

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 551.583.7

doi: 10.26907/2542-064X.2023.4.620-632

**ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ МАГНИТНО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ОЗЕРА БЕЛОЕ
(ЮЖНАЯ СИБИРЬ, РОССИЯ)**

*А.Р. Юсупова, Н.Г. Нургалиева, Д.М. Кузина, В.Ф. Сотникова,
Д.И. Муликова*

Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, 420008, Россия

Аннотация

В работе представлены результаты предварительных исследований донных отложений озера Белое (Южная Сибирь, Россия), направленных на получение вариаций магнитно-минералогических показателей и интерпретацию влияющих на них геологических факторов. Проведен комплекс петромагнитных исследований, включающий измерение магнитной восприимчивости (МВ) образцов трех керновых колонок, получение кривых нормального остаточного намагничивания при непрерывном росте внешнего магнитного поля до 1.5 Тл для одной колонки, дифференциальный термомагнитный анализ по индуцированной намагниченности и сканирующую электронную микроскопию (СЭМ) по выборочным образцам. По кривым нормального намагничивания проведено разделение магнитной составляющей на ферромагнитную, диа/парамагнитную и суперпарамагнитную компоненты и определен их вклад. Данные по МВ образцов всех колонок хорошо коррелируют между собой, что позволяет проводить их сопоставление. Магнитные минералы представлены магнетитом и пиритом, присутствие которых прослеживается почти по всему разрезу. На диаграмме Дзя–Данлопа изучаемые образцы представлены однодоменными (ОД) и псевдооднодоменными (ПОД) зернами. Вариативность магнитных компонент по разрезу говорит об изменяющихся условиях во время осадконакопления. Методом СЭМ обнаружены частицы, сходные по составу и морфологии с космогенными и вулканическими сферулами. На основе комплексного анализа данных выделена значимая граница плейстоцен–голоцен.

Ключевые слова: условия осадконакопления, космогенные частицы, плейстоцен-голоценовые осадки.

Введение

Изменение концентраций и состава зерен магнитного вещества, аккумулирующегося в донных отложениях озер, приводит к варьированию магнитных параметров. К их числу относятся магнитная восприимчивость (МВ), а также ее компоненты (ферро-, пара- и суперпарамагнитная) [1–3]. Магнитные параметры могут быть информативными и в отношении седиментационных и постседиментационных процессов, в числе которых перенос обломочного материала ледовыми, эоловыми и водными агентами, аутигенное формирование ферромагнитных сульфидов и оксидов железа, биогенная минерализация железа, чередующаяся с магнитными ансамблями обломочных зерен [1, 2, 4–6].

Интересной особенностью плейстоцен-голоценовых озерных осадочных летописей являются повышенные значения многих магнитных характеристик в плейстоценовых отложениях по сравнению с голоценовыми (например, в озерах Гранд, Грязевое, Большое, Соседнее, Водораздельное, Сапог [7] и Сабакты [8]), обусловленные особенным участием ледового и эолового агентов транспортировки магнитного обломочного материала в озерную котловину [3, 8, 9], а также, вероятно, более активным участием космогенного вещества, детектируемого в виде магнитных сферул и железоникелевых сплавов [10, 11]. Для такого железа характерен сильно выраженный ферромагнетизм с точкой Кюри $\sim 700\text{--}750\text{ }^\circ\text{C}$ [11, 12].

В настоящей работе представлены результаты предварительных магнитно-минералогических исследований озера Белое, расположенного на юго-западе Алтайского края (Южная Сибирь, Россия). В настоящее время на исследуемой территории изучены донные отложения лишь некоторых озер [1, 13], среди которых отсутствует вышеупомянутое озеро. В результате исследований установлены вариации магнитно-минералогических показателей и проведена предварительная интерпретация геологических факторов этих вариаций.

2. Материалы и методы исследований

Озеро Белое располагается на юго-западе Алтайского края (Южная Сибирь, Россия), у подножия северных склонов Колыванского хребта [14], который находится в Курьинском районе, на северо-востоке от г. Синюхи. Керн донных отложений озера Белое был получен в ходе научной экспедиции в августе 2022 г. сотрудниками Института геологии и нефтегазовых технологий Казанского федерального университета (КФУ). Отбор образцов для различных методов исследований проводили пробоотборником, подробно описанным в работе [15]. Шаг отбора составил 2 см. Проведено изучение трех керновых колонок, отобранных на основе предварительных сейсмоакустических исследований из центральной части озера в местах ненарушенной сплошности донных отложений. Основные характеристики колонок представлены в табл. 1.

Табл. 1.

Основные характеристики керновых колонок (глубина отбора ~ 6 м)

№ колонки	Широта	Долгота	Длина, см	Число образцов
1	51°17.5825'	82°39.0919'	492	248
2	51°17.4223'	82°39.1003'	452	241
3	51°17.4856'	82°39.1423'	518	250

Для всех образцов отобранных керновых колонок (табл. 1) была измерена МВ. На основе предварительных сейсмоакустических исследований и первичного литологического описания для детальных комплексных лабораторных исследований, проведенных в Институте геологии и нефтегазовых технологий Казанского (Приволжского) федерального университета, была выбрана керновая колонка № 2. Для нее проведены коэрцитивная спектрометрия, дифференциальный термомагнитный анализ, а также получены изображения сканирующей электронной микроскопии (СЭМ).

Разрез колонки № 2 представлен снизу вверх плотными глинистыми беловато-серыми отложениями, сменяющимися слаболитифицированным серым и светло-серым илом. Растительный детрит установлен на отметках 196, 220, 230–250, 294 и 366 см. Раковинный детрит фиксируется на отметках 156–170, 262–282, 362 и 420 см.

МВ измерена для всех 739 отобранных образцов (табл. 1) при частоте 976 Гц и амплитуде поля 200 А/м с использованием многочастотного измерителя МВ Kappabridge MFK1-FA (AGICO, Чехия). Для указанных параметров чувствительность прибора составляет 2×10^{-8} SI. Диапазон измерения прибора достигает 0.5 (SI) при частоте 976 Гц. Точность в пределах одного диапазона составляет $\pm 0.1\%$, а точность абсолютной калибровки – $\pm 3\%$.

Коэрцитивную спектрометрию проводили с помощью коэрцитивного спектрометра J_meter (Россия) [16–18]. Для образцов керновой колонки № 2 в автоматическом режиме измеряли 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 определен вклад в магнитную составляющую осадка различных магнитных компонент озерных отложений: ферромагнитной (χ_f), диа-/парамагнитной (χ_p) и суперпарамагнитной (χ_{sp}), согласно методике, описанной в работах [8, 19].

Дифференциальный термомагнитный анализ образцов керновой колонки № 2 по индуцированной намагниченности выполняли на авторегистрирующих крутильных магнитных весах, действующих по нулевому методу [16].

Для изучения морфологии и элементного состава минеральных частиц донных отложений озера Белое использовали автоэмиссионный сканирующий электронный микроскоп Merlin™ (Carl Zeiss, Германия), оснащенный детектором элементного анализа Aztec X-MAX 80. Спектральное разрешение составляло 127 эВ. Образцы помещали на углеродный скотч.

3. Результаты и их обсуждение

Измеренные значения МВ по образцам керновой колонки № 1 изменяются в интервале от 0.264×10^{-7} до 13.400×10^{-7} м³/кг, а среднее значение составляет 1.01×10^{-7} м³/кг. Значения МВ образцов керновой колонки № 2 изменяются в диапазоне $(0.289–5.340) \times 10^{-7}$ м³/кг со средним значением 0.862×10^{-7} м³/кг. МВ образцов керновой колонки № 3 варьируется от 0.160×10^{-7} до 5.790×10^{-7} м³/кг со средним значением 0.796×10^{-7} м³/кг. Сопоставление вариаций величины МВ по трем отобранным колонкам представлено на рис. 1. Повышенные значения МВ в нижней части разреза (интервал 500–444, 414–182 и 512–448 см для керновых колонок № 1, № 2 и № 3 соответственно) (рис. 1, а) свидетельствуют о значительном содержании магнитного вещества и указывают предположительно на плейстоценовый возраст этой части разреза [7, 8].

Построенная диаграмма Дзя-Данлопа [20–21] (рис. 1, б) позволила установить, что изучаемые образцы керновой колонки № 2 делятся на две группы. Первая группа представлена образцами интервала глубин 482–438 см (однодоменные зерна (ОД) (синие точки)). Вторая группа представлена образцами интервала глубин 436–2 см (псевдооднодоменные зерна (ПОД) (красные точки)). Таким образом, только в предположительно плейстоценовых отложениях детектируется магнитный материал, сложенный однодоменными зернами.

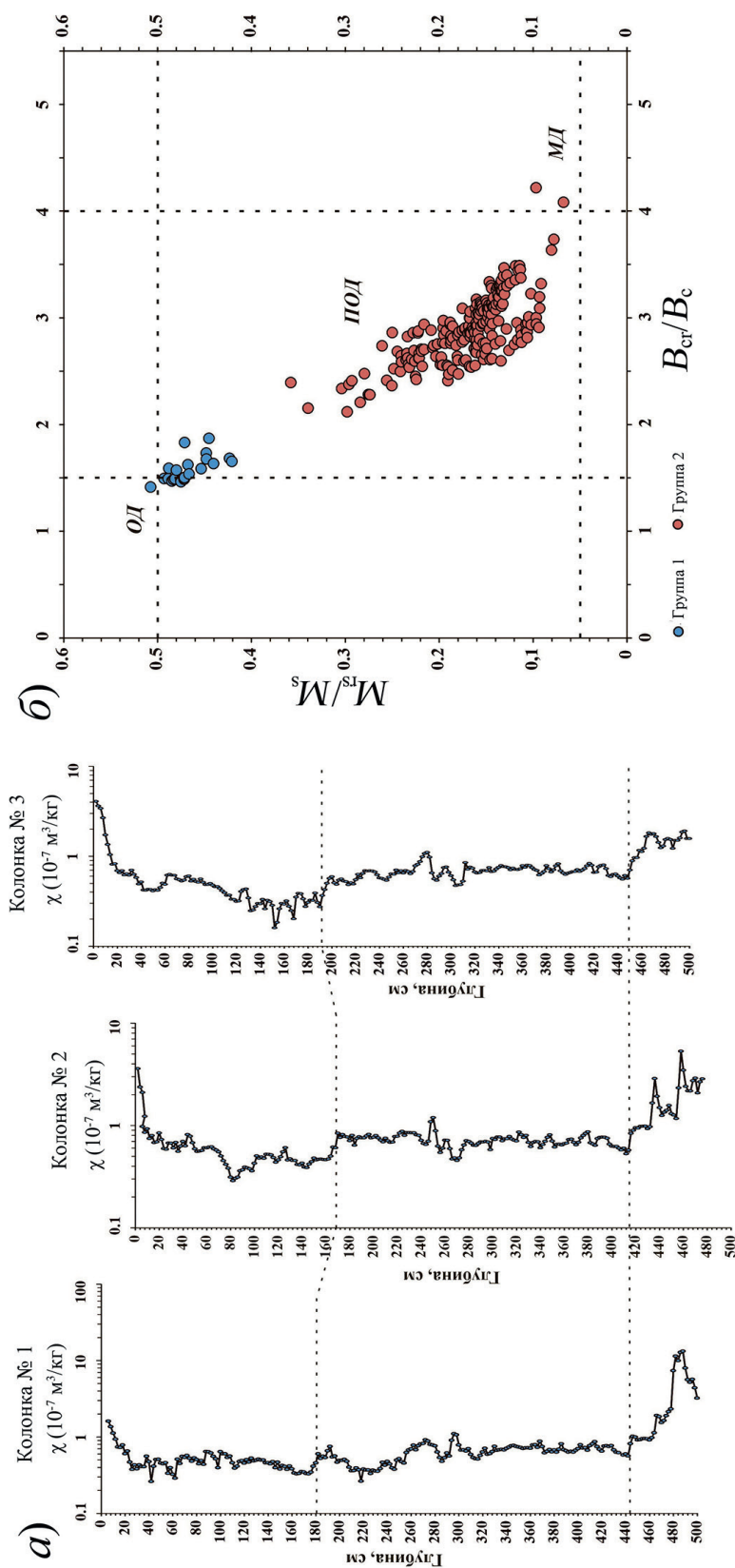


Рис. 1. а) Вариации величины МВ по трем колонкам ядра озера Белое; б) диаграмма Дэй–Данлопа [20–21] керновой колонки № 3 озера Белое. ОД – однодоменные, ПОД – псевдооднодоменные, МД – многодоменные зерна. Группа 1 – интервал 482–438 см (синие точки), группа 2 – интервал 436–2 см (красные точки)

На рис. 2 представлены результаты дифференциального термомагнитного анализа.

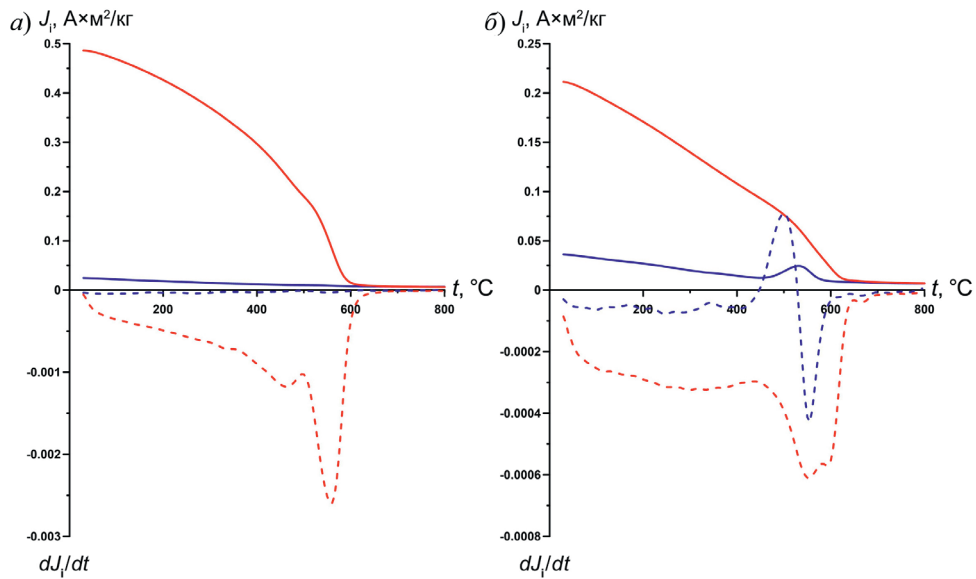


Рис. 2. Результаты дифференциального термомагнитного анализа керновой колонки № 2 (*a* – образец 490 (отметка 380 см), *б* – образец 522 (отметка 444 см)). Сплошные синяя и красная линии – первый и второй нагрев соответственно, пунктирные синяя и красная линии – дифференциалы первого и второго нагрева соответственно

Для всех образцов характерен рост намагниченности после первого нагрева, что говорит об образовании новых магнитных минералов. Для образцов из верхней части керна это, скорее всего, связано с образованием тонкодисперсного магнетита при горении органики (рис. 2, *a*). Для некоторых образцов это происходит вследствие преобразования пирита при нагревании. При температуре ~450 °С начинается диссоциация пирита и он переходит в магнетит. Поэтому сложно судить о первоначальном присутствии магнетита в осадке (рис. 2, *б*). Пирит распространен почти по всему разрезу.

На рис. 3 отображены вариации компонент МВ, статистические параметры которых представлены в табл. 2. Значения χ_{full} изменяются в интервале $(2.41-50.94) \times 10^{-5} \text{ м}^3/\text{кг}$, при этом χ_p варьируется в диапазоне $(1.66-7.73) \times 10^{-5} \text{ м}^3/\text{кг}$, $\chi_f - (1.66-7.73) \times 10^{-5} \text{ м}^3/\text{кг}$ и $\chi_{sp} - (0.001-1.02) \times 10^{-5} \text{ м}^3/\text{кг}$.

Табл. 2.

Статистические параметры компонент МВ керновой колонки № 2 донных отложений озера Белое

Параметр	χ_{full} ($10^{-5} \text{ м}^3/\text{кг}$)	χ_p ($10^{-5} \text{ м}^3/\text{кг}$)	χ_f ($10^{-5} \text{ м}^3/\text{кг}$)	χ_{sp} ($10^{-5} \text{ м}^3/\text{кг}$)
Минимальное значение	2.41	1.66	0.54	0.001
Максимальное значение	50.94	7.73	42.57	1.02
Среднее значение	7.11	4.14	2.94	0.038
Стандартное отклонение	6.06	1.37	5.30	0.09

На графиках вариаций компонент МВ (рис. 3) установлены повышенные значения последних в условно плейстоценовых отложениях по сравнению с вышележащими голоценовыми отложениями.

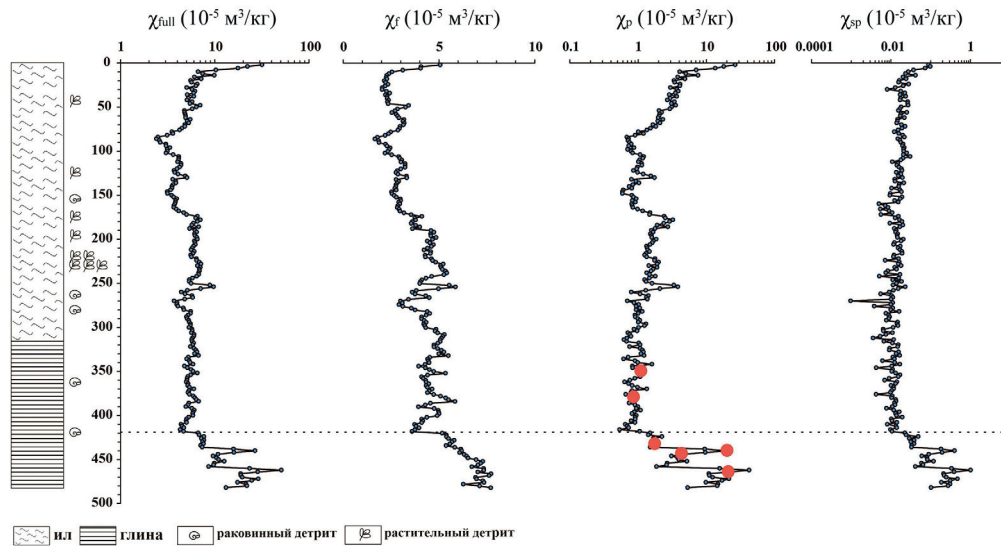


Рис. 3. Вариации компонент МВ по образцам колонки № 2 осадков озера Белое. Красным обозначены точки, отобранные для исследований методом СЭМ

По данным СЭМ установлено наличие железных сферул и чешуек с примесями Cr, Ni (2–10%) и в меньшей степени Mn, Al, Zn, Si и других элементов (до 1%). По структуре и составу некоторые частицы можно отнести к космогенным (рис. 4, а и б). Они в большей степени распространены в предположительно плейстоценовых отложениях по сравнению с вышележащими отложениями, где такие частицы не обнаружены. На остальных СЭМ-изображениях (рис. 4, в–д) видно, что поверхность более бугристая, что типично для вулканических сферул. Это часто встречается, если породы вокруг озера являются вулканогенными. Для представленных образцов размываемыми породами являются осадочные, вулканогенные и вулканогенно-осадочные образования Алтае-Саянской и Обь-Зайсанской складчатых областей [22]. Предположительно космогенные частицы (сферулы и железоникелевые частицы [11, 23, 24]) распространены в плейстоценовых донных осадках других озер, например, озер Банное и Турго-як (рис. 4, е и ж). Присутствие космогенных частиц можно объяснить с помощью гипотезы о метеоритных взрывах в позднечетвертичное время, особенно в плейстоцене [25, 26].

Наличие множества вулканических частиц может быть связано с интенсивным выветриванием пород водосбора и привнесом этого вещества в бассейн осадконакопления. Похожие частицы обнаружены и в других изученных авторами озерах, например, в озере Сабакты (рис. 4, з). Более детальный отбор образцов со всего разреза, микроскопическое изучение морфологии, химического состава и доменной структуры магнитных частиц позволят в будущем улучшить понимание их происхождения.

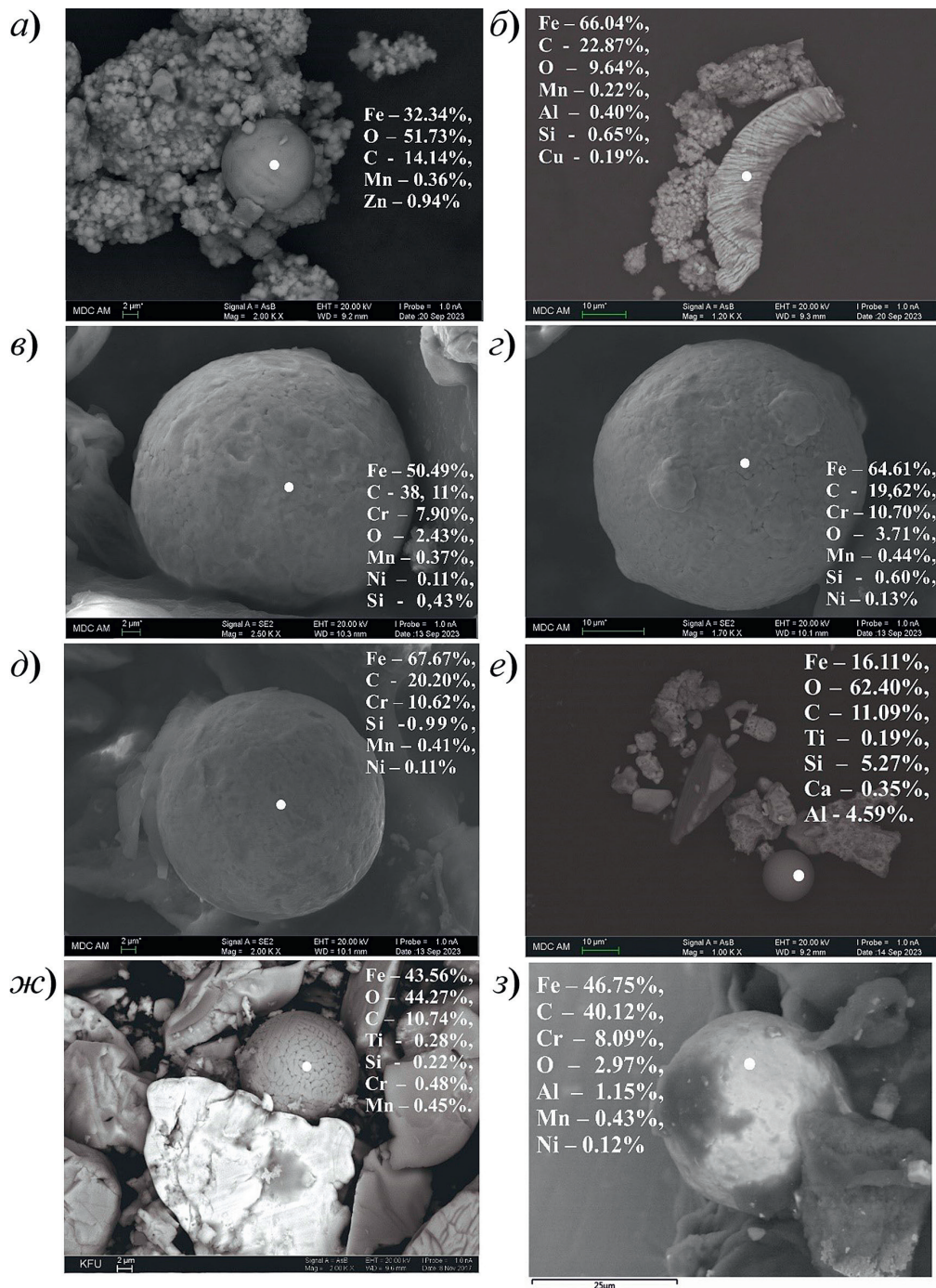


Рис. 4. СЭМ-изображения космических и вулканических частиц и содержание элементов (% атом.): а) озеро Белое, глубина 444 см; б) озеро Белое, глубина 444 см; в) озеро Белое, глубина 428 см; г) озеро Белое, глубина 428 см; д) озеро Белое, глубина 428 см; е) озеро Банное, глубина 508 см (~12 600 лет); ж) озеро Тургойак, глубина 520 см (более 20 000 лет); з) озеро Сабакты, глубина 234 см (~11 600 лет [8])

Заключение

Установлены значительные вариации величин МВ и ее компонент, позволяющие предположительно определить плейстоцен–голоценовый рубеж. Плейстоценовые отложения характеризуются повышенными значениями МВ и ее компонент (χ_p , χ_t и χ_{sp}). В составе магнитного материала этих отложений зафиксированы однодоменные зерна, а в вышележащих голоценовых отложениях – псевдооднодоменные.

На основе полученных результатов СЭМ сделано предположение о заметной роли магнитных сферул и железоникелевых частиц (космогенного и вулканического происхождения) в магнитной составляющей плейстоценовых отложений озера Белое.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ № 22-47-08001, <https://rscf.ru/project/22-47-08001/>.

Литература

1. Косарева Л.Р., Щербаков В.П., Нурғалиев Д.К., Нурғалиева Н.Г., Сычева Н.К., Антоненко В.В., Кузина Д.М., Евтюгин 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. <https://doi.org/10.15372/GiG2019148>.
2. Evans M.E., Heller F. Environmental Magnetism. Principles and Applications of Enviromagnetics. San Diego: Acad. Press, 2003. 299 p.
3. Liu Q., Roberts A.P., Larrasoańa J.C., Banerjee S.K., Guyodo Y., Tauxe L., Oldfield F. Environmental magnetism: Principles and applications // Rev. Geophys. 2012. V. 50, No 4. Art. RG4002. <https://doi.org/10.1029/2012RG000393>.
4. Berner R.A. A new geochemical classification of sedimentary environments // J. Sediment. Res. 1981. V. 51, No 2. P. 359–365. <https://doi.org/10.1306/212F7C7F-2B24-11D7-8648000102C1865D>.
5. Dong Y., Wu N., Li F., Huang L., Wen W. Time-transgressive nature of the magnetic susceptibility record across the Chinese Loess Plateau at the Pleistocene/Holocene transition // PLoS One. 2015. V. 10, No 7. Art. e0133541. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0133541>.
6. Curtis C. Mineralogical consequences of organic matter degradation in sediments: Inorganic/organic diagenesis // Marine Clastic Sedimentology / Ed. by J.K. Leggett, G.G. Zuffa. Dordrecht: Springer, 1987. P. 108–123. https://doi.org/10.1007/978-94-009-3241-8_6.
7. Минюк П.С., Пожидаева Д.К., Соцкая О.Т., Акинин В.В., Морозова М.А. Магнито-минералогические аномалии на границе плейстоцена и голоцена в озерных осадках Северо-Востока России // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2023. Т. 510, № 2. С. 194–200. <https://doi.org/10.31857/S2686739723600182>.
8. Юсупова А.Р., Нурғалиева Н.Г., Кузина Д.М., Косарева Л.Р., Юнусова Д.А. Особенности вещественного состава донных отложений озера Сабакты (Южный Урал) // Успехи современного естествознания. 2023. № 7. С. 72–81. <https://doi.org/10.17513/use.38074>.
9. Hu S., Goddu S.R., Herb C., Appel E., Gleixner G., Wang S., Yang X., Zhu X. Climate variability and its magnetic response recorded in a lacustrine sequence in Heqing basin at the SE Tibetan Plateau since 900 ka // Geophys. J. Int. 2015. V. 201, No 1. P. 444–458. <https://doi.org/10.1093/gji/ggv033>.
10. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Минеральные индикаторы литогенеза. Сыктывкар: Геопринт, 2008. 564 с.

11. *Kuzina D.M., Yusupova A.R., Markov G.P., Nurgaliev D.K., Lemazina Yu.A., Vorob'ev V.V., Kadyrov R.I.* Micrometeorites from Lake Turgoyak, South Ural, Russia // *Meteorit. Planet. Sci.* 2018. V. 53, No S1. Art. 6306. P. A156. <https://doi.org/10.1111/maps.13146>.
12. *Буров Б.В., Ясонов П.Г.* Введение в дифференциальный термомагнитный анализ горных пород. Казань: Издательство Казанского университета, 1979. 159 с.
13. *Дарьин А.В., Калугин И.А.* Реконструкция климата Горного Алтая по данным литолого-геохимических исследований донных осадков озера Телецкое // *Известия Российской академии наук. Серия географическая.* 2012. № 6. С. 63–70. <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2012-6-63-70>.
14. *Панин Е.Л., Панина Е.А., Шаров А.С.* Некоторые аспекты развития санаторно-курортной и туристической деятельности в Алтайском крае // *Экономика. Сервис. Туризм. Культура (ЭСТК-2003): сборник статей V Международной научно-практической конференции (Барнаул, 27-28 мая 2003 г.).* Барнаул: Издательство Алтайского государственного технического университета, 2003. С. 47–50.
15. *Борисов А.С.* Система технологического обеспечения палеомагнитных исследований отложений современных озер: автореф. дис. ... докт. геол.-минерал. наук. Казань, 2004. 46 с.
16. *Буров Б.В., Нургалиев Д.К., Ясонов П.Г.* Палеомагнитный анализ. Казань: Издательство Казанского университета, 1986. 167 с.
17. *Нургалиев Д.К., Ясонов П.Г.* Коэрцитивный спектрометр. Патент РФ на полезную модель. № 81805. 2009. Бюл. ФИПС № 9.
18. *Yasonov P.G., Nurgaliev D.K., Burov B.V., Heller F.* A modernized coercivity spectrometer // *Geol. Carpathica.* 1998. V. 49, No 3. P. 224–225.
19. *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 J. Earth Sci.* 2015. V. 4, No 1. P. 1–6.
20. *Day R., Fuller M., Schmidt V.A.* Hysteresis properties of titanomagnetites: Grain-size and compositional dependence // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1977. V. 13, No 4. P. 260–267. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(77\)90108-X](https://doi.org/10.1016/0031-9201(77)90108-X).
21. *Dunlop D.J.* Theory and application of the Day plot (M_{rs}/M_s versus H_{cr}/H_c) 1. Theoretical curves and tests using titanomagnetite data // *J. Geophys. Res.: Solid Earth.* 2002. V. 107, No B3. P. EPM 4-1–EPM 4-22. <https://doi.org/10.1029/2001JB000486>.
22. *Литвинова Т.П., Тимофеева И.К., Кудрявцев И.В.* Отчет по объекту «Создание опережающих геофизических основ Госгеолкарты-1000/3». Книга 17 (М-44). СПб.: ВСЕГЕИ; РГФ, 2012.
23. *Глухов М.С.* Магнитные микросферулы: морфология, состав, принципы классификации: дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Казань, 2022. 202 с.
24. *Кузина Д.М.* Космическое вещество в осадках и осадочных породах: методы диагностики и применение для решения геологических задач: дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Казань, 2019. 183 с.
25. *Субетто Д.А., Леонтьев П.А., Серых Л.С., Андроников А.В., Назарова Л.Б., Кублицкий Ю.А.* Резкие/катастрофические природно-климатические изменения и явления на рубеже позднего неоплейстоцена и голоцена на Северо-Западе России // *Общество. Среда. Развитие.* 2016. № 2. С. 87–96.
26. *Jelinowska A., Tucholka P., Wieckowski K.* Magnetic properties of sediments in a Polish lake: Evidence of a relation between the rock-magnetic record and environmental changes in Late Pleistocene and Holocene sediments // *Geophys. J. Int.* 1997. V. 129, No 3. P. 727–736. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1997.tb04508.x>.

Поступила в редакцию 03.10.2023

Принята к публикации 01.12.2023

Юсупова Анастасия Рафаиловна, младший научный сотрудник НИЛ палеоклиматологии, палеоэкологии, палеомагнетизма Института геологии и нефтегазовых технологий

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: *i@ajusupova.ru*

Нургалиева Нурия Гавазовна, доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры геологии нефти и газа Института геологии и нефтегазовых технологий

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: *nouria.nourgalieva@kpfu.ru*

Кузина Диляра Мтыгулловна, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник НИЛ палеоклиматологии, палеоэкологии, палеомагнетизма Института геологии и нефтегазовых технологий

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: *di.kuzina@gmail.com*

Сотникова Василина Федоровна, инженер НИЛ «Гибридные оптические сенсоры» Института физики

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: *vasilina0917@gmail.com*

Муликова Динара Илхомовна, лаборант-исследователь НИЛ палеоклиматологии, палеоэкологии, палеомагнетизма Института геологии и нефтегазовых технологий

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: *dindirin8642@gmail.com*

ISSN 2542-064X (Print)
ISSN 2500-218X (Online)

UCHENYE ZAPISKI KAZANSKOGO UNIVERSITETA. SERIYA ESTESTVENNYE NAUKI
(Proceedings of Kazan University. Natural Sciences Series)

2023, vol. 165, no. 4, pp. 620–632

ORIGINAL ARTICLE

doi: 10.26907/2542-064X.2023.4.620-632

**Preliminary Magnetic Mineralogical Studies of Lake Beloe Sediments
(Southern Siberia, Russia)**

*A.R. Yusupova**, *N.G. Nurgalieva****, *D.M. Kuzina****, *V.F. Sotnikova*****, *D.I. Mulikova******

**Kazan Federal University, Kazan, 420008 Russia*

*E-mail: *i@ajusupova.ru, **nouria.nourgalieva@kpfu.ru, ***di.kuzina@gmail.com,*
*****vasilina0917@gmail.com, *****dindirin8642@gmail.com*

Received October 3, 2023; Accepted December 1, 2023

Abstract

This article overviews the results of a preliminary magnetic and mineralogical study of the bottom sediments of Lake Beloe (Southern Siberia, Russia). The magnetic and mineralogical properties of the sediments were examined. Their variations were correlated with geological factors. A comprehensive magnetic survey was performed: magnetic susceptibility of samples extracted from three sediment cores was measured; normal remanent magnetization in a continuously increasing external magnetic field of up to 1.5 T was calculated; differential thermomagnetic analysis was carried out based on induced

magnetization and scanning electron microscopy (SEM) for certain samples. The magnetic component was divided into three subcomponents based on the normal magnetization curves: ferromagnetic, dia-/paramagnetic, and superparamagnetic. The contribution of each subcomponent to the total magnetization was determined. It was found that the magnetic susceptibility values correlate well across all the studied cores, thus making it possible to compare them. Magnetite and pyrite turned out to be the magnetic minerals distributed throughout almost the entire section. In the Day–Dunlop plot, the studied samples are represented by single-domain (SD) and pseudo–single-domain (PSD) grains. The magnetic components vary consistently along the section, suggesting that the depositional environment underwent substantial changes. Particles similar in composition and morphology to cosmogenic and volcanic spherules were discovered using the SEM method. Based on the obtained results, the boundary between the Pleistocene and Holocene deposits was defined.

Keywords: sedimentation conditions, cosmogenic particles, Pleistocene-Holocene sediments

Acknowledgements. This study was supported by the Russian Science Foundation (project no. 224708001, <https://rscf.ru/project/22-47-08001/>).

Figure Captions

Fig. 1. *a*) Variations in the magnetic susceptibility of three sediment cores from Lake Beloe; *b*) Day–Dunlop plot [20–21] of sediment core no. 3 from Lake Beloe. SD – single-domain grains, PSD – pseudo–single-domain grains, MD – multi-domain grains. Group 1 – the interval of 482–438 cm (blue dots), group 2 – 436–2 cm (red dots).

Fig. 2. Differential thermomagnetic analysis of sediment core no. 2 (*a* – sample no. 490 (depth 380 cm), *b* – sample no. 522 (depth 444 cm)). Solid blue and red lines are the first and second heating, respectively; dotted blue and red lines are the differentials of the first and second heating, respectively.

Fig. 3. Variations of the magnetic susceptibility components of sediment core no. 2 from Lake Beloe. The points selected for the SEM study are shown in red.

Fig. 4. SEM images of cosmic and volcanic particles and their atomic concentration (in at%): *a*) Lake Beloe, depth 444 cm; *b*) Lake Beloe, depth 444 cm; *c*) Lake Beloe, depth 428 cm; *d*) Lake Beloe, depth 428 cm; *e*) Lake Beloe, depth 428 cm; *f*) Lake Bannoe, depth 508 cm (~12 600 years old); *g*) Lake Turgoyak, depth 520 cm (more than 20 000 years old); *h*) Lake Sabakty, depth 234 cm (~11.600 years old [8]).

References

1. Kosareva L.R., Shcherbakov V.P., Nurgaliev D.K., Nurgalieva N.G., Sycheva N.K., Antonenko V.V., Kuzina D.M., Evtuyugin V.G. Periodization of Holocene climatic cycles based on synchronous variations in the magnetic and geochemical parameters of the sediments of Lake Bol'shoe Yarovoe (southwestern Siberia). *Geol. Geofiz.*, 2020, vol. 61, no. 7, pp. 889–907. <https://doi.org/10.15372/GiG2019148>. (In Russian)
2. Evans M.E., Heller F. *Environmental Magnetism. Principles and Applications of Enviromagnetics*. San Diego, Acad. Press, 2003. 299 p.
3. Liu Q., Roberts A.P., Larrasoaña J.C., Banerjee S.K., Guyodo Y., Tauxe L., Oldfield F. Environmental magnetism: Principles and applications. *Rev. Geophys.*, 2012, vol. 50, no. 4, art. RG4002. <https://doi.org/10.1029/2012RG000393>.
4. Berner R.A. A new geochemical classification of sedimentary environments. *J. Sediment. Res.*, 1981, vol. 51, no. 2, pp. 359–365. <https://doi.org/10.1306/212F7C7F-2B24-11D7-8648000102C1865D>.
5. Dong Y., Wu N., Li F., Huang L., Wen W. Time-transgressive nature of the magnetic susceptibility record across the Chinese Loess Plateau at the Pleistocene/Holocene transition. *PLoS One*, 2015, vol. 10, no. 7, art. e0133541. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0133541>.
6. Curtis C. Mineralogical consequences of organic matter degradation in sediments: Inorganic/organic diagenesis. In: Leggett J.K., Zuffa G.G. (Eds.) *Marine Clastic Sedimentology*. Dordrecht, Springer, 1987. pp. 108–123. https://doi.org/10.1007/978-94-009-3241-8_6.

7. Minyuk P.S., Pozhidaeva D.S., Sotskaya O.T., Akinin V.V., Morozova M.A. Magnetic–mineralogical anomalies at the Pleistocene–Holocene boundary in lacustrine sediments of Northeastern Russia. *Dokl. Earth Sci.*, 2023, vol. 510, no. 2, pp. 453–458. <https://doi.org/10.1134/S1028334X23600342>.
8. Yusupova A.R., Nurgalieva N.G., Kuzina D.M., Kosareva L.R., Yunusova D.A. Compositional characteristics of Lake Sabakty sediments (Southern Urals). *Usp. Sovrem. Estestvozn.*, 2023, no. 7, pp. 72–81. <https://doi.org/10.17513/use.38074>. (In Russian)
9. Hu S., Goddu S.R., Herb C., Appel E., Gleixner G., Wang S., Yang X., Zhu X. Climate variability and its magnetic response recorded in a lacustrine sequence in Heqing basin at the SE Tibetan Plateau since 900 ka. *Geophys. J. Int.*, 2015, vol. 201, no. 1, pp. 444–458. <https://doi.org/10.1093/gji/ggv033>.
10. Yudovich Ya.E., Ketris M.P. *Mineral'nye indikatory litogeneza* [Mineral Indicators of Lithogenesis]. Syktyvkar, Geoprint, 2008. 564 p. (In Russian)
11. Kuzina D.M., Yusupova A.R., Markov G.P., Nurgaliev D.K., Lemazina Yu.A., Vorob'ev V.V., Kadyrov R.I. Micrometeorites from Lake Turgoyak, South Ural, Russia. *Meteorit. Planet. Sci.*, 2018, vol. 53, no. S1, art. 6306, p. A156. <https://doi.org/10.1111/maps.13146>
12. Burov B.V., Yasonov P.G. *Vvedenie v differentsial'nyi termomagnitnyi analiz gornyykh porod* [Introduction to Differential Thermomagnetic Analysis of Rocks]. Kazan, Izd. Kazan. Univ., 1979. 159 p. (In Russian)
13. Dar'in A.V., Kalugin I.A. Climate reconstruction of the Altai Mountains inferred from the lithological and geochemical studies of Lake Teletskoye sediments. *Izv. Ross. Akad. Nauk. Ser. Geogr.*, 2012, no. 6, pp. 63–70. <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2012-6-63-70>. (In Russian)
14. Panin E.L., Panina E.A., Sharov A.S. Some aspects of the development of health resorts and tourism in the Altai region. *Ekonomika. Servis. Turizm. Kul'tura (ESTK-2003): sbornik statei V Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (Barnaul, 27–28 maya 2003 g.)* [Economy. Service. Tourism. Culture (ESTC-2003): Proc. V Int. Sci.-Pract. Conf. (Barnaul, May 27–28, 2003)]. Barnaul, Izd. Altai. Gos. Tekh. Univ., 2003, pp. 47–50. (In Russian)
15. Borisov A.S. Technological support system for paleomagnetic studies of bottom sediments in modern lakes. *Extended Abstract of Doct. Geol.-Mineral. Sci. Diss.* Kazan, 2004. 46 p. (In Russian)
16. Burov B.V., Nurgaliev D.K., Yasonov P.G. *Paleomagnitnyi analiz* [Paleomagnetic Analysis]. Kazan, Izd. Kazan. Univ., 1986. 167 p. (In Russian)
17. Nurgaliev D.K., Yasonov P.G. Coercivity spectrometer. Utility Model Patent no. 81805. *FIPS Byull.*, no. 9, 2009. (In Russian)
18. Jasonov P.G., Nurgaliev D.K., Burov B.V., Heller F. A modernized coercivity spectrometer. *Geol. Carpathica*, 1998. vol. 49, no. 3, pp. 224–225.
19. 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 paleo-environmental reconstruction. *ARN J. Earth Sci.*, 2015, vol. 4, no. 1, pp. 1–6.
20. Day R., Fuller M., Schmidt V.A. Hysteresis properties of titanomagnetites: Grain-size and compositional dependence. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 1977, vol. 13, no. 4, pp. 260–267. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(77\)90108-X](https://doi.org/10.1016/0031-9201(77)90108-X).
21. Dunlop D.J. Theory and application of the Day plot (M_{rs}/M_s versus H_{cr}/H_c) 1. Theoretical curves and tests using titanomagnetite data. *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 2002, vol. 107, no. B3, pp. EPM 4-1–EPM 4-22. <https://doi.org/10.1029/2001JB000486>.
22. Litvinova T.P., Timofeeva I.K., Kudryavtsev I.V. Report on the object “Advanced Geophysical Tools for State GeolMap-1000/3”. Book 17 (M-44). St. Petersburg, VSEGEI, RGF, 2012. (In Russian)
23. Glukhov M.S. Magnetic microspherules: Morphology, composition, and principles of classification. *Cand. Geol.-Mineral. Sci. Diss.* Kazan, 2022. 202 p. (In Russian)
24. Kuzina D.M. Cosmic matter in sediments and sedimentary rocks: Diagnostic methods and their use for solving geological problems. *Cand. Geol.-Mineral. Sci. Diss.* Kazan, 2019. 183 p. (In Russian)

25. Subetto D.A., Leont'ev P.A., Serykh L.S., Andronikov A.V., Nazarova L.B., Kublitskii U.A. Ab-rupt/catastrophic natural and climatic changes and phenomena at the boundary of the Late Neopleistocene and Holocene in Northwest Russia. *O-vo. Sreda. Razvit.*, 2016, no. 2, pp. 87–96. (In Russian)
26. Jelinowska A., Tucholka P., Wieckowski K. Magnetic properties of sediments in a Polish lake: Evidence of a relation between the rock-magnetic record and environmental changes in Late Pleistocene and Holocene sediments. *Geophys. J. Int.*, 1997, vol. 129, no. 3, pp. 727–736. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1997.tb04508.x>.

⟨ **Для цитирования:** Юсупова А.Р., Нурғалиева Н.Г., Кузина Д.М., Сотникова В.Ф., Муликова Д.И. Предварительные магнитно-минералогические исследования донных отложений озера Белое (Южная Сибирь, Россия) // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. 2023. Т. 165, кн. 4. С. 620–632. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2023.4.620-632>. ⟩

⟨ **For citation:** Yusupova A.R., Nurgalieva N.G., Kuzina D.M., Sotnikova V.F., Mulikova D.I. Preliminary magnetic mineralogical studies of Lake Beloe sediments (Southern Siberia, Russia). *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennyye Nauki*, 2023, vol. 165, no. 4, pp. 620–632. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2023.4.620-632>. (In Russian) ⟩