

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 556.55+551.89+551.583.7

doi: 10.26907/2542-064X.2023.4.563-576

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ МАГНИТНО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕОПЛЕЙСТОЦЕН-ГОЛОЦЕНОВЫХ ОСАДКОВ ОЗЕРА ТУРГОЯК

*Л.Р. Косарева¹, Н.Г. Нурғалиева¹, Д.К. Нурғалиев¹, Х.-Ч. Ли²,
П.С. Крылов¹, Д.М. Кузина¹, В.В. Антоненко¹*

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, 420008, Россия

²Национальный университет Тайваня, г. Тайбэй, 106, Тайвань

Аннотация

В статье приведены некоторые результаты сейсмоакустического профилирования бассейна и исследования магнитных свойств донных отложений озера Тургояк (Южный Урал). Толща озерных осадков в восточных впадинах достигает 8 м. Радиоуглеродное датирование образцов позволяет говорить о возрасте озера, составляющем не менее 25 тыс. лет. По данным сейсмоакустики нижняя часть разреза, представленная плотными осадками неоплейстоцена, накапливалась при более низком уровне воды. Голоценовые осадки представлены толщей слабоконсолидированных илов мощностью до 4 м. Показано, что магнитные свойства осадков характеризуют условия окружающей среды и колебания уровня озера. Скалярные магнитные величины в осадках показывают высокоамплитудные вариации, отражающие частую смену условий осадконакопления. Осадки с самыми высокими значениями магнитной восприимчивости (χ), естественной остаточной намагниченности (NRM), коэрцитивной силы намагниченности насыщения за вычетом влияния парамагнитной компоненты (B_c), коэрцитивной силы остаточной намагниченности насыщения (B_{cr}), намагниченности насыщения за вычетом парамагнитной компоненты (M_s), нормальной остаточной намагниченности насыщения (M_n) вероятно формировались в периоды ледового переноса осадочного материала со значительным участием эолового агента.

Ключевые слова: озерные отложения, радиоуглеродное датирование, палеолимнология, сейсмоакустическое профилирование, петромагнитные параметры, коэрцитивная спектроскопия, терромагнитный анализ.

Введение

В настоящее время изучение магнитно-минералогической составляющей донных отложений озер все чаще рассматривается как один из существенных этапов реконструкции условий озерного осадконакопления. Зерна магнитных минералов являются важной частью вещественного состава осадочных образований. Состав магнитной фракции обуславливает изменения петромагнитных параметров. Ее аллохтонная компонента привносится с территории водосборного бассейна и представлена твердой и растворенной фазой ледового и речного стока, эоловым и космогенным материалом, антропогенным веществом, автохтонная – представлена материалом, образованным в результате абразии берегов и дна водоема, гидрохимических и гидробиологических процессов [1].

Озеро Тургояк, являющееся жемчужиной Южного Урала, представляет большой научный интерес для изучения изменений климата региона и планеты. Несмотря на то, что современные озера являются ценными источниками информации об изменениях окружающей среды в течение последних тысячелетий, озеро Тургояк изучено недостаточно. Следует отметить работы, посвященные общим представлениям об истории формирования, развитии и геоморфологических особенностях озера [2, 3]. Строение осадочной толщи в северо-западной части озера, некоторые особенности вещественного состава, результаты диатомового изучения голоценовых отложений приведены в статье [4].

Целью исследования явилась предварительная характеристика магнитно-минералогических и генетических особенностей донных отложений озера Тургояк.

1. Объект исследований

Озеро Тургояк ($55^{\circ}09'40''$ с. ш., $60^{\circ}04'00''$ в. д.) является памятником природы Челябинской области. Его по праву называют «младшим братом Байкала» за прозрачность и чистоту воды. Котловина озера тектонического происхождения, расположена на восточном склоне Южного Урала и приурочена к межгорному прогибу, образованному хребтами Большого Таганая и Ильменских гор (рис. 1). Высота над уровнем моря составляет 320 м.

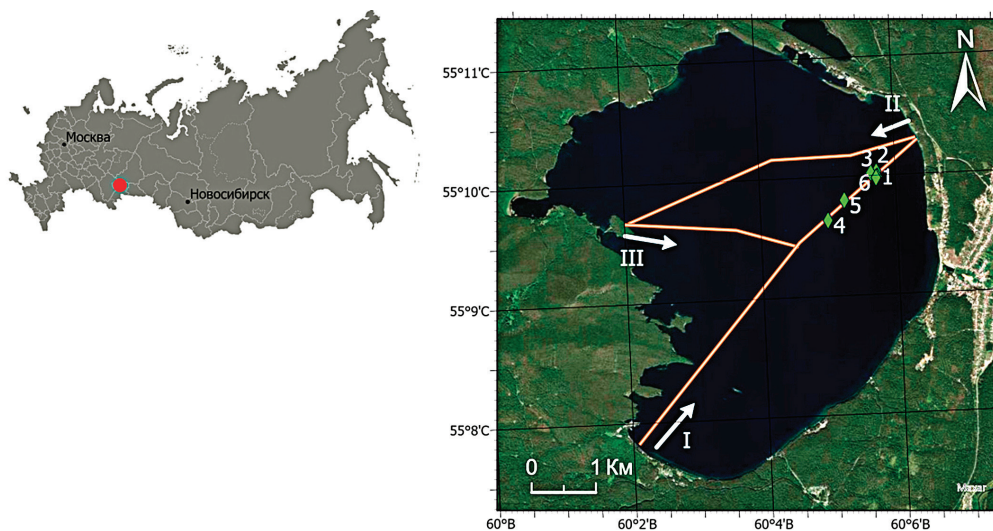


Рис. 1. Карта озера Тургояк. Расположение сейсмоакустических профилей указано римскими цифрами, места отбора керновых колонок – зелеными точками

Основные параметры озера Тургояк: площадь водной поверхности – 26.4 км^2 , длина – 6.9 км, наибольшая ширина – 6.3 км, средняя глубина – 19.1 м, максимальная глубина – 32 м. Озеро проточное, его гидрографическая сеть развита слабо. Площадь водосбора составляет 476 км^2 [5]. Питание озера в основном обеспечивают грунтовые воды, реки и ручьи. Озеро относится к олиготрофным. Вода пресная, гидрокарбонатного класса сульфатно-натриевого (II) типа группы кальция (по О.А. Алекину). Минерализация воды за послед-

ние 100 лет увеличивается и составляет 138 мг/л, прозрачность варьирует от 8 до 10.2 м [6].

2. Материалы и методы исследования

В 2017 г. в рамках научно-исследовательской экспедиции сотрудников Казанского федерального университета (КФУ) на основе предварительных сейсмоакустических данных были отобраны 6 керновых колонок донных отложений озера Тургойак. Сейсмоакустическое профилирование было проведено с использованием специализированного комплекса спроектированного и изготовленного на базе КФУ по трем профилям, пересекающим центральную часть озера (см. рис. 1). Анализ временных разрезов позволил определить наилучшие места для проведения отбора керна, обусловленные наличием стратифицированного осадка достаточной мощности без видимых нарушений сплошности и отсутствием газопроявлений [7].

При отборе керновых колонок использовали уникальный поршневого гидравлический донный пробоотборник, спроектированный и изготовленный в КФУ [8] и аналогичный по устройству отборнику [9]. В полевом лагере сразу после доставки керна на берег производили послойный отбор проб с шагом 2 см в немагнитные кубические пластиковые контейнеры для палеомагнитных исследований и маркированные zip-пакеты для лабораторных исследований. Хранение палеомагнитных образцов обеспечивали пермаллоевые экраны.

Магнитно-минералогический анализ проводился в Лаборатории палеоэкологии, палеоклиматологии, палеомагнетизма КФУ по образцам колонки № 5 (55° 02' 45.5" с. ш., 60° 18' 40.9" в. д. глубина воды – 31 м). Длина колонки составила 5.72 м (283 образца). Нижняя часть керна литологически представлена переслаиванием серых и зеленовато-серых глинистых и песчаных консолидированных алевритов с включениями галечного материала. Выше по разрезу осадок становится более светлым, переходя в зеленовато-серый консолидированный алеврит с включениями остатков растительности. Верхняя часть разреза представлена темным зеленовато-коричневым слабоконсолидированным осадком со значительным содержанием органического вещества.

Исследования содержания ^{14}C в образцах проводили на факультете наук о Земле Национального университета Тайваня (NTUAMS Lab) с использованием ускорительного масс-спектрометра 1.0 MV Tandetron (HVE, Нидерланды). Для калибровки возраста образцов применялась программа OxCal v4.2.4 Bronk Ramsey (2013) и калибровочная кривая IntCal 20.

По всем образцам колонки проводили измерения магнитной восприимчивости (χ) с использованием Каррабридж MFK-FA (AGICO, Чехия). Для получения спектров нормального намагничивания до полей 1.5 Тл использовали коэрцитивный спектрометр J_Meter [10, 11], позволяющий регистрировать отдельно остаточную и индуктивную намагниченности образцов при комнатной температуре. По кривым нормального намагничивания были определены следующие параметры [12, 13]: M_{rs} , M_s , M_p , B_c , B_{cr} , а также диа-/парамагнитная, ферромагнитная и суперпарамагнитная компоненты магнитной восприимчивости (χ_p , χ_f , χ_{sp}) [14].

Величину естественной остаточной намагниченности (*NRM*) измеряли на SQUID-магнитометре (2G Enterprise, США) в Палеомагнитном центре Новосибирского государственного университета (г. Новосибирск).

Для проведения термомагнитных исследований образцы отбирали равномерно по колонке с шагом 20 см. При помощи экспрессных весов Кюри [15] измеряли зависимость индуктивной намагниченности в поле до 0.2 Тл от температуры при скорости нагрева 100 °С/мин до температуры 800 °С.

3. Результаты и их обсуждение

В результате проведения сейсмоакустического профилирования были получены временные разрезы, анализ которых позволил выявить особенности строения озерной котловины и сложную картину морфологии дна (рис. 2) [7]. Следует отметить выходы коренных пород в водную толщу. В восточной части озера наблюдаются впадины с наибольшей мощностью осадочной толщи, достигающей 8 м (рис. 2, б). Нижняя часть разреза представлена плотными отложениями, приуроченными к самой глубокой части озера. Поскольку эти осадки не наблюдаются в менее глубоких впадинах, можно предположить, что седиментация происходила при значительно более низком уровне воды. Интенсивное акустическое отражение, вероятно связанное с перерывом в осадконакоплении, обусловленном климатическими колебаниями, отделяет плотную осадочную толщу и верхнюю часть разреза, представленную слабоконсолидированным алевритом мощностью до 4 м [7].

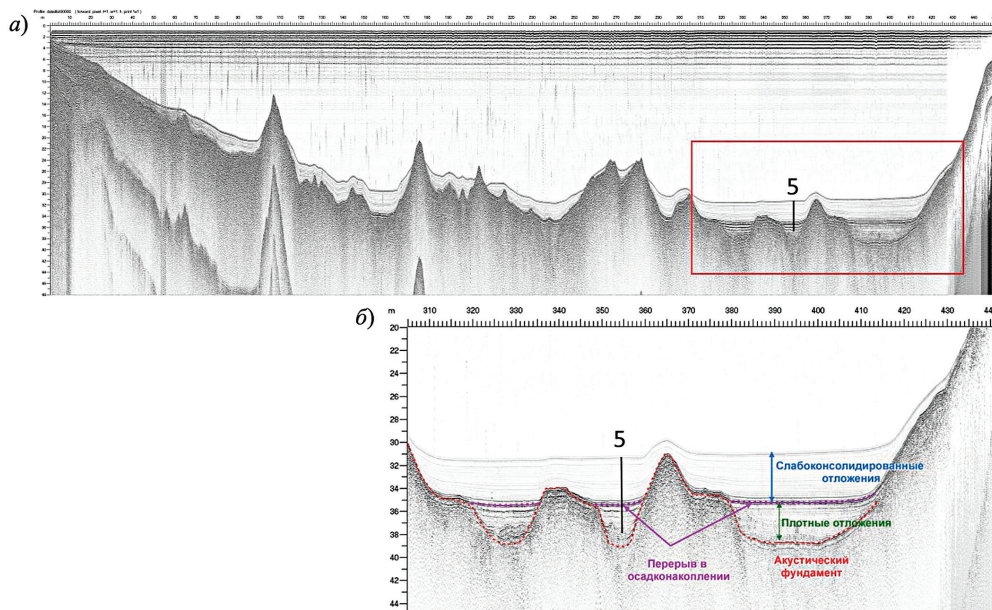


Рис. 2. Временные разрезы сейсмоакустического профилирования озера Тургойак: а) профиль 1; б) фрагмент профиля 1 [7]. Оцифровка горизонтального масштаба соответствует пикетам профиля, по вертикали отложена глубина в метрах относительно зеркала воды. Цифрой 5 отображено место отбора керновой колонки

Результаты радиоуглеродного датирования (табл. 1) позволяют говорить о том, что толща озерных осадков стратиграфически относится к неоплейстоцену и голоцену.

Табл. 1

Результаты радиоуглеродного датирования донных отложений озера Тургойак, колонка № 5

№	Глубина отбора пробы, см	Лаб. номер определения	Материал	Калиброванный возраст, к. л. н.
1	1114	NTUAMS-6885-2s	Осадок	1040 ± 145
2	1162	NTUAMS-6886-1	Осадок	5065 ± 235
3	1218	NTUAMS-4328	Осадок	6620 ± 185
4	1241	NTUAMS-6887-1	Осадок	9895 ± 295
5	1272	NTUAMS-4327	Растительность	27390 ± 290
6	1312	NTUAMS-4326	Растительность	20485 ± 380
7	1329	NTUAMS-6888dd+es	Осадок	25410 ± 460
8	1376	NTUAMS-6889s	Осадок	25655 ± 275

Вариации петромагнитных и гистерезисных параметров, а также их соотношений представлены на основе климатической стадийности по схеме Блитта-Сернандера [16–19] на рис. 3 и 4. Неоплейстоцен и голоцен существенно различаются по характеру вариаций и значениям ряда магнитных параметров (табл. 2).

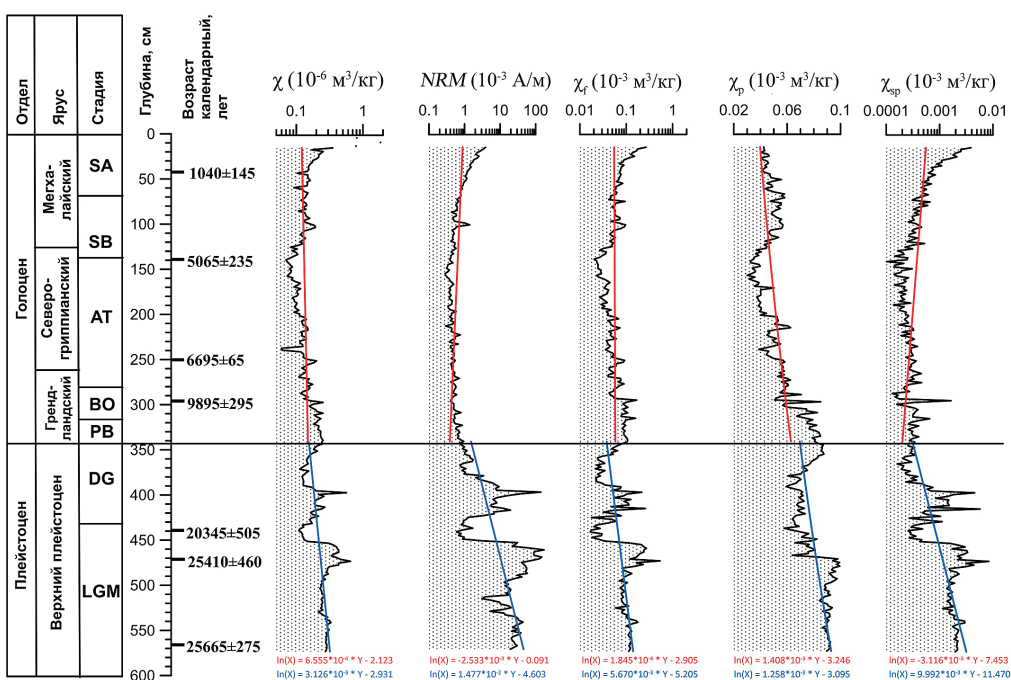


Рис. 3. Вариации значений петромагнитных параметров в осадках озера Тургойак, колонка № 5. Климатические стадии по [16–19]: LGM – максимум последнего оледенения, DG – дегляциация, включающая в себя ранний, средний, поздний дриас, аллерёдское и бёллингское потепление, PB – пребореальная, BO – бореальная, AT – атлантическая, SB – суббореальная, SA – субатлантическая стадии. Красным и синим цветом обозначены линии тренда и ниже уравнения регрессии для голоцена и плейстоцена соответственно

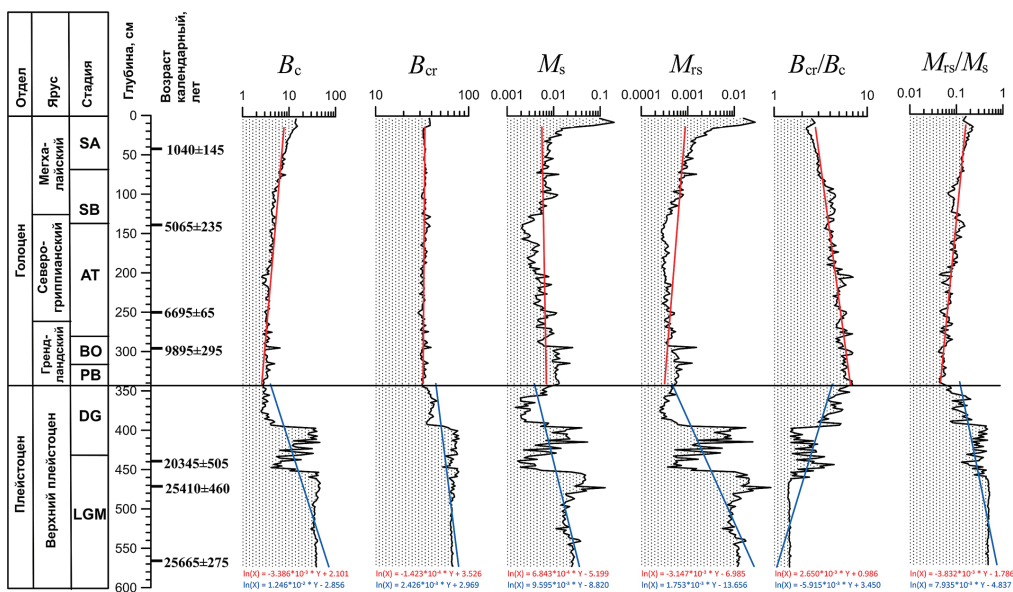


Рис. 4. Вариации значений гистерезисных магнитных параметров в осадках озера Тургой, колонка № 5. Сокращения и обозначения – см. рис. 3

Табл. 2

Статистические характеристики петромагнитных параметров донных отложений озера Тургой, колонка № 5 (\bar{X} – среднее арифметическое, σ – стандартное отклонение выборки)

Магнитный параметр	Неоплейстоцен			Голоцен		
	Диапазон	\bar{X}	σ	Диапазон	\bar{X}	σ
χ (10^{-6} м ³ /кг)	0.11–0.65	0.24	0.09	0.06–0.35	0.14	0.05
NRM (10^{-3} А/м)	0.597–171.600	22.986	31.372	0.285–3.901	0.686	0.526
χ_f (10^{-3} м ³ /кг)	0.017–0.534	0.095	0.072	0.020–0.266	0.063	0.033
χ_p (10^{-3} м ³ /кг)	0.058–0.099	0.081	0.011	0.030–0.087	0.052	0.014
χ_{sp} (10^{-3} м ³ /кг)	0.0002–0.0084	0.0015	0.0012	0.0001–0.0039	0.0004	0.0005
B_c	5.86–51.78	34.82	15.07	4.39–15.45	8.05	2.52
B_{cr}	35.2–78.9	61.7	11.97	28.6–39.4	33.2	1.7
M_s	0.0015–0.1279	0.0185	0.0168	0.0020–0.0278	0.0071	0.0040
M_{rs}	0.0003–0.0610	0.0081	0.0081	0.0003–0.0057	0.0007	0.0006
B_{cr}/B_c	1.40–6.46	2.28	1.24	2.22–7.04	4.47	1.17
M_{rs}/M_s	0.062–0.518	0.363	0.150	0.041–0.229	0.092	0.041

Такие вариации магнитных показателей являются характерными для рубежа неоплейстоцен – голоцен, обусловленного знаменательной климатической перестройкой от существенно холодного климата плейстоцена до теплого и влажного климата голоцена [20]. Повышенные значения магнитной восприимчивости и других магнитно-минералогических показателей в плейстоцене объясняются существенной ролью ледового и эолового переноса обломочного материала, вероятным участием космогенных частиц, а также образованием автохтонных сульфидов железа, в том числе и биогенных [21–23].

Соотношение гистерезисных параметров представлено на диаграмме Дзя-Данлопа [24, 25] на рис. 5. Ансамбль ферромагнитных зерен неоднороден, и обусловлен различными причинами изменения магнитных свойств. Следует отметить, наличие в осадке смеси однодоменных (ОД) зерен магнетита и грейгита, многодоменных (МД) и суперпарамагнитных (СП) частиц. Данные нижней части разреза, представленной плотными отложениями максимума последнего оледенения и частично осадками стадий дегляциации, достаточно хорошо соответствуют теоретической линии смешения однодоменного грейгита и магнетита (на рис. 5 – синий овал). Голоценовые слабоконсолидированные осадки характеризуются высоким содержанием многодоменной фракции (50–95%), наличием ОД частиц магнетита и грейгита, со значительным влиянием суперпарамагнетизма. Здесь из общей картины выделяются образцы верхней части разреза (осадки последнего тысячелетия, на рис. 5 – сиреневый овал) с более высокими содержаниями однодоменного магнетита по сравнению с нижележащими голоценовыми осадками.

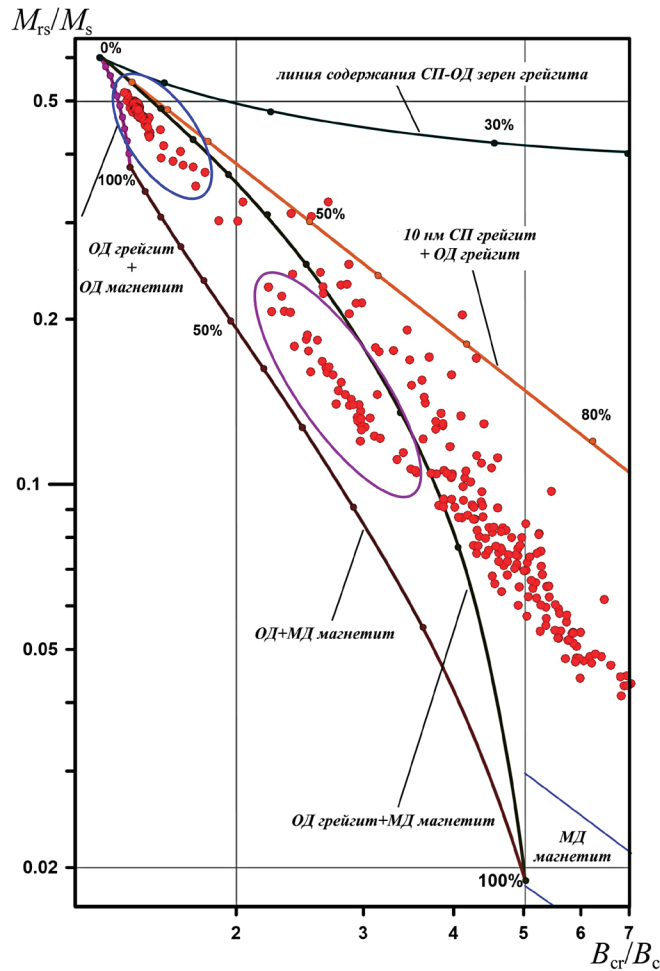


Рис. 5. Диаграмма Дзя-Данлопа [24, 25] для образцов озера Тургояк, включая теоретические линии концентраций (согласно [24]) для смесей грейгита и магнетита с различными размерами зерен. Численные значения для расчета линий смешения для магнетита и грейгита взяты из работ [26–28]

Согласно данным дифференциального термомагнитного анализа почти во всех образцах обнаруживается пирит по росту намагниченности в районе 450 °С и последующему спаду при приближении к температуре Кюри магнетита (рис. 6). Для этих образцов характерен рост намагниченности после первого прогрева из-за новообразованного магнетита. Также на второй кривой все еще наблюдается присутствие пирита, поскольку при первом нагреве он не полностью диссоциирует. Ближе к отметке 4 м вид кривых дифференциального термомагнитного анализа значительно изменяется, роста намагниченности после первого нагрева не наблюдается.

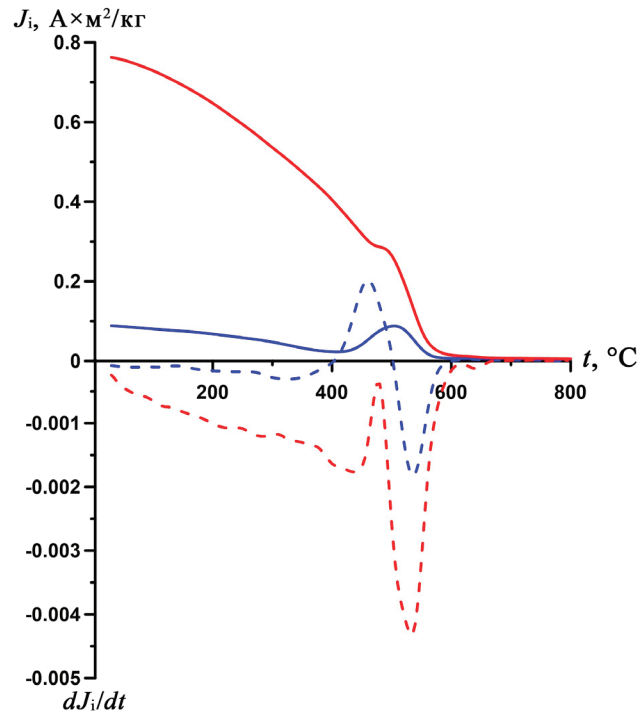


Рис. 6. Диаграмма дифференциального термомагнитного анализа для образца 1291, взятого на глубине 396 см. Сплошные линии – интегральные кривые, пунктир – дифференциальные. Синим цветом обозначен первый нагрев, красным – второй

Заключение

Сейсмоакустические исследования позволили выявить сложное строение озерной котловины, в разной степени заполненной стратифицированными осадками мощностью до 8 м. Акустическая граница разделяет плотный осадок от верхней толщи неконсолидированных алевритов мощностью порядка 4 м. Согласно радиометрическому датированию, возраст озера составляет не менее 25 тыс. лет.

Вариации значений магнитных параметров (магнитной восприимчивости, *NRM*, гистерезисных характеристик) указывают на их важную роль в литостратиграфическом отношении при маркировании неоплейстоцена и голоцена, отличавшихся климатическими условиями и структурой агентов переноса обломочного материала, а также соотношением автохтонного и аллохтонного вещества в осадочной озерной системе. Примечательным фактом является доминирующее присутствие ОД магнитных зерен в отложениях неоплейстоцена.

Благодарности. Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания проект № FZSM-2023-0023 в сфере научной деятельности.

Литература

1. *Страховенко В.Д., Белкина Н.А., Ефременко Н.А., Потахин М.С., Субетто Д.А., Фролова Л.А., Нигаматзянова Г.Р., Лудикова А.В., Овдина Е.А.* Первые данные по минералогии и геохимии взвеси Онежского озера // Геология и геофизика. 2022. Т. 63, № 1. С. 68–86. <https://doi.org/10.15372/GiG2020198>.
2. *Рогозин А.Г., Такачев В.А.* О некоторых гидрологических особенностях озера Тургояк // Известия Челябинского научного центра. 1998. № 1. С. 70–75.
3. *Дьянова О.П., Дерягин В.В.* Литолого-геоморфологические особенности побережий некоторых озер Южного Урала и Зауралья // Вестник МГОУ. Серия: Естественные науки. 2010. № 2. С. 106–112.
4. *Масленникова А.В., Удачин В.Н., Дерягин В.В., Штенберг М.В.* Реконструкция этапа развития озера Тургояк (Южный Урал) в голоцене // Литосфера. 2018. Т. 18, № 6. С. 914–927. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2018-18-6-914-927>.
5. *Андреева М.А.* Озера Среднего и Южного Урала. Челябинск: Южно-Уральское книжное издательство, 1973. 272 с.
6. *Захаров С.Г.* Динамика экологического состояния озера Тургояк // Известия русского географического общества. 2020. Т. 152, № 1. С. 56–65. <https://doi.org/10.31857/S0869607120010085>.
7. *Крылов П.С.* Сейсмоакустика донных отложений современных озер как основа палеогеофизических и палеоклиматических реконструкций: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Казань, 2018. 24 с.
8. *Борисов А.С.* Система технологического обеспечения палеомагнитных исследований отложений современных озер: автореф. дис. ... докт. геол.-минерал. наук. Казань, 2004. 46 с.
9. *Mackereth F.J.H.* A portable core sampler for lake sediments // Limnol. Oceanogr. 1958. V. 3, No 2. P. 181–191. <https://doi.org/10.4319/lo.1958.3.2.0181>.
10. *Jasonov P.G., Nurgaliev D.K., Burov B.V., Heller F.* A modernized coercivity spectrometer // Geol. Carpathica. 1998. V. 49, No 3. P. 224–225.
11. *Нургалиев Д.К., Ясонов П.Г.* Коэрцитивный спектрометр. Патент РФ на полезную модель. № 81805. 2009. Бюл. ФИПС № 9.
12. *Шолто Л.Е.* Использование магнетизма горных пород для решения геологических задач. Л.: Недра, 1977. 182 с.
13. *Kruiver P.P., Dekkers M.J., Heslop D.* Quantification of magnetic coercivity components by the analysis of acquisition curves of isothermal remanent magnetisation // Earth Planet. Sci. Lett. 2001. V. 189, No 3–4. P. 269–276. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(01\)00367-3](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(01)00367-3).
14. *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.
15. *Буров Б.В., Нургалиев Д.К., Ясонов П.Г.* Палеомагнитный анализ. Казань: Издательство Казанского университета, 1986. 167 с.
16. *Blytt A.G.* Forsøg til en Theorie om Indvandringen af Norges Flora under vekslede regnfulde og tørre Tider // Nyt Mag. Naturvidensk. 1876. Bd. 21, H. 4. S.
17. *Blytt A.G.* Essay on the Immigration of the Norwegian Flora during the Alternating Rainy and Dry Period. Christiania: Alb. Cammermayer, 1876. 89 p.

18. *Sernander R.* Studier öfver den Gótländska vegetationens utvecklingshistora: Akad. afh. Uppsala: Nya Tidnings Aktie-Bolags Tr., 1894. 112 s.
19. *Ravazzi C.* An overview of the Quaternary continental stratigraphic units based on biological and climatic events in Italy // *II Quaternario. Ital. J. Quat. Sci.* 2003. V. 16, No 1. P. 11–18.
20. *Крайнов М.А., Безрукова Е.В., Кербер Е.В., Левина О.В., Иванов Е.В., Щетников А.А., Филинов И.А.* Первые результаты исследования донных отложений озера Баунт (Северное Забайкалье) // *Геология и геофизика.* 2017. Т. 58, № 11. С. 1764–1776. <https://doi.org/10.15372/GiG20171110>.
21. *Steffensen J.P.* The size distribution of microparticles from selected segments of the Greenland Ice Core Project ice core representing different climatic periods // *J. Geophys. Res.: Oceans.* 1997. V. 102, No C12. P. 26755–26763. <https://doi.org/10.1029/97JC01490>.
22. *Simonsen M.F., Baccolo G., Blunier T., Borunda A., Delmonte B., Frei R., Goldstein S., Grinsted A., Kjær H.A., Sowers T., Svensson A., Vinther B., Vladimirova D., Winckler G., Winstrup M., Vallelonga P.* East Greenland ice core dust record reveals timing of Greenland ice sheet advance and retreat // *Nat. Commun.* 2019. V. 10, No 1. Art. 4494. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12546-2>.
23. *Субетто Д.А.* Донные отложения озер. Палеолимнологические реконструкции. СПб.: Издательство РГПУ имени А.И. Герцена, 2009. 343 с.
24. *Snowball I.F.* Magnetic hysteresis properties of greigite (Fe_3S_4) and a new occurrence in Holocene sediments from Swedish Lapland // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1991. V. 68, No 1–2. P. 32–40. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(91\)90004-2](https://doi.org/10.1016/0031-9201(91)90004-2).
25. *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).
26. *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>.
27. *Chang L., Roberts A.P., Tang Y., Rainford B.D., Muxworthy A.R., Chen Q.* Fundamental magnetic parameters from pure synthetic greigite (Fe_3S_4) // *J. Geophys. Res.: Solid Earth.* 2008. V. 113, No B6. Art. B06104. <https://doi.org/10.1029/2007JB005502>.
28. *Dekkers M.J., Schoonen M.A.A.* Magnetic properties of hydrothermally synthesized greigite (Fe_3S_4)—I. Rock magnetic parameters at room temperature // *Geophys. J. Int.* 1996. V. 126, No 2. P. 360–368. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1996.tb05296.x>.

Поступила в редакцию 25.10.2023

Принята к публикации 30.11.2023

Косарева Лина Раисовна, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник НИЦ «Цифровая Земля» Института геологии и нефтегазовых технологий

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

Нурғалиева 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

Нурғалиев Данис Карлович, доктор геолого-минералогических наук, профессор, директор Института геологии и нефтегазовых технологий

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

Хун-Чун Ли, доктор философии в области геологии, профессор, заведующий лабораторией радиоуглеродного датирования с применением ускорительной масс-спектрометрии (NTUAMS Lab), факультет наук о земле

Национальный университет Тайваня
Рузвельт роуд, 1, Секция 4, г. Тайбэй, 106, Тайвань
E-mail: *hcli1960@ntu.edu.tw*

Крылов Павел Сергеевич, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник НИЛ изучения бассейнов нефтегазонакоплений Института геологии и нефтегазовых технологий

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

Антоненко Вадим Вячеславович, младший научный сотрудник НИЛ изучения бассейнов нефтегазонакоплений Института геологии и нефтегазовых технологий

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

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. 563–576

ORIGINAL ARTICLE

doi: 10.26907/2542-064X.2023.4.563-576

Preliminary Magnetic Mineralogical Studies of the Neopleistocene-Holocene Sediments from Lake Turgoyak

L.R. Kosareva^{a}, N.G. Nurgalieva^{a**}, D.K. Nurgaliev^{a***}, H.-C. Li^{b****}, P.S. Krylov^{a*****},
D.M. Kuzina^{a*****}, V.V. Antonenko^{a*****}*

^aKazan Federal University, Kazan, 420008 Russia

^bNational Taiwan University, Taipei, 106 Taiwan

E-mail: **lina.kosareva@mail.ru, **nouria.nourgalieva@kpfu.ru, ***Danis.Nourgaliev@kpfu.ru, ****hcli1960@ntu.edu.tw, *****pskrylov@kpfu.ru, *****di.kuzina@gmail.com, *****stay_uzeless@mail.ru*

Received October 25, 2023; Accepted November 30, 2023

Abstract

This article reports on some preliminary findings of a study on the seismoacoustic profiling of the basin of Lake Turgoyak (Southern Urals) and the magnetic properties of its bottom sediments. In the eastern depressions, the lake sediments are up to 8 m thick. The radiocarbon dating of the sedi-

ment samples suggests that the lake is at least 25 000 years old. The seismoacoustic data reveal that the lower part of the section, which is composed of the dense Neopleistocene sediments, accumulated when the water level was lower. The Holocene sediments are poorly consolidated silts up to 4 m thick. The magnetic properties of the sediments were found to be indicative of the environmental conditions and fluctuations in the lake level. The high-amplitude variations in the scalar magnetic values of the sediments point to frequent changes in the sedimentation conditions. The sediments with the highest magnetic susceptibility (χ), natural remanent magnetization (NRM), coercive force (B_c), coercivity of remanence (B_{cr}), saturation magnetization (M_s), and magnetization remanence (M_{rs}) are likely to have formed during the periods when sedimentary material was transported by ice, often with a significant influence from wind.

Keywords: lake sediments, radiocarbon dating, paleolimnology, seismoacoustic profiling, petromagnetic properties, coercive spectroscopy, thermomagnetic analysis

Acknowledgements. This study was supported by the subsidy allocated to Kazan Federal University for the state assignment in the sphere of scientific activities (project no. FZSM-2023-0023).

Figure Captions

- Fig. 1. Map of Lake Turgoyak. The seismoacoustic profiles are indicated with Roman numbers, the coring sites marked by green dots.
- Fig. 2. Time depth of the seismoacoustic profile of Lake Turgoyak: *a*) profile 1; *b*) the fragment of profile 1 [7]. Digitization of the horizontal scale corresponds to the profile stations; the vertical scale shows the depth in meters relative to the water surface. Coring sites are marked with 5.
- Fig. 3. Variations of the magnetic parameters in the sediments of Lake Turgoyak, core sample 5. Climatic stages given according to [16–19]: LGM – Last Glacial Maximum, DG – Deglaciation, including the Early, Middle, and Younger Dryas, as well as the Allerød-Bølling warm period, PB – Preboreal, BO – Boreal, AT – Atlantic, SB – Subboreal, SA – Subatlantic. The trend lines for the Holocene and Pleistocene are indicated in red and blue, respectively; the regression equations are shown below in the corresponding colors.
- Fig. 4. Variations of the hysteresis magnetic parameters of the sediments of Lake Turgoyak. See Fig. 3 for abbreviations and designations.
- Fig. 5. Day-Dunlop plot [24, 25] for the samples from Lake Turgoyak, including the theoretical mixing lines (according to [24]) of greigite and magnetite mixtures with different grain sizes. Numerical values for calculations of the magnetite and greigite mixing lines taken from [25–27].
- Fig. 6. Differential thermomagnetic analysis diagram for sample 1291 collected from a depth of 396 cm. Solid lines are integral curves, dashed lines are differential curves. Blue and red colors indicate the first and second heating, respectively.

References

1. Strakhovenko V.D., Belkina N.A., Efremenko N.A., Potakhin M.S., Subetto D.A., Frolova L.A., Nigamatzyanova G.R., Ludikova A.V., Ovdina E.A. The first data on the mineralogy and geochemistry of the suspension of Lake Onego. *Russ. Geol. Geophys.*, 2022, vol. 63, no. 1, pp. 55–71. <https://doi.org/10.2113/RGG20204280>.
2. Rogozin A.G., Takachev V.A. On some hydrological features of Lake Turgoyak. *Izv. Chelyab. Nauchn. Tsentra*, 1998, no. 1, pp. 70–75. (In Russian)
3. Diyanova O.P., Deryagin V.V. Lithologic and geomorphological characteristics of some lakes in the Southern Urals and Trans-Urals. *Vestn. MGOU. Ser.: Estestv. Nauki*, 2010, no. 2, pp. 106–112. (In Russian)
4. Maslennikova A.V., Udachin V.N., Deryagin V.V., Shtenberg M.V. Reconstruction of Turgoyak Lake (the Southern Urals) ecosystem changes in Holocene. *Litosfera*, 2018, vol. 18, no. 6, pp. 914–927. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2018-18-6-914-927>. (In Russian)

5. Andreeva M.A. *Ozera Srednego i Yuzhnogo Urala* [Lakes of the Middle and Southern Urals]. Chelyabinsk, Yuzhno-Ural. Kn. Izd., 1973. 272 p. (In Russian)
6. Zakharov S.G. Dynamics of the environmental status of Lake Turgoyak. *Izv. Russ. Geogr. O-va.*, 2020, vol. 152, no. 1, pp. 56–65. <https://doi.org/10.31857/S0869607120010085>. (In Russian)
7. Krylov P.S. Seismoacoustics of the bottom sediments of modern lakes as a basis for paleogeophysical and paleoclimatic reconstructions. *Extended Abstract of Cand. Geol-Mineral. Sci.* Kazan, 2018. 24 p. (In Russian)
8. Borisov A.S. An engineering support system for the paleomagnetic investigations of modern lake sediments. *Extended Abstract of Doct. Geol-Mineral. Sci.* Kazan, 2004. 46 p. (In Russian)
9. Mackereth F.J.H. A portable core sampler for lake sediments. *Limnol. Oceanogr.*, 1958, vol. 3, no. 2, pp. 181–191. <https://doi.org/10.4319/lo.1958.3.2.0181>.
10. 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.
11. Nurgaliev D.K., Yasonov P.G. Coercivity spectrometer. Utility Model Patent no. 81805. *FIPS Byull.*, no. 9, 2009. (In Russian)
12. Sholpo L.E. *Ispol'zovanie magnetizma gornyx porod dlya resheniya geologicheskikh zadach* [The Use of Rock Magnetism for Solving Geological Problems]. Leningrad, Nedra, 1977. 182 p. (In Russian)
13. Kruiver P.P., Dekkers M.J., Heslop D. Quantification of magnetic coercivity components by the analysis of acquisition curves of isothermal remanent magnetization. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2001, vol. 189, nos. 3–4, pp. 269–276. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(01\)00367-3](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(01)00367-3).
14. 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. *ARPJ. Earth Sci.*, 2015, vol. 4, no. 1, pp. 1–6.
15. Burov B.V., Nurgaliev D.K., Yasonov P.G. *Paleomagnetnyi analiz* [Paleomagnetic Analysis]. Kazan, Izd. Kazan. Univ., 1986. 167 p. (In Russian)
16. Blytt A.G. Forsøg til en Theorie om Indvandringen af Norges Flora under vekslede regnfulde og tørre Tider. *Nyt Mag. Naturvidensk.*, 1876, Bd. 21, H. 4, S. 279–362. (In Danish)
17. Blytt A.G. *Essay on the Immigration of the Norwegian Flora during Alternating Rainy and Dry Periods*. Christiania, Alb. Cammermayer, 1876. 89 p.
18. Sernander R. *Studier öfver den Götländska vegetationens utvecklingshistora: Akad. afh.* Uppsala, Nya Tidnings Aktie-Bolags Tr., 1894. 112 s. (In Swedish)
19. Ravazzi C. An overview of the Quaternary continental stratigraphic units based on biological and climatic events in Italy. *Il Quaternario. Ital. J. Quat. Sci.* 2003, vol. 16, no. 1, pp. 11–18.
20. Krainov M.A., Bezrukova E.V., Kerber E.V., Levina O.V., Ivanov E.V., Shchetnikov A.A., Filinov I.A. First results of study of Lake Baunt bottom sediments (northern Transbaikalia). *Russ. Geol. Geophys.*, 2017, vol. 58, no. 11, pp. 1401–1411. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2017.02.005>.
21. Steffensen J.P. The size distribution of microparticles from selected segments of the Greenland Ice Core Project ice core representing different climatic periods. *J. Geophys. Res.: Oceans*, 1997, vol. 102, no. C12, pp. 26755–26763. <https://doi.org/10.1029/97JC01490>.
22. Simonsen M.F., Baccolo G., Blunier T., Borunda A., Delmonte B., Frei R., Goldstein S., Grinsted A., Kjär H.A., Sowers T., Svensson A., Vinther B., Vladimirova D., Winckler G., Winstrup M., Vallelonga P. East Greenland ice core dust record reveals timing of Greenland ice sheet advance and retreat. *Nat. Commun.*, 2019, vol. 10, no. 1, art. 4494. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12546-2>.
23. Subetto D.A. *Donnye otlozheniya ozer: paleolimnologicheskie rekonstruktsii* [Lake Sediments. Paleolimnological Reconstructions]. St. Petersburg, Izd. RGPU im. A.I. Gertsena, 2009. 343 p. (In Russian)

24. Snowball I.F. Magnetic hysteresis properties of greigite (Fe_3S_4) and a new occurrence in Holocene sediments from Swedish Lappland. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 1991, vol. 68, nos. 1–2, pp. 32–40. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(91\)90004-2](https://doi.org/10.1016/0031-9201(91)90004-2).
25. 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).
26. 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>.
27. Chang L., Roberts A.P., Tang Y., Rainford B.D., Muxworthy A.R., Chen Q. Fundamental magnetic parameters from pure synthetic greigite (Fe_3S_4). *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 2008, vol. 113, no. B6, art. B06104. <https://doi.org/10.1029/2007JB005502>.
28. Dekkers M.J., Schoonen M.A.A. Magnetic properties of hydrothermally synthesized greigite (Fe_3S_4)–I. Rock magnetic parameters at room temperature. *Geophys. J. Int.*, 1996, vol. 126, no. 2, pp. 360–368. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1996.tb05296.x>.

Для цитирования: Косарева Л.Р., Нурғалиева Н.Г., Нурғалиев Д.К., Ли Х.-Ч., Крылов П.С., Кузина Д.М., Антоненко В.В. Предварительные магнитно-минералогические исследования неоплейстоцен-голоценовых осадков озера Тургойак // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. 2023. Т. 165, кн. 4. С. 563–576. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2023.4.563-576>.

For citation: Kosareva L.R., Nurgalieva N.G., Nurgaliev D.K., Li H.-C., Krylov P.S., Kuzina D.M., Antonenko V.V. Preliminary magnetic mineralogical studies of the Neopleistocene-Holocene sediments from Lake Turgoyak. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennyye Nauki*, 2023, vol. 165, no. 4, pp. 563–576. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2023.4.563-576>. (In Russian)