изучение минерального состава как индикатора палеоклимата донных отложений озера Сабакты. **Объект:** керн донных отложений озера Сабакты длиной 298 см, возраст которых составляет не менее 25 тыс. к.л.н. **Методы.** Отбор образцов проводился с учетом сейсмоакустических данных, литологической неоднородности, а также экспрессного измерения магнитной восприимчивости и данных радиометрического датирования. Гранулометрический анализ осуществлялся методом лазерной гранулометрии с использованием анализатора размера частиц Bluewave (Microtrac, США), совмещённого с системой загрузки и циркуляции пробы с интегрированным ультразвуковым диспергатором. Минеральный состав осадков был определен при помощи рентгеновского дифрактометра D2 PHASER и автоэмиссионного сканирующего электронного микроскопа Merlin. **Результаты.** По всему разрезу установлено доминирование алевритовой фракции. Результаты рентгенодифрактометрии и электронной микроскопии показали, что минеральный состав характеризуется преобладанием в осадках аллотигенных минералов (кварц, микроклин, альбит, слюда, хлорит, смешанно-слоистые глинистые минералы, роговая обманка, каолинит). Аутигенные минералы включают биогенный кремнезем (кристобалит, тридимит), пирит, карбонаты (кальцит, доломит), сульфаты (гипс, барит). **Выводы.** Соотношение аллотигенной и аутигенной составляющих отражает климатически обусловленный режим поставки кластического материала. Эпизоды увеличения/уменьшения влажности климата проявляются в изменениях содержания карбонатных и сульфатных минералов. Выявлено, что во время начального этапа осадконакопления (~26000–11700 к.л.н.) озеро Сабакты было мелководным и минерализованным вследствие аридизации климата, включавшей, вероятно, и глобальное событие Бонда 8. Изучение минерального состава осадков озера Сабакты позволило установить события аридизации климата: ~10000 к.л.н., ~7600 к.л.н., ~6900 к.л.н., ~1900 к.л.н. и ~1400 к.л.н. В осадках озера Сабакты отмечается яркий эпизод уменьшения влажности климата в интервале ~7300–5200 к.л.н., который сопровождается увеличением карбонатности до 70 % и обнаружением гипса на отметке ~6900 к.л.н.

Ключевые слова: палеоклимат, голоцен, озерные осадки, минеральный состав, гранулометрия

Благодарности: Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания проект № FZSM-2023–0023 в сфере научной деятельности, гранулометрический анализ выполнен за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета (ПРИОРИТЕТ-2030).

Для цитирования: Юсупова А.Р., Нургалиева Н.Г., Рогов А.М. Минеральный состав донных отложений озера Сабакты как индикатор палеоклимата, Южный Урал, Россия // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 8. – С. 77–90. DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4403

UDC 551.583.7

DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4403

Mineral composition of lake Sabakty sediments as an indicator of paleoclimate, Southern Urals, Russia

A.R. Yusupova[✉], N.G. Nurgalieva, A.M. Rogov

Kazan Federal University, Kazan, Russian Federation

[✉]i@ajusupova.ru

Abstract. Relevance. Reconstruction of climatic changes based on the lacustrine sediments of lakes makes it possible to identify climatic trends and events in the late Quaternary. The Urals is considered as one of the climatic divisions, therefore, studies of the conditions of lake sedimentation, including climatic ones, are relevant in this area. **Aim.** To study mineral composition as an indicator of paleoclimate of Lake Sabakty sediments. **Object.** Core of Lake Sabakty sediments (length is 298 cm). The age of the core is ~25 thousand years old. **Materials and methods.** Sampling was carried out taking into account seismo-acoustic data, lithological description, as well as measurements of magnetic susceptibility and radiometric dating data. The granulometric analysis was carried out by laser granulometry using a Bluewave particle size analyzer (Microtrac, USA) combined with a sample loading and circulation system with an integrated ultrasonic dispersant. Mineral composition of the sediments was determined using the D2 PHASER X-ray diffractometer and the Merlin auto-emission scanning electron microscope. **Results.** The predominance of the siltstone fraction was established. The mineral composition is characterized by the predominance of allotigenic minerals in sediments (quartz, microcline, albite, mica, chlorite, mixed-layer clay minerals, hornblende, kaolinite) according to X-ray diffraction and electron microscopy. Autigenic minerals include biogenic silica (cristobalite, tridymite), pyrite, carbonates (calcite, dolomite), sulfates (gypsum, barite). **Conclusions.** The ratio of allogenic and autogenic components reflects the changes in the accommodation of the reservoir and the supply of clastic material associated with changes in climate humidity. Changes in climate humidity are reflected in changes in the contents of carbonate and sulfate minerals. At the beginning of sedimentation, Lake Sabakty was shallow and mineralized due to climate aridization, which probably included the global Bond 8 event (~26000–11700 BP). The study of the mineral composition of the sediments of Lake Sabakty allowed us to establish the events of climate aridization: ~10000 BP, ~7600 BP, ~6900 BP ~1900 BP and ~1400 BP. In Sabakty Lake, there is a bright episode of a decrease in climate humidity in the range of ~7300–5200 BP, which is marked by an increase in carbonate content up to 70% and the detection of gypsum at ~6900 BP.

Keywords: Paleoclimate, Holocene, lacustrine sediments, mineral composition, granulometry

Acknowledgements: This work was funded by the subsidy allocated to Kazan Federal University for the state assignment project no. FZSM-2023-0023 in the sphere of scientific activities and granulometric analysis was supported by the Kazan Federal University Strategic Academic Leadership Program (PRIORITY-2030).

For citation: Yusupova A.R., Nurgalieva N.G., Rogov A.M. Mineral composition of lake Sabakty sediments as an indicator of paleoclimate, Southern Urals, Russia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 8, pp. 77–90. DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4403

Введение

Известно, что донные отложения современных озер являются наиболее информативными архивами климатических данных. Характер озерного осадкообразования, чувствительного к изменениям климата и других факторов окружающей среды определяет разнообразие вещественного состава донных отложений, открывая большие возможности для литолого-генетических палеореконструкций.

Седиментация в малых озерах обладает рядом характерных черт, в частности богатством минеральных фаз, которые могут отложиться за короткое время в небольшом по площади и глубине бассейне. Образование минералов in-situ как под влиянием химизма среды, так и при участии биологиче-

ских агентов, является важной частью геохимического цикла, а структурные и кристаллохимические особенности продуктов аутигенного минералообразования представляют собой надежные индикаторы климатических обстановок, в которых этот процесс протекает. Оптимальными объектами для подобных исследований считаются плейстоцен-голоценовые отложения малых минеральных озер [1]. Таким образом, в донных отложениях озер формируется уникальный архив данных об изменениях природных процессов прошлого.

Изучение минерального состава донных отложений озер позволяет оценить величину терригенного сноса, колебания уровня и продуктивность озер, так как изменения содержания аллотигенных

минералов в сапропеле свидетельствуют о колебаниях уровня озера [2]. Аллотигенные минералы в осадочных отложениях образуют определенные, часто весьма характерные ассоциации, состав которых отражает состав пород питающей провинции или источника сноса обломочного материала [3]. Аутигенные минералы являются индикаторами физико-химических условий среды. Многие аутигенные минералы осадочных пород могут быть индикаторами среды образования, показывающими значение pH, Eh, степень солености вод бассейна и т. д. [3–5].

Полнота и детальность реконструкций условий формирования отложений определяется числом объектов и получением большего числа записей разных литологических данных. Это актуально для территории Южного Урала, где изучены единичные озера [6].

Ряд работ посвящен изучению вещественного состава озерных отложений, а также палеоклиматическим реконструкциям Урала с помощью спорово-пыльцевого анализа торфяных отложений, например, [7]. Урал рассматривается как климато-раздел [8], поэтому исследования условий озерного седиментогенеза, в том числе климатических, особенно актуальны на данной территории.

Наличие достаточно мощных донных осадков (более 7 м) [9] установлено в озере Сабакты (53°37'0,78" с.ш.; 58°39'36,1" в.д.), которое расположено в срединной части Башкирского Зауралья.

Озеро Сабакты впервые специально изучалось в работе [10]. В данной работе состав донных отложений охарактеризован в пределах не более 50–60 см верхней части ила как однообразный по толщине, дисперсности, цвету и органолептическим показателям, за исключением прибрежной полосы восточной части озера (в пределах 50–100 м от берега), где дно представлено слегка заиленным песчано-гравийным слоем черноватого цвета. При этом какие-либо данные по вещественному составу рассмотренных донных отложений здесь не получены.

В работе [11] изучен керн донных отложений озера Сабакты мощностью 1,68 м. Геохимический анализ осадков озера позволил провести реконструкцию условий осадконакопления в позднечетвертичное время. Также, согласно проведенным реконструкциям электропроводности, авторам работы удалось установить, что в течение конца плейстоцена-голоцена соленость озера Сабакты изменялась [11].

В работе [12] представлены результаты комплексирования данных лабораторных исследований (радиоуглеродное датирование, гранулометрический анализ, измерение магнитной восприимчивости, коэрцитивная спектрометрия, дифференциальный термоманитный анализ, рентгенофлуорес-

центный и ИСП-МС анализ). В работе представлена литологическая зональность керна донных отложений озера Сабакты длиной ~3 м, возраст которой составляет ~25 тыс. лет. Выделены одна плейстоценовая зона и четыре голоценовые литологические зоны, отражающие историю осадконакопления в изучаемом водоеме. Авторами указанной работы обозначены наиболее значительные эпизоды и события в истории осадконакопления.

Целью данной работы является изучение особенностей минерального состава осадков озера Сабакты.

Полученные данные позволят развить и дополнить общие и региональные представления об условиях озерного осадконакопления.

Характеристика объекта исследования

Бессточноеzero Сабакты (53°36'55" с.ш.; 58°39'22" в.д.) имеет следующие морфометрические параметры: площадь – 2,4 км², длина – 2,3 км, средняя ширина – 1 км, средняя глубина – 2,8 м; максимальная глубина – 6 м, объем воды – 5,1 млн м³; площадь водосбора – 9,0 км² [13]. Берега озера преимущественно пологие. Чаша озера имеет блюдцеобразную форму с относительно медленным нарастанием глубин в западной и юго-западной частях котловины и более быстрым нарастанием глубин у восточного и северо-восточного берегов [10].

Согласно данным радиоуглеродного датирования возраст изучаемых отложений составляет не менее 25 тыс. лет [12].

Материал и методы исследования

Для хронологической оценки и подробного изучения гранулометрического и минерального состава была опробована керновая колонка 4К длиной 298 см, отобранная в центральной части оз. Сабакты в августе 2019 г. с глубины ~6 м [9].

Отбор образцов для различных методов исследования проводился пробоотборником, подробно описанным в [14] с учетом сейсмоакустических данных (выбран участок ненарушенной слоевой ассоциации), литологической неоднородности (по данным первичного описания керна в полевых условиях и экспрессного измерения магнитной восприимчивости [12, 15] и данных радиометрического датирования [12]).

Все виды исследований (кроме радиометрического датирования) осуществлены в Институте геологии и нефтегазовых технологий Казанского федерального университета.

Гранулометрический анализ проводился методом лазерной гранулометрии с использованием анализатора размера частиц Bluewave (Microtrac, США), совмещенного с системой загрузки и цир-

куляции пробы с интегрированным ультразвуковым диспергатором. Предварительно были обработаны образцы 10 %-й HCl и 30 %-й H₂O₂ для удаления карбонатов и органического вещества. Для определения литологических разностей использована классификация нелитифицированных осадков по [3]. При обработке данных гранулометрического состава строились графики распределения содержаний фракций (гистограммы и кумулятивные кривые) и использовался медианный размер зерен (M_d), рассчитываемый квантильным методом, тесно связанный с коэффициентом сортировки и отражающий гидродинамический уровень осадкообразования и аккомодацию [16, 17].

Электронная микроскопия была проведена на базе Междисциплинарного центра «Аналитическая микроскопия» КФУ. С целью изучения морфологии и элементного состава минеральных частиц донных отложений использовался автоэмиссионный сканирующий электронный микроскоп Merlin компании Carl Zeiss (Германия), оснащенный детектором элементного анализа Aztec X-MAX. Разрешение составляет 127 эВ.

Рентгеновский дифракционный анализ (X-Ray diffraction analysis) использовался для определения минерального состава осадочных отложений. Анализ был проведен при помощи рентгеновского дифрактометра D2 PHASER. В ходе исследований были получены дифрактограммы исследуемых образцов. Определены кристаллические фазы (силикаты, алюмосиликаты, водные силикаты, ферросиликаты, оксиды, сульфиды, сульфаты, карбонаты) и их процентное содержание. Минеральный состав представлен аллотигенной (привнесенной) и аутигенной (биогеомогенной) составляющими осадочных образований.

Результаты

Гранулометрический анализ. Отложения нижней части колонки сложены голубовато-серым суглинком (интервал 290–216 см) и сменяются вверх по разрезу темно-зеленым суглинком алевритовым с прослойками супеси алевритовой и алевритистого песка (рис. 1). Включения галечно-гравийного материала характерно для интервала 246–256 см. Наличие раковинного детрита зафиксировано в интервале 132–226 см [12].

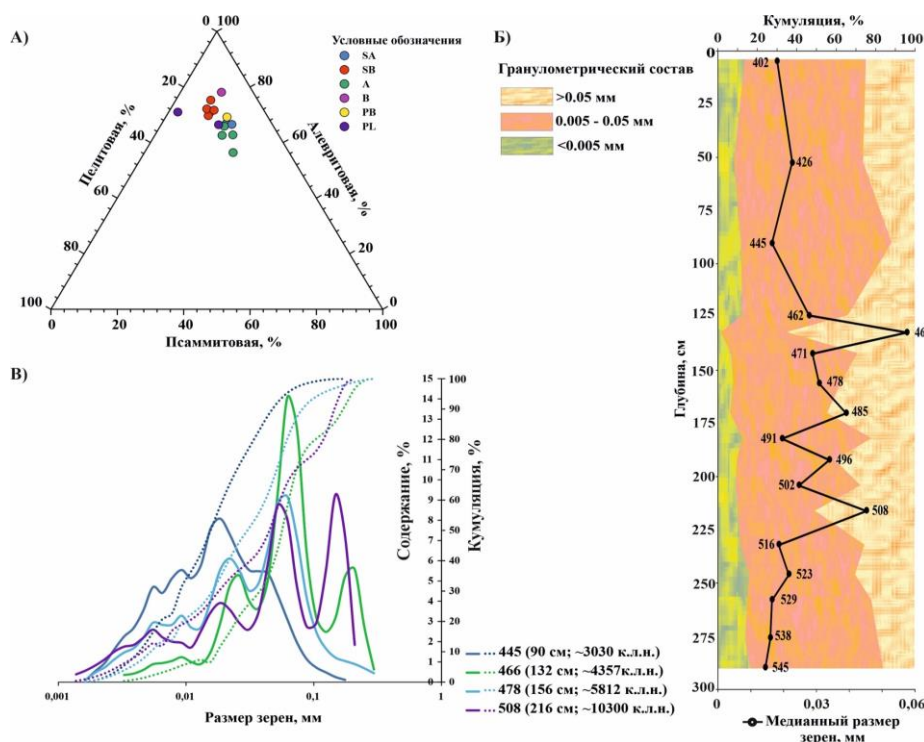


Рис. 1. А) треугольная диаграмма, отображающая распределение гранулометрического состава (пелитовая фракция, %; алевритовая фракция, %; псаммитовая фракция, %); Б) распределение гранулометрического состава (M_d , мм; глина, %; алеврит, %; песок, %); В) примеры графиков распределения содержания зерен по размеру частиц (гистограмма (сплошная линия) и кумулятивный график (пунктирная линия)) для образцов № 445 (суглинок алевритовый), № 478 (супесь алевритовая), № 508 (суглинок) и № 466 (алевритовый песок)

Fig. 1. А) triangle diagram showing the distribution of granulometric composition (clay, %; silt, %; sand, %); Б) distribution of granulometric composition (M_d , mm; clay, %; silt, %; sand, %); В) examples of graphs of grain content distribution by particle size (histogram (solid line) and cumulative graph (dotted line)) for samples no. 445 (siltstone loam), no. 478 (siltstone sandy loam), no. 508 (loam) and no. 466 (siltstone sand)

По разрезу устанавливается преобладание алевритовой фракции (рис. 1, А, Б), содержание которой изменяется в интервале от 33,24 до 76,3 % со средним значением 58,14 %. Содержание пелитовой фракции (размер зерен <0,005 мм) изменяется в диапазоне от 1,37 до 16,41 % со средним значением 10,63 %. Содержание псаммитовой (песчаной) фракции изменяется от 12,02 до 65,39 % со средним значением 31,22 %. Медианный размер (M_d) зерен изменяется в пределах 0,014–0,056 мм со средним значением 0,0258 мм [12] (рис. 1, Б).

На рис. 1, В показано распределение зерен (гистограмма и кумулятивная кривая) в типичном суглинке алевритовом (90 см, ~3030 к.л.н.) – преобладающей литологической разности разреза, а также в супеси алевритовой (156 см, ~5812 к.л.н.), суглинке (216 см, ~10300 к.л.н.) и алевритовом песке (132 см, ~4357 к.л.н.).

Минеральный состав. Результаты рентгенодифрактометрии показали, что минеральный состав характеризуется преобладанием в осадках (28–96 % (среднее 77 %) минерального состава) аллотигенных минералов (кварц, микроклин, альбит, слюда, хлорит, смешаннослойные глинистые минералы, роговая обманка, каолинит).

Аутигенные минералы включают биогенный кремнезем (кристоалит, тридимит), пирит, карбонаты (кальцит, доломит), гипс, барит.

Содержание биогенного кремнезема (кристоалит, тридимит) [18, 19], который идентифицируется на электронно-микроскопических снимках в составе панцирей диатомей и стоматоцист, изменяется в пределах 3–26 % (рис. 2).

Последние имеют сферическую форму в основном с гладкой поверхностью размером 5–10 мкм с достаточно хорошей сохранностью (рис. 2).

В осадках оз. Сабакты содержание пирита изменяется в диапазоне от 0,55 до 8,44 % со средним значением 1,34 %. В осадках установлено присутствие фрамбоидального пирита и отдельных кубических кристаллов пирита (рис. 3).

Содержание карбонатов характеризуется реверсивным, по отношению к содержанию аллотигенных минералов, изменением по разрезу в пределах 2–71 % при среднем значении 9–13,76 %. Минеральный состав карбонатной компоненты оз. Сабакты характеризуется чередованием кальцитовых (рис. 4, А) и кальцит-доломитовых композиций (рис. 4, Б).

Содержание кальцита в осадочных отложениях озера изменяется в широком диапазоне от 1 до 69 %, содержание доломита варьирует от 0,57 до 3,78 % при среднем значении 1,66 %.

Кальцит, содержащий в примесях Mg, Mn и Sr, по данным СЭМ установлен в виде блочных кристаллов с размером зерен <10 мкм (рис. 5).

Доломит в осадках оз. Сабакты был установлен в двух основных формах (рис. 6, 7). Ромбоэдрический доломит был зафиксирован в виде хорошо сформированного субидiomорфного кристалла (~3 мкм) (рис. 6).

Также доломит был установлен в виде дисперсных кристаллов, прикрепленных к поверхности других минералов с зернами менее 2 мкм (рис. 7) и агрегированных в кластеры (рис. 7).

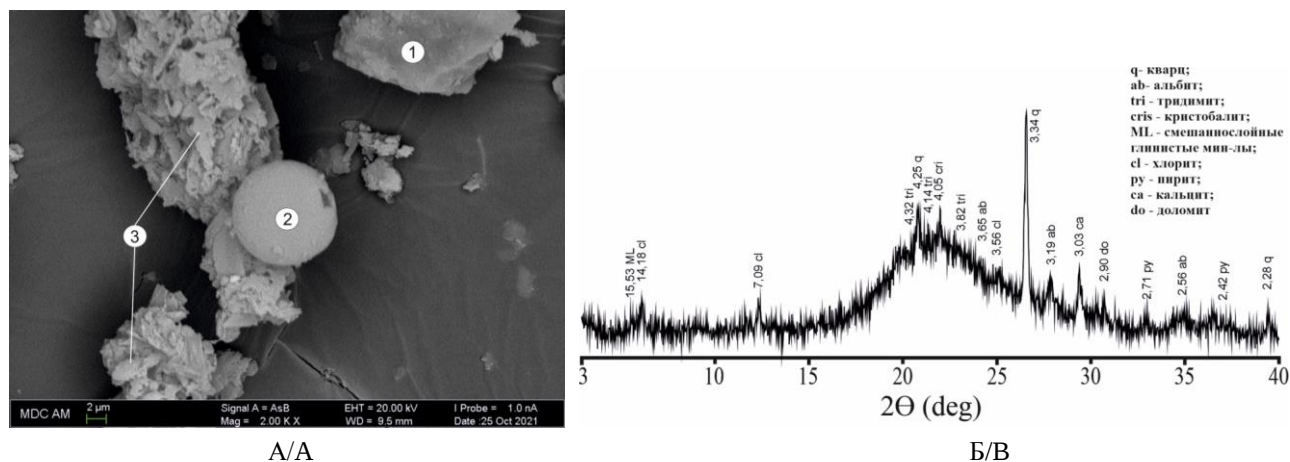


Рис. 2. Минеральный состав осадков оз. Сабакты на примере интервала 90 см (~3030 к.л.н.): А) электронно-микроскопические снимки: обломочный кварц – энергодисперсионный спектр (1), стоматоцисты, на врезках – энергодисперсионный спектр (2), панцири диатомей (целые створки и фрагменты) (3); Б) дифракционный спектр минерального состава осадков с выраженной рентгеноаморфной фазой (86 см; ~2940 к.л.н.)

Fig. 2. Mineral composition of Sabakty Lake sediments. An interval of 90 cm (~3030 BP): А) electron microscopic images: detrital quartz – energy dispersion spectrum (1), stomatocysts, on insets – energy dispersion spectrum (2), shells of diatoms (whole leaves and fragments) (3); Б) diffraction spectrum of the mineral composition of sediments with a pronounced X-ray amorphous phase (86 cm; ~2940 BP)

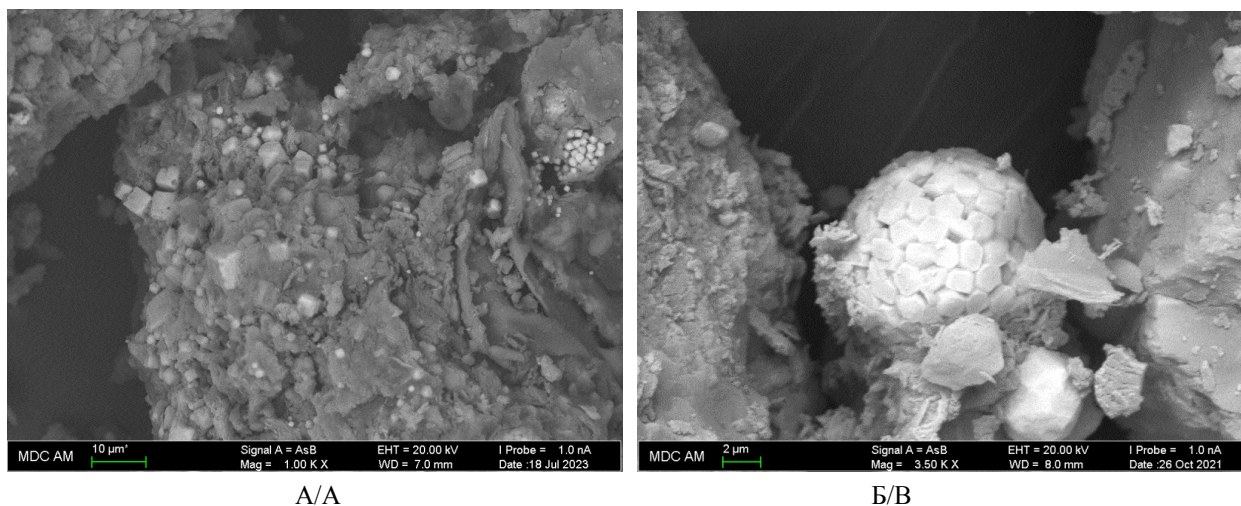


Рис. 3. А) электронно-микроскопический снимок фрамбоидального пирита (190 см; ~2160 к.л.н.); Б) электронно-микроскопический снимок фрамбоидального пирита (отметка 170 см; ~6750 к.л.н.) (атом. % Si – 5,62, O – 33,71, Al – 1,51, Cu – 2,17, Fe – 49,69)
Fig. 3. A) electron microscopic image of framboidal pyrite (190 cm; ~2160 BP); B) electron microscopic image of framboidal pyrite (170 cm; ~6750 BP) (atom. % Si – 5,62, O – 33,71, Al – 1,51, Cu – 2,17, Fe – 49,69)

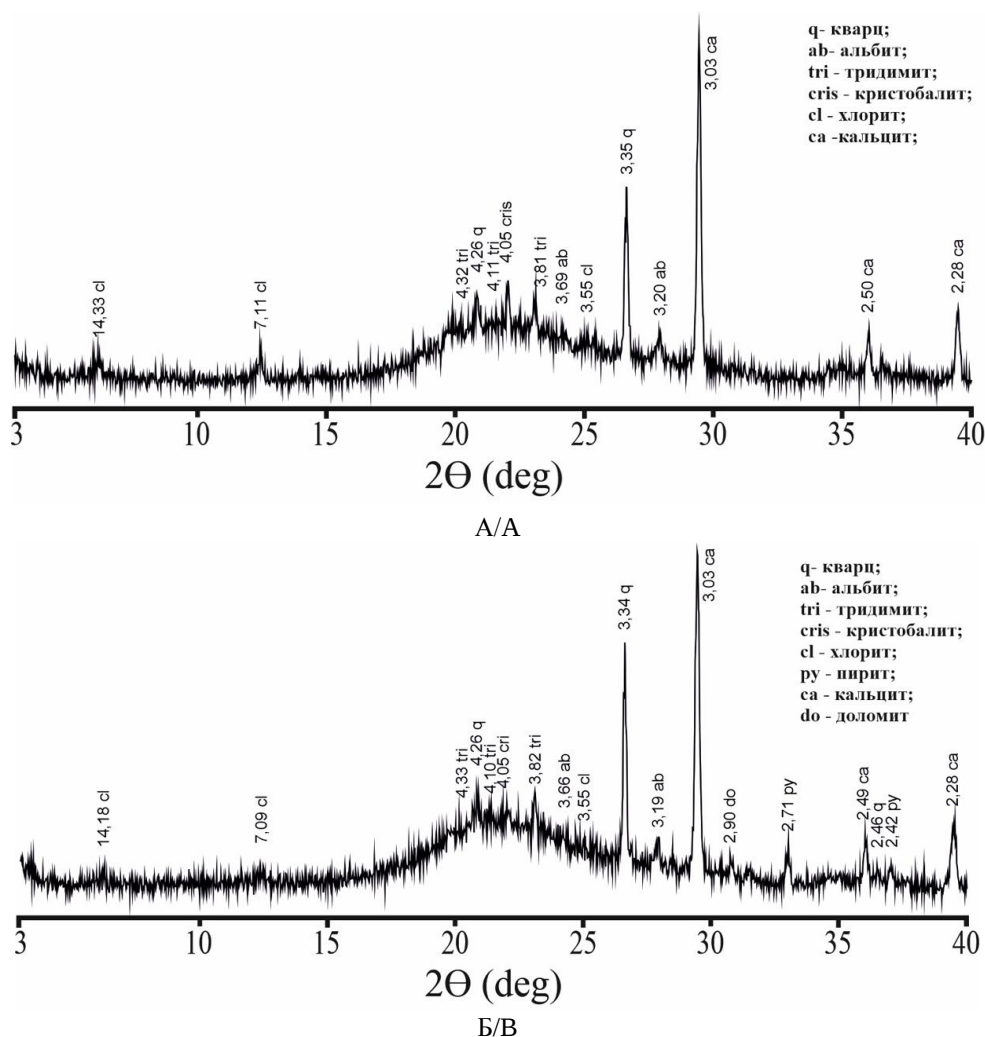
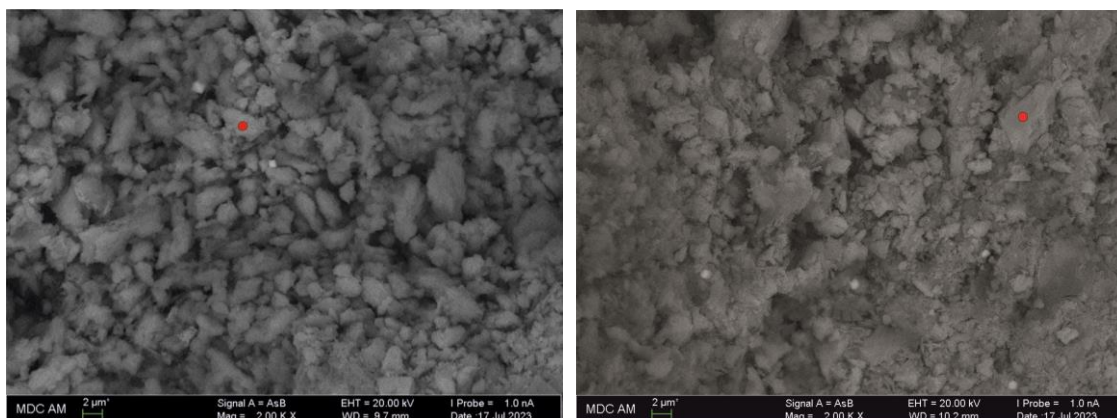


Рис. 4. Дифрактограммы донных отложений оз. Сабакты: А) отметка 46 см (~1372 к.л.н.); Б) отметка 166 см (~6472 к.л.н.)
Fig. 4. Diffractograms of Sabakty Lake sediments: A) depth is 46 cm (~1372 BP); B) depth is 166 cm (~6472 BP)



А/А

Б/В

Рис. 5. Электронно-микроскопический снимок кальцита, 154 см, ~5700 кл.н.: А) атом. % Ca – 8,69, Mg – 0,47; O – 38,87, C – 50,87; Mn – 0,05, Si – 0,44; Al – 0,24, S – 0,23, Fe – 0,08; Б) атом. % Ca – 10,86, Mg – 0,65; O – 61,53, C – 25,70; Sr – 0,03, Si – 0,64; Al – 0,23, S – 0,21, Fe – 0,11

Fig. 5. Electron microscopic image of calcite, 154 cm, ~5700 BP; А) atom. % Ca – 8,69, Mg – 0,47; O – 38,87, C – 50,87; Mn – 0,05, Si – 0,44; Al – 0,24, S – 0,23, Fe – 0,08; Б) atom. % Ca – 10,86, Mg – 0,65; O – 61,53, C – 25,70; Sr – 0,03, Si – 0,64; Al – 0,23, S – 0,21, Fe – 0,11

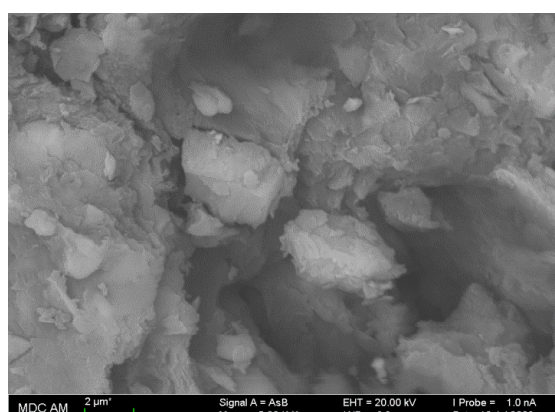
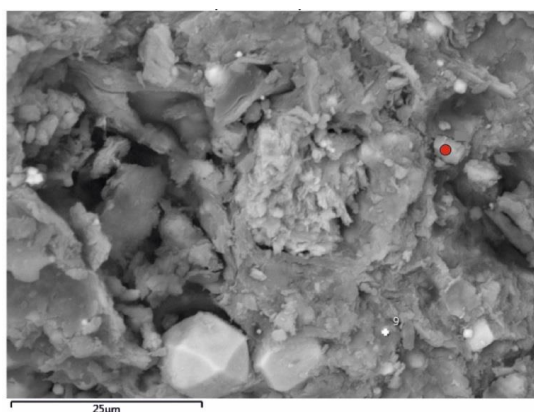


Рис. 6. Электронно-микроскопический снимок доломита (отметка 190 см; ~8164 кл.н.; атом. % Ca – 3,52, Mg – 3,73; O – 46,63, C – 43,74; Si – 5,17; Al – 0,59, S – 0,98, Fe – 0,23)

Fig. 6. Electron microscopic image of dolomite (depth is 190 cm; ~8164 BP; atom. % Ca – 3,52, Mg – 3,73; O – 46,63, C – 43,74; Si – 5,17; Al – 0,59, S – 0,98, Fe – 0,23)

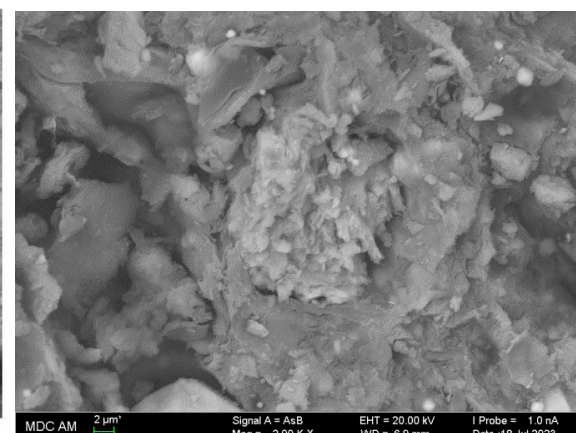
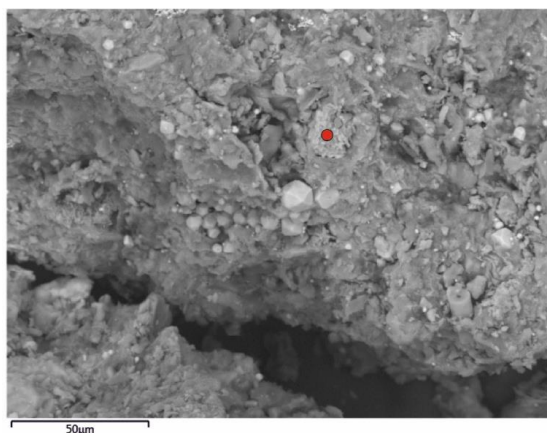


Рис. 7. Электронно-микроскопический снимок доломита (отметка 190 см; ~8164 кл.н.; атом. % Ca – 2,40, Mg – 1,94; O – 56,57, C – 29,54; Si – 4,37; Al – 1,93, Ti – 1,98, Fe – 1,27)

Fig. 7. Electron microscopic image of dolomite (depth is 190 cm; ~8164 BP; atom. % Ca – 2,40, Mg – 1,94; O – 56,57, C – 29,54; Si – 4,37; Al – 1,93, Ti – 1,98, Fe – 1,27)

На отметках 72, 172 и 212 см зафиксировано присутствие гипса с содержаниями 8,45, 5,91 и 11,85 % соответственно (рис. 8).

Методом СЭМ подтверждено наличие кристаллов гипса в осадках (рис. 9).

Методом СЭМ также удалось зафиксировать присутствие барита (рис. 10) на отметке 182 см (~7600 к.л.н.).

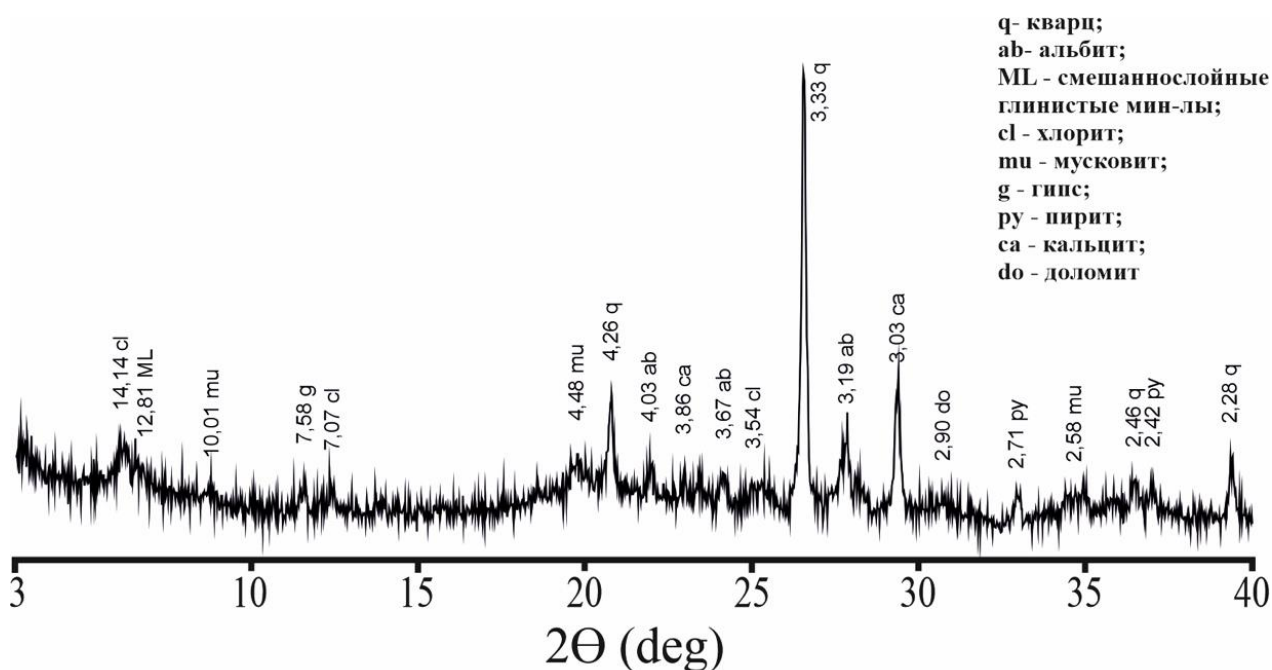


Рис. 8. Дифрактограмма донных отложений оз. Сабакты – отметка 172 см (~6890 к.л.н.)

Fig. 8. Diffractogram of Lake Sabakty sediments – depth is 172 cm (~6890 BP)

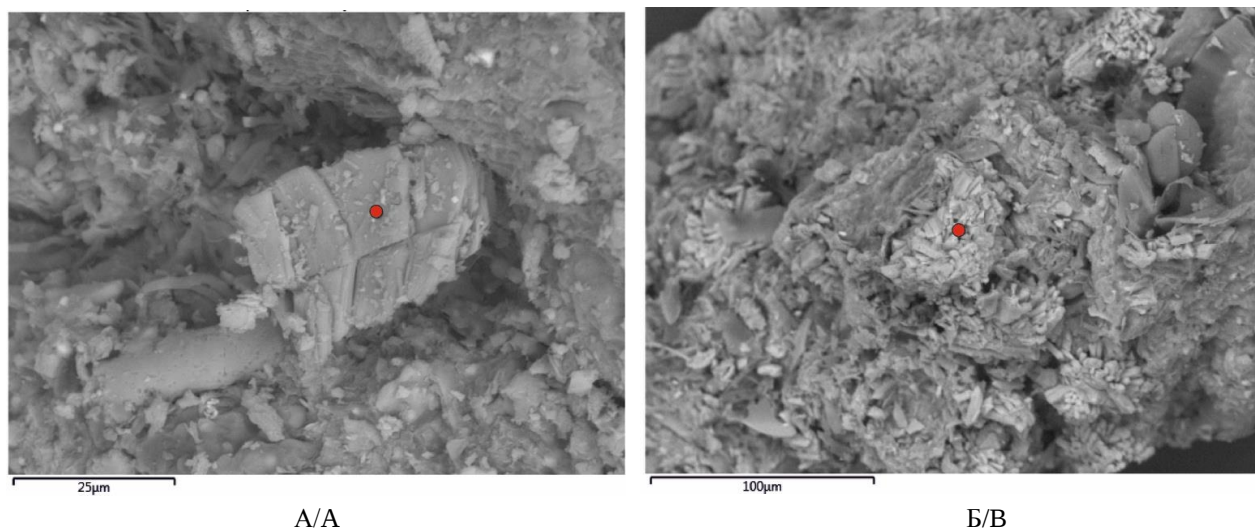


Рис. 9. А) электронно-микроскопический снимок гипса в образце 506 оз. Сабакты (212 см; 9973 к.л.н., атом. % Ca – 14,09; S – 14,40; O – 70,39, Si – 0,45, Al – 0,24, Fe – 0,26); Б) электронно-микроскопический снимок гипса в образце 436 оз. Сабакты (72 см; 2440 к.л.н. атом. % Ca – 21,21; S – 16,65; O – 61,03, Si – 0,55, Al – 0,21, Fe – 0,18)

Fig. 9. А) electron microscopic image of gypsum in a sample of 506 (depth is 212 cm; 9973 BP, atom. % Ca – 14,09; S – 14,40; O – 70,39, Si – 0,45, Al – 0,24, Fe – 0,26); Б) electron microscopic image of gypsum in a sample of 436 (depth is 72 cm; 2440 BP. atom. % Ca – 21,21; S – 16,65; O – 61,03, Si – 0,55, Al – 0,21, Fe – 0,18)

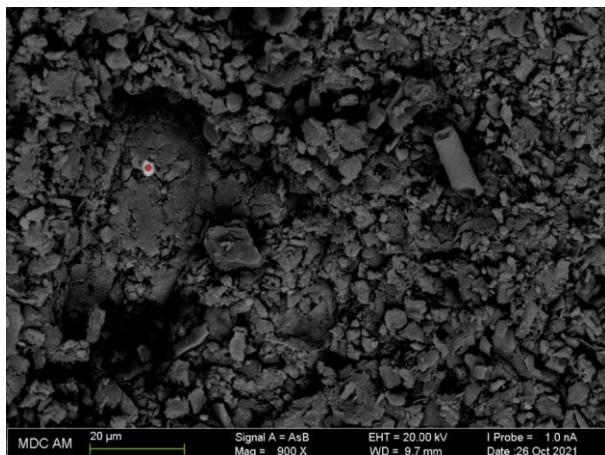


Рис. 10. Электронно-микроскопический снимок барита в образце 491 (глубина 182 см, ~7600 к.л.н.) оз. Сабакты, атом. Ва – 22,11, О – 25,23, Si – 16,68, Al – 4,23, Fe – 3,45, S – 3,92, Na – 1,90)

Fig. 10. Electron microscopic image of barite in sample 491 (depth is 182 cm, ~7600 BP), atom. Ba – 22,11, O – 25,23, Si – 16,68, Al – 4,23, Fe – 3,45, S – 3,92, Na – 1,90)

Обсуждение результатов

Для описания событий, произошедших в позднем плейстоцене–голоцене, была использована литологическая зональность, представленная в работе [12].

Плейстоценовая литологическая зона оз. Сабакты относится к интервалу разреза 294–238 см, ~26000–11700 к.л.н. По данным первичного литологического описания изучаемые образцы представлены глинистыми отложениями серо-голубыми плотными с включениями галечно-гравийного материала. Среднее значение M_d в данной зоне составило 0,017 мм. В образцах преимущественно содержится алевритовая фракция: среднее значение составило 62,80 %. В меньшей степени в образцах установлено содержание пелитовой (среднее значение – 15,18 %) и псаммитовой (среднее значение – 22,02 %) фракций. По классификации Н.В. Логвиненко определен суглинок легкий, алевритовый [12]. Для данной зоны характерно повышенное содержание аллотигенных минералов (до 87 %). Карбонатные минералы преимущественно представлены кальцитом, содержание которого изменяется в пределах 11,94–33,96 %. Содержание пирита малозначительно (среднее содержание 1,22 %).

Таким образом, начальный этап осадконакопления характеризуется постепенно растущим накоплением терригенных осадков с существенной карбонатностью. Кальцит-доломитовый состав карбонатной компоненты озера Сабакты указывает на то, что озеро было мелководным и минерализованным вследствие аридизации климата, включавшей, вероятно, и глобальное событие Бонда 8 [20–22]. Вариации в разрезе значений изотопных отношений

$^{18}\text{O}_{\text{карб}}$, $^{13}\text{C}_{\text{карб}}$ [23] подтверждают выводы, сделанные на основании изучения карбонатной записи.

Накопление карбонатных минералов, вероятно, происходило согласно биохемогенному механизму, где в условиях локальных пересыщений за счет смещения карбонатного равновесия при фотосинтезе в зарослях водной растительности может происходить их осаждение [24]. Также известно, что при регуляции микробного метаболизма доломит может образовываться не только в средах с высокой соленостью [25–27], но и в озерных водах с низкой соленостью [28] или даже в пресной воде [29, 30]. Следовательно, вездесущие микроорганизмы могут играть важную роль в образовании доломита [31].

В работе [11] по результатам геохимического анализа и количественных реконструкций установлено, что >12000–11600 к.л.н. озеро представляло собой слабосоленоватый водоем, что подтверждает аридность климата в рассматриваемый период.

К литологической голоценовой зоне I приурочен интервал 238–214 см (~11700–10130 к.л.н.), сложенный илом светло-серым и темно-зеленым, плотным, глинистым. Среднее значение M_d для осадочных отложений оз. Сабакты в данной зоне составило 0,031 мм. Преимущественно в образцах содержится алевритовая фракция: среднее значение составило 50,85 %. В меньшей степени в образцах установлено содержание пелитовой (среднее значение – 10,78 %) и псаммитовой (среднее значение – 38,38 %) фракций. По классификации Н.В. Логвиненко определены суглинок легкий алевритовый (глубина 232 см) и суглинок легкий (глубина 216 см) [12]. Среднее содержание аллотигенных минералов в осадочных отложениях озера Сабакты составило 76,25 %, а карбонатов – 22,54 %. Карбонатные минералы представлены кальцитом и доломитом, их среднее содержание составляет 21,78 и 1,14 %. Также в осадочных отложениях присутствует пирит (среднее содержание 3,55 %), а на глубине 226 см установлено присутствие биогенного кремнезема (кристобалит и тридимит), содержание которого составило 2,55 %. Постепенное увеличение значений изотопных отношений $^{18}\text{O}_{\text{карб}}$, $^{13}\text{C}_{\text{карб}}$ [23] указывает на снижение влажности климата. Рассматриваемая литологическая зона также характеризуется колебаниями содержаний аллотигенного и карбонатного вещества, указывая на чередование увеличения/уменьшения влажности климата. Согласно результатам А.В. Масленниковой [11], начало голоцена характеризуется колебаниями электропроводности вод озера Сабакты, что указывает на колебания уменьшения/увеличения влажности климата.

Литологическая голоценовая зона 2 охватывает интервал разреза 214–178 см (~10130–7300 к.л.н.).

Согласно первичному литологическому описанию, интервал представлен илом светло-коричневым плотным, песчано-алевритовым. Среднее значение M_d составило 0,025 мм. Содержание алевритовой фракции составило 59,35 %, псаммитовой – 30,38 %, пелитовой – 10,27 %. По классификации Н.В. Логвиненко определены супесь алевритовая (интервал 204–192 см) и суглинок легкий алевритовый (глубина 182 см) [12]. Среднее содержание аллотигенных минералов возрастает до 87,84 %, при этом среднее содержание карбонатной компоненты резко снижается до 4,29 %. Карбонатные минералы представлены кальцитом (среднее 6,62 %) и доломитом (среднее 2,07 %). Содержание биогенного кремнезема и пирита растет, их средние значения составили 4,71 и 5,52 % соответственно. Также на глубине 212 см установлено наличие гипса, содержание которого составило 11,85 %.

Повышенное содержание аллотигенных минералов в осадке указывает на увеличение влажности климатических условий. Однако выделяются эпизоды аридизации климата, которые устанавливаются благодаря присутствию в осадках эвапоритов (гипс, барит).

Известно, что растворимые сульфаты кальция (гипс), выпадают при большем выпаривании растворов, которое осуществляется в ограниченных водоемах, то больших по площади, то меньших, почти всегда мелководных. Установлено, что для осаждения гипса в воде необходимо содержание, в определенных концентрациях, растворенных сульфатов, кальция и сероводорода. Несмотря на то, что в основном гидраты сульфата кальция образуются в водоемах с соленой водой, необходимые для его минерализации компоненты могут также быть обусловлены обилием органического материала. Так, основной компонент – сероводород – образуется в дезоксигенированных участках озер, как правило, после значительного понижения содержания кислорода в результате разложения биологического материала [32].

Таким образом, присутствие гипса на 212 см (~10000 к.л.н.), а также барита на глубине 182 см (~7600 к.л.н.) в осадках озера Сабакты свидетельствует об аридизации климата. Аридизацию климата подтверждают повышенные значения изотопных отношений $^{18}O_{\text{карб}}$, $^{13}C_{\text{карб}}$ [23].

К литологической голоценовой зоне 3 приурочен интервал разреза 178–60 см (~7300–1950 к.л.н.), сложенный илом темно-зеленым, серо-зеленым и зеленым плотным, участками песчано-алевритовым. Среднее значение M_d зерна по сравнению с зоной 2 увеличивается до 0,033 мм. Для данной зоны характерно увеличение содержания псаммитовой фракции (среднее значение составило 37,22 %). Средние содержания алевритовой и пели-

товой фракций снижаются до 55,11 и 7,67 % соответственно. По классификации Н.В. Логвиненко определены супесь алевритовая (170–156 см), алевритовый песок (132 см) и суглинок легкий алевритовый (124–90 см) [12]. Среднее содержание аллотигенных минералов составляет 71,77 %, карбонатных минералов – 24,03 %. Для данной литологической зоны характерно увеличение содержания биогенного кремнезема до 13,85 % и уменьшение среднего содержания пирита до 2,91 %. Также на глубинах 172 и 72 см установлено наличие гипса, содержание которого составило 5,91 и 8,45 %.

В осадках озера Сабакты отмечается яркий эпизод уменьшения влажности климата в интервале ~7300–5200 к.л.н., для которого характерно увеличение карбонатности до 70 %. Данное событие подтверждается наличием гипса на отметке ~6900 к.л.н (172 см). Согласно Н.А. Хотинскому [33], в период ~6800–5800 л.н. на территории Северной Евразии произошел термический максимум. Полученные данные согласуются с региональными данными по оз. Сырыткуль [34], палеопочвам [35]. Для озер Южного Урала установлено возрастание электропроводности в период ~6500–5500 к.л.н., а также снижение содержания пылицы ели [11], что свидетельствует об уменьшении влажности климата. Также установлено, что в период ~5500–5000 к.л.н. доля карбонатной компоненты для озера Сабакты снижается, при этом доля аллотигенной компоненты увеличивается, что может указывать на уменьшение сухости и/или похолодание климата, что согласуется с [8, 11]. Присутствие гипса на глубине 72 см (~2440 к.л.н.) может указывать на аридизацию климата. Согласно Н.А. Хотинскому [33], в период ~4700–3600 л.н. на территории Северной Евразии произошел термический максимум. Данное событие отмечается в оз. Сабакты и сопровождается резким увеличением M_d , содержания псаммитовой фракции, положительными отклонениями $\delta^{18}O_{\text{карб}}$ и $\delta^{13}C_{\text{карб}}$, [23], а также уменьшением k_{para} [12].

Литологическая голоценовая зона 4 охватывает интервал разреза 60–2 см (~1950–1000 к.л.н.), представленный илом темно-зеленым. Среднее значение M_d в осадочных отложениях оз. Сабакты уменьшается по сравнению с зоной 3 до 0,020 мм. Среднее содержание алевритовой фракции составило 63,39 %, пелитовой – 10,84 %, псаммитовой – 25,76 %. По классификации Н.В. Логвиненко определены супесь алевритовая (52 см) и суглинок легкий алевритовый (4 см) [12]. Содержание аллотигенных минералов изменяется от 41,51 до 81,00 %, среднее содержание карбонатных минералов составляет 28,84 %. Для данной литологической зоны характерно увеличение содержания биогенного кремнезема до 25,70 % и уменьшение среднего содержания пирита до 1,80 %.

На отметке 46 см (~1400 к.л.н.) в осадке озера Сабакты содержание кальцита составило 52 % и доломита ~4 % на глубине 56 см (~1900 к.л.н.) в осадках оз. Сабакты, что совпадает с событием Бонда 1 (увеличение сухости климата). На этом этапе, вероятно, произошло сокращение аккомодации водоема, что подтверждается увеличением значений $\delta^{18}\text{O}_{\text{карб}}$ и $\delta^{13}\text{C}_{\text{карб}}$ в осадочных отложениях оз. Сабакты в интервале ~1900–1200 к.л.н. [23].

Заключение

По разрезу установлено преобладание алевроитовой фракции.

Соотношение аллотигенной и аутигенной составляющих отражает климатически обусловленные изменения аккомодации водоема и поставки кластического материала.

Изменения влажности климата находят отклик в изменениях содержаний карбонатных и сульфатных минералов.

Во время начального этапа осадконакопления (~26000–11700 к.л.н.) озеро Сабакты было мелководным и минерализованным вследствие аридизации климата, включавшей, вероятно, и глобальное событие Бонда 8.

Изучение минерального состава осадков озера Сабакты позволило установить события аридизации климата: ~10000 к.л.н., ~7600 к.л.н., ~6900 к.л.н., ~1900 к.л.н. и ~1400 к.л.н.

В осадках озера Сабакты отмечается яркий эпизод уменьшения влажности климата в интервале ~7300–5200 к.л.н., который характеризуется увеличением карбонатности осадков до 70 % и обнаружением гипса на отметке ~6900 к.л.н.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Smoot J.P., Lowenstein T.K. Depositional environments of non-marine evaporates // *Evaporites, Petroleum and Mineral Resources* / Ed. by J.L. Melvi. – New York: Elsevier, 1991. – P. 189–348.
- Реконструкция обстановок озерного седиментогенеза в позднеледниковье и голоцене Среднего Урала / А.В. Масленникова, В.Н. Удачин, Д.В. Пирогов, П.В. Хворов // *Литосфера*. – 2016. – № 6. – С. 166–176.
- Логвиненко Н.В. Петрография осадочных пород с основами методики исследования. – М.: Высшая школа, 1984. – 416 с.
- Mineralogical and mineral composition analysis of lacustrine sediments from Lake Toson, NE Qinghai-Tibet Plateau, China / A. Cheng, J. Yu, Ch. Gao, L. Zhang // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2021. – Vol. 783. – P. 1–5.
- Microbial diversity and authigenic mineral formation of modern bottom sediments in the littoral zone of Lake Issyk-Kul, Kyrgyz Republic (Central Asia) / S. Krivonogov, A. Maltsev, D. Zelenina, A. Safonov // *Biology*. – 2023. – Vol. 12. – № 5. – P. 1–19.
- Дерягин В.В., Масленникова А.В., Колодич О.П. Ландшафт водосбора озера Уфимское (Южный Урал) на временных срезах голоцена // *Ландшафтоведение и ландшафтная экология: коадаптация ландшафта и хозяйственной деятельности: материалы Междунар. науч.-практ. конф.* – Симферополь, 2020. – С. 246–251.
- Панова Н.К. История лесной и болотной растительности центральной горной провинции Южного Урала в голоцене: по данным спорово-пыльцевого анализа торфа: дис. ... канд. биол. наук. – Свердловск, 1986. – 183 с.
- Масленникова А.В., Удачин В.Н., Дерягин В.В. Палеоэкология и геохимия озерной седиментации голоцена Урала. – Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2014. – 136 с.
- High-resolution seismic studies of shallow Lake Sabakty (Russia) / P.S. Krylov, D.K. Nurgaliev, D.M. Kuzina, P.G. Yasonov // *19th SGEM International Multidisciplinary Scientific GeoConference EXPO Proceedings*. – Sofiya, 2019. – Vol. 19. – № 4.2. – P. 229–234.
- Шевченко А.М., Островская Ю.В. Эколого-фаунистическая характеристика сообществ макробеспозвоночных озера Сабакты (Южное Зауралье, Республика Башкортостан) // *Материалы по флоре и фауне Республики Башкортостан*. – 2018. – № 19. – С. 147–158.
- Геохимическая летопись озера Сабакты: количественная оценка электропроводности вод и реконструкция обстановок осадконакопления позднеледниковья и голоцена степной зоны Южного Урала / А.В. Масленникова, Д.А. Артемьев, Э.П. Зазовская, В.В. Дерягин, В.О. Гулаков, Н.В. Удачин, П.Г. Аминов, В.Н. Удачин // *Литосфера*. – 2023. – Т. 23. – № 3. – С. 410–429.
- Особенности вещественного состава донных отложений озера Сабакты (Южный Урал) / А.Р. Юсупова, Н.Г. Нурғалиева, Д.М. Кузина, Л.Р. Косарева, Д.А. Юнусова // *Успехи современного естествознания*. – 2023. – № 7. – С. 72–81.
- Гареев А.М. Сабакты. Башкирская энциклопедия. – Уфа: Башкир. Энцикл, 2015–2020. – Т. 5. – 358 с.
- Борисов А.С. Система технологического обеспечения палеомагнитных исследований отложений современных озер: автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Казань, 2004. – 46 с.
- Kuzina D.M., Iusupova A.R., Antonenko V.V. Magnetic studies of Lake Sabakty sediments (South Ural, Russia) // *20th SGEM International Multidisciplinary Scientific GeoConference Proceedings*. – Sofiya, 2020. – Vol. 19. – № 4.2. – P. 201–208.
- Карогодин Ю.Н. Седиментационная цикличность. – М.: Недра, 1980. – 242 с.
- Шванов В.Н. Песчаные породы и методы их изучения: (распространение, структуры, текстуры). – Л.: Недра, 1969. – 248 с.
- Леусова Н.Ю. Устойчивость и сохранность биогенных форм кремнезема в углях // *Успехи современного естествознания*. – 2020. – № 12. – С. 117–123.
- Солотчин П.А. Литолого-минералогические летописи донных отложений озер Сибирского региона как основа палеоклиматических реконструкций: дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Новосибирск, 2023. – 237 с.
- Аутигенные карбонаты голоценовых осадков озера Иткуль (юг Западной Сибири) – индикаторы изменений климата / Э.П. Солотчина, М.И. Кузьмин, П.А. Солотчин, А.Е. Мальцев, Г.А. Леонова, И.В. Даниленко // *Докл. АН*. – 2019. – Т. 487. – № 1. – С. 54–59.

21. Allen H.D. Response of past and present Mediterranean ecosystems to environmental change // *Progress in Physical Geography Earth and Environment*. – 2003. – Vol. 27. – № 3. – P. 359–377.
22. A pervasive millennial-scale cycle in North Atlantic Holocene and glacial climates / G. Bond, S.W. Shower, M. Cheseby, R. Lotti, P. Almasi, P. Demenocal, P. Priore, H. Cullen, I. Hajdas, G. Bonani // *Science*. – 1997. – Vol. 278. – № 5341. – P. 1257–1266.
23. Первые результаты изотопной геохимии донных отложений озера Сабакты (Южный Урал) / А.Р. Юсупова, Н.Г. Нургалиева, Г.А. Баталин, Б.И. Гареев // *Современные проблемы геохимии-2021: Материалы конференции молодых ученых*. – Иркутск, 14–17 сентября 2021. – С. 36–38.
24. Экология озера Большое Миассово / под ред. А.Г. Рогозина, В.А. Ткачева. – Миасс: Ильмен. гос. Заповедник, 2000. – 318 с.
25. Bacterial sulfate reduction and salinity two controls on dolomite precipitation in Lagoa Vermelha and Brejo do Espinho (Brazil) / Y. van Lith, C. Vasconcelos, R. Warthmann, J.C.F. Martins, J.A. McKenzie // *Hydrobiologia*. – 2002. – Vol. 485. – P. 35–49.
26. Vasconcelos C., McKenzie J.A. Microbial mediation of modern dolomite precipitation and diagenesis under anoxic conditions (Lagoa Vermelha, Rio de Janeiro, Brazil) // *J. Sediment. Res.* – 1997. – Vol. 67. – P. 378–390.
27. Wright D.T. The role of sulphate-reducing bacteria and cyanobacteria in dolomite formation in distal ephemeral lakes of the Coorong region, South Australia. *Sediment // Geol.* – 1999. – Vol. 126. – № 1–4. – P. 147–157.
28. Microbial dolomite precipitation using sulfate reducing and halophilic bacteria: results from Qinghai Lake, Tibetan Plateau, N.W. China / S. Deng, H. Dong, G. Lv, H. Jiang, B. Yu, M.E. Bishop // *Chem. Geol.* – 2010. – Vol. 278. – № 3. – P. 151–159.
29. Microbial precipitation of dolomite in methanogenic groundwater / J.A. Roberts, Ph.C. Bennett, L.A. González, G.L. Macpherson, L.K. Milliken // *Geology*. – 2004. – Vol. 34. – № 4. – P. 277–280.
30. Precipitation of low-temperature dolomite from an anaerobic microbial consortium: the role of methanogenic Archaea / P.A. Kenward, R.H. Goldstein, L.A. González, J.A. Roberts // *Geobiology*. – 2009. – Vol. 7. – № 5. – P. 556–565.
31. Origin of modern dolomite in surface lake sediments on the central and western Tibetan Plateau / J. Li, L. Zhu, M. Li, J. Wang, Q. Ma // *Quaternary International*. – 2020. – Vol. 544. – P. 65–75.
32. Новоселов А.А., Малых А.Г. Особенности минерального состава донного сапропелевого осадка озера Грязное (юг Тюменской области) // *Успехи современного естествознания*. – 2018. – № 12. – Ч. 1. – С. 194–199.
33. Хотинский Н.А. Голоцен Северной Евразии: опыт трансконтинентальной корреляции этапов развития растительности и климата. – М.: Наука, 1977. – 199 с.
34. Maslennikova A.V., Udachin V.N., Aminov P.G. Lateglacial and holocene environmental changes in the Southern Urals reflected in palynological. Geochemical and diatom records from the lake Syrytkul sediments // *Quaternary International*. – 2016. – Vol. 420. – № 28. – P. 65–75.
35. Эволюция почв и изменение климата восточно-европейской полупустыни в позднем голоцене / В.А. Демкин, М.И. Дергачева, А.В. Борисов, С.Н. Удалцов // *Почвоведение*. – 1998. – № 2. – С. 148–157.

Информация об авторах

Анастасия Рафаиловна Юсупова, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт геологии и нефтегазовых технологий, Казанский федеральный университет, Россия, 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 4/5. i@ajusupova.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8732-3053>

Нурия Гавазовна Нургалиева, доктор геолого-минералогических наук, доцент, профессор кафедры геологии нефти и газа имени академика А.А. Трофимука, Институт геологии и нефтегазовых технологий, Казанский федеральный университет, Россия, 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 4/5. nurgal07@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4372-9777>

Алексей Михайлович Рогов, младший научный сотрудник, Институт геологии и нефтегазовых технологий, Казанский федеральный университет, Россия, 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 4/5. Aleksej.Rogov@kpfu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1626-4636>

Поступила в редакцию: 27.09.2023

Поступила после рецензирования: 10.10.2023

Принята к публикации: 24.05.2024

REFERENCES

1. Smoot J.P., Lowenstein T.K. Depositional environments of non-marine evaporates. *Evaporites, Petroleum and Mineral Resources*. Ed. by J.L. Melvin. New York, Elsevier, 1991. pp. 189–348.
2. Maslennikova A.V., Udachin V.N., Pirogov D.V., Khvorov P.V. Reconstruction of the conditions of lake sedimentogenesis in the Late Glacial and Holocene of the Middle Urals. *Lithosphere*, 2016, no. 6, pp. 166–176. (In Russ.)
3. Logvinenko N.V. *Petrography of sedimentary rocks with the basics of research methodology*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1984. 416 p. (In Russ.)
4. Cheng A., Yu J., Gao Ch., Zhang L. Mineralogical and mineral composition analysis of lacustrine sediments from Lake Toson, NE Qinghai-Tibet Plateau, China. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 783, pp. 1–5.
5. Krivonogov S., Maltsev A., Zelenina D., Safonov A. Microbial diversity and authigenic mineral formation of modern bottom sediments in the littoral zone of Lake Issyk-Kul, Kyrgyz Republic (Central Asia). *Biology*, 2023, vol. 12, no. 5, pp. 1–19.
6. Deryagin V.S., Maslennikova A.S., Kolodich O.P. Landscape water intake of Lake Ufa (Eugene Ural) at intermediate sites of the Holocene. *Landscape and landscape ecology: landscape coadaptation and existing duty. Materials of International science-practical conference*. Simferopol, 2020. pp. 246–251. (In Russ.)

7. Panova N.K. *History of forest and swamp vegetation of the central mountain province of the Southern Urals in the Holocene: according to the data of spore-pollen analysis of peat*. Cand. Dis. Sverdlovsk, 1986. 183 p. (In Russ.)
8. Maslennikova A.V., Udachin V.N., Deryagin V.V. *Paleoecology and geochemistry of lake sedimentation of the Holocene of the Urals*. Yekaterinburg, RIO UrO RAS Publ., 2014. 136 p. (In Russ.)
9. Krylov P.S., Nurgaliev D.K., Kuzina D.M., Yasonov P.G. High-resolution seismic studies of shallow Lake Sabakty (Russia). *19th SGEM International Multidisciplinary Scientific GeoConference EXPO Proceedings*. Sofiya, 2019. vol. 19, no. 4.2, pp. 229–234.
10. Shevchenko A.M., Ostrovsky V. Ecological and faunistic characteristics of the macroinvertebrate community of Sabakty lake (Southern Trans-Urals, Republic of Bashkortostan). *Materials on flora and fauna of the Republic of Bashkortostan*, 2018, no. 19, pp. 147–158. (In Russ.)
11. Maslennikova A.V., Artemyev D.A., Zazovskaya E.P., Deryagin V.V., Gulakov V.O., Udachin N.V., Aminov P.G., Udachin V.N. Geochemical chronicle of Lake Sabakty: quantitative assessment of water conductivity and reconstruction of sedimentation conditions of the Late Glacial and Holocene steppe zone of the Southern Urals. *Lithosphere*, 2023, vol. 23, no. 3, pp. 410–429. (In Russ.)
12. Yusupova A.R., Nurgaliev N.G., Kuzina D.M., Kosareva L.R., Yunusova D.A. Features of the material composition of the bottom sediments of Lake Sabakty (Southern Urals). *Advances in current natural sciences*, 2023, no. 7, pp. 72–81. (In Russ.)
13. Gareev A.M. *Sabakty. Bashkir Encyclopedia*. Ufa, Bask. Encyclopedia Publ., 2015–2020. Vol. 5, 358 p. (In Russ.)
14. Borisov A.S. *System of technological support for paleomagnetic studies of sediments of modern lakes*. Dr. Diss. Abstract. Kazan, 2004. 46 p. (In Russ.)
15. Kuzina D.M., Iusupova A.R., Antonenko V.V. Magnetic studies of Lake Sabakty sediments (South Ural, Russia). *20th SGEM International Multidisciplinary Scientific GeoConference Proceedings*. Sofiya, 2020. Vol. 19, no. 4.2, pp. 201–208.
16. Karogodin Yu.N. *Sedimentation cyclicity*. Moscow, Nedra Publ., 1980. 242 p. (In Russ.)
17. Shvanov V.N. *Sand rocks and methods of their study: (distribution, structures, textures)*. Leningrad, Nedra Publ., 1969. 248 p. (In Russ.)
18. Leusova N.Y. Stability and preservation of biogenic forms of silica in coals. *Advances in current natural sciences*, 2020, no. 12, pp. 117–123. (In Russ.)
19. Solotchin P.A. *Lithological and mineralogical chronicles of bottom sediments of lakes of the Siberian region as the basis of paleoclimatic reconstructions*. Dr. Diss. Novosibirsk, 2023. 237 p. (In Russ.)
20. Solotchina E.P., Kuzmin M.I., Solotchin P.A., Maltsev A.E., Leonova G.A., Danilenko I.V. Autigenic carbonates of Holocene sediments of Lake Itkul (south of Western Siberia) – indicators of climate change. *Dokl. AN*, 2019, vol. 487, no. 1, pp. 54–59. (In Russ.)
21. Allen H.D. Response of past and present Mediterranean ecosystems to environmental change. *Progress in Physical Geography Earth and Environment*, 2003, vol. 27, no. 3, pp. 359–377.
22. Bond G., Shower S.W., Cheseby M., Lotti R., Almasi P., Demenocal P., Priore P., Cullen H., Hajdas I., Bonani G. A pervasive millennial-scale cycle in North Atlantic Holocene and glacial climates. *Science*, 1997, vol. 278, no. 5341, pp. 1257–1266.
23. Yusupova A.R., Nurgaliev N.G., Batalin G.A., Gareev B.I. The first results of isotope geochemistry of bottom sediments of Lake Sabakty (Southern Urals). *Modern problems of geochemistry-2021. Proceedings of the conference of young scientists*. Irkutsk, September 14–17, 2021. pp. 36–38. (In Russ.)
24. *Ecology of Lake Bolshoe Miassovo*. Eds. A.G. Rogozin, V.A. Tkachev. Miass, Ilmen State Nature Reserve, 2000. 318 p. (In Russ.)
25. Van Lith Y., Vasconcelos C., Warthmann R., Martins J.C.F., McKenzie J.A. Bacterial sulfate reduction and salinity two controls on dolomite precipitation in Lagoa Vermelha and Brejo do Espinho (Brazil). *Hydrobiologia*, 2002, vol. 485, pp. 35–49.
26. Vasconcelos C., McKenzie J.A. Microbial mediation of modern dolomite precipitation and diagenesis under anoxic conditions (Lagoa Vermelha, Rio de Janeiro, Brazil). *J. Sediment. Res.*, 1997, vol. 67, pp. 378–390.
27. Wright D.T. The role of sulphate-reducing bacteria and cyanobacteria in dolomite formation in distal ephemeral lakes of the Coorong region, South Australia. *Sediment. Geol.*, 1999, vol. 126, no. 1–4, pp. 147–157.
28. Deng S., Dong H., Lv G., Jiang H., Yu B., Bishop M.E. Microbial dolomite precipitation using sulfate reducing and halophilic bacteria: results from Qinghai Lake, Tibetan Plateau, NW China. *Chem. Geol.*, 2010, vol. 278, no. 3, pp. 151–159.
29. Roberts J.A., Bennett Ph.C., González L.A., Macpherson G.L., Milliken L.K. Microbial precipitation of dolomite in methanogenic groundwater. *Geology*, 2004, vol. 34, no. 4, pp. 277–280.
30. Kenward P.A., Goldstein R.H., González L.A., Roberts J.A. Precipitation of low-temperature dolomite from an anaerobic microbial consortium: the role of methanogenic Archaea. *Geobiology*, 2009, vol. 7, no. 5, pp. 556–565.
31. Li J., Zhu L., Li M., Wang J., Ma Q. Origin of modern dolomite in surface lake sediments on the central and western Tibetan Plateau. *Quaternary International*, 2020, vol. 544, pp. 65–75.
32. Novoselov A.A., Malykh A. G. Features of the mineral composition of this sapropel sediment of Lake Gryaznoe (south of the Tyumen region). *Advances in current natural sciences*, 2018, no. 12, P. 1, pp. 194–199. (In Russ.)
33. Khotinsky N.A. *Holocene of Northern Eurasia: experience in transcontinental correlation of stages of vegetation and climate development*. Moscow, Nauka Publ., 1977. 199 p. (In Russ.)
34. Maslennikova A.V., Udachin V.N., Aminov P.G. Lateglacial and Holocene environmental changes in the Southern Urals reflected in palynological. Geochemical and diatom records from the lake Syrytkul sediments. *Quaternary International*, 2016, vol. 420, no. 28, pp. 65–75.
35. Demkin V.A., Dergacheva M.I., Borisov A.V., Udaltsov S. N. Evolution of soils and climate change of the East European semi-desert in the Late Holocene. *Soil Science*, 1998, no. 2, pp. 148–157. (In Russ.)

Information about the authors

Anastasia R. Yusupova, Cand. Sc., Senior Researcher, Kazan Federal University, 4/5, Kremlyovskaya street, Kazan, 420008, Russian Federation. 3053 i@ajusupova.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8732-3053>

Nuriia G. Nurgalieva, Dr. Sc., Professor, Kazan Federal University, 4/5, Kremlyovskaya street, Kazan, 420008, Russian Federation. nurgal07@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4372-9777>

Alexey M. Rogov, Junior Researcher, Kazan Federal University, 4/5, Kremlyovskaya street, Kazan, 420008, Russian Federation. Aleksej.Rogov@kpfu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1626-4636>

Received: 27.09.2023

Revised: 10.10.2023

Accepted: 24.05.2024