

УДК 550.384(571.654):551.79

ПЕТРОМАГНИТНЫЕ ДАННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ ГОЛОЦЕНА В БАССЕЙНЕ ОЗЕРА ЧИСТОЕ (Северное Приохотье)

Минюк П. С., Пожидаева Д. К., Соцкая О. Т., Бурнатный С. С.

ФГБУН Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт

им. Н. А. Шило ДВО РАН, г. Магадан

E-mail: minyuk@neisri.ru

Приведены результаты комплексного изучения отложений бассейна озера Чистое. Изучены магнитные и минералогические характеристики различных гранулометрических фракций делювиальных отложений, современных поверхностных донных осадков, отложений из скважин. Показана связь петромагнитных параметров делювия и осадков озера. Определен состав магнитных минералов. Установлена зависимость магнитных характеристик от гранулометрического состава осадков. Скалярные магнитные величины в осадках скважин показывают широкоамплитудные вариации, отражающие частую смену условий осадконакопления. Осадки с высокими значениями MB , J_s , J_{rs} могли формироваться в периоды холодного климата, с интенсивным поступлением детритового материала в бассейн.

Ключевые слова: озерные осадки, озеро Чистое, петромагнетизм, магнитные минералы, голоцен, делювиальные отложения.

DOI: 10.34078/1814-0998-2023-2-21-41

ВВЕДЕНИЕ

Озерные отложения являются важным архивом данных изменения природной среды прошлого. Площадь водного покрытия естественными водоемами в Магаданской области составляет около 1100 км², суммарный объем озерных вод – 2.86 км³ (Измайлова, 2018). Большинство озер имеет ледниковое или термокарстовое происхождение. Возраст многих озер ограничивается концом плейстоцена или голоценом. Ледниковые озера являются благоприятными объектами для исследования изменений природных обстановок последнего ледникового цикла. Среди древних озер следует отметить озёра Эльгыгыт-гын и Гранд, осадки которых начали формироваться в позднем плиocene (3.6 млн л. н.) и позднем плейстоцене (60 тыс. л. н.) соответственно (Melles et al., 2012; Ложкин и др., 2010). Отложения этих озер комплексно изучаются, включая петрофизический и палеомагнитный методы (Haltia, Nowaczyk, 2014; Minyuk, Subbotnikova, 2021). Для палеомагнитных исследований осадки многих озер непригодны из-за низких значений магнитной восприимчивости и остаточной намагниченности, вызванных разбавлением детритового материала органикой. В некоторых озерах установлены низкие скорости осадкона-

копления, не позволяющие получить высокоразрешающие данные изменений природной среды. Озеро Чистое по составу осадков, высоким скоростям осадконакопления является уникальным объектом для комплексного изучения различных аспектов природной среды голоцена (Бурнатный, Минюк, 2019; Minyuk et al., 2022). Целью данной работы является получение детальной петрофизической, магнито-минералогической характеристик озерных осадков, а также продуктов выветривания коренных пород для реконструкций условий седиментации в бассейне.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Основными объектами исследований являлось озеро Чистое, а также небольшие озёра ЛБ-1 и ЛБ-2 (неформальные названия), расположенные в Северном Приохотье Магаданской области (рис. 1).

Озеро Чистое (59° 32.63' с. ш., 151° 48.02' в. д.) является одним из крупнейших на Северо-Востоке. Длина его составляет 8.8 км, ширина – 6.5 км, максимальная глубина – 6.6 м. Озёра ЛБ-1 и ЛБ-2 отделены от озера Чистое узким (несколько метров) песчано-галечным баром. Длина этих озер составляет несколько сот метров, глубина – до 4 м. Все озёра находятся в Ланковской впадине северного Приохотья, на левобережье р. Ланковая (приток р. Ола). Река Ланковая соединяется с оз. Чистое протокой Олачан (Белая), протяжён-

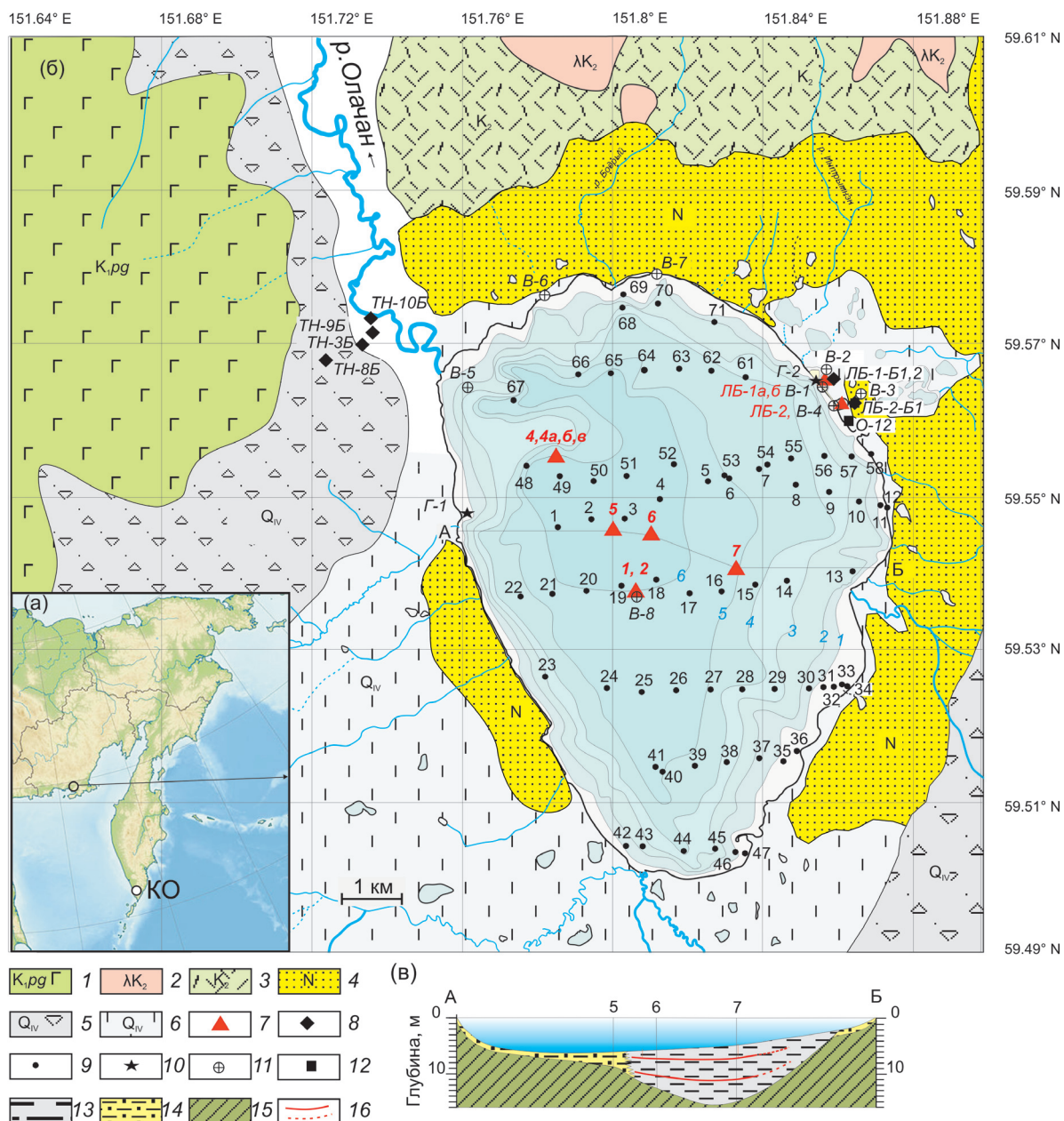


Рис. 1. Местоположение объектов исследования (а, б) и профиль озера (в): 1 – нижнемеловые туфы и лавы базальтов и андезитов пъягинской свиты; 2 – верхнемеловые субвулканические интрузии риолитов; 3 – верхнемеловые эффузивы риолитов и дацитов; 4 – неогеновые осадочные породы с прослоями лигнитов и бурых углей; 5 – голоценовые делювиальные отложения; 6 – голоценовые торфяники; 7 – местоположение скважин; 8–11 – точки отбора проб: делювия (8), поверхностных донных проб (9), гальки (10), воды (11); 12 – местоположение обнажения; 13 – ил; 14 – песчано-гравийные отложения, 15 – ложе озера; 16 – прослои тефры. КО – кальдера Курильского озера.

Fig. 1. Study object locations (a, б) and the lake profile (в): 1 – Lower Cretaceous tuffs and lavas of the Piagin Formation basalts and andesites; 2 – Upper Cretaceous subvolcanic intrusions of rhyolites; 3 – Upper Cretaceous effusions of rhyolites and dacites; 4 – Neogene sedimentary rocks with interlayers of lignites and brown coals; 5 – Holocene deluvial deposits; 6 – Holocene peats; 7 – core locations; 8–11 – sampling sites for deluvium (8), surface bottom samples (9), pebbles (10), water (11); 12 – outcrop location; 13 – silt; 14 – sand-gravel deposits, 15 – lake basement; 16 – tephra layers. KO – Lake Kuril'skoye caldera.

ностью 15 км. Около 30 ручьев различной длины впадают в озеро. Ланковскую впадину выполняют кайнозойские толщи. На южном и северном берегах распространены мощные голоценовые торфяники, содержащие прослой тефры. Окружающие озеро сопки сложены нижнемеловой

пъягинской свитой, представленной главным образом базальтами, андезитами и их туфами, реже туфами кислого состава, нерасчлененными верхнемеловыми породами, представленными дацитами, андезито-дацитами, риодацитами и их туфами (Геологическая..., 1985). Продук-

ты выветривания этих пород являются основным детритовым материалом, приносимым в озеро многочисленными ручьями.

Озеро находится в пределах Ланковской низменности. Юго-восточные берега заболочены. На юге и северо-востоке расположены многочисленные небольшие озёра. Прибрежные районы озера и окружающие сопки труднопроходимые, покрыты лиственничными редколесьями.

Вода в озере ультрапресная, общая минерализация составляет 36.45–53.76 мг/л, pH = 5.9–6.6. По составу она соответствует гидрокарбонатной кальциевой (Минюк и др., 2022а).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Отбор проб. 8 проб (В-1-8), объемом 2 л, отобраны в летнее время из озерного бассейна для определения химического состава воды.

7 валовых (5–10 л) проб для комплексного изучения гранулометрических фракций отобраны из делювиальных отложений, распространенных в северо-западной (пробы ТН-3Б, ТН-8Б, 9Б, ТН-10Б) и северной (пробы ЛБ-1-Б1, ЛБ-1-Б2, ЛБ-2-Б1) окрестностях озера. Галька, гравий и песок пляжа (2 пробы) опробованы для петрофизических исследований в западной (проба Г-1) и восточной (проба Г-2) частях озера. Опробование поверхностных донных проб (71 проба) проведено драгированием по профилям по всей акватории озера.

Береговое обнажение О-12 (59° 33.52', 151° 51.9') с глинисто-гравийными отложениями, а также торфом, содержащим тефру, опробовано в северной части озера на различные виды анализов, включая петрофизический, радиоуглеродный, минералогический, палинологический (образцы 1-н-1, 1-н-2, 1-н-3).

Бурение озерных осадков. Бурение озера Чистое проводилось со льда озера в зимне-весеннее время с использованием пробоотборника Ливингстона (Wright et al., 1984). Всего пробурено 9 скважин – скв. ЧС-1, 2 (пробурены рядом, 59° 32.259' с. ш., 151° 48.377' в. д.), скв. ЧС-4, 4а, 4б, 4в (59° 32.753' с. ш., 151° 47.257' в. д.), скв. ЧС-5 (59° 32.810' с. ш., 151° 48.020' в. д.), скв. ЧС-6 (59° 32.718' с. ш., 151° 48.651' в. д.), скв. ЧС-7 (59° 32.225' с. ш., 151° 50.579' в. д.). Скважины ЧС-4, 4а, 4б, 4в пробурены до нижней тефры в нескольких десятках см друг от друга, остальные скважины – до основания озерных осадков. Небольшие озёра ЛБ-1 и ЛБ-2, расположенные северо-восточнее озера Чистое, пробурены летом – скв. ЛБ-1а, ЛБ-1б (59° 33.931' с. ш., 151° 51.5' в. д.), ЛБ-2 (59° 33.755' с. ш., 151° 51.758' в. д.).

Лабораторные исследования. Отложения исследовались оптическим, петромагнитным, минералогическим, геохимическим методами.

Керн всех скважин после описания и фотографирования разделен на сегменты длиной 1 см (озеро Чистое) или длиной 0.5 см (озёра ЛБ-1, ЛБ-2). Все пробы высушивались для последующих комплексных исследований.

Каждая проба делювия разделена ситованием на следующие гранулометрические фракции: 2500, 500, 250, 140, 100, 63, 40 и < 40 мкм. Последнюю фракцию взмучивали и исследовали материал, выпавший в осадок сразу (фракция 20 мкм), через 24 часа (фракция ≈ 5 мкм), а также неосажденную взвесь (фракция ≈ 1 мкм), которая исследовалась после высушивания. Размер зерен этих фракций определялся под микроскопом в приготовленных прозрачных слайдах, а также методом лазерной дифракции.

Химический состав отдельных образцов изучен методом рентгенофлуоресцентного анализа. Относительное количество органического материала оценено по величине потерь при прокаливании (LOI) после прогрева проб до 550 °С (2 часа) (Heiri et al., 2001).

Измерения магнитной восприимчивости (МВ) пород и осадков и исследование ее при высоких температурах выполнены на многофункциональном капнаметре MFK1-FA с термоприставкой CS3 (AGICO Ltd.). Магнитная восприимчивость измерена в осадках всех скважин. Точки Кюри (T_c) магнитных минералов определялись по пикам Гопкинсона и кривым $1/MB(T)$ (Lattard et al., 2006; Petrovský, Kapička, 2006; Fabian et al., 2013).

Гистерезисные параметры осадков скважин ЧС-2 и ЧС-7, включая остаточную намагниченность насыщения (J_{rs}), намагниченность насыщения (J_s), индуктивную намагниченность (J_i), коэрцитивную силу (B_c), остаточную коэрцитивную силу (B_{cr}), измерены на автоматическом коэрцитиметре J-meter (КТУ) (Буров и др., 1986). Относительное содержание парамагнитной компоненты намагниченности (J_p) рассчитывалось по формуле $[J_i \text{ (при 500 мТл)} - J_s \text{ (ферримагнитная компонента)}] / J_i \text{ (при 500 мТл)}$. Для оценки доменного состояния зерен магнитные параметры (J_{rs}/J_s , B_{cr}/B_c) вынесены на диаграмму Дея–Данлопа (Day et al., 1977; Dunlop, 2002a, b).

Исследования элементного состава стекол тефры, а также зерен магнитной фракции из озерных осадков, делювия и тефры проводились на сканирующем электронном микроскопе EVO-50 с энергодисперсионными спектрометрами AXS XFlash фирмы Bruker и системой рентгеновского микроанализа Quantax Esprite 1.9. Радиоуглеродный анализ проб торфа выполнен в СВКНИИ ДВО РАН на низкофоновом жидкостинтиллиационном спектрометрическом радиометре 1220 QUANTULUS. Пробоподготовка и синтез счетной формы проведены на установке КЛП С14.

Радиоуглеродное датирование органических микрочастиц из керна получено в лаборатории Ангстрёма Уппсальского университета (Швеция). Калиброванный возраст определен по программе Calib 8.20 (<http://calib.org/calib/calib.html>).

Химический анализ воды выполнен методами титриметрии, фотоколориметрии и атомно-абсорбционной спектроскопии с использованием утвержденных унифицированных методических указаний на спектрофотометре UVmini-1240 (SHIMADZU), атомно-эмиссионном спектрометре Agilent 4100 MP-AES, а также весовым методом.

Гранулометрический анализ тонких фракций делювия (22 пробы) и отдельных образцов озерных осадков из скважины ЧС-2 (20 проб) выполнен в ДВГИ ДВО РАН методом лазерной дифракции на лазерном дифракционном анализаторе SALD-2300 (Shimadzu, Япония). Из-за низких содержаний органики в пробах специальной обработки проб для удаления органического веще-

ства не проводилось. Для диспергирования и гомогенизирования приготовленных суспензий использовалась ультразвуковая обработка. В ходе анализа проводилось 5–6 циклов измерений с регистрацией значений 2–3 последних циклов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Поверхностные донные отложения

Литология. Состав озерных отложений зависит от местоположения в бассейне. Пляжи состоят преимущественно из песчано-галечного материала. Прибрежные участки озера выполнены песками с гравием и редкой галькой. В западной части они распространены полосой шириной до 1.3 км, в восточной части озера эти отложения составляют узкую прибрежную зону шириной около 300 м. В центральной части озера поверхностные осадки сложены илами алеврито-глинистого состава (рис. 2).

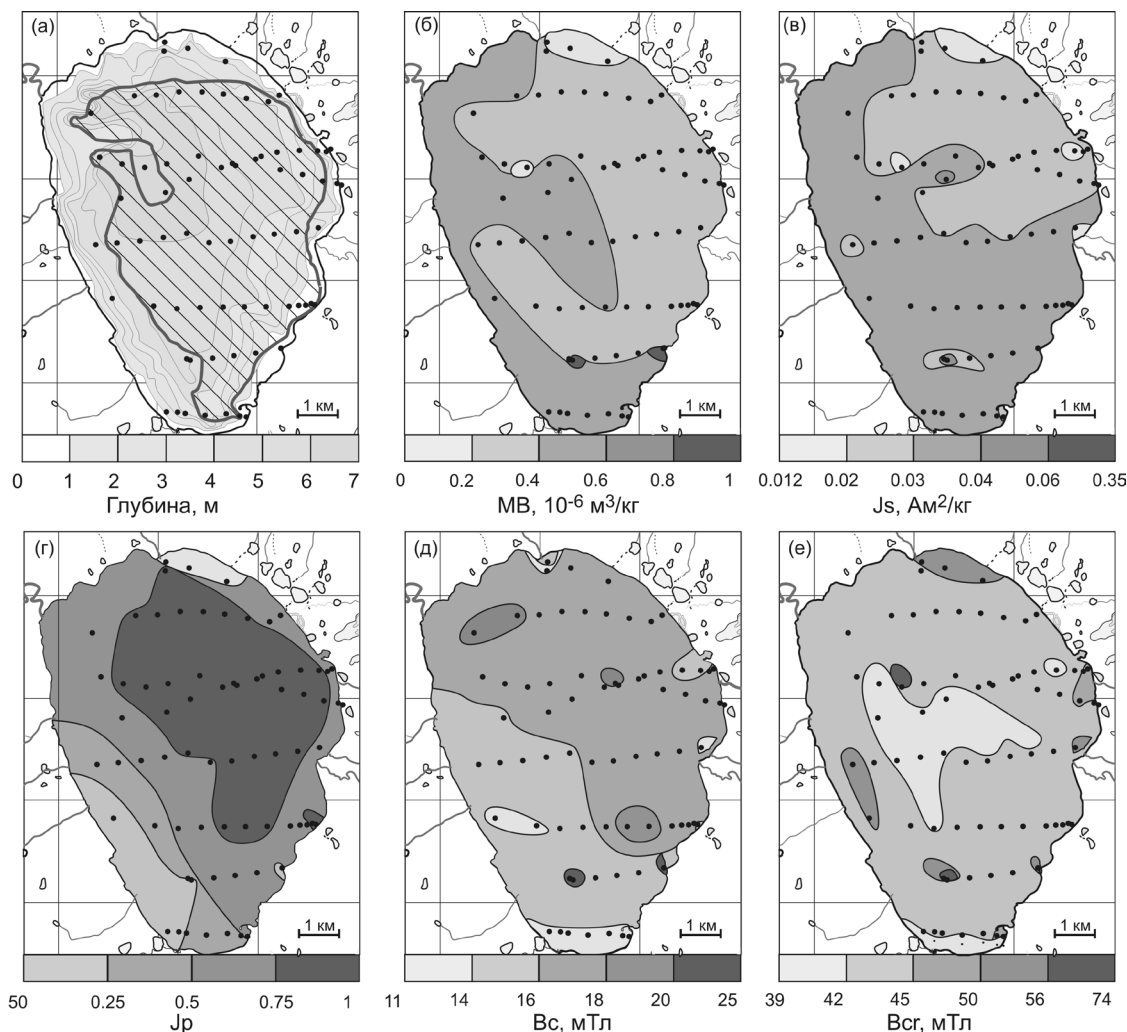


Рис. 2. Батиметрическая карта (а) и карты петромагнитных параметров (б–е) поверхностных донных осадков озера Чистое. Заштрихованный участок – область распространения илистых осадков, точками обозначены места отбора поверхностных проб.

Fig. 2. Bathymetric map (a) and maps of petromagnetic parameters (b–e) of surface bottom sediments in Lake Chistoye. The shaded area shows the distribution of silty sediments, the points indicate the sampling sites.

Петромагнитные характеристики отложений. Петромагнитные характеристики поверхностных проб варьируют по площади бассейна. Некоторые из них контролируются гранулометрическим составом (табл. 1). Пески и алевриты отличаются по петрофизическим параметрам. Средние величины MV , J_{rs} и J_s выше для песков, чем для алевритов. В песках меньше содержание парамагнитной компоненты (табл. 1, рис. 3, б, в). Согласно распределению данных на диаграмме Дея–Данлопа, магнитные частицы псевдомоменные, они занимают область диаграммы между кривыми смеси однодоменных-многодоменных

и суперпарамагнитных-однодоменных частиц (рис. 3, а). Кластер песков локализуется ближе к кривой для суперпарамагнитных-однодоменных частиц. Среднее отношение J_{rs}/J_s ниже для песков, чем для тонких осадков, и составляет 0.17.

Береговой разрез О-12

Разрез расположен на северном берегу озера. В разрезе выделено 4 слоя.

Слой 1 – торф волокнистый, темно-коричневый, с остатками веточек, семян, мощностью 125 см. В средней части слоя торф включает бе-

Таблица 1. Петромагнитные характеристики поверхностных донных проб

Table 1. Petromagnetic characteristics of surface bottom samples

Осадок (N)	Алеврит (49)			Песок (20)		
Значение	Мин.	Макс.	Средне	Мин.	Макс.	Среднее
$MV, 10^{-6} \text{ м}^3/\text{кг}$	0.18	0.58	0.36	0.06	3.31	0.60
$J_s, \text{ Ам}^2/\text{кг}$	0.015	0.0594	0.030	0.012	0.3544	0.044
$J_{rs}, \text{ Ам}^2/\text{кг}$	0.0026	0.0099	0.0057	0.0022	0.06885	0.00805
$B_c, \text{ мТл}$	12.73	19.38	16.13	11.86	25.37	15.69
$B_{cr}, \text{ мТл}$	39.00	47.71	43.17	41.42	74.05	49.33
J_{rs}/J_s	0.15	0.22	0.19	0.14	0.25	0.17
B_{cr}/B_c	2.35	3.33	2.69	2.43	4.14	3.19
J_p	0.41	0.67	0.59	0.33	0.79	0.50

N – количество образцов.

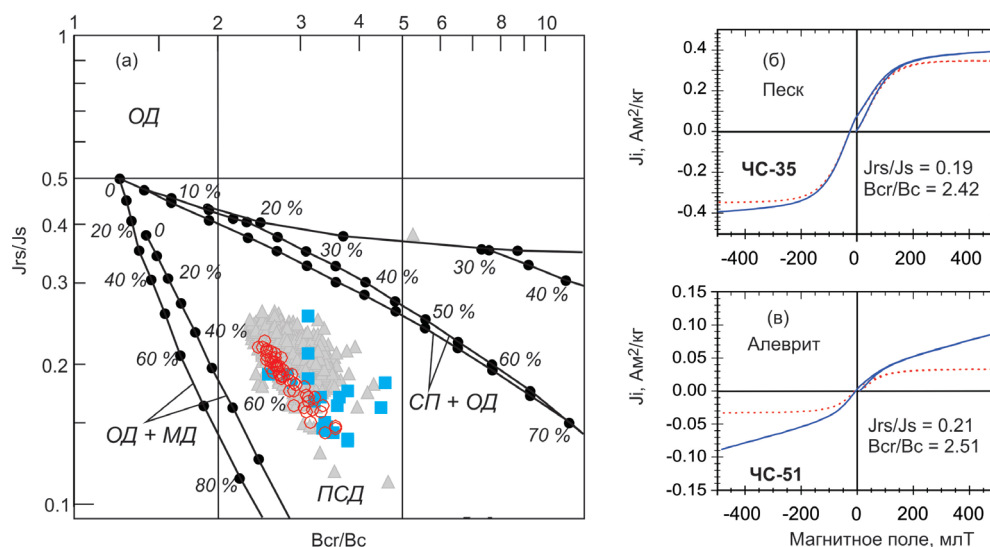


Рис. 3. Гистерезисные свойства отложений озера Чистое: (а) – диаграмма Дея–Данлопа для поверхностных донных песчаных (синие символы), илистых отложений (красные символы) и осадков скважины 7 (серые символы): ОД, МД, СП, ПСД – однодоменные, многодоменные, суперпарамагнитные, псевдомоменные частицы соответственно. Кривые ОД + МД и ОД + СП из работ (Dunlop, 2002a, b); (б, в) – петли гистерезиса: жирным шрифтом обозначены номера образцов, пунктирная линия – скорректированная кривая на парамагнитную компоненту.

Fig. 3. Hysteresis features of Lake Chistoye sediments: (а) – Day–Dunlop diagram for surface bottom sandy (blue symbols), silty (red symbols), and core 7 sediments (grey symbols): SD, MD, SP, PSD – single-domain, multi-domain, superparamagnetic, pseudodomain particles, respectively. Curves SD + MD and SD + SP from (Dunlop, 2002a, b); (б, в) – hysteresis loops: sample numbers are indicated in bold, the dotted line is the corrected curve for the paramagnetic component.

лого цвета тефру невыдержанной мощности (до 10 см). Радиоуглеродное датирование 9 образцов, отобранных равномерно по слою, показало голоценовый возраст торфа – от 3450 до 9725 лет (Минюк и др., 2022б).

Слой 2 – алевриты, серые, лёссовидные, мощностью 360 см. Значения магнитной восприимчивости алевритов составляют $(0.16–0.20) \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{кг}$.

Слой 3 – глины, серые, $M = 80$ см. Магнитная восприимчивость глин составляет в среднем $0.19 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{кг}$.

Слой 4 – песчано-гравийные отложения, видимой мощностью более 40 см. Отложения слоя разделены на 4 гранулометрические фракции, отличающиеся по величине магнитной восприимчивости. Отмечено, что грубые фракции показывают высокие значения МВ: $0.61 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{кг}$ (фракция > 2500 мкм), $0.40 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{кг}$ (фракция 2500–500 мкм). Для фракций ≤ 500 мкм МВ составляет $(0.27–0.29) \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{кг}$.

Делювиальные отложения

По магнитным и петрологическим характеристикам выделяются две группы образцов. В первую группу входят образцы, отобранные на склонах сопки западной части озера (ТН-3Б, ТН-8Б, 9Б, ТН-10Б) (рис. 1). Они представлены несортированным разнозернистым делювием, образованным по породам основного и среднего состава пъягинской свиты. Вторую группу составляют пробы, отобранные на северо-восточном берегу озера (ЛБ-1-Б1, ЛБ-1-Б2, ЛБ-2-Б1). Это почвенно-делювиальные образования, состоящие из продуктов разрушения пород различного состава и генезиса, выполняющих Ланковскую впадину. Предполагается, что грубые фракции делювия по комплексу характеристик ближе всего к коренным породам. Размер обломков пород в отдельных образцах достигает более 5 см.

Петромагнитные свойства двух групп грубых фракций делювия (> 500 мкм) различные. Отложения первой группы характеризуются повы-

шенными значениями МВ, J_s , J_{rs} , коэрцитивных сил, низкими величинами парамагнитной компоненты, которые варьируют в пределах 0.17–0.25 (табл. 2). Фракции второй группы менее магнитные, они более химически измененные, доля парамагнитной компоненты в них составляет 0.43–0.81.

Установлена зависимость магнитных характеристик делювиальных отложений от гранулометрического состава (рис. 4). Для первой группы образцов значения МВ, J_{rs} , J_s уменьшаются при уменьшении размера фракций, причем наиболее резкое отличие параметров выявлено для фракций 500–250 мкм.

Значения этих параметров для второй группы возрастают или изменяются разнонаправленно от грубых фракций до фракции 20 мкм, затем уменьшаются. Для большинства образцов обеих групп парамагнитная составляющая увеличивается с уменьшением размера фракций. Значения B_c и B_{cr} уменьшаются от грубых фракций до фракций 63–40 мкм, затем преимущественно возрастают в тонких фракциях. Отношения B_{cr}/B_c минимальны для фракции 5 мкм, а в самой тонкой фракции они возрастают, в то время как для отношений J_{rs}/J_s наблюдается обратная тенденция.

Озерные осадки скважин

Литология. Осадки скважин оз. Чистое представлены серыми, темно-серыми алевритами различной мощности с редкими включениями вивианита и органических остатков (табл. 3). Нижняя часть разреза самой глубокой скв. ЧС-7 (гл. 600–945 см) сложена неяснослоистыми алевритами. Слоистость обусловлена тонкими прослоями органики или более грубыми литологическими разностями. Группа скважин ЧС-4, 4а, 4б, 4в пробурена до прослоя нижней тефры, остальные скважины – до ложа озера. В основании скважин ЧС-1, ЧС-2, ЧС-6, ЧС-7 отложения состоят из прослоев песка, гравия, гальки и обугленных органических остатков. Осадки небольших озер ЛБ-1 и ЛБ-2 представлены алевритами с многочисленными просло-

Таблица 2. Петромагнитные характеристики фракций > 500 мкм склоновых отложений

Table 2. Petromagnetic characteristics of fractions > 500 microns of slope deposits

Образец	ЛБ-1-Б1	ЛБ-1-Б2	ЛБ-2-Б1	ТН-10Б	ТН-3Б	ТН-9Б	ТН-8Б
J_s , Ам ² /кг	0.008	0.014	0.006	0.1355	0.207	0.108	0.346
J_{rs} , Ам ² /кг	0.00124	0.0021	0.0009	0.0276	0.0651	0.0233	0.0987
B_{cr} , мТл	46.6	46.4	49.2	54.5	83.4	60.1	76.84
B_c , мТл	14.1	14.0	16.7	19.7	36.2	20.9	32.6
J_r/J_s	0.145	0.150	0.159	0.203	0.3134	0.2144	0.284
B_{cr}/B_c	3.303	3.303	2.948	2.762	2.302	2.869	2.354
J_p	0.69	0.43	0.81	0.22	0.25	0.22	0.17
МВ, $10^{-6} \text{ м}^3/\text{кг}$	0.11	0.075	0.13	1.03	2.63	0.92	2.09

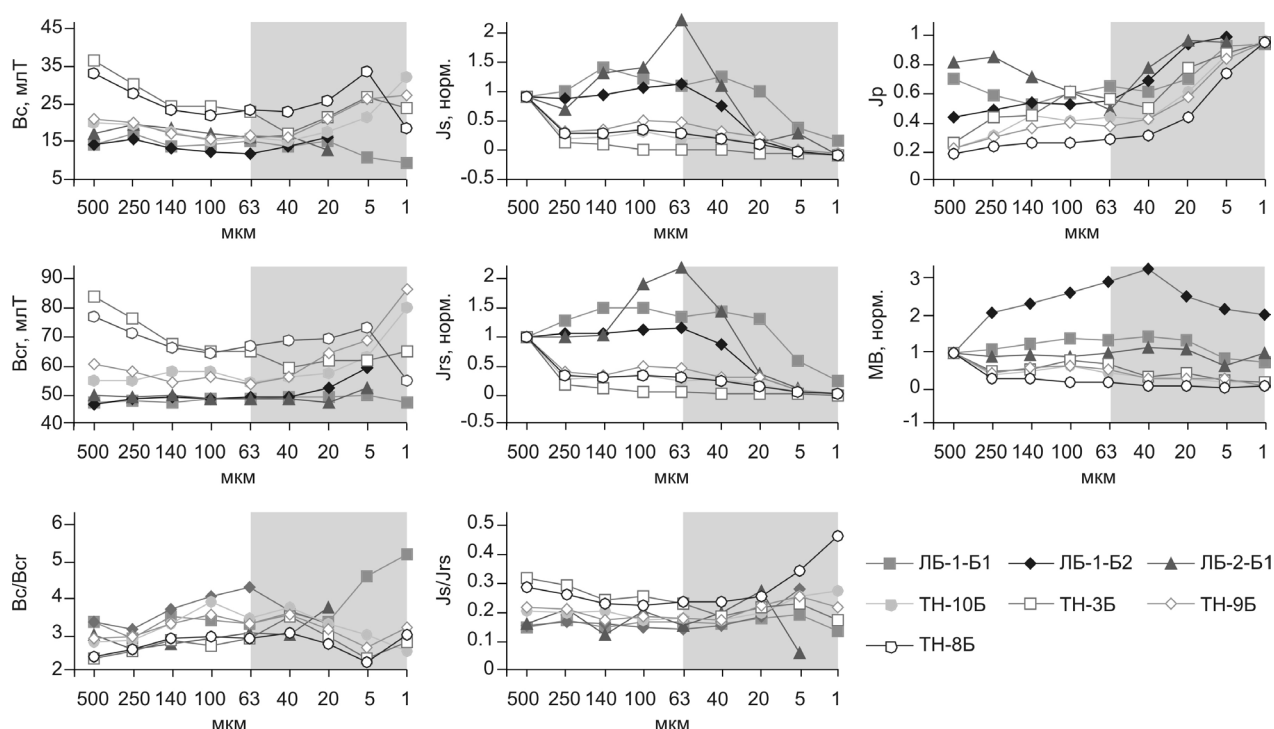


Рис. 4. Зависимость магнитных характеристик от размера гранулометрических фракций делювия. Серой полосой обозначен доминирующий гранулометрический размер озерных осадков.

Fig. 4. Dependence of magnetic characteristics on the deluvium granulometric fractions. The grey stripe indicates the dominant granulometric size of lake sediments.

Таблица 3. Характеристика керн скважин озер Чистое, ЛБ-1 и ЛБ-2

Table 3. Characteristics of the core sediments from Chistoye, LB-1, and LB-2 Lakes

Скважина	ЧС-1	ЧС-2	ЧС-4	ЧС-4а	ЧС-4б	ЧС-4в	ЧС-5	ЧС-6	ЧС-7	ЛБ-1а	ЛБ-1б	ЛБ-2
Мощность, см (N)	599 (591)	577 (552)	193 (295)	189 (279)	204 (304)	203 (202)	223 (360)	635 (594)	945 (920)	439 (863)	423 (842)	669 (1325)
Верхняя тефра, см	86–88	77–80	36–38.5	35.5–37	31–34	36.5–37	–	162–166	240–249	108.5–109	109.5–110	171.5–172.0
Нижняя тефра (КО), см	373–377	360–364	190–193	185–189	184–188	182–186	–	433–437	625.5–626.5	–	–	616–619
MB, 10^{-6} м ³ /кг	0.22–	0.06–	0.24–	0.13–	0.16–	0.05–	0.03–	0.05–	0.11–	0.01–	0.002–	0.05–
Мин.–макс. (среднее)	1.48 (0.43)	1.39 (0.43)	0.81 (0.45)	1.01 (0.38)	1.14 (0.36)	0.66 (0.36)	0.43 (0.26)	0.96 (0.28)	1.75 (0.41)	1.15 (0.19)	0.44 (0.19)	3.83 (0.22)

N – количество измеренных образцов.

ями песчаных алевритов, тонкозернистых песков, растительного детрита.

В осадках озер Чистое, ЛБ-1, ЛБ-2 установлены два прослоя тефры, имеющие различную мощность (табл. 3) и геохимические, петрофизические и минералогические характеристики (Минюк и др., 2022б). Нижняя тефра имеет риолитовый состав, слабомагнитная, содержащая высокотитанистые и малотитанистые титаномагнетиты с характерными точками Кюри. Она связывается с извержением вулкана Курильского озера на Камчатке, произошедшим, по данным радиоуглеродного анализа, 7600 л. н. (Ponomareva et al.,

2004). Верхняя тефра имеет андезито-дацитовый состав, сильномагнитная, включающая малотитанистые титаномагнетиты и магнетиты (Минюк и др., 2022б). Она детально изучена в разрезах скв. ЛБ-1а, ЛБ-1б, ЛБ-2, где прослой тефры имеет четкие границы. В осадках озера Чистое слой тефры не выдержан по простиранию, вулканический материал перемешан с вмещающими осадками, по-видимому, вследствие биотурбаций. Тем не менее по высоким значениям магнитных параметров тефра уверенно диагностируется в осадках (рис. 5). Возраст ее составляет 2745 ± 10 лет (Lozhkin et al., 2022).

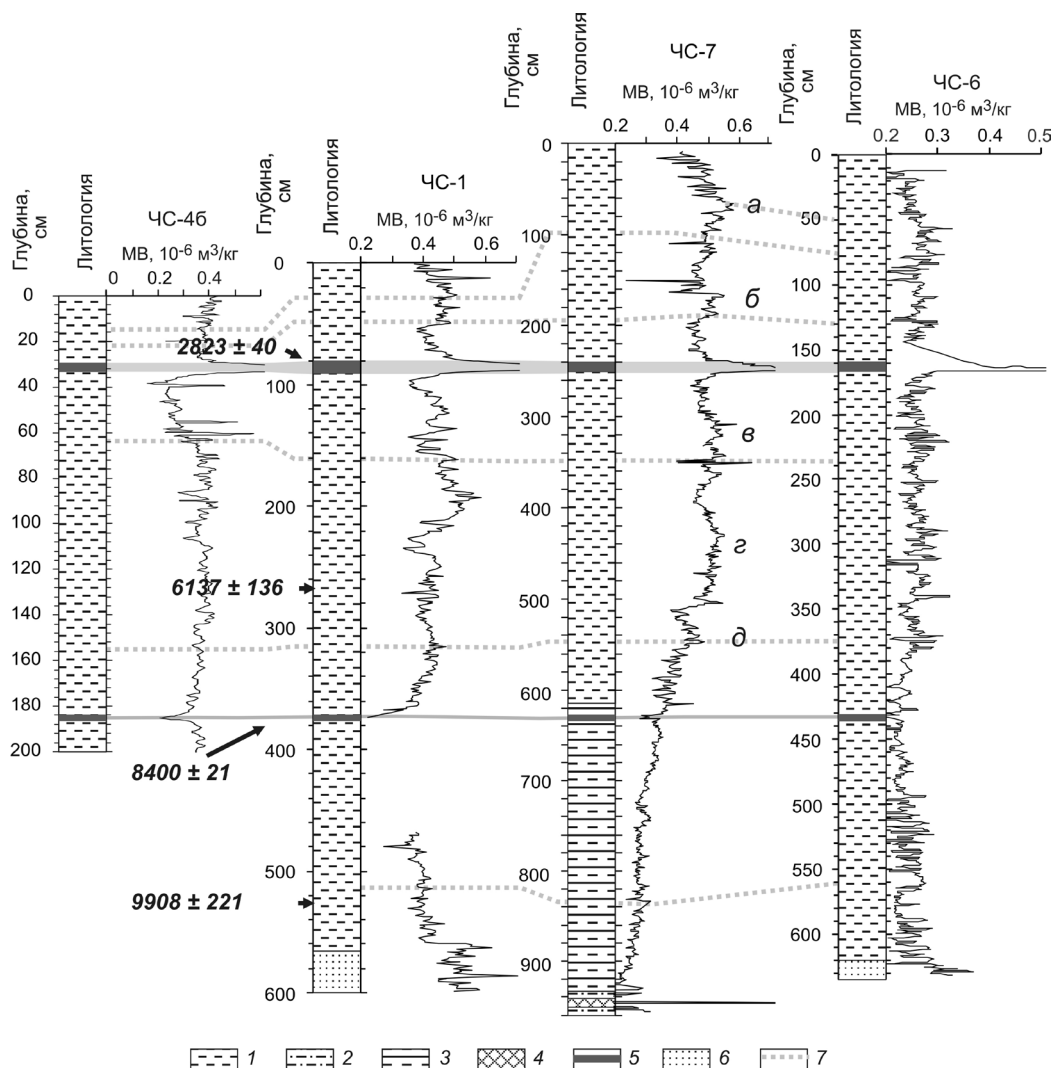


Рис. 5. Магнитная восприимчивость осадков скважин оз. Чистое: 1 – алевроит; 2 – песчаный алевроит; 3 – слоистый алевроит; 4 – органические прослои; 5 – тephра; 6 – песок; 7 – предполагаемые линии корреляции; цифрами курсивом обозначены калиброванные радиоуглеродные датировки; а–д – интервалы повышенных значений магнитной восприимчивости.

Fig. 5. Magnetic susceptibility of core sediments from Lake Chistoye: 1 – aleurite; 2 – sandy aleurite; 3 – laminated aleurite; 4 – organic interlayers; 5 – tephra; 6 – sand; 7 – assumed correlation lines; **italicized numbers indicate calibrated radiocarbon dates**; а–д – intervals of increased magnetic susceptibility values.

По данным радиоуглеродного датирования, осадки, отобранные на глубинах 266 и 524 см из скв. ЧС-2, имеют возраст 5349 ± 33 лет (6137 ± 136 кал. лет ВР) и 8815 ± 36 лет (9908 ± 221 кал. лет ВР) соответственно (рис. 5).

Гранулометрия. Для 20 проб из скв. ЧС-2 выполнен гранулометрический анализ. Пробы отбирались по всей колонке из отложений с высокими и низкими значениями магнитной восприимчивости. Полученные гранулометрические спектры практически однотипные. Они асимметричные, одномодальные. Значения модальных пиков составляют от 27 до 70 мкм (среднее 53 мкм). Пики сдвинуты к области грубых гранулометрических разностей. Содержание глинистой компоненты фракций варьирует от 11 до

28 % (среднее = 18 %). Фракции более 70 мкм составляют 13–33 % (среднее = 24 %).

Петромагнитная характеристика. Для осадков всех скважин измерены величины магнитной восприимчивости (6750 образцов) (табл. 3). Установлено, что они значительно варьируют по колонкам и зависят от расположения скважин в бассейне (рис. 5). По этому параметру осадки близлежащих скважин легко коррелируются, однако удаленные колонки сопоставлять трудно. Надежными корреляционными и хронологическими реперами являются прослой тephры. В самой длинной колонке ЧС-7 нижняя часть разреза менее магнитная, чем верхняя. Вариации значений магнитной восприимчивости в ней незначительные. Смена магнитных парамет-

тров между частями не резкая (рис. 5). В верхней части можно выделить 5 интервалов (a–d), осадки которых показывают повышенные значения МВ.

По осадкам двух скважин ЧС-2 (527 образцов) и ЧС-7 (880 образцов) получены гистерезисные характеристики (табл. 4, рис. 6). В целом по

скважинам параметры близкие. Незначительные отличия объясняются особенностями литологического состава. Тем не менее в разрезах скважин отчетливо видны изменения всех параметров по вертикали. Для нижней части разреза, представленной слоистыми осадками, характерны низкие значения МВ, J_s , J_{rs} и повышенные значения B_{cr} и

Таблица 4. Петромагнитные характеристики отложений скважин ЧС-2, ЧС-7

Table 4. Petromagnetic characteristics of sediments from cores ChS-2, ChS-7

Скважина (N)	ЧС-2 (527)			ЧС-7 (880)		
Значение	Мин.	Макс.	Среднее	Мин.	Макс.	Среднее
МВ, $10^{-6} \text{ м}^3/\text{кг}$	0.06	1.39	0.43	0.12	1.76	0.41
J_s , $\text{Ам}^2/\text{кг}$	0.0210	0.1516	0.0339	0.0015	0.0806	0.0256
J_{rs} , $\text{Ам}^2/\text{кг}$	0.0035	0.0107	0.0049	0.0006	0.0100	0.0054
B_c , мТл	5.91	22.04	12.37	9.49	19.86	16.72
B_{cr} , мТл	30.13	61.89	40.03	33.86	57.42	44.22
J_{rs}/J_s	0.065	0.244	0.150	0.118	0.382	0.215
B_{cr}/B_c	2.70	5.147	3.252	2.242	4.715	2.65
J_p	0.21	0.69	0.55	0.28	0.95	0.70

N – количество образцов.

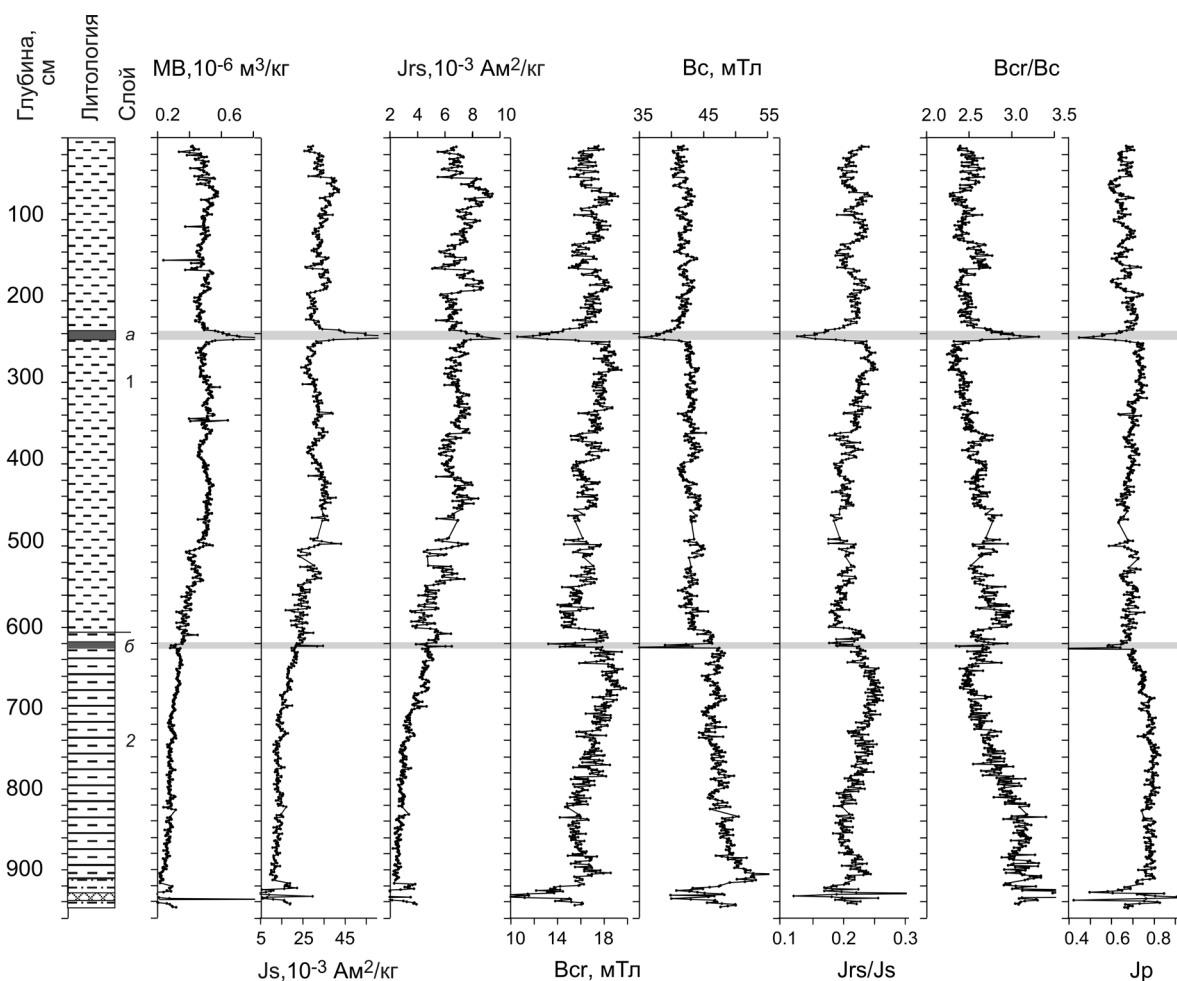


Рис. 6. Петромагнитные характеристики отложений скв. ЧС-7. Серыми полосами показаны уровни тефры.

Fig. 6. Petromagnetic characteristics of sediments from core ChS-7. The grey bars show the tephra levels.

J_p . Коэффициенты корреляции между B_c и $J_{rs}/J_s = 0.75$, B_{cr} и $J_p = 0.69$. Верхняя тефра сильномагнитная, выделяется по всем параметрам. Нижняя тефра отчетливо диагностируется по низким значениям B_c , B_{cr} и J_p (рис. 6).

Магнито-минералогические данные

Минералогические данные. Состав отсепарированных магнитных фракций из озерных осадков и делювия разнообразный, однако преобладают титаномагнетиты с различным содержанием титана (рис. 7, табл. 5).

Титаномагнетиты условно разделены на две группы. Малотитанистые с содержанием титана от долей процента до 13 % (среднее 4.4 %). Они обнаружены в 122 зернах (табл. 5). В эту группу включены также магнетиты (22 анализа), в которых титан не зафиксирован. Из примесей в большинстве зерен присутствуют Al, Si (около 1 %), реже встречаются Mn, Cr, V, Ca, Na.

Высокотитанистые титаномагнетиты определены в 135 зернах. Содержание титана в них колеблется от 13.3 до 30.1 % (среднее 20.4 %). Состав примесей такой же, как и в малотитанистых титаномагнетитах, однако ванадий в них не зафиксирован.

Титаномагнетиты маггемитизированы, на что указывает трещиноватость зерен (рис. 7, а, б, н, п) (Dunlop, Özdemir, 1997; Haltia, Nowaczyk, 2014; Minyuk, Subbotnikova, 2021). Маггемитизация отмечена для минералов из делювия (рис. 7, н, п) и озерных донных отложений (рис. 7, а, б). В отдельных зернах отмечены высокотемпературные структуры распада (рис. 7, жс). Подобные структуры типичны для титаномагнетитов из осадков озер Курильского архипелага (Минюк и др., 2013).

Среди других минералов магнитных фракций отмечены ильмениты. Они исследованы в 30 зернах и характеризуются приблизительно равным содержанием железа и титана. Наиболее значимой примесью в ильменитах является марганец (табл. 5). Максимальное количество зерен ильменита установлено в пробе 71, в северной части озера.

Хромиты (FeCr_2O_4) выявлены в 24 зернах в пробах ЧС-2, 13, 22, 41, 69, ЛБ-1-Б1, ЛБ-2-Б1, ТН-8Б, ТН-10Б. Содержание хрома в них варьирует от 6.4 до 18.4 % (среднее 12.3 %). Магнитные свойства хромитов зависят от содержания хрома и других примесей (Schmidbauer, 1983; Kądziałko-Hofmokr et al., 2008; Максимочкин и др., 2013).

В образце ЧС-2 обнаружены магнитные сферы (рис. 7, и), состоящие из железа (около 70 %) с незначительной примесью алюминия и кремния.

Терромагнитный анализ. Исследована зависимость магнитной восприимчивости от температуры делювия, коренных пород, озерных осадков и отсепарированных магнитных фракций. Выделено несколько типов кривых терромагнитного анализа, все кривые необратимые. Для основной группы спад магнитной восприимчивости наблюдается около 600 °С. Температуры Кюри, определенные по кривым ($1/\text{MB}$) (не показаны), составляют 566–580 °С.

В некоторых образцах спад MB отмечен при температурах 106–113 °С, причем он отчетливо проявляется и на кривых остывания (рис. 8, а). Предполагается, что он обусловлен высокотитанистыми титаномагнетитами, выявленными энергоспектроскопией.

На многих кривых MB (T) отмечается рост MB при $T = 225\text{--}250$ °С, затем спад при температурах ≈ 400 °С (рис. 8, а, з). Предполагается, что такое поведение MB обусловлено наличием лепидокрокита ($\gamma\text{-FeOOH}$), который в процессе нагрева трансформируется в маггемит, а затем в гематит (Gehring et al., 1994; Gendler et al., 2005; Hanesch et al., 2006).

Циклы нагревов отдельных образцов, проведенных до температуры 300 °С и затем 700 °С, подтверждают эти выводы. Новообразованный маггемит проявляется ростом MB на кривых после нагрева до 300 °С (рис. 8, з). Последующий нагрев до больших температур приводит к резкому спаду восприимчивости около 400–450 °С (маггемит-гематитовый переход) на кривых нагрева (рис. 8, з). Лепидокрокит отмечен на кривых нагрева MB (T), полученных по магнитным экстрактам и осадкам. Кривые MB (T) для осадков, представленных алевритами, глинами, характеризуются ростом магнитной восприимчивости при температуре ≈ 400 °С, обусловленным восстановлением магнетита под воздействием органики (рис. 8, ж, з) (Hanesch et al., 2006; Минюк и др., 2011).

На кривых нагрева MB (T) некоторых образцов отмечаются перегибы в области температур 400–450 °С, которые связываются с катиондефицитным магнетитом (маггемитом) (рис. 8, в). Этот минерал неустойчив к нагреву, в процессе которого переходит в гематит. Температура маггемит-гематитового перехода отмечается в широком диапазоне – от 250 °С до 900 °С и зависит от примесей, размера и формы зерен, степени окисления, генезиса и скорости нагрева (De Boer, Dekkers, 2001; Dunlop, Özdemir, 1997).

После нагрева магнитная восприимчивость образцов уменьшается, т. к. MB гематита в сотни раз ниже магнитной восприимчивости маггемита (Peters, Dekkers, 2003), при этом на графиках терромагнитного анализа кривые остывания лежат

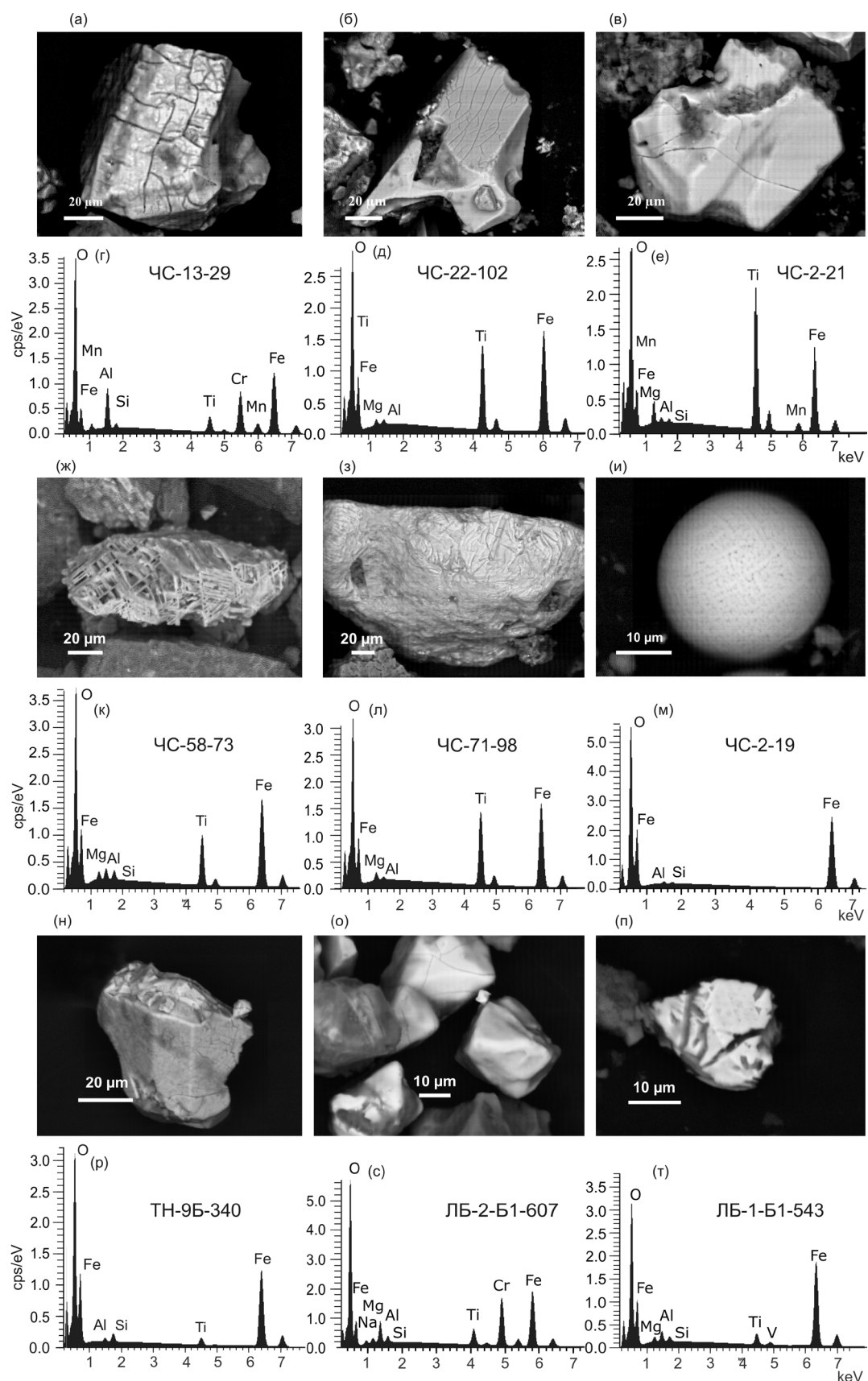


Рис. 7. Характерные минералы магнитных фракций из донных поверхностных и делювиальных отложений: (а–в, ж–и, н–п) – изображение в обратнорассеянных электронах; (г–е, к–м, р–т) – энергодисперсионные спектры.

Fig. 7. Characteristic minerals of magnetic fractions from bottom surface and deluvial deposits: (а–в, ж–и, н–п) – image in backscattered electrons; (г–е, к–м, р–т) – energy-dispersion spectra.

Таблица 5. Элементный (%) состав минералов магнитной фракции

Table 5. Elemental (%) composition of magnetic fraction minerals

Титаномagnetит 2	Элементы	O	Fe	Ti	Si	Al	Na	Mg	Mn	Ca	Cr	
	N	135	135	135	106	128	5	123	45	4	3	
	Мин.	20.49	26.19	13.36	0.10	0.11	0.23	0.16	0.43	0.76	0.30	
	Макс.	43.82	53.35	30.17	1.89	2.16	1.00	2.17	4.63	1.97	0.46	
	Среднее	32.19	41.50	20.40	0.67	0.60	0.63	1.02	1.63	1.35	0.38	
Титаномagnetит 1	Элементы	O	Fe	Ti	Si	Al	Na	Mg	Mn	Ca	Cr	V
	N	144	144	122	129	138	11	44	14	29	14	6
	Мин.	9.34	31.25	0.34	0.07	0.11	0.26	0.16	0.96	0.23	0.30	0.31
	Макс.	40.10	74.28	13.00	6.45	2.72	1.11	3.23	2.82	7.14	3.48	1.41
	Среднее	27.58	59.65	4.42	1.10	0.86	0.54	0.71	1.41	1.24	1.27	0.56
Хромит	Элементы	O	Fe	Ti	Si	Al	Na	Mg	Mn	Cr	Zn	
	N	24	24	22	22	24	9	14	17	24	8	
	Мин.	1.18	25.02	0.55	0.30	0.16	0.45	0.34	1.04	6.44	1.38	
	Макс.	34.87	63.24	19.25	3.24	8.41	1.06	3.39	9.21	18.43	4.23	
	Среднее	27.59	41.89	6.08	0.65	3.89	0.66	1.01	2.94	12.27	2.32	
Ильменит	Элементы	O	Fe	Ti	Si	Al	Na	Mg	Mn	Ca		
	N	30	30	30	26	20	1	6	28	2		
	Мин.	23.96	17.22	22.01	0.10	0.10	0.53	0.23	0.68	0.53		
	Макс.	42.14	37.37	34.05	1.29	1.11	0.53	1.65	9.93	1.12		
	Среднее	32.63	30.48	29.01	0.44	0.36	0.53	0.89	3.35	0.82		

N – количество анализов (зерен).

ниже кривых нагрева (рис. 8, б, в, г). Для отдельных образцов, содержащих предположительно маггемит, кривые остывания лежат выше кривых

нагрева, указывая на новообразование магнетита при высоких температурах, выше температуры маггемит-гематитового перехода (рис. 8, д).

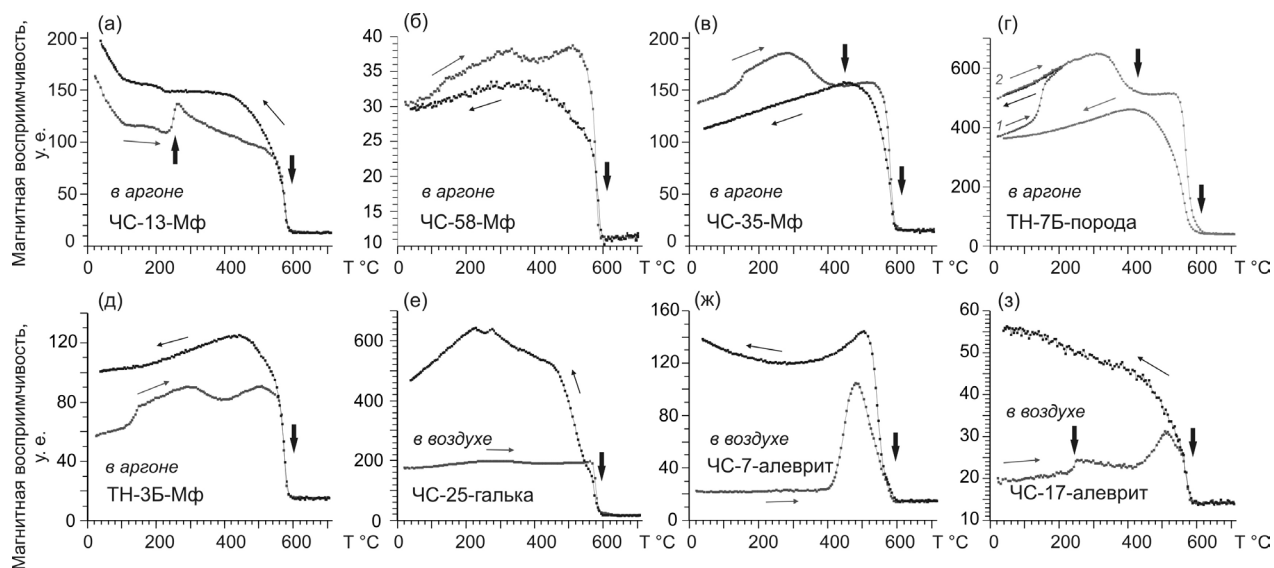


Рис. 8. Типичные кривые термомагнитного анализа. Жирной стрелкой обозначены температуры характерных изменений магнитной восприимчивости.

Fig. 8. Typical thermomagnetic analysis curves. The bold arrow indicates the temperatures of characteristic changes in magnetic susceptibility.

ОБСУЖДЕНИЕ

Изменения магнитных параметров в озерных осадках обусловлены качеством и количеством магнитных минералов. Эти характеристики зависят от условий осадконакопления, источников сноса, постседиментационных процессов, биопродуктивности. Рассмотрим некоторые из них.

Биопродуктивность озерного бассейна влияет на все петрофизические параметры. Обилие диатомей в осадках, накопление аллохтонной и автохтонной органики приводят к разбавлению детритового вещества, включая детритовые магнитные минералы, что приводит к уменьшению таких магнитных параметров, как MB , J_s , J_{rs} .

Относительное содержание органики в осадках озера, определенное по величине потерь при прокаливании (LOI) в керне скв. ЧС-2, невысокое – 1.12–14.9 % (среднее 9.6 %). Такие концентрации существенно не влияют на магнитные параметры. Коэффициент аппроксимации между MB и LOI составляет 0.016 (рис. 9, в). Для поверхностных донных проб этот коэффициент равен 0.08.

Биогенный кремнезем может влиять на магнитные свойства отложений. Разбавление биогенным кремнеземом, приводящее к уменьшению магнитных параметров, отмечено ранее для осадков оз. Байкал (Kravchinsky et al., 2003), суперинтерстадиалов оз. Эльгыгитгын (67° 30' с. ш., 172° 05' в. д.) (Minyuk et al., 2014), осадков оз. Гранд (60° 44' с. ш., 51° 53' в. д.) (Minyuk, Subbotnikova, 2021).

Содержание общего кремнезема в осадках определяется детритовой составляющей, зависящей от химического состава обломочного материала в источниках сноса, и биогенной компонентой. В осадках озер, расположенных в области распространения основных и средних пород,

например озер Курильских островов, концентрации SiO_2 в отложениях с малым содержанием диатомей составляют в среднем 61.3 % (Минюк, Борходоев, 2021), в осадках скв. ЧС-2 озера Чистое – 66 %. Однако надо иметь в виду, что содержания SiO_2 в осадках не будут соответствовать содержаниям в коренных породах. В процессе химического и физического выветривания концентрации кремнезема уменьшаются. В тонких фракциях продуктов выветривания, соответствующих по размеру озерным осадкам, содержания SiO_2 минимальны и могут составлять 80–90 % от содержаний в неизмененных породах (Минюк, 2022). В осадках озера Чистое кремнезем в основном детритовый. Корреляция MB с SiO_2 отсутствует, либо она слабоположительная (рис. 9, г). Для выяснения влияния биогенного кремнезема на магнитные параметры в прозрачных слайдах, приготовленных из отложений с высокими и низкими магнитными параметрами, определено относительное содержание створок диатомей. Эффекта разбавления не обнаружено.

Химический состав воды озера и выпадающих ручьев позволяет предполагать, что хемогенного осаждения растворенных компонент в бассейне не происходило или оно было незначительным.

Влияние источников сноса. Анализ распределения магнитных параметров поверхностных донных проб позволил установить влияние источников сноса на характеристику осадка. Установлены две области осадконакопления в озере Чистое – южная и западная, с одной стороны, и северная и северо-восточная – с другой. Площадь распространения грубозернистых отложений (преимущественно песков) больше на западе и севере бассейна (рис. 2, а). Пески северной части бассейна менее магнитные, чем пески запад-

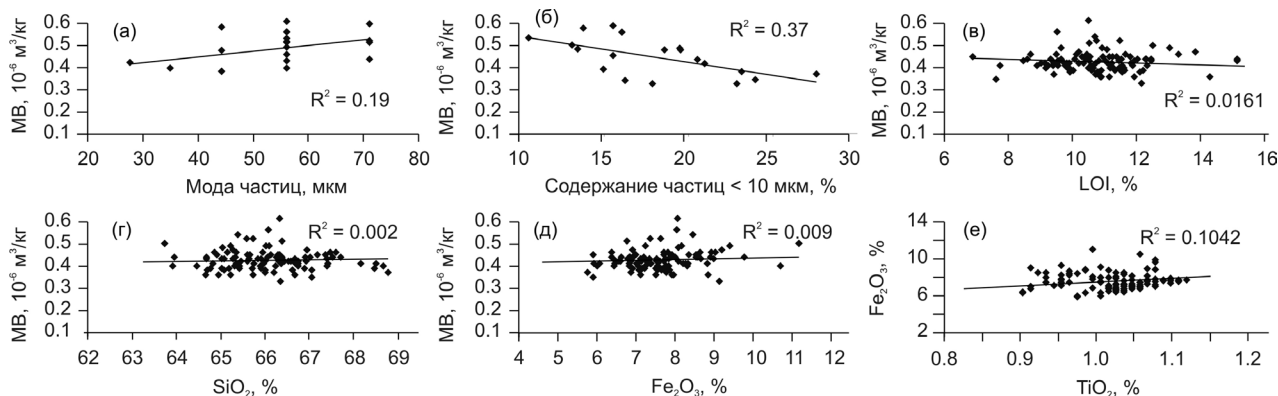


Рис. 9. Зависимость магнитной восприимчивости от моды гранулометрических частиц (а), содержания частиц размером меньше 10 мкм (б), содержания органики (в), общего кремнезема (г), железа (д), а также связь содержаний железа и титана (е).

Fig. 9. Magnetic susceptibility dependence on the mode of granulometric particles (а), the content of particles smaller than 10 microns (б), the content of organic matter (в), total silica (г), iron (д), as well as the relationship of iron and titanium contents (е).

ной и южной. Более того, они менее магнитные, чем илистые отложения, хотя в целом для озера Чистое грубозернистые отложения более магнитные, чем ил (рис. 2, а, б).

Величины J_s и J_{rs} песков и ила минимальны в северной и северо-восточной частях бассейна. Склоновые отложения, отобранные севернее озера, а также отложения берегового обнажения, расположенного на северном берегу, имеют пониженные значения магнитной восприимчивости по сравнению с МВ делювия, отобранного западнее озера. Тем не менее в обнажении песчано-галечный материал более магнитный, чем алевриты и глины, что характерно для всего озерного бассейна (рис. 10). Магнитная восприимчивость осадков озер ЛБ-1 и ЛБ-2, расположенных северо-восточнее озера Чистое, имеет более низкие значения по сравнению с МВ осадков озера Чистое (рис. 10).

Основным источником сноса с северного направления были риолиты и дациты верхнемелового возраста, в то время как с других направлений сносился рыхлый материал, образованный по андезито-базальтам.

Влияние постседиментационных процессов. По облику магнитные зерна осадков и делювия не отличаются. Трещиноватость зерен, каверны, маггемит и гидроокислы железа (лепидокрокит) не связаны с точками отбора проб. Однако частичное постседиментационное перераспреде-

ление железа в осадках озера происходило. На некоторых уровнях в разрезах скважин выявлен аутигенный вивианит. Для этих уровней установлены повышенные содержания железа, фосфора, марганца, типичных элементов вивианита (Minyuk et al., 2013; Минюк, Борходоев, 2016). Положительная корреляция между Fe_2O_3 и P_2O_5 ($r = 0.32$), Fe_2O_3 и MnO ($r = 0.89$), P_2O_5 и MnO ($r = 0.28$) предполагает, что эти элементы связаны с аутигенным седиментогенезом (Бурнатный, Минюк, 2019). Вивианит, исследованный в 25 зернах из интервала 444 см скв. ЧС-6, состоит из Fe (32.51 вес. %), P (13.70 вес. %), Mn (1.88 вес. %), O (51.49 вес. %). Вивианит является индикатором восстановительных условий. В осадках озера он приурочен к скоплениям органики, создающей восстановительные локальные микросреды.

Аутигенным минералом может быть биогенный магнетит, например (Abrajevitch, Kodama, 2011). Для биогенного железа характерны отсутствие корреляции или слабая корреляция Fe_2O_3 и TiO_2 , значимая положительная корреляция Fe_2O_3 с магнитной восприимчивостью, J_s и J_{rs} (Минюк, 2021). В осадках озера Чистое Fe_2O_3 не коррелирует с МВ ($R^2 = 0.01$); с другой стороны, железо положительно коррелируется с титаном ($R^2 = 0.104$) (рис. 9, д, е). Биогенный магнетит если и присутствует в осадках, то он не диагностируется по этим критериям.

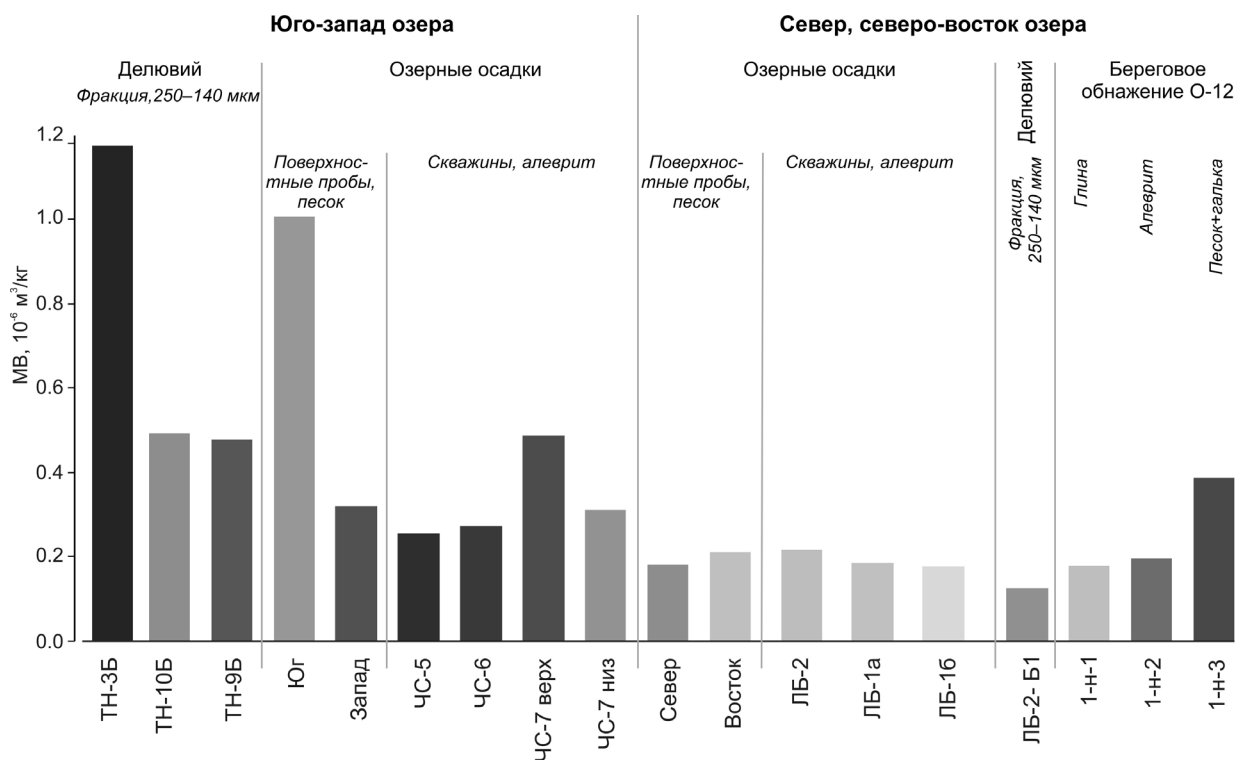


Рис. 10. Магнитная восприимчивость осадков озера, отложений береговых обнажений и делювия.

Fig. 10. Magnetic susceptibility of lake sediments, coastal outcrop deposits, and deluvium.

Гранулометрический эффект. Магнитные свойства осадков при одинаковой магнитной минералогии могут контролироваться гранулометрическим составом (Минюк, 2022). Для осадков озера Чистое наблюдается зависимость магнитных свойств от размера частиц. Чем тоньше детритовый материал, тем ниже значения MB , J_{rs} , J_s . Коэффициенты аппроксимации (R^2) между MB и содержанием фракции размером меньше 10 мкм и больше 70 мкм составляют 0.37 (рис. 9, б) и 0.32 соответственно. Аппроксимация между модальными значениями и магнитной восприимчивостью равна 0.19 (рис. 9, а). Анализ данных по делювию показал, что магнитные характеристики также связаны с размером частиц делювия. Гранулометрические фракции делювия по породам пьегинской свиты (андезиты, базальты) характеризуются направленным уменьшением магнитных параметров с уменьшением размера частиц. Для образцов делювия по осадочным отложениям, выполняющим Ланковскую впадину, выявлено увеличение магнитных характеристик до фракций 100–63 мкм, а затем спад в тонких глинистых фракциях. Изменение магнитных свойств обусловлено спецификой дезинтеграции минерального вещества. Общая тенденция распределения магнитных характеристик в озерных осадках и во фракциях делювия, сопоставимых по размеру с озерными осадками, идентичная. Для тонких литологических разностей характерны низкие величины MB , J_s , J_{rs} и высокие значения J_p . Облик магнитных зерен из склоновых отложений и озерных осадков идентичен. Поверхности зерен имеют трещиноватость и каверны, характерные для маггемитизации (Dunlop, Özdemir, 1997). **Маггемит, а также гидроокислы железа** свойственны как склоновым, так и озерным отложениям.

Таким образом, гранулометрический состав осадков является существенным фактором, влияющим на магнитные свойства, а при неизменных источниках сноса он будет определяющим.

Характер осадконакопления в озере. Гранулометрия озерных осадков контролируется многими процессами, включая локальные и региональные. Литологический состав отложений по площади озера Чистое неоднородный. Как правило, более грубый материал накапливался вблизи устьев ручьев, в прибрежной зоне. Анализ глубин озера и мощности осадков указывает на асимметричное строение озерного бассейна (рис. 1). Грубозернистые осадки прибрежной зоны распространены больше в западной и северной частях озера, указывая на активное разрушение берегов волнами. Предполагается, что, как и сейчас, доминирующее направление ветров было северо-западное. В скважине

ЧС-5, расположенной около 2 км от береговой линии (рис. 1), осадки состоят преимущественно из глинистых (алевритистых) песков. Алевриты преобладают в скважинах ЧС 1, 2, 4, 4а, 4б, 4в, 6, 7.

Базальные слои скважин сложены плохо сортированными отложениями, включающими линзы глинистых песков, растительные остатки, часто обугленные, гумусированные отложения. Отложения имеют пестрый облик. Величины магнитных характеристик слоев непостоянные. Эти отложения образованы на поверхности, в мелких промоинах, видимо, в начале разлива термокарста, когда климатические условия стали более теплые. При бурении нижних слоев осадочной толщи из скважины в больших количествах начал поступать метан (горит при поджоге). Скопления метана характерны для термокарстовых озер (Heslop et al., 2020).

Образование озера, согласно возрастным моделям, построенным на основе радиоуглеродных датировок и возрасте тефры, произошло в самом начале голоцена, около 11 200 кал. л. н. Синхронно с озерным накоплением на периферии озера формировались торфяники. Серия из 9 радиоуглеродных дат свидетельствует о непрерывном накоплении торфа начиная от $11\,122 \pm 813$ (^{14}C 9725 ± 250) до 3715 ± 245 (^{14}C 3450 ± 90) кал. л. н. (Минюк и др., 2022б). Торф состоит из слаборазложившегося органического вещества, минеральных детритовых озерных прослоев не обнаружено. В течение голоцена торфяные болота не затопливались водной толщей, как могло бы быть при повышении уровня воды озера, что предполагалось ранее (Андерсон и др., 1997).

Термокарстовые озёра проходят несколько стадий, последние из которых включают затухание процессов термокарста и осушение озер (Кудрявцев и др., 1978). В течение нескольких десятилетий очертания озер могут измениться и даже полностью исчезнуть (Zakharova et al., 2018; Loshkin et al., 2023; Chen et al., 2022). Однако озеро Чистое благодаря расположению в неотектонической впадине в условиях прогибания активно развивалось в голоцене. При скорости осадконакопления около 1 см в 10 лет в озере накопилось почти 9.5 м осадков. Они неоднородные по многим параметрам.

Отложения, залегающие в нижней части разрезов (от нижней тефры до забоя) скважин ЧС-1, 2, 6, 7, кроме базальных слоев характеризуются низкими величинами MB , J_{rs} , J_s и повышенными значениями коэрцитивных сил по сравнению с этими параметрами верхней части разрезов. Доля парамагнитной компоненты в этих осадках высокая. Наиболее заметно это выражено в разрезе самой глубокой скв. ЧС-7 (рис. 5–6),

частично в скв. ЧС-6 и незначительно в других скважинах, расположенных ближе к берегу. Такие характеристики присущи тонким современным илам, распространенным в центральной части озера.

Материал в озеро поступал со склонов, покрытых делювием, образованным в результате выветривания вулканогенных пород, а также из дренируемых осадочных отложений впадины кайнозойского возраста. В озерных осадках отмечено наличие большого количества переотложенной пыльцы, включающей термофильные таксоны *Picea* sect. *Eurpicea*, *Tsuga*, *Tilia*, *Corylus*, *Juglans*, *Ulmus*, которые не произрастают в окрестностях озера (Lozhkin et al., 2022). В небольших озёрах ЛБ-1 и ЛБ-2 с ограниченным водосбором переотложение пыльцы отсутствует.

Литологические и магнитные характеристики указывают на смену условий осадконакопления. Согласно возрастным моделям, построенным с применением программы Bacon (Blaauw, Christen, 2011), наиболее заметное изменение условий седиментации произошло в интервале 7.2–8.5 тыс. кал. л. н. Приблизительно на этом уровне по содержанию спор *Sphagnum* в осадках скв. ЧС-1 оз. Чистое реконструированы изменения влажности климата (Lozhkin et al., 2022), а также установлена смена температурного режима в озере Грязевое (61° 08.35' с. ш., 152° 19.95' в. д.) Магаданской области (Черепанова и др., 2022), изменение лагунно-морских обстановок на пресноводные в озёрах Курильских островов, отразившееся на магнитных параметрах осадков (Минюк и др., 2013; Минюк, Борходоев, 2021). Этот рубеж совпадает со сменой активности муссонов в Азии, повлиявшей на характер седиментации и магнитные свойства отложений некоторых озёр Китая (Chen et al., 2013).

Установленные в верхней части разреза скв. ЧС-7 интервалы осадков с относительно высокими значениями магнитной восприимчивости и маркированные *a–d* (рис. 5), по-видимому, отражают «холодные» условия. Для изученных нами ледниковых озёр Северо-Востока России (Гранд, Джульетты, Энгтери, Алут, Смородиновое и др.) осадки позднего плейстоцена, сформированные в холодных условиях, более магнитные по сравнению с осадками голоцена (Минюк и др., 2007). В голоценовых осадках Курильских озёр грубозернистые сильномагнитные прослои соответствуют этапам регрессий и похолоданий (Минюк и др., 2013). Возраст осадков интервала (*a*) составляет 835, (*b*) – 1931–2156, (*b*) – 3825–4379, (*c*) – 5295–6109, (*d*) – 7009 кал. лет. Возможно, они связаны с холодными событиями Бонда 1–5, выделенными в осадках Северной Атлантики по содержанию гематита, принесенного льдами (Bond

et al., 1997; 2001). События установлены в голоценовых разрезах многих регионов (Wanner et al., 2011; Viaggi, 2021).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Озеро Чистое по составу осадков, магнитным характеристикам, высоким скоростям осадконакопления является уникальным объектом для комплексного изучения различных аспектов природной среды голоцена. Озеро образовано в начале голоцена в результате развития термокарстовых процессов. Установлена связь магнитных характеристик озерных осадков и склоновых отложений. Более тонкие гранулометрические разности характеризуются низкими значениями величин MB , J_s , J_{rs} по сравнению с грубозернистыми отложениями. Гидроокислы железа и маггемит отмечены как в озерных, так и в склоновых отложениях. Влияние органики и биогенного кремнезема на магнитные величины незначительно.

Скалярные магнитные величины в осадках скважин показывают широкоамплитудные вариации, отражающие частую смену условий осадконакопления. Осадки с высокими значениями MB , J_s , J_{rs} могли формироваться в периоды холодного климата, с интенсивным поступлением детритового материала в бассейн.

Источник финансирования. Исследования выполнены за счёт средств Российского научного фонда, проект № 22-27-00444.

ЛИТЕРАТУРА

- Андерсон П. М., Беляя Б. В., Глушкова О. Ю., Ложкин А. В. Новые данные об эволюции растительного покрова Северного Приохотья в позднем плейстоцене и голоцене // Поздний плейстоцен и голоцен Берингии. Магадан : СВКНИИ ДВО РАН, 1997. С. 33–54.
- Бурнатный С. С., Минюк П. С. Петромагнетизм и геохимическая характеристика голоценовых осадков оз. Чистое, Приохотье (Магаданская область) // Палеомагнетизм и магнетизм горных пород. Материалы XXV юбилейной Всероссийской школы-семинара по проблемам палеомагнетизма и магнетизма горных пород (с международным участием), Москва–Борок, 25–29 сентября 2019 г. / РАН, Институт физики Земли, Геофизическая обсерватория «Борок»; отв. ред. В. П. Щербаков. Москва ; Ярославль : Филигрань, 2019. С. 44–47.
- Буров Б. В., Нургалиев Д. К., Ясонов П. Г. Палеомагнитный анализ / Ред. В. П. Боронин. Казань : Изд-во Казан. ун-та, 1986. 167 с.
- Геологическая карта. Лист Q-56-II. Масштаб 1 : 2 000 000 / Составители В. Г. Корольков, А. М. Королькова. Первое издание, 1985.
- Измайлова А. В. Озерные водные ресурсы азиатской части Российской Федерации // Водные ресурсы. 2018. Т. 45. № 5. С. 453–462. DOI: 10.1134/S0321059618050097.

Кудрявцев В. А., Достовалов Б. Н., Романовский Н. Н., Кондратьева К. А., Меламед В. Г. Общее мерзлотоведение (геокриология). Москва : МГУ, 1978. 464 с.

Ложкин А. В., Андерсон П. М., Браун Т. А., Важенина Л. Н., Матросова Т. В., Минюк П. С., Пахомов А. Ю., Соломаткина Т. Б. Новая летопись изменения климата и растительности северного Приохотья в течение изотопных стадий 1–4 // Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН. 2010. № 1. С. 63–70.

Максимочкин В. И., Губайдуллин Р. Р., Гареева М. Я. Магнитные свойства и структура хромитов состава $\text{Fe}_{2-x}\text{Mg}_x\text{CrO}_4$ // ВМУ. Серия 3. Физика. Астрономия. 2013. № 3. С. 64–70. DOI: 10.3103/S0027134913030077.

Минюк П. С. Детритовое и хемогенное железо в озерных осадках Дальнего Востока: петрофизические и геохимические признаки // Материалы 13-й международной школы-конференции «Проблемы геокосмоса» (24–27 марта 2021 г., Санкт-Петербург, Россия) / Отв. ред. Н. Ю. Бобров [и др.]. Санкт-Петербург, 2021. С. 184–194.

Минюк П. С. Значение гранулометрического состава и физико-химических характеристик для интерпретации седиментогенеза озера Гранд // Геология и геофизика. 2022. Т. 63. № 9. С. 1253–1268. DOI: 10.15372/GiG2021156.

Минюк П. С., Борходоев В. Я. Геохимия осадков озера Гранд, Северо-Восток России // Геохимия. 2016. Т. 9. С. 841–851. DOI: 10.7868/S0016752516070074.

Минюк П. С., Борходоев В. Я. Реакция геохимических характеристик на изменения природной среды голоцена по данным донных отложений озера Малое, остров Итуруп // Геохимия. 2021. Т. 66. № 4. С. 351–363. DOI: 10.31857/S0016752521040051.

Минюк П. С., Ложкин А. В., Андерсон П. М., Соломаткина Т. Б., Пахомов А. Ю., Борходоев В. Я. Комплексные исследования осадков оз. Энгтери, Северо-Восток России // Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН. 2007. № 4. С. 2–13.

Минюк П. С., Пожидаева Д. К., Бурнатный С. С. Гидрохимические характеристики природных и техногенных вод Магаданской области // Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН. 2022а. № 2. С. 45–58. DOI: 10.34078/1814-0998-2022-2-45-58.

Минюк П. С., Соцкая О. Т., Цыганкова В. И., Акинин В. В., Бурнатный С. С. Голоценовые пеплы в озерных осадках Приохотья: отличительные признаки // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2022б. Т. 505. № 1. С. 62–68. DOI: 10.31857/S2686739722070131.

Минюк П. С., Субботникова Т. В., Андерсон П. М., Ложкин А. В. Петромагнитные свойства осадков озера Пернатое (остров Парамушир, Курильская гряда) как показатели изменений условий осадконакопления // Физика Земли. 2013. Т. 49. № 1. С. 1–10. DOI: 10.7868/S0002333713010092.

Минюк П. С., Субботникова Т. В., Пляшкевич А. А. Термокаппметрия гематита и гетита // Физика Земли. 2011. Т. 47. № 9. С. 18–30.

Черепанова М. В., Минюк П. С., Пожидаева Д. К., Бурнатный С. С. Реакция диатомовых водорослей

озера Грязевое (Магаданская область) на изменения окружающей среды Северного Приохотья в позднем плейстоцене – голоцене // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2022. № 3. Вып. 55. С. 70–86. DOI: 10.31431/1816-5524-2022-3-55-70-86.

Abrajevitch A., Kodama K. Diagenetic sensitivity of paleoenvironmental proxies: A rock magnetic study of Australian continental margin sediments // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2011. Vol. 12. No. 5. Q05Z24. DOI: 10.1029/2010GC003481.

Blaauw M., Christen J. A. Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process // Bayesian Analysis. 2011. Vol. 6. No. 3. P. 457–474. DOI: 10.1214/11-BA618.

Bond G., Kromer B., Beer J., Muscheler R., Evans M. N., Showers W., Hoffmann S., Lotti-Bond R., Hajdas I., Bonani G. Persistent solar influence on North Atlantic climate during the Holocene // Science. 2001. Vol. 294. P. 2130–2136. DOI: 10.1126/science.1065680.

Bond G., Showers 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. P. 1257–1266. DOI: 10.1126/science.278.5341.1257.

Chen F., Liu J., Xu Q., Li Y., Chen J., Wie H., Liu Q., Wang Z., Cao X., Zhang S. Environmental magnetic studies of sediment cores from Gonghai Lake: Implications for monsoon evolution in North China during the late Glacial and Holocene // Journal of Paleolimnology. 2013. Vol. 49. P. 447–464. DOI: 10.1007/s10933-012-9677-3.

Chen Y., Liu A., Cheng X. Detection of the thermokarst lake drainage event in the Northern Alaska permafrost region // Science of the Total Environment. 2022. Vol. 807. Pt. 2. Art. 150828. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.150828.

Day R., Fuller M., Schmidt V. A. Hysteresis properties of titanomagnetites: Grain size and compositional dependence // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 1977. Vol. 13. P. 260–267. DOI: 10.1016/0031-9201-(77)90108-X.

De Boer C. B., Dekkers M. J. Unusual thermomagnetic behaviour of haematites: Neof ormation of a highly magnetic spinel phase on heating in air // Geophysical Journal International. 2001. Vol. 144. P. 481–494. DOI: 10.1016/j.epsl.2015.02.007.

Dunlop D. J. Theory and application of the Day plot (M_{rs}/M_s versus H_r/H_c) 1. Theoretical curves and tests using titanomagnetite data // Journal of Geophysical Research. 2002a. Vol. 107. No. B3. P. EPM 4-1–EPM 4-22. DOI: 10.1029/2001JB000486.

Dunlop D. J. Theory and application of the Day plot (M_{rs}/M_s versus H_r/H_c) 2. Application to data for rocks, sediments, and soils // Journal of Geophysical Research. 2002b. Vol. 107. No. B3. P. EPM 5-1–EPM 5-15. DOI: 10.1029/2001jb000487.

Dunlop D., Özdemir O. Rock Magnetism: Fundamentals and Frontiers. Cambridge : Cambridge University Press, 1997. 573 pp.

Fabian K., Shcherbakov V. P., McEnroe S. A. Measuring the Curie temperature // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2013. Vol. 14. No. 4. P. 947–961. DOI: 10.1029/2012GC004440.

Gehring A. U., Hofmeister A. M. The transformation of lepidocrocite during heating: a magnetic and spectroscop-

ic study // *Clays and Clay Minerals*. 1994. Vol. 42. P. 409–415.

Gendler T. S., Shcherbakov V. P., Dekkers M. J., Gap-
eev A. K., Gribov S. K., McClelland E. The lepidocrocite–
maghemite–haematite reaction chain – I. Acquisition of
chemical remanent magnetization by maghemite, its mag-
netic properties and thermal stability // *Geophysical Jour-
nal International*. 2005. Vol. 160. No. 3. P. 815–832. DOI:
10.1111/j.1365-246X.2005.02550.x.

Haltia E. M., Nowaczyk N. R. Magnetostratigraphy of
sediments from Lake El'gygytyn ICDP Site 5011-1: Pa-
leomagnetic age constraints for the longest paleoclimate
record from the continental Arctic // *Climate of the Past*.
2014. Vol. 10. P. 623–642. DOI: 10.5194/cp-10-623-2014.

Hanesch M., Stanjek H., Petersen N. Thermomag-
netic measurements of soil iron minerals: The role of or-
ganic carbon // *Geophysical Journal International*. 2006.
Vol. 165. Is. 1. P. 53–61. DOI: 10.1111/j.1365-246-
X.2006.02933.x.

Heiri O., Lotter A. F., Lemcke G. Loss on ignition as
a method for estimating organic and carbonate content in
sediments: Reproducibility and comparability of results
// *Journal of Paleolimnology*. 2001. Vol. 25. P. 101–110.
DOI: 10.1023/A:1008119611481.

Heslop J. K., Walter Anthony K. M., Winkel M., Sep-
ulveda-Jauregui A., Martinez-Cruz K., Bondurant A.,
Grosse G., Liebner S. A synthesis of methane dynam-
ics in thermokarst lake environments // *Earth-Science
Reviews*. 2020. Vol. 210. Art. 103365. DOI: 10.1016/j.
earscirev.2020.103365.

Kądziałko-Hofmök M., Delura K., Bylina P.,
Jeleńska M., Kruczyk J. Mineralogy and magnetism of
Fe–Cr spinel series minerals from podiform chromi-
tites and dunites from Tąpadła (Sudetic ophiolite, SW
Poland) and their relationship to palaeomagnetic re-
sults of the dunites // *Geophysical Journal Internation-
al*. 2008. Vol. 175. P. 885–900. DOI: 10.1111/j.1365-
246x.2008.03933.x.

Kravchinsky V. A., Krainov M. A., Evans M. E., Peck J. A.,
King J. W., Kuzmin M. I., Sakai H., Kawai T., Willi-
ams D. F. Magnetic record of Lake Baikal sediments:
Chronological and paleoclimatic implication for the last
6.7 Myr // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palae-
oecology*. 2003. Vol. 195. P. 281–298. DOI: 10.1016/
S0031-0182(03)00362-6.

Lattard D., Engelmann R., Kontny A., Sauerzapf U. Curie
temperatures of synthetic titanomagnetites in the Fe–Ti–O
system. Reassessment of some methodological and crystal
chemical effects // *Journal Geophysical Research*. 2006.
Vol. 111. Art. B12S28. DOI: 10.1029/2006JB004591.

Lozhkin A. V., Anderson P. M., Regel K. V. The role
of lake basin history on palynological records from the
Upper Kolyma region (northeastern Siberia) // *Quater-
nary Research*. 2023. Vol. 112. P. 51–66. DOI: 10.1017/
qua.2022.47.

Lozhkin A. V., Korzun Yu. A., Minyuk P. S., Ander-
son P. M., Burnatny S. S., Glushkova O. Yu. Palynologi-
cal characteristics and volcanic ash from sediments of
Chistoye Lake, northern Priokhotye // *Вестник Северо-
Восточного научного центра ДВО РАН*. 2022. № 4.
С. 24–34. DOI: 10.34078/1814-0998-2022-4-24-34.

Melles M., Brigham-Grette J., Minyuk P. S., Nowac-
zyk N. R., Wennrich V., DeConto R. M., Anderson P. M.,
Andreev A. A., Coletti A., Cook T. L., Haltia-Hovi E., Kuk-
konen M., Lozhkin A. V., Rosén P., Tarasov P., Vogel H.,
Wagner B. 2.8 million years of Arctic climate change
from Lake El'gygytyn, NE Russia // *Science*. 2012.
Vol. 337 (6092). P. 315–320. DOI: 1126/science.
1222135.

Minyuk P. S., Borkhodoev V. Y., Wennrich V. Inorgan-
ic geochemistry data from Lake El'gygytyn sediments:
Marine isotope stages 6–11 // *Climate of the Past*. 2014.
Vol. 10. P. 467–485. DOI: 10.5194/cp-10-467-2014.

Minyuk P. S., Pozhidaeva D. K., Byrnatny S. S. Lake
Chistoye (northern Priokhotsk area, Russia) – the high
resolution environmental archive for the Holocene // *Lim-
nology and Freshwater Biology*. 2022. No. 4. P. 1503–
1505. DOI: 10.31951/2658-3518-2022-A-4-1503.

Minyuk P., Subbotnikova T. Rock magnetic proper-
ties of Grand Lake sediments as evidence of environ-
mental changes during the last 60 000 years in North-
East Russia // *Boreas*. 2021. Vol. 50. No. 4. P. 1027–1042.
DOI: 10.1111/bor.12546.

Minyuk P. S., Subbotnikova T. V., Brown L. L., Mur-
dock K. J. High-temperature thermomagnetic properties
of vivianite nodules, Lake El'gygytyn, Northeast Rus-
sia // *Climate of the Past*. 2013. Vol. 9. P. 433–446. DOI:
10.5194/cp-9-433-2013.

Peters C., Dekkers M. J. Selected room temperature
magnetic parameters as a function of mineralogy, con-
centration and grain size // *Physics and Chemistry of the
Earth*. 2003. Vol. 28. P. 659–667. DOI: 10.1016/S1474-
7065(03)00120-7.

Petrovský E., Kapička A. On determination of the Cu-
rie point from thermomagnetic curves // *Journal of Geo-
physical Research*. 2006. Vol. 111. Art. B12S27. DOI:
10.1029/2006JB004507.

Ponomareva V. V., Kyle P. R., Melekestsev I. V., Rin-
kleff P. G., Dirksen O. V., Sulerzhitsky L. D., Zaretska-
ia N. E., Rourke R. The 7600 (¹⁴C) year BP Kurile Lake
caldera-forming eruption, Kamchatka, Russia: stratigra-
phy and field relationships // *Journal of Volcanology and
Geothermal Research*. 2004. Vol. 136. P. 199–222. DOI:
10.1016/j.jvolgeores.2004.05.013.

Schmidbauer E. Magnetization of Fe–Cr–Ti spinels // *Physics and Chemistry of Minerals*. 1983. Vol. 9. P. 124–
126. DOI: 10.1007/BF00308368.

Viaggi P. Quantitative impact of astronomical and
Sun-related cycles on the Pleistocene climate system from
Antarctica records // *Quaternary Science Advances*. 2021.
Vol. 4. Art. 100037. DOI: 10.1016/j.qsa.2021.100037.

Wanner H., Solomina O., Grosjean M., Ritz S. P., Je-
tel M. Structure and origin of Holocene cold events // *Quaternary Science Reviews*. 2011. Vol. 30. P. 3109–
3123. DOI: 10.1016/j.quascirev.2011.07.010.

Wright H. E., Mann D. H., Glaser P. H. Piston corers
for peat and lake sediments // *Ecology*. 1984. Vol. 65. Is. 2.
P. 657–659. DOI: 10.2307/1941430.

Zakharova E. A., Kouraev A. V., Guillasco S., Garesti-
er F., Desyatkin R. V., Desyatkin A. R. Recent dynamics of
hydro-ecosystems in thermokarst depressions in Central
Siberia from satellite and in situ observations: Importance
for agriculture and human life // *Science of the Total Envi-
ronments*. 2018. Vol. 615. P. 1290–1304. DOI: 10.1016/j.
scitotenv.2017.09.059.

PETROMAGNETIC EVIDENCE OF HOLOCENE ENVIRONMENT CHANGES IN THE LAKE CHISTOYE BASIN (Northern Priokhotye)

P. S. Minyuk, D. K. Pozhidaeva, O. T. Sotskaya, S. S. Burnatny

North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute n. a. N. A. Shilo, FEB RAS, Magadan

The results of a comprehensive study of Lake Chistoye basin sediments are presented. Magnetic and mineralogical characteristics of various granulometric fractions of deluvial deposits, modern surface bottom sediments, and core materials have been studied. The relationship between the petromagnetic parameters of deluvium and lake sediments is shown. The composition of magnetic minerals has been determined. The dependence of magnetic characteristics on the granulometric composition of sediments has been established. Scalar magnetic parameters in core sediments show wide-amplitude variations reflecting frequent changes in sedimentation conditions. Sediments with high values of MS , J_s , J_{rs} might have been formed in the periods of cold climate, with intensive flow of detritus material into the basin.

Keywords: lake sediments, Lake Chistoye, petromagnetism, magnetic minerals, Holocene, deluvial deposits.

REFERENCES

- Abrajevitch, A., Kodama, K.*, 2011. Diagenetic Sensitivity of Paleoenvironmental Proxies: A Rock Magnetic Study of Australian Continental Margin Sediments, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 12, 5, Q05Z24. DOI: 10.1029/2010GC003481.
- Anderson, P. M., Belaya, B. V., Glushkova, O. Yu., Lozhkin, A. V.*, 1997. New Data on the Evolution of the Vegetation Cover of the Northern Priokhotye in the Late Pleistocene and Holocene, *Late Pleistocene and Holocene of Beringia*. Magadan, NEISRI FEB RAS, 33–54 [In Russian].
- Blaauw, M., Christen, J. A.*, 2011. Flexible Paleoclimate Age-Depth Models Using an Autoregressive Gamma Process, *Bayesian Analysis*. 6, 3, 457–474. DOI: 10.1214/11-BA618.
- Bond, G., Kromer, B., Beer, J., Muscheler, R., Evans, M. N., Showers, W., Hoffmann, S., Lotti-Bond, R., Hajdas, I., Bonani, G.*, 2001. Persistent Solar Influence on North Atlantic Climate during the Holocene, *Science*. 294, 2130–2136. DOI: 10.1126/science.1065680.
- Bond, G., Showers, W., Cheseby, M., Lotti, R., Almasi, P., deMenocal, P., Priore, P., Cullen, H., Hajdas, I., Bonani G.*, 1999. A Pervasive Millennial Scale Cycle in North Atlantic Holocene and Glacial Climates, *Science*. 278, 1257–1266. DOI: 10.1126/science.278.5341.1257.
- Burnatny, S. S., Minyuk, P. S.*, 2019. Petromagnetism and Geochemical Characteristics of Holocene Sediments from Lake Chistoye, Priokhotye (Magadan Oblast), *Paleomagnetism and Magnetism of Rocks. Proceeding of the 15th All-Russia Seminar School with International Participation on the Problems of Paleomagnetism and Magnetism of Rocks, Moscow–Borok, September 25–29, 2019*. Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS, Borok Geophysical Observatory, ed. V. P. Shcherbakov. Moscow ; Yaroslavl, Filigree, 44–47 [In Russian].
- Burov, B. V., Nurgaliyev, D. K., Yasonov, P. G.*, 1986. Paleomagnetic Analysis, ed. V. P. Boronin. Kazan, KSU [In Russian].
- Chen, F., Liu, J., Xu, Q., Li, Y., Chen, J., Wie, H., Liu, Q., Wang, Z., Cao, X., Zhang, S.*, 2013. Environmental Magnetic Studies of Sediment Cores from Gonghai Lake: Implications for Monsoon Evolution in North China during the Late Glacial and Holocene, *Journal of Paleolimnology*. 49, 447–464. DOI: 10.1007/s10933-012-9677-3.
- Chen, Y., Liu, A., Cheng, X.*, 2022. Detection of the Thermokarst Lake Drainage Event in the Northern Alaska Permafrost Region, *Science of the Total Environment*. 807, 2, 150828. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.150828.
- Cherepanova, M. V., Minyuk, P. S., Pozhidaeva, D. K., Burnatny, S. S.*, 2022. Diatom Response to Environmental Changes of the Northern Okhotsk Area (Magadan Region) during Late Pleistocene – Holocene from Gryazevoye Lake, *Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle*. 3, 55, 79–86 [In Russian].
- Day, R., Fuller, M., Schmidt, V. A.*, 1977. Hysteresis Properties of Titanomagnetites: Grain Size and Compositional Dependence, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 13, 260–267. DOI: 10.1016/0031-9201(77)90108-X.
- De Boer, C. B., Dekkers, M. J.*, 2001. Unusual Thermomagnetic Behaviour of Haematites: Neoformation of a Highly Magnetic Spinel Phase on Heating in Air, *Geophysical Journal International*. 144, 481–494. DOI: 10.1016/j.epsl.2015.02.007.
- Dunlop, D. J.*, 2002a. Theory and Application of the Day Plot (M_{rs}/M_s versus H_{cr}/H_c) 1. Theoretical Curves and Tests Using Titanomagnetite Data, *Journal of Geophysical Research*. 107, B3, EPM 4-1–EPM 4-22. DOI: 10.1029/2001JB000486.
- Dunlop, D. J.*, 2002b. Theory and Application of the Day Plot (M_{rs}/M_s versus H_{cr}/H_c) 2. Application to Data for Rocks, Sediments, and Soils, *Journal of Geophysical Research*. 107, B3, EPM 5-1–EPM 5-15. DOI: 10.1029/2001jb000487.
- Dunlop, D., Özdemir, O.*, 1997. Rock Magnetism: Fundamentals and Frontiers. Cambridge, Cambridge University Press.

- Fabian, K., Shcherbakov, V. P., McEnroe, S. A., 2013. Measuring the Curie Temperature, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 14, 4, 947–961. DOI: 10.1029/2012GC004440.
- Gehring, A. U., Hofmeister, A. M., 1994. The Transformation of Lepidocrocite during Heating: A Magnetic and Spectroscopic Study, *Clays and Clay Minerals*. 42, 409–415.
- Gendler, T. S., Shcherbakov, V. P., Dekkers, M. J., Gapeev, A. K., Gribov, S. K., McClelland, E., 2005. The Lepidocrocite–Maghemite–Haematite Reaction Chain – I. Acquisition of Chemical Remanent Magnetization by Maghemite, Its Magnetic Properties and Thermal Stability, *Geophysical Journal International*. 160, 3, 815–832. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2005.02550.x.
- Geological Map, 1985. Sheet Q-56-II. Scale 1 : 2,000,000. Compiled by V. G. Korolkov, A. M. Korolkova [In Russian].
- Haltia, E. M., Nowaczyk, N. R., 2014. Magnetostratigraphy of Sediments from Lake El'gygytyn ICDP Site 5011-1: Paleomagnetic Age Constraints for the Longest Paleoclimate Record from the Continental Arctic, *Climate of the Past*. 10, 623–642. DOI: 10.5194/cp-10-623-2014.
- Hanesch, M., Stanjek H., Petersen, N., 2006. Thermomagnetic Measurements of Soil Iron Minerals: The Role of Organic Carbon, *Geophysical Journal International*. 165, 1, 53–61. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2006.02933.x.
- Heiri, O., Lotter, A. F., Lemcke, G., 2001. Loss on Ignition as a Method for Estimating Organic and Carbonate Content in Sediments: Reproducibility and Comparability of Results, *Journal of Paleolimnology*. 25, 101–110. DOI: 10.1023/A:1008119611481.
- Heslop, J. K., Walter Anthony, K. M., Winkel, M., Sepulveda-Jauregui, A., Martinez-Cruz, K., Bondurant, A., Grosse, G., Liebner, S., 2020. A Synthesis of Methane Dynamics in Thermokarst Lake Environments, *Earth-Science Reviews*. 210, 103365. DOI: 10.1016/j.earscirev.2020.103365.
- Izmaylova, A. V., 2018. Lake Water Resources in the Asian Part of the Russian Federation, *Water Resources*. 45, 5, 453–462 [In Russian].
- Kądziałko-Hofmök, M., Delura, K., Bylina, P., Jeleńska, M., Kruczyk, J., 2008. Mineralogy and Magnetism of Fe–Cr Spinel Series Minerals from Podiform Chromitites and Dunites from Tąpadła (Sudetic Ophiolite, SW Poland) and Their Relationship to Palaeomagnetic Results of the Dunites, *Geophysical Journal International*. 175, 885–900. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2008.03933.x.
- Kravchinsky, V. A., Krainov, M. A., Evans, M. E., Peck, J. A., King, J. W., Kuzmin, M. I., Sakai, H., Kawai, T., Williams, D. F., 2003. Magnetic Record of Lake Baikal Sediments: Chronological and Paleoclimatic Implication for the Last 6.7 Myr, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 195, 281–298. DOI: 10.1016/S0031-0182(03)00362-6.
- Kudryavtsev, V. A., Dostovalov, B. N., Romanovsky, N. N., Kondratieva, K. A., Melamed, V. G., 1978. General Permafrost Studies (Geocryology). Moscow, Moscow State University [In Russian].
- Lattard, D., Engelmann, R., Kontny, A., Sauerzapf, U., 2006. Curie Temperatures of Synthetic Titanomagnetites in the Fe–Ti–O System. Reassessment of Some Methodological and Crystal Chemical Effects, *Journal of Geophysical Research*. 111, B12S28. DOI: 10.1029/2006JB004591.
- Lozhkin, A. V., Anderson, P. M., Brown, T. A., Vazhenina, L. N., Matrosova, T. V., Minyuk, P. S., Pakhomov, A. Yu., Solomatkina, T. B., 2010. A New Chronicle of Climate Change and Vegetation of the Northern Priokhotye during Isotopic Stages 1–4, *Bulletin of NESCFEB RAS*. 1, 63–70 [In Russian].
- Lozhkin, A. V., Anderson, P. M., Regel, K. V., 2023. The Role of Lake Basin History on Palynological Records from the Upper Kolyma Region (Northeastern Siberia), *Quaternary Research*. 112, 51–66. DOI: 10.1017/qua.2022.47.
- Lozhkin, A. V., Korzun, Yu. A., Minyuk, P. S., Anderson, P. M., Burnatny, S. S., Glushkova, O. Yu., 2022. Palynological Characteristics and Volcanic Ash from Sediments of Chistoye Lake, Northern Priokhotye, *Bulletin of NESCFEB RAS*. 4, 24–34. DOI: 10.34078/1814-0998-2022-4-24-34.
- Maksimochkin, V. I., Gubaidullin, R. R., Gareeva, M. Ya., 2013. Magnetic Properties and Structure of Chromites of the Composition $\text{Fe}_{2-x}\text{Mg}_x\text{CrO}_4$, *Moscow University Physics Bulletin*. 3, 64–70. DOI: 10.3103/S0027134913030077 [In Russian].
- Melles, M., Brigham-Grette, J., Minyuk, P. S., Nowaczyk, N. R., Wennrich, V., DeConto, R. M., Anderson, P. M., Andreev, A. A., Coletti, A., Cook, T. L., Haltia-Hovi, E., Kukkonen, M., Lozhkin, A. V., Rosén, P., Tarasov, P., Vogel, H., Wagner, B., 2012. 2.8 Million Years of Arctic Climate Change from Lake El'gygytyn, NE Russia, *Science*. 337 (6092), 315–320. DOI: 1126/science.1222135.
- Minyuk, P. S., 2021. Detritus and Chemogenic Iron in Lake Sediments of the Far East: Rock Magnetic and Geochemical Features, *Proceedings of the 13th International School-Conference "Problems of Geocosmos" (March 24–27, 2021, St. Petersburg, Russia)*, ed. N. Yu. Bobrov [et al.]. St. Petersburg, 184–194 [In Russian].
- Minyuk, P. S., 2022. Significance of Granulometric Composition and Physicochemical Properties for Interpreting Lake Grand Sedimentation, *Russian Geology and Geophysics*. 63, 9, 1253–1268. DOI: 10.15372/GiG2021156 [In Russian].
- Minyuk, P. S., Borkhodoev, V. Ya., 2016. Geochemistry of Sediments from Lake Grand, Northeast Russia, *Geochemistry International*. 9, 841–851. DOI: 10.7868/S0016752516070074 [In Russian].
- Minyuk, P. S., Borkhodoev, V. Ya., 2021. Response of Geochemical Characteristics on the Environmental Changes in the Holocene: Data on Bottom Sediments of Lake Maloe, Iturup Island, *Geochemistry International*. 66, 4, 351–363. DOI: 10.31857/S0016752521040051 [In Russian].
- Minyuk, P. S., Borkhodoev, V. Y., Wennrich, V., 2014. Inorganic Geochemistry Data from Lake El'gygytyn Sediments: Marine Isotope Stages 6–11, *Climate of the Past*. 10, 467–485. DOI: 10.5194/cp-10-467-2014.
- Minyuk, P. S., Lozhkin, A. V., Anderson, P. M., Solomatkina, T. B., Pakhomov, A. Yu., Borkhodoev, V. Ya., 2007. Multiproxy Studies of Sediments from Engtery Lake, North-East Russia, *Bulletin of NESCFEB RAS*. 4, 2–13 [In Russian].
- Minyuk, P. S., Pozhidaeva, D. K., Burnatny, S. S., 2022a. Hydrochemical Characteristics of Natural and

- Technogenic Water Bodies in Magadan Oblast, *Bulletin of NESCFEB RAS*. 2, 45–58. DOI: 10.34078/1814-0998-2022-2-45-58 [In Russian].
- Minyuk, P. S., Pozhidaeva, D. K., Byrnatny, S. S., 2022. Lake Chistoye (Northern Priokhotsk Area, Russia) – the High Resolution Environmental Archive for the Holocene, *Limnology and Freshwater Biology*. 4, 1503–1505. DOI: 10.31951/2658-3518-2022-A-4-1503.
- Minyuk, P. S., Sotskaya, O. T., Tsygankova, V. I., Akinin, V. V., Burnatny, S. S., 2022. Holocene Ash from Lacustrine Sediments of the Okhotsk Area: Distinctive Features, *Doklady Earth Sciences*. 505, 1, 62–68. DOI: 10.31857/S2686739722070131 [In Russian].
- Minyuk, P., Subbotnikova, T., 2021. Rock Magnetic Properties of Grand Lake Sediments as Evidence of Environmental Changes during the Last 60 000 Years in North-East Russia, *Boreas*. 50, 4, 1027–1042. DOI: 10.1111/bor.12546.
- Minyuk, P. S., Subbotnikova, T. V., Anderson, P. M., Lozhkin, A. V., 2013. Rock Magnetic Properties of the Lake Pernatoye Sediments (Paramushir Island) as an Indicator of the Changes in Sedimentation Conditions, *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 49, 1, 120–129. DOI: 10.7868/S0002333713010092 [In Russian].
- Minyuk, P. S., Subbotnikova, T. V., Brown, L. L., Murdock, K. J., 2013. High-Temperature Thermomagnetic Properties of Vivianite Nodules, Lake El'gygytyn, Northeast Russia, *Climate of the Past*. 9, 433–446. DOI: 10.5194/cp-9-433-2013.
- Minyuk, P. S., Subbotnikova, T. V., Plyashkevich, A. A., 2011. Measurements of Thermal Magnetic Susceptibility of Hematite and Goethite, *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 47, 9, 18–30 [In Russian].
- Peters, C., Dekkers, M. J., 2003. Selected Room Temperature Magnetic Parameters as a Function of Mineralogy, Concentration, and Grain Size, *Physics and Chemistry of the Earth*. 28, 659–667. DOI: 10.1016/S1474-7065-(03)00120-7.
- Petrovskiy, E., Kapička, A., 2006. On Determination of the Curie Point from Thermomagnetic Curves, *Journal of Geophysical Research*. 111, B12S27. DOI: 10.1029/2006JB004507.
- Ponomareva, V. V., Kyle, P. R., Melekestsev, I. V., Rinckel, P. G., Dirksen, O. V., Sulerzhitsky, L. D., Zaretskaia, N. E., Rourke, R., 2004. The 7600 (¹⁴C) Year BP Kurile Lake Caldera-Forming Eruption, Kamchatka, Russia: Stratigraphy and Field Relationships, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 136, 199–222. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2004.05.013.
- Schmidbauer, E., 1983. Magnetization of Fe-Cr-Ti Spinels, *Physics and Chemistry of Minerals*. 9, 124–126. DOI: 10.1007/BF00308368.
- Viaggi, P., 2021. Quantitative Impact of Astronomical and Sun-related Cycles on the Pleistocene Climate System from Antarctica Records, *Quaternary Science Advances*. 4, 100037. DOI: 10.1016/j.qsa.2021.100037.
- Wanner, H., Solomina, O., Grosjean, M., Ritz, S. P., Jetel, M., 2011. Structure and Origin of Holocene Cold Events, *Quaternary Science Reviews*. 30, 3109–3123. DOI: 10.1016/j.quascirev.2011.07.010.
- Wright, H. E., Mann, D. H., Glaser, P. H., 1984. Piston Corers for Pea and Lake Sediments, *Ecology*. 65, 2, 657–659. DOI: 10.2307/1941430.
- Zakharova, E. A., Kouraev, A. V., Guillasco, S., Garestier, F., Desyatkin, R. V., Desyatkin, A. R., 2018. Recent Dynamics of Hydro-Ecosystems in Thermokarst Depressions in Central Siberia from Satellite and In Situ Observations: Importance for Agriculture and Human Life, *Science of the Total Environment*. 615, 1290–1304. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.09.059.