

СТАТЬЯ

УДК 551.794

DOI 10.17513/use.38074

**ОСОБЕННОСТИ ВЕЩЕСТВЕННОГО СОСТАВА
ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ОЗЕРА САБАКТЫ (ЮЖНЫЙ УРАЛ)****Юсупова А.Р., Нургалиева Н.Г., Кузина Д.М., Косарева Л.Р., Юнусова Д.А.***ФГБОУ ВО «Казанский федеральный университет», Казань, e-mail: yusupovaanast095@gmail.com*

Известно, что вариации магнитных свойств донных отложений современных озер отражают условия окружающей среды: интенсивность поступления осадочного материала в бассейн седиментации, характер источников осадочного материала, колебания уровня озера, климат и другие условия озерного осадконакопления. Также информативным показателем условий осадконакопления является содержание главных и второстепенных элементов. С целью выявления особенностей условий осадконакопления на территории Южного Урала были изучены донные отложения озера Сабакты. Для детального изучения была выбрана самая длинная отобранная керновая колонка № 4, расположенная в восточной части озера. Комплексирование данных различных лабораторных исследований (радиоуглеродное датирование, гранулометрический анализ, измерение магнитной восприимчивости, коэрцитивная спектрометрия, дифференциальный термомагнитный анализ, рентгенофлуоресцентный и ИСП-МС анализ) позволило разделить разрез керновой колонки озера Сабакты на одну плейстоценовую зону и 4 голоценовые литологические зоны. Полученные результаты дали возможность выявить условия формирования озерных отложений в рассматриваемом регионе, а также развить и дополнить общие представления об озерном осадконакоплении в плейстоцен-голоценовое время. Установлена литологическая зональность донных отложений, отражающая историю осадконакопления в изучаемом озере, а также обозначены наиболее значительные события в истории осадконакопления.

Ключевые слова: озера, магнитные свойства, геохимия, гранулометрический состав, палеоклимат

Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания проект № FZSM-2023-0023 в сфере научной деятельности, часть работ выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20–35–90058.

**COMPOSITION CHARACTERISTICS
OF SABAKTY LAKE LACUSTRINE SEDIMENTS (SOUTHERN URALS)****Yusupova A.R., Nurgalieva N.G., Kuzina D.M., Kosareva L.R.***Kazan Federal University, Kazan, e-mail: yusupovaanast095@gmail.com*

It is known that variations in the magnetic properties of modern lakes sediments reflect environmental conditions: the intensity of sedimentary material entering the sedimentation basin, the genesis of sedimentary material sources, lake level fluctuations, climate and other conditions of lake sedimentation. Also informative indicators of sedimentation conditions are the contents of the major and minor elements. In order to identify the features of sedimentation conditions on the territory of the Southern Urals, Lake Sabakty sediments were studied. For a detailed study, the longest selected core column No. 4, located in the eastern part of the lake, was selected. Combining data from various laboratory studies (radiocarbon dating, granulometric analysis, magnetic susceptibility, coercive spectrometry, differential thermomagnetic analysis, X-ray fluorescence and ICP-MS analysis) allowed us to divide the core column section of Lake Sabakty into one Pleistocene zone and 4 Holocene lithological zones. The received results made it possible to identify the conditions for the formation of lake sediments in the region under consideration, as well as to develop and supplement general ideas about lake sedimentation in the Pleistocene and Holocene. The lithological zonation and staging of lacustrine sediments have been established. They have been considered in light of some climate events.

Keywords: lakes, magnetic properties, geochemistry, granulometric composition, paleoclimate

The work was carried out at the expense of a subsidy allocated to the Kazan Federal University for the implementation of the state assignment project No. FZSM-2023-0023 in the field of scientific activity, part of the work was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research within the framework of scientific project No. 20–35–90058.

Озера являются элементом многих современных и древних ландшафтных обстановок. Особенностью озер является их чувствительность к климатическим изменениям. Осадки современных озер с высокими скоростями седиментации позволяют получить более разрешенные палеоклиматиче-

ские, палеоэкологические и палеомагнитные записи по сравнению с океаническими осадками. Разнообразие типов озер и многочисленные факторы, определяющие процессы осадконакопления в каждом из них, формируют индивидуальный качественный и количественный состав отложений кон-

кретного озера. Изучение этих процессов в современных обстановках позволяет создавать палеорекострукции окружающей среды в геологическом прошлом, а на их основе – моделировать поведение климата в будущем [1].

В настоящее время интерес к донным отложениям как к архивам информации о параметрах окружающей среды высокий, так как эти данные чрезвычайно важны для понимания процессов изменения окружающей среды сегодня и в ближайшем будущем.

Полнота и детальность реконструкций условий формирования отложений определяются числом объектов и получением большего числа записей разных литологических данных. Это актуально для территории Южного Урала, где изучены единичные озера. История природных изменений Южного Урала в голоцене имеет сложный характер, так как соединяет в себе черты, характерные для развития природных условий Русской равнины и Сибири в голоцене. Проведение детального комплексного анализа донных осадочных отложений повысит надежность исследований, а также позволит провести более точную реконструкцию палеообстановок озерного седиментогенеза Южного Урала в позднечетвертичное время и определить основные факторы, влияющие на изменение этих обстановок.

Магнитные параметры (магнитная восприимчивость, параметры коэрцитивных спектров), аллотигенные и биогенные магнитные минералы в комплексе с разнообразными данными (гранулометрическими, геохимическими) позволяют выявлять эпизоды уменьшения/увеличения влажности климатических условий, вариации твердого стока и уровня водоемов, а также другие геологические и экологические изменения (например, [2]).

В качестве объекта исследования выбрано озеро Сабакты (53°36'55" N; 58°39'22" E) на территории Южного Урала, где активно развиваются исследования озерных донных осадков [3, 4]. Длина озера 2,37 км, средняя ширина – 1,01 км, средняя и максимальная глубины озера соответственно 2,8 м и 6 м. Площадь акватории составляет 2,4 км² [5]. Предварительные сейсмоакустические исследования позволили наметить места отбора кернa. Всего были отобраны 4 керновые колонки, длина которых изменяется от 1,5 до 3 м. Общее количество отобранных образцов составило 452 шт. Шаг отбора составил 2 см. Для детального изучения была выбрана самая длинная отобранная керно-

вая колонка № 4, расположенная в восточной части озера (N 53° 37' 5.4"; E 58° 39' 33.4").

Целью исследования является изучение особенностей вещественного состава и магнитно-минералогических свойств плейстоцен-голоценовых осадков озера Сабакты.

Материал и методы исследования

Радиоуглеродный анализ проводился на Факультете Наук о Земле Национального университета Тайваня (NTUAMS Lab), г. Тайвань, на ускорительном масс-спектрометре 1.0 MV HVE. Для калибровки возраста образцов использовали программный продукт OxCal v4.2.4 Bronk Ramsey (2013) и калибровочную кривую IntCal 13, что позволяет определить временные интервалы с наибольшей вероятностью.

Анализ гранулометрического состава производили на анализаторе размера частиц Bluewave (Microtrac, США, заводской номер BCR66-MW08012403), совмещенном с системой загрузки и циркуляции пробы с интегрированным ультразвуковым диспергатором. Образцы предварительно были обработаны 10% HCl и 30% H₂O₂ для удаления карбонатов и органического вещества. Для определения литологических разностей использована классификация нелитифицированных осадков по [6]. При обработке данных гранулометрического состава строились графики распределения содержаний фракций (гистограммы и кумулятивные кривые) и использовался медианный размер зерен (Md), рассчитываемый квантильным методом и отражающий гидродинамический уровень осадкообразования и аккумуляцию.

Магнитная восприимчивость (МВ) была измерена на частоте 976 Гц и амплитуде поля 200 А/м с использованием многочастотного измерителя магнитной восприимчивости Agico Carrabridge MFK1-FA. Диапазон измерения прибора до 0,5 (SI) при частоте 976 Гц. Точность в пределах одного диапазона ±0,1; точность абсолютной калибровки ±3%. Значения магнитной восприимчивости осадочных отложений зависят от процесса выветривания. В условиях засухи эрозия, химическое выветривание замедляются, что приводит к снижению содержания магнитных минералов в осадке. Напротив, при повышенной влажности химическое выветривание, эрозия усиливаются, что приводит к более высоким значениям МВ. Таким образом, во время теплых/влажных климатических условий ожидаются более высокие значения МВ, и наоборот [2].

Коэрцитивная спектрометрия (КС). Измерения проводились на коэрцитивном спектрометре J_meter [7]. Для образцов в автоматическом режиме измерялись кривые нормального остаточного намагничивания при непрерывном росте внешнего магнитного поля до 1,5 Тл. Получены полные петли гистерезиса одновременно по остаточной и индуктивной намагниченностям. По кривым нормального намагничивания был определен вклад в магнитную составляющую осадка различных компонент озерных отложений: ферромагнитной (k_{ferro}), диа-/парамагнитной (k_{para}) и суперпарамагнитной (k_{super}) [8], что позволяет оценивать величину терригенного сноса, колебания уровня и продуктивность озер. Например, вклад k_{para} в МВ, в основном обусловлен поступлением аллотигенного материала в бассейне осадко-накопления [3, 8]. Ферромагнитный материал (магнетит, маггемит) может иметь смешанное (аллотигенное и биогенное) происхождение. Суперпарамагнитные минералы также могут быть как биогенного, так и аллотигенного происхождения, которые могут быть представлены гематитом или биогенно индуцированными оксидами или сульфидами железа [8].

Дифференциальный термомагнитный анализ (ДТМА) образцов по индуцированной намагниченности выполнялся на авто-регистрирующих крутильных магнитных весах, действующих по нулевому методу. Нагрев каждого образца в магнитном поле 0,5 мТл проводился дважды при скорости нагрева 100°C/мин. В результате измерений были получены зависимости индуктивной намагниченности от температуры – $J_i(T)$ первого и второго нагревов. Точка Кюри (T_k – температура перехода ферромагнитного материала в парамагнитное состояние)

осадочной породы определяется точкой Кюри ферромагнитных минералов, входящих в ее состав. Для чистого магнетита она составляет 575°C, для различных его разновидностей колеблется от 315 до 600°C.

Рентгенофлуоресцентный анализ и ИСП-МС анализ. Для определения элементного состава озерных отложений был применен рентгенофлуоресцентный анализ (РФА) и ИСП-МС. Измерения проводились при помощи рентгенофлуоресцентного спектрометра Bruker S8 Tiger и на масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой iCAP Qc (ThermoFisher Scientific, Германия). Геохимические данные несут важную информацию об условиях седиментогенеза в озерных бассейнах. Содержание главных и второстепенных элементов, их соотношения известны как информативные показатели условий осадкообразования (например, [2, 3]). Для выяснения факторов валового химического состава использован факторный анализ методом главных компонент способом «Варимакс нормализованный» в Пакете программ STATISTICA. Факторный анализ был проведен для разрешенных переменных, имеющих статистически достоверный объем выборки и подчиняющихся нормальному и логнормальному распределениям со значимыми нагрузками более 0,7.

Результаты исследования и их обсуждение

Радиоуглеродное датирование. Согласно полученным результатам, возраст изучаемых отложений для озера Сабакты не позднее ~25 тыс. лет. Полученные радиоуглеродные даты приводятся в количестве лет до наших дней с указанием возможной статистической ошибки. За момент отсчета принята дата – 1950 г. (табл. 1).

Таблица 1

Результаты радиоуглеродного датирования

Лабораторный номер образца	номер образца	Глубина, см	Датированный материал	AMS ^{14}C возраст (^{14}C л.н.)	Калиброванный возраст (к.л.н.)
NTUAMS-5856	413	26	Озерный осадок	1257±70	1175±125
NTUAMS-5855	422	44		1356±81	1290±120
NTUAMS-7596-1	441	82		2734±51	2850±95
NTUAMS-5854-1	461	122		3477±77	3750±180
NTUAMS-5853	480	160		5244±88	6055±165
NTUAMS-5852	494	188		7191±107	8000±210
NTUAMS-7597-1	512	224		9604±62	10960±220
NTUAMS-5851	532	264		11340±114	13220±205
NTUAMS-7598	536	272		13989±68	17050±275
NTUAMS-5850	543	286		18850±144	22725±280

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. Включения галечно-гравийного материала характерны для интервала 246–256 см. По разрезу устанавливается преобладание алевритовой фракции, содержание которой изменяется от 33,24% до 76,3% (ср. знач. 58,14%). Содержание пелитовой фракции изменяется от 1,37% до 16,41% (ср. знач. 10,63%). Содержание псаммитовой фракции изменяется от 12,02% до 65,39% (ср. знач. 31,22%). Медианный размер зерен изменяется в пределах 0,014–0,056 мм (ср. знач. 0,0258 мм).

Химический состав. В результате РФА были получены данные по содержаниям главных и второстепенных элементов. Главные элементы представлены в основном литофильными элементами, за исключением сидерофильного железа и халькофильной серы.

Содержание SiO_2 характеризуется изменением в пределах 14,60–63,36% со средним 31,93%, Al_2O_3 (2,97–15,39%, среднее 7,78%), Fe_2O_3 (3,52–7,28%, среднее 5,54%), CaO (2,05–25,33%, среднее 7,90%). Сравнительно меньшие содержания отмечаются для MgO (0,98–3,04%, среднее 1,88%), SO_2 (0,15–5,61%, среднее 2,88%), K_2O (0,38–2,02%, среднее 0,94%), Na_2O (0,26–0,98%, среднее 0,55%), TiO_2 (0,19–0,70%, среднее 0,41%), P_2O_5 (0,06–0,28%, среднее 0,13%), MnO (0,09–0,65%, среднее 0,22%).

Второстепенные элементы представлены литофильными элементами (ванадий, хлор, стронций, хром, цирконий, рубидий, бром), халькофильными элементами (медь, цинк, мышьяк) и сидерофильными элементами (никель, кобальт). Сравнительно более высокие содержания характерны для Cl , V_2O_5 , SrO (средние содержания 0,040%, 0,020%, 0,025% соответственно). Меньшие содержания характерны для Cr_2O_3 , CuO , ZnO , Br , NiO , ZrO_2 , Rb_2O , As_2O_3 (средние содержания 0,013%, 0,009%, 0,010%, 0,007%, 0,006%, 0,008%, 0,003%, 0,003% соответственно). В семи образцах зафиксирован CoO (среднее содержание 0,0002%).

В ходе ИСП-МС также измерены концентрации в г/т Li , Be , Sc , Ga , Ge , Se , Y , Nb , Mo , Ag , Cd , Sn , Sb , Cs , Ba , PЗЭ , Hf , Ta , W , Ir , Tl , Pb , Bi , Th , U . Наиболее заметные содержания отмечены для Li , Ba (средние содержания составляют 20,52, 232,64 г/т соответственно). Меньше представлены Ta ,

W , Be , Hf , U , Cs , Th , Nb (средние содержания 0,29, 0,62, 1,35, 1,62, 1,79, 2,86, 3,89, 4,89 г/т соответственно). Содержание легких редкоземельных элементов LREE (La , Ce , Pr , Nd , Sm , Eu , Cd) изменяется в пределах 18,02–112,82 г/т, а содержание тяжелых редкоземельных элементов HREE (Tb , Dy , Ho , Er , Tm , Yb , Lu) изменяется от 1,84 г/т до 10,50 г/т. Общее содержание REE (LREE+HREE) изменяется от 28,38 г/т до 163,61 г/т.

Среди халькофильных элементов установлено наличие Bi , Cd , Te , Tl , Sb , Ag , Sn , Se , Ge , Pb , Ga (средние содержания составляют 0,13, 0,13, 0,16, 0,19, 0,67, 1,18, 1,29, 2,11, 3,67, 7,59, 10,50 г/т соответственно). Среди сидерофильных элементов установлено наличие Mo , содержания которого варьируют в пределах 1,20–4,08 г/т. В 16 образцах зафиксировано наличие Re , среднее значение которого составляет 0,01 г/т, а также в 5 образцах присутствует Ir со средним значением 0,016 г/т.

Факторный анализ разрешенных переменных позволил установить 3 фактора со значимыми нагрузками более 0,7 (табл. 2).

Самым значимым является фактор F1 (вес 24,46%), далее с меньшими весами располагаются факторы F2, F3.

Фактор F1 отражает увеличение содержания элементов терригенного привноса (аллотигенных элементов): Na , Mg , Si , K , Ti , V , Cr , Ni , Rb , Zr , Ba , REE, Th , Li , Fe , Ga , Ge , Se , Y , Nb , Sn , Sb , Cs , Hf , Ta , Tl , Pb , Bi .

Фактор F2 отражает уменьшение содержания Sr . Элемент Sr является «геохимическим аналогом» кальция и может входить в состав кальцита, поэтому в осадках с высоким содержанием карбонатов (макрофитогенные сапропели) наблюдается корреляция в распределении Ca и Sr [9].

Фактор F3 – это фактор уменьшения S . Содержание S в осадочных отложениях озер является отражением процессов бактериальной сульфатредукции, в результате которой выделяется H_2S и, как следствие, образуется пирит [4, 9].

Магнитная восприимчивость. Значения магнитной восприимчивости изменяются в пределах $(0,48–12,6) \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{кг}$ (табл. 3) в связи с литологической неоднородностью [10].

На диаграмме Дзя-Данлопа [11] (рис. 1) отображены полученные параметры магнитного гистерезиса по керновой колонке № 3 и № 4. Согласно построенной диаграмме (рис. 1), исследуемые образцы находятся в области смеси однодоменных (SD), суперпарамагнитных (SP) и многодоменных (MD) зерен.

Таблица 2

Результаты факторного анализа

Переменная	Фактор. нагрузки (Варимакс нормализ.) Выделение: Главные компоненты (Отмечены нагрузки >0,70)		
	Фактор F1	Фактор F2	Фактор F3
Na (%)	0,88	0,12	-0,06
Mg (%)	0,95	-0,20	-0,02
Si (%)	0,90	0,25	0,22
S (%)	-0,39	0,01	-0,83
LOG K	0,96	0,01	0,01
Ti (%)	0,92	0,09	0,08
V (ppm)	0,87	0,19	0,03
Cr (ppm)	0,90	0,22	0,03
Co (ppm)	0,68	0,41	-0,45
Ni (ppm)	0,66	-0,03	0,09
Cu (ppm)	0,43	0,05	0,10
Zn (ppm)	0,41	0,43	-0,05
LOG Rb	0,88	0,07	-0,01
LOG Sr	0,01	-0,99	0,04
LOG Zr	0,78	0,37	0,15
Ba (ppm)	0,96	-0,18	0,04
LOG REE	0,96	0,07	0,02
LOG Th	0,97	0,08	0,01
Log Li	0,97	0,18	-0,03
Log Be	0,21	-0,05	0,01
Fe	0,77	0,13	-0,57
Ga	0,95	0,02	0,08
Ge	0,95	0,02	0,09
Se	0,93	0,20	0,07
Log Y	0,93	0,11	0,03
Log Nb	0,97	0,05	0,02
Mo	-0,28	-0,14	-0,29
Cd	0,33	0,19	-0,16
Sn	0,70	0,03	0,09
Sb	0,92	0,02	0,05
Cs	0,94	-0,03	0,08
Hf	0,94	0,02	0,14
log Ta	0,97	0,05	0,02
log Tl	0,96	0,08	-0,05
log Pb	0,94	0,17	0,01
log Bi	0,96	0,07	0,01
Общ.дис.	24,46	1,92	1,49
Доля общ	0,68	0,05	0,04

Таблица 3

Статистические параметры магнитной восприимчивости колонок донных отложений озера Сабакты ($\cdot 10^{-7}$ м³/кг)

№ колонки	1К	2К	3К	4К
Минимум	0,78	0,93	0,63	0,48
Максимум	2,7	9,68	8,45	12,6
Среднее	1,26	1,92	1,88	1,62
Число наблюдений	91	73	125	147

Согласно построенной диаграмме (рис. 1), магнитные зерна исследуемых образцов представляют собой комбинацию SD и MD (PSD) зерен с долей MD от 40 до 92% [11].

Значения общей MB по всему разрезу изменяются от $3,55 \cdot 10^{-5}$ до $38,63 \cdot 10^{-5}$. Вклад k_{para} в MB изменяется от $1,95 \cdot 10^{-5}$ до $10,11 \cdot 10^{-5}$, k_{ferro} – от $0,55 \cdot 10^{-5}$ до $35,17 \cdot 10^{-5}$ и k_{super} – от $0,006 \cdot 10^{-5}$ до $0,25 \cdot 10^{-5}$ (табл. 4).

Таблица 4

Статистика значений компонент магнитной восприимчивости ($\cdot 10^{-5}$)

Выборка	k_{full}	k_{para}	k_{ferro}	k_{super}
Минимум	3,55	1,95	0,55	0,006
Максимум	38,63	10,11	35,17	0,25
Среднее	12,74	6,20	6,48	0,058

Для установления генезиса магнитных параметров была вычислена корреляционная матрица по выборке, включающей геохимические факторы и параметры коэрцитивных спектров (табл. 5).

Согласно таблице 2, коэффициент корреляции между k_{para} и F1 составляет 0,91. Таким образом, k_{para} выступает как прокси поставки аллотигенного материала в озерную систему.

Для прочих компонент установлена тесная корреляционная связь между k_{full} , k_{ferro} и k_{super} , объясняющаяся присутствием маггемита и магнетита (последний обнаруживается по данным ДТМА, рис. 2) со смешанным (аллотигенным и аутигенным) происхождением, требующим дополнительных исследований.

Комплексообразование данных радиометрического датирования, гранулометрического состава, химического состава (факторы F1, F2 и F3) и парамагнитной компоненты k_{para} позволило выделить в составе колонки № 4 пять литологических зон: одну плейстоценовую и четыре голоценовые (рис. 3).

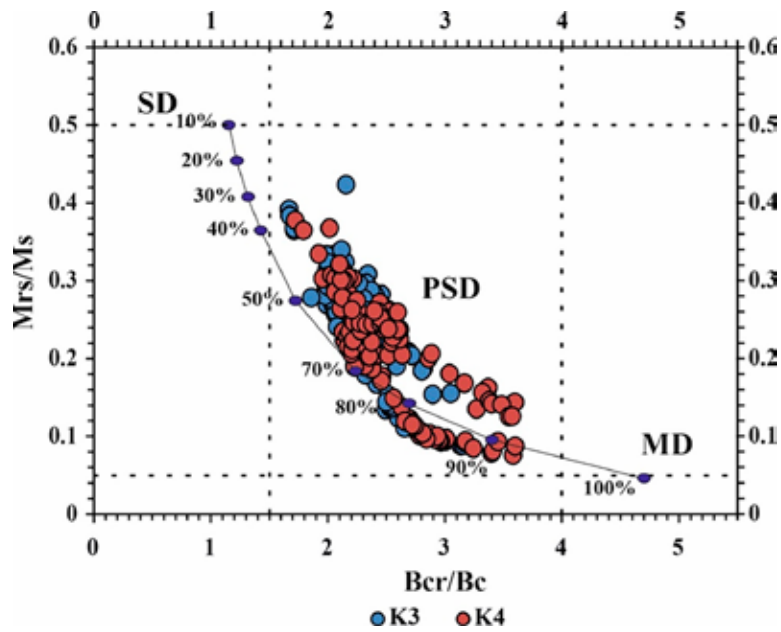


Рис. 1. Диаграмма Дзя-Данлопа для керновых колонок: синие кружочки – керновая колонка № 3, красные – № 4 [11]

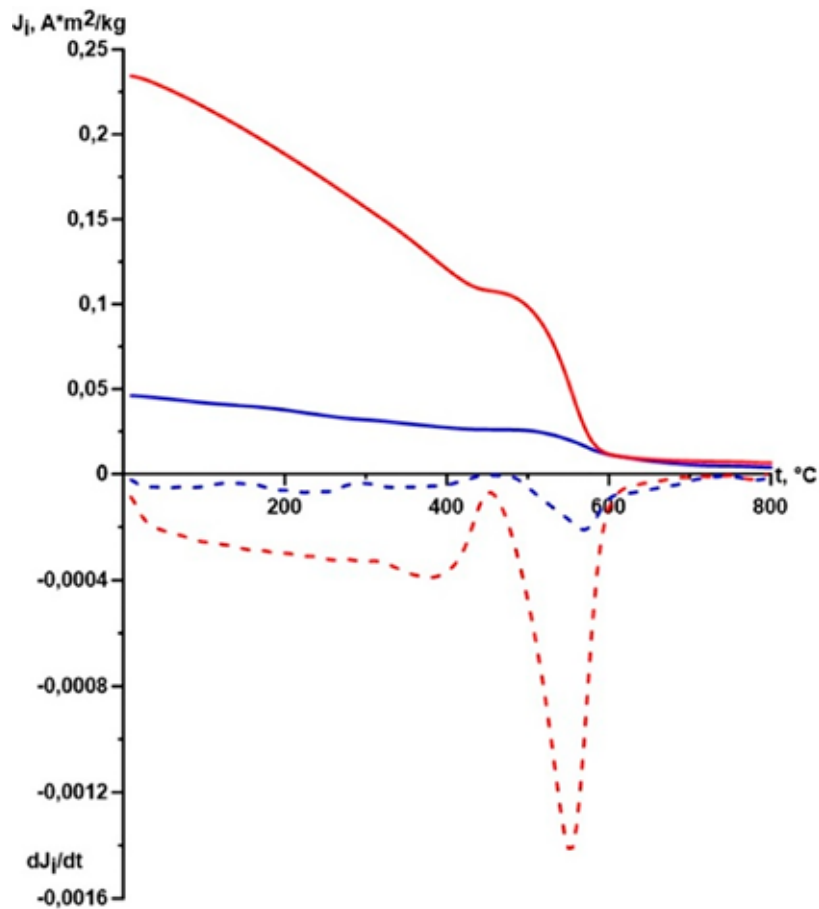


Рис. 2. Результат дифференциального термомагнитного анализа образца с глубины 6 см (колонка № 4). Синим цветом обозначен первый нагрев, красным – второй; сплошная линия – интегральная кривая, пунктир – дифференциальная кривая. Идентифицируется магнетит по кривой первого нагрева

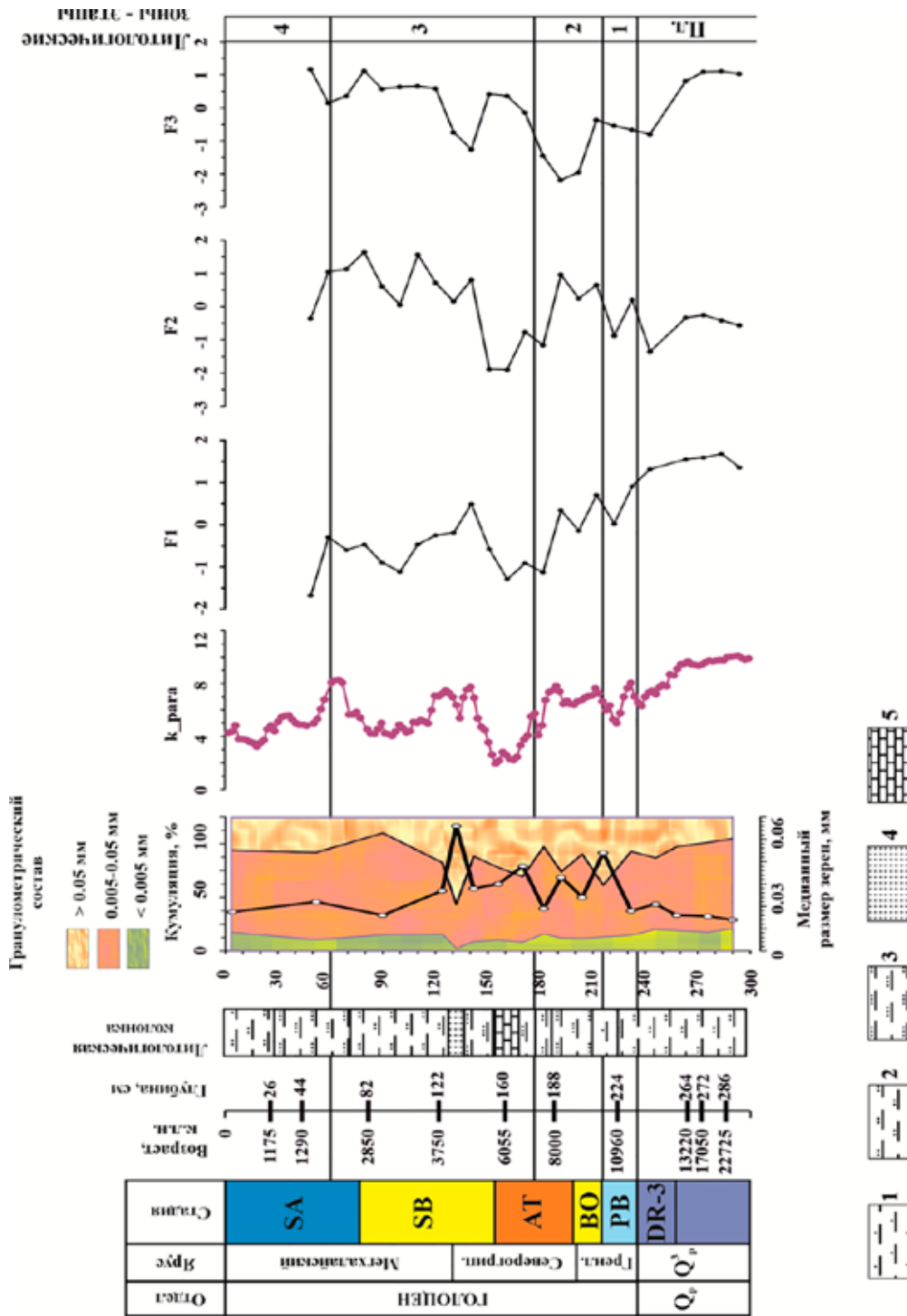


Рис. 3. Вариации k_{para} и F1 озера Сабакты
 Условные обозначения: 1 – суглинок тяжелый алевроитовый, 2 – суглинок легкой алевроитовый, 3 – супесь алевроитовая, 4 – песок алевроитовый; 5 – карбонатный сапропель; Q₃ – плейстоцен; Q₂ – верхний плейстоцен [12]; DR-3 – поздний дриас, PB – Пребореальная стадия, BO – Бореальная стадия, AT – Атлантическая стадия, SB – Суббореальная стадия, SA – Субатлантическая стадия [13]

Таблица 5

Матрица коэффициентов корреляции

	Отмеченные коэффициенты значимы на уровне $p < 0,05$						
	F1	F2	F3	k_full	k_para	k_ferro	k_super
F1	1,00						
F2	0,00	1,00					
F3	0,00	0,00	1,00				
k_full	0,47	0,25	0,09	1,00			
k_para	0,91	0,29	0,21	0,63	1,00		
k_ferro	-0,01	0,16	0,09	0,84	0,18	1,00	
k_super	-0,08	0,07	0,06	0,72	0,08	0,94	1,00

Плейстоценовая литологическая зона озера Сабакты относится к интервалу разреза 294–238 см (~26000 – 11700 к.л.н.) (рис. 3).

Изучаемые образцы по данным первичного литологического описания представлены глинистыми отложениями серо-голубыми плотными, с включениями галечно-гравийного материала. Среднее значение M_d в данной зоне составило 0,017 мм. Преимущественно в образцах 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 Логвиненко определен суглинок легкий алевритовый. Для данной зоны характерны повышенные значения k_{para} , F1, F2 и F3, указывающие на активный привнос аллотигенного материала на начальном этапе существования озера.

К голоценовой литологической зоне 1 приурочен интервал 238–214 см (~11700–10130 к.л.н., пребореальная стадия), сложенный илом светло-серым и темно-зеленым плотным, глинистым. Среднее значение M_d для осадочных отложений озера 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 Логвиненко определены суглинок легкий алевритовый (глубина 232 см) и суглинок легкий (глубина 216 см). Подошвенная часть зоны отмечается локальным увеличением k_{para} и F2 (на фоне трендов уменьшения терригенного сноса),

обозначившим начало пребореальной седиментационной стадии. Аналогичная ситуация для подошвенной части отмечается и для следующей литологической зоны.

Литологическая зона 2 голоцена охватывает интервал разреза 214–178 см (~10130–7300 к.л.н.; бореальная стадия и первая половина атлантической стадии). 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 Логвиненко определены супесь алевритовая (интервал 204–192 см) и суглинок легкий алевритовый (глубина 182 см).

Для данной зоны характерно увеличение значений k_{para} , F1 и F2, указывающее на увеличение поставки аллотигенного материала. Повышенное содержание аллотигенного материала в интервале 236–184 см, вероятно, связано с обводнением озера в результате потепления и увлажнения климата в интервале ~11640–7700 к.л.н. [4].

Значения F3 выражено уменьшаются, что соответствует, по всей вероятности, активному высвобождению серы в результате бактериальной сульфатредукции [4, 9].

К литологической зоне 3 голоцена приурочен интервал разреза 178–60 см (~7300–1950 к.л.н.; вторая половина атлантической стадии, суббореальная стадия), сложенный илом темно-зеленым, серо-зеленым и зеленым плотным, участками песчано-алевритовым. Среднее значение медианного размера 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 пелитовой фракции снижаются до 55,11% и 7,67% соответственно. По классификации Логвиненко определены супесь алевритовая (170–156 см), алевритовый песок (132 см) и суглинок легкий алевритовый (124–90 см). В интервалах 144–118 см (~5100–3660 к.л.н.), 78–52 см (~2630–1620 к.л.н.) установлено увеличение k_{para} и F_1 , что указывает на увеличение поставки аллотигенного материала в бассейн седиментации. Пониженное содержание аллотигенного вещества в осадках установлено в интервале 184–144 см (~7700–5100 к.л.н.), которое сопровождается замечательным увеличением S_g в осадке (уменьшение значений фактора F_2 , карбонатная седиментация). Снижение поставки аллотигенного материала и карбонатообразование, скорее всего, связаны с уменьшением влажности климата. Так, например, согласно Н.А. Хотинскому [14], в период ~6800–5800 лет назад на территории Северной Евразии произошел термический максимум. Снижение значений k_{para} и F_1 установлено в интервале 118–78 см (~3660–2630 к.л.н.), что указывает на аридизацию климата, что согласуется с данными по [4]: спорово-пыльцевой и диатомовый анализы осадочных отложений озера Талкас позволили установить аридизацию климата, которая произошла ~4200–3000 к.л.н.

Голоценовая литологическая зона 4 охватывает интервал разреза 60–2 см (~1950–1000 к.л.н., большая часть субатлантической стадии), представленный илом темно-зеленым. Среднее значение M_d в осадочных отложениях озера 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 Логвиненко определены супесь алевритовая (52 см) и суглинок легкий алевритовый (4 см). Для данной зоны характерно снижение значений k_{para} , F_1 , что указывает на уменьшение содержания аллотигенного материала в осадке. Пониженное содержание аллотигенного вещества в осадках установлено в интервале 52–2 см (~1620–1000 к.л.н.), который коррелирует с событием Бонда 1 (увеличение сухости климата) [15].

Заключение

Впервые получены детальные данные по возрасту, вещественному составу и генетическим особенностям донных отложений озера Сабакты по данным длинных керно-

вых колонок. Полученные результаты позволили выявить условия формирования озерных отложений в рассматриваемом регионе, а также развить и дополнить общие представления об озерном осадконакоплении в плейстоцен-голоценовое время. Согласно радиоуглеродному датированию, седиментация в озере Сабакты началась не позднее ~ 25 тыс. лет назад. Выявлено значение k_{para} как показателя интенсивности поступления аллотигенного материала в озерный бассейн осадконакопления. Установлена литологическая зональность донных отложений, отражающая историю осадконакопления в изучаемом озере, а также обозначены наиболее значительные эпизоды и события в истории осадконакопления.

Список литературы

1. Pu Y., Nace T., Meyers P.A., Zhang H., Wang Y., Zhang C.L., Shao X. Paleoclimate changes of the last 1000 yr on the eastern Qinghai–Tibetan Plateau recorded by elemental, isotopic, and molecular organic matter proxies in sediment from glacial Lake Ximencuo // Original Research Article Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. 2013. Vol. 379–380. P. 39–53. DOI: 10.1016/j.palaeo.2013.03.023.
2. Косарева Л.Р., Щербakov В.П., Нургалиев Д.К., Нургалиева Н.Г., Сычева Н.К., Антоненко В.В., Кузина Д.М., Евтугин В.Г. Периодизация климатических циклов в голоцене по синхронным вариациям магнитных и геохимических параметров осадков озера Большое Яровое (юго-запад Сибири) // Геология и геофизика. 2020. Т. 61. № 7. С. 889–907. DOI: 10.15372/GiG2019148.
3. Юсупова А.Р., Нургалиева Н.Г. Геохимическая основа индикации изменения климата по голоценовым донным отложениям озера Банное (Южный Урал) // Ученые записки Казанского университета. Серия: Естественные науки. 2021. Т. 163. № 3. С. 514–526. DOI: 10.26907/2542-064X.2021.3.514-526.
4. Масленикова А.В., Удачин В.Н., Дерягин В.В. Палеоэкология и геохимия озерной седиментации голоцена Урала. Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2014. 136 с.
5. Krylov P.S., Nurgaliev D.K., Kuzina D.M., Yasonov P.G. High resolution seismic studies of shallow lake sabakty (Russia) // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management. SGEM. 2019. Vol. 19, Is. 4.2. P. 229–234. DOI: 10.5593/sgem2019V/4.2/S06.031.
6. Логвиненко Н.В. Петрография осадочных пород с основами методики исследования: учеб. для геол. спец. вузов. М.: Высш. шк., 1984. 416 с.
7. Нургалиев Д. К., Ясонов П.Г. Полезная модель «Коррелятивный спектрометр» // Патент № 81805. Патентообладатель Гос. обр. уч-е высшего проф. обр. «Казан. гос. ун-т им. В. И. Ульянова-Ленина». № 2008125924/22; заявлено 17.06.08; опубл. 27.03.09, Бюл. ФИПС № 9. 20 с.
8. Kosareva L.R., Nourgaliev D.K., Kuzina D.M., Spassov S., Fattakhov A.V. Ferromagnetic, dia-/paramagnetic and superparamagnetic components of Aral sea sediments: significance for paleoenvironmental reconstruction // ARPN Journal of Earth Sciences. 2015. Vol. 4. Is. 1. P. 1–6.
9. Мальцев А.Е. Геохимия голоценовых разрезов сапропелей малых озер юга Западной Сибири и Восточного Прибайкалья: дис. ... канд. геол.-мин. наук. Новосибирск, 2017. 199 с.

10. Kuzina D., Iusupova A., Antonenko V. MAGNETIC STUDIES OF LAKE SABAКТY SEDIMENTS (SOUTH URAL, RUSSIA) // 20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference. SGEM 2020. Conference Proceedings. 2020. P. 201-208. DOI: 10.5593/sgem2020V/4.2/s06.25.
11. Dunlop D.J. Theory and application of the Day plot (M-rs/M-s versus H-cr/H-c) // J. Geophys. Res. S Solid Earth. 2002. Vol. 107, Is. B3. P. 2046–2067.
12. Gradstein F.M., Ogg J.G., Schmitz M.D., Ogg G.M. The Geologic Time Scale 2020 // Elsevier. 2020. Vol. 2. P. 1219-1240. DOI: 10.1016/C2020-1-02369-3.
13. Борисов Б.А. О дальнейшем усовершенствовании общей шкалы квартера для детализации карт четвертичных отложений, входящих в комплекты госгеолкарты РФ // Общая стратиграфическая шкала России: состояние и проблемы обустройства: ГИН РАН. 2013. С. 365–375.
14. Хотинский Н.А. Голоцен Северной Евразии. М.: Наука, 1977. 199 с.
15. Bond G., Showers W., Cheseby M., Lotti R. et al. A Pervasive Millennial-Scale Cycle in North Atlantic Holocene and Glacial Climates // Science. 1997. Vol. 278, Is. 5341. P. 1257–1266. DOI: 10.1126/science.278.5341.1257.