

УДК 550.38

**ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ
О МАГНИТНЫХ СВОЙСТВАХ ОСАДКОВ
ОЗЕРА БАЛХАШ (КАЗАХСТАН)**

*Л.Р. Косарева, Д.К. Нургалиев,
А.В. Фаттахов, Д.М. Кузина, П.С. Крылов*

Аннотация

В статье приведены некоторые результаты исследования магнитных свойств донных отложений уникального озера Балхаш. Показано, что магнитные свойства осадков характеризуют условия окружающей среды и колебания уровня озера. По исследованиям гистерезисных параметров установлено наличие в осадках однодоменных ферри-магнитных зерен предположительно биогенного происхождения.

Ключевые слова: озерные осадки, палеолимнология, палеоклимат, сейсмоакустические исследования, магнитные свойства, терромагнитные исследования, коэрцитивная спектроскопия.

Введение

Палеоклимат в настоящее время представляет собой интересную область научных изысканий, связанную с пониманием процессов и причин изменения климата в прошлом, что, в свою очередь, дает возможность с высокой точностью предсказывать подобные изменения в будущем. Озеро Балхаш, являющееся одним из крупнейших соленых озер в мире, представляет большой научный интерес для изучения изменений климата региона и планеты. Несмотря на то что все современные озера являются ценными источниками информации об изменениях окружающей среды в течение последних тысячелетий, Балхаш изучен недостаточно. Геологическое строение Или-Балхашского региона в целом описано подробно [1], но, как можно заметить, непосредственно озеро изучено очень слабо. Из заметных геофизических исследований озера можно выделить проведение непрерывного сейсмоакустического профилирования Институтом водных проблем АН СССР [2]. Следует также отметить работы по изучению современных осадков и гидрологии Института геологических наук АН СССР и Гидрохимического института АН СССР [3, 4] и одну из последних работ, посвященную изучению отложений озера в экологическом аспекте [5].

Летом 2012 г. сотрудниками Казанского федерального университета (КФУ) была проведена экспедиция к уникальному озеру расположенному на юго-востоке Казахстана – озеру Балхаш (46°32'27" с.ш., 74°52'44" в.д.). Оно расположено на высоте 340 м над уровнем моря, имеет форму полумесяца. Длина составляет около 600 км, ширина изменяется от 9–19 км в восточной части и до 74 км в западной. Длина береговой линии – 2385 км. Площадь озера составляет



Рис. 1. Космоснимок оз. Балхаш; 1–6 – места отбора керновых колонок донных отложений

почти 17 тыс. км², но, как и Аральское море, оно высыхает из-за отвода воды из питающих его семи рек. Важнейшей для озера является река Или, приносящая большинство прибрежного притока, другие обеспечивают поверхностный и подповерхностный поток. Эти реки несут свои воды с гор Заилийского и Джунгарского Алатау и Тарбагатай. Бассейн Балхаша внутренний – не имеет оттока. Озеро уникально тем, что разделено узким проливом на западную часть (проточную, практически пресную (минерализация 0.74 г/л) и мелководную) и восточную (бессточную, солоноватую (минерализация от 3.5 до 6 г/л) и имеющую большую глубину) (рис. 1). Через образованный полуостровом пролив шириной 3.5 км вода из западной части пополняет восточную.

1. Методы исследования

В рамках данной экспедиции для изучения была выбрана восточная часть озера. Предварительно проводилось сейсмопрофилирование по двум профилям субширотного простирания, общей протяженностью 12 км, что позволило наметить точки отбора керновых колонок. Результаты этих исследований представлены в статье [6].

Керн был получен при бурении осадков озера с применением специализированного гидравлического пробоотборника, разработанного и изготовленного сотрудниками палеомагнитной лаборатории КФУ [7]. Пробоотборник позволяет отбирать колонки отложений для палеомагнитных и других видов исследований (геологических, палеобиологических, геохимических и т. д.). Всего было отобрано 6 колонок (см. рис. 2) донных отложений мощностью от 3.7 до 5.4 м. В местах отбора керновых колонок глубина воды в среднем составляла 7 м.

Разработанная система подготовки коллекции образцов для палеомагнитных и магнито-минералогических исследований предусматривает послойный отбор образцов из недеформированной центральной части керна, их герметичную

упаковку в маркированные пластиковые контейнеры и транспортировку коллекции в пермалловых экранах в лабораторию [7]. Всего было отобрано 1430 образцов с шагом 2 см.

Лабораторные исследования керна проводились в палеомагнитных лабораториях КФУ (керновая колонка № 4) и Университета г. Берген, Норвегия (керновая колонка № 5) в рамках проектов РФФИ № 14-05-31376и CPRU-2012/10043 “Coercivity spectrometry for environmental research”.

Первоначально по всем образцам керновых колонок были проведены измерения магнитной восприимчивости (χ). Измерителем магнитной восприимчивости MS2-B фирмы Bartington (Великобритания) были исследованы образцы колонки № 4, отобранные в пластиковые кубические контейнеры. Так как объем образцов постоянен (8 см^3), рассматривалась зависимость χ от массы. На приборе AGICOMFK-FA были измерены образцы колонки № 5. Предварительно осадок был высушен и запакован в специальные бумажные контейнеры для удобства транспортировки.

Для получения спектров нормального намагничивания до полей 1.5 Т из керновой колонки № 4 были отобраны образцы с шагом 4 см, а из колонки № 5 – с шагом 2 см. Для измерений использовался коэрцитивный спектрометр J_meter [8, 9], позволяющий отдельно регистрировать остаточную и индуктивную намагниченности образцов при комнатной температуре. По кривым нормального намагничивания были определены следующие параметры [10, 11]: нормальная остаточная намагниченность насыщения (J_{rs}), намагниченность насыщения за вычетом парамагнитной компоненты (J_s), намагниченность парамагнитной компоненты в поле 0.5 Т (J_p), коэрцитивная сила намагниченности насыщения за вычетом влияния парамагнитной компоненты (B_c), коэрцитивная сила остаточной намагниченности насыщения (B_{cr}), положение максимума коэрцитивного спектра нормального остаточного намагничивания (B_{da}), положение максимума коэрцитивного спектра нормального остаточного намагничивания перемагничивания из насыщенного состояния (B_{db}), суперпарамагнитная восприимчивость в поле до 8 мТ (K_{sp}).

Коэрцитивные спектры намагничивания и перемагничивания, полученные по кривым нормального остаточного намагничивания, имеют существенное различие для образцов, содержащих многодоменные или сильно взаимодействующие однодоменные ансамбли магнетиков [12].

Для проведения термомагнитных исследований образцы отбирались равномерно по колонке, на основе анализа коэрцитивных спектров. При помощи экспрессных весов Кюри [13] была измерена зависимость индуктивной намагниченности в поле до 0.2 Т от температуры при скорости нагрева $100 \text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$. Термомагнитные диаграммы были построены для 15 образцов колонки № 4.

2. Результаты исследования

В результате проведения сейсмоакустического профилирования были получены временные разрезы, по которым была установлена сложная история колебаний уровня оз. Балхаш [6]. На рис. 2 представлена информативная часть временного разреза профиля № 1, проходящего вдоль залива. Оцифровка горизонтального масштаба соответствует пикетам профиля, по вертикали отложена

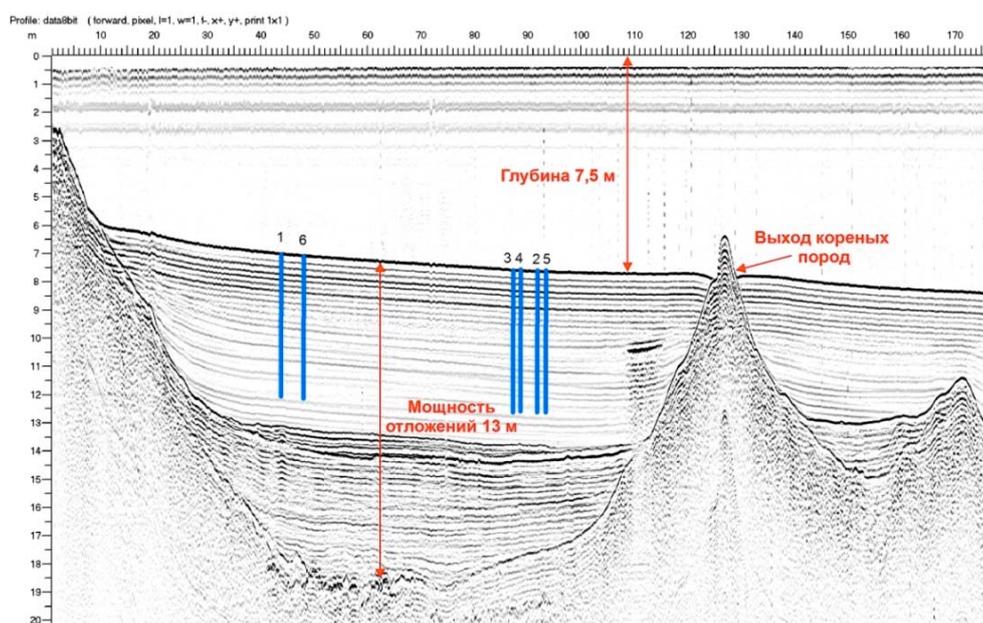


Рис. 2. Сейсмоакустический профиль № 1 оз. Балхаш (от $46^{\circ}47'37''$ с.ш., $75^{\circ}51'15''$ в.д. до $46^{\circ}47'00''$ с.ш., $75^{\circ}53'58''$ в.д.). Цифрами 1–6 на профиле отображены места отбора керновых колонок донных отложений.

глубина в метрах относительно зеркала воды. По данному разрезу можно определить, что котловина озера разделена на две блюдцеобразные части, заполненные современными отложениями: западную и восточную. Максимальная глубина воды по профилю составляет 7,5 м. Максимальная мощность донных отложений западной котловины колеблется в пределах 13–14 м (данные значения приведены к скорости звука в воде и требуют дополнительных исследований для уточнения). Отобранные колонки донных отложений охватывают период последней трансгрессии но, по-видимому, не содержат значительных перерывов осадконакопления.

Используя измеренные значения магнитной восприимчивости, были построены кривые изменения χ с глубиной. На рис. 3 представлены вариации χ , некоторые из гистерезисных параметров, а также их соотношения.

Из этих данных видно, что величины магнитной восприимчивости слабо коррелируют с остаточной намагниченностью насыщения (J_{rs}). Это свидетельствует о том, что в χ большую роль играет намагничивание парамагнитных зерен породы (глины, обломочные минеральные зерна), которые привносятся в бассейн седиментации реками и временными водными потоками. Таким образом, величина парамагнитной восприимчивости характеризует важный палеогидрологический параметр – объем воды, привнесенный в бассейн. В то же время, особенно в нижней части разреза, наблюдаются сильные вариации χ , которые связаны в том числе и с вариациями концентрации ферромагнетика. Ферромагнитная составляющая магнитной фракции пород может быть связана с присутствием в образцах биогенных магнитных зерен.

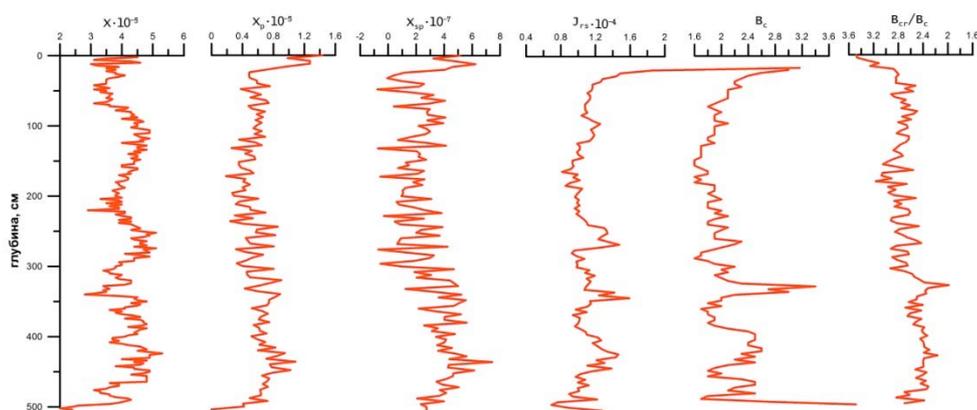


Рис. 3. Вариации гистерезисных магнитных параметров в осадках оз. Балхаш

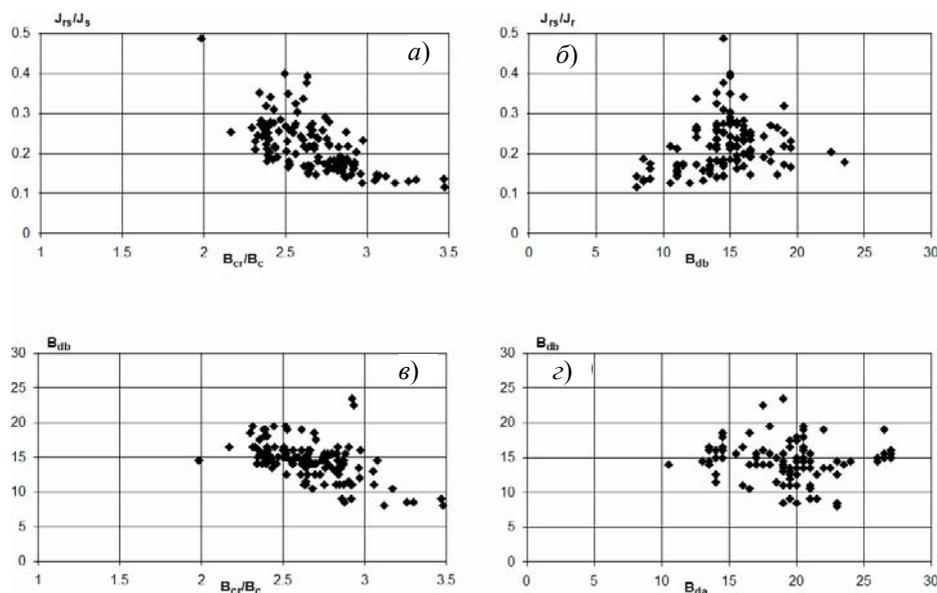


Рис. 4. Соотношения между гистерезисными магнитными параметрами образцов донных отложений оз. Балхаш: а) J_{rs}/J_r и B_{cr}/B_c ; б) J_{rs}/J_r и B_{db} ; в) B_{db} и B_{cr}/B_c ; г) B_{db} и B_{da}

Анализ гистерезисных магнитных параметров позволил выявить, что ферримагнитная фракция отобранных образцов представлена преимущественно однодоменными и суперпарамагнитными зернами (рис. 4, а–в) [14]. Магнитное взаимодействие между частицами невелико и в среднем составляет 5–7 мТл (рис. 4, г).

Коэрцитивные спектры образцов однотипны и характерны для озерных осадков (рис. 5). С целью определения составляющих ферримагнитной фракции был проведен компонентный анализ по спектрам нормального намагничивания. При этом использовался способ вейвлет-разложения на компоненты с гауссовой формой кривых [15]. Выделена основная ферримагнитная компонента во всех образцах исследуемой колонки согласно Р. Эгли [16, 17] – BS (biogenic soft – биогенная магнитомягкая) (рис. 6). Это говорит о том, что ферримагнитная

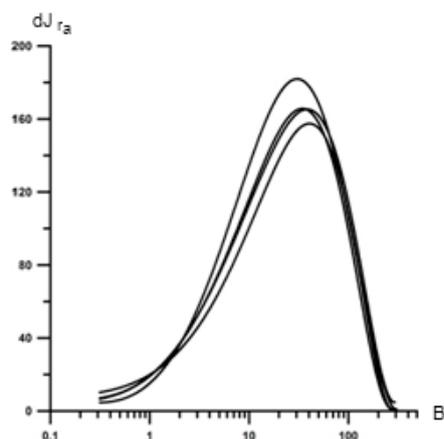


Рис. 5. Коэрцитивные спектры образцов 945, 977, 986, 1076

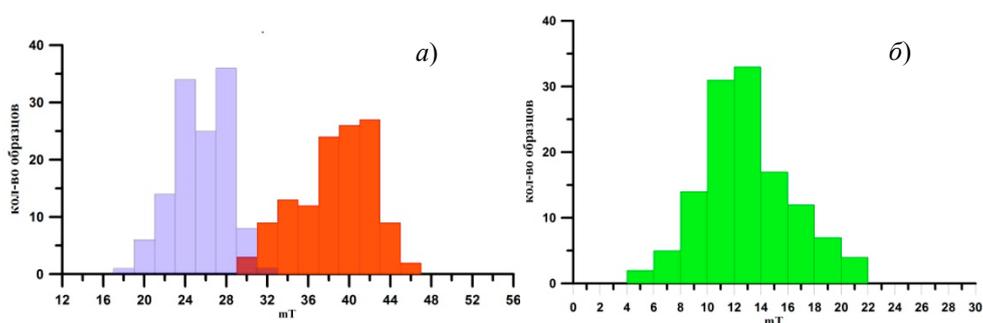


Рис. 6. *а)* гистограмма распределения основной ферримагнитной компоненты (красный цвет – по намагничиванию, фиолетовый – по перемагничиванию); *б)* гистограмма разности положения основной ферримагнитной компоненты между намагничиванием и перемагничиванием

фракция образцов оз. Балхаш представлена преимущественно однодоменными зёрнами биогенного происхождения. Положение максимума коэрцитивного спектра (ПМКС) в диапазоне 29–47 мТл и смещение спектров намагничивания и перемагничивания связаны, скорее всего, с образованием агломератов зёрен. Узость пика на гистограмме и характерные значения ПМКС свидетельствуют о том, что эти зёрна имеют биогенное происхождение и представляют собой остатки магнитотактических бактерий [16, 17].

Морфология термомагнитных диаграмм всех образцов сходна (рис. 7). Образцы отличаются в основном по степени роста намагниченности после прогрева до 800 °С. При первом нагреве повышение намагниченности при температуре 450 °С свидетельствует о возможном наличии пирита в осадке или о его образовании во время горения органики. Далее пирит, окисляясь, переходит в магнетит, что является причиной роста намагниченности. Поэтому говорить о наличии в образцах магнетита (аутигенного или аллотигенного) достаточно сложно, возможно, весь вклад в намагниченность вносят вновь образованные частицы. В целом корытообразная форма кривых до температуры 300 °С подтверждает наличие в породе тонкодисперсной фракции с низкими блокирующими

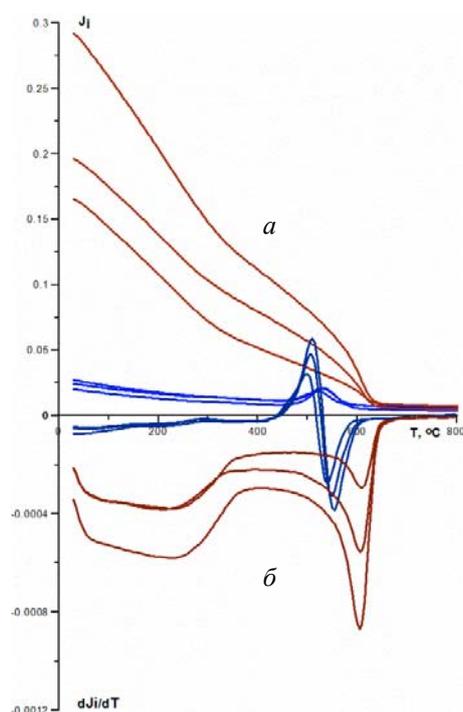


Рис. 7. Интегральные (а) и дифференциальные (б) кривые первого (синие) и повторного (красные) нагрева. Образцы 641_642, 701_702, 841_841 оз. Балхаш

температурами. При лабораторном нагреве до 800 °С происходит окисление магнетита до гематита, о чем свидетельствует пик на второй дифференциальной кривой при температуре ~620 °С.

Заключение

Вариации величины магнитной восприимчивости осадков позволяют судить о наличии циклических изменений условий осадконакопления. Участки с повышенными значениями χ могут быть обусловлены увеличением привноса терригенного материала реками, так как обычно в донных осадках озер наибольшее влияние на магнитную восприимчивость оказывает парамагнитная составляющая, или увеличением вклада в намагниченность ферромагнитной составляющей, отражающей численность популяции магнитотактических бактерий [18, 19].

Все магнитотактические бактерии синтезируют неорганические ферромагнитные кристаллы, такие как магнетит (Fe_3O_4) или грейгит (Fe_3S_4) [20, 21]. Большинство наблюдаемых магнитных частиц бактериального происхождения являются однодоменными и их размеры варьируют в очень небольшом диапазоне 35–120 нм [22, 23]. После смерти бактерий и разрушения защитной клеточной мембраны химическая среда, окружающая магнитосомы внутри бактерии, изменяется, поэтому сохранность магнитосом зависит от фактической окружающей среды.

В осадках скорость окисления магнетита является такой, что более крупные частицы сохраняются в течение геологического времени, а мелкие подвержены сильному окислению и разрушению. Анализ данных, полученных на основе коэрцитивной спектрометрии и дифференциального термомагнитного анализа,

позволяет сделать вывод о существенном вкладе «биогенной магнитомягкой» составляющей в намагниченность осадков, представленной однодоменными зернами магнетита, а также суперпарамагнитных частиц гематита.

Литература

1. Геология СССР. Том XX. Центральный Казахстан. Геологическое описание. Книга 2 / Ред. Ш.Е. Есенов, Г.Ф. Ляпичев, Е.Д. Шлыгин. – М.: Недра, 1972. – 320 с.
2. Саядян Ю.В., Милановский Е.Е., Асланян А.Т., Севастьянов Д.В., Трешников А.Ф. История озер Севан, Иссык-Куль, Балхаш, Зайсан и Арал. – Л.: Наука, 1991. – 301 с.
3. Сапожников Д.Г. Современные осадки и геология озера Балхаш. – М.: Изд-во АН СССР, 1951. – 207 с. (Труды Ин-та геол. наук, Вып. 132, Геол. сер., № 53)
4. Тарасов М.Н. Гидрохимия озера Балхаш. – М.: Изд-во АН СССР, 1961. – 226 с.
5. Aubekero B.Z., Nigmatova S.A., Voyakin D. Ecological change in the Balkhash Region during the last two Millennia // The Second International Workshop “Toward a Sustainable Society in Central Asia: An Historical Perspective on the Future”. – Kyoto: Ili Project, Research Institute for Humanity and Nature, 2012. – P. 27–36.
6. Крылов П.С., Нурғалиев Д.К., Ясонов П.Г. Об истории развития озера Балхаш (Казахстан) по сейсмоакустическим данным // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. – 2014. – Т. 156, кн. 1. – С. 128–136.
7. Борисов А.С. Система технологического обеспечения палеомагнитных исследований отложений современных озер: Автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. – Казань, 2004. – 46 с.
8. Нурғалиев Д.К., Ясонов П.Г. Коэрцитивный спектрометр. Патент РФ на полезную модель. № 81805. – 2009. – Бюл. ФИПС № 9.
9. Jasonov P.G., Nurgaliev D.K., Burov B.V., Heller F. A modernized coercivity spectrometer // *Geologica Carpathica*. – 1998. – V. 49, No 3. – P. 224–225.
10. Шолло Л.Е. Использование магнетизма горных пород для решения геологических задач. – Л.: Недра, 1977. – 182 с.
11. 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.
12. Nourgaliev D.K., Iassonov P.G., Kosareva L.R., Kazanskii A.Yu., Fedotov A.P. The origin of magnetic minerals in the Lake Khubsugul sediments (Mongolia) // *Russ. J. Earth Sci.* – 2005. – V. 7, No 3. – Art. ES3004, P. 1–6. – doi: 10.2205/2005ES000173.
13. Буров Б.В., Нурғалиев Д.К., Ясонов П.Г. Палеомагнитный анализ. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1986. – 167 с.
14. 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.
15. Нурғалиев Д.К., Утемов Э.В., Ясонов П.Г., Нурғалиева Н.Г., Косарева Л.Р. Остатки магнитотактических бактерий в отложениях современных озер – новый инструмент палеогеофизики // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. – 2009. – Т. 151, кн. 4. – С. 180–191.
16. Egli R. Characterization of individual rock magnetic components by analysis of remanence curves. 1. Unmixing natural sediments // *Stud. Geophys. Geod.* – 2004. – V. 48, No 2. – P. 391–446.

17. Egli R. Characterization of individual rock magnetic components by analysis of remanence curves. 2. Fundamental properties of coercivity distributions // *Phys. Chem. Earth.* – 2004. – V. 29, No 13–14. – P. 851–867.
18. Frankel R.B., Blakemore R.P., Wolfe R.S. Magnetite in freshwater magnetotactic bacteria // *Science.* – 1979. – V. 203, No 4387. – P. 1355–1356.
19. Balkwill D.L., Maratea D., Blakemore R.P. Ultrastructure of a magnetotactic spirillum // *J. Bacteriol.* – 1980. – V. 141, No 3. – P. 1399–1408.
20. Farina M., Esquivel D.M.S., Lins de Barros H.G.P. Magnetic iron-sulphur crystals from a magnetotactic microorganism // *Nature.* – 1990. – V. 343, No 6255. – P. 256–258. – doi: 10.1038/343256a0.
21. Frankel R.B., Papaefthymiou G.C., Blakemore R.P., O'Brien W. Fe₃O₄ precipitation in magnetotactic bacteria // *Biochim. Biophys. Acta.* – 1983. – V. 763, No 2. – P. 147–159.
22. Butler R.F., Banerjee S.K. Theoretical single-domain grain size range in magnetite and titanomagnetite // *J. Geophys. Res.* – 1975. – V. 80, No 29. – P. 4049–4058.
23. Diaz Ricci J.C., Kirschvink J.L. Magnetic domain state and coercivity predictions for biogenic greigite (Fe₃S₄): A comparison of theory with magnetosome observations // *J. Geophys. Res.* – 1992. – V. 97, No B12. – P. 17309–17315.

Поступила в редакцию
25.12.13

Косарева Лина Раисовна – ассистент кафедры геофизики и геоинформационных технологий, Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия.

E-mail: Lina.Kosareva@mail.ru

Нургалиев Данис Карлович – доктор геолого-минералогических наук, профессор, проректор по научной деятельности, Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия.

E-mail: Danis.Nourgaliev@kpfu.ru

Фаттахов Артур Вильданович – аспирант кафедры геофизики и геоинформационных технологий, Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия.

E-mail: avfattakhov@gmail.com

Кузина Диляра Мтыгулловна – аспирант кафедры геофизики и геоинформационных технологий, Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия.

E-mail: di.gilmanova@gmail.com

Крылов Павел Сергеевич – аспирант кафедры геофизики и геоинформационных технологий, Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия.

E-mail: sprint@front.ru

* * *

PRELIMINARY DATA ON THE MAGNETIC PROPERTIES OF LAKE BALKHASH SEDIMENTS (KAZAKHSTAN)

L.R. Kosareva, D.K. Nurgaliev, A.V. Fattakhov, D.M. Kuzina, P.S. Krylov

Abstract

The article presents some results from the study of the magnetic properties of Lake Balkhash sediments. It is shown that magnetic properties of sediments characterize environmental conditions and

fluctuations of lake level. According to the analysis of the hysteretic parameters, the presence of single-domain ferromagnetic grains (presumably of biogenic origin) in the sediments is established.

Keywords: lake sediments, paleolimnology, paleoclimate, seismoacoustic research, magnetic properties, thermomagnetic analysis, coercitive spectroscopy.

References

1. Geology of the USSR. Vol. XX. Central Kazakhstan. Geological Description. Book 2 / By Eds. Sh.E. Esenov, E.D. Shlygin, G.F. Lyapichev. Moscow, 1972. 320 p. (In Russian)
2. Esenov Sh.E., Shlygin E.D., Lyapichev G.F., Avdeev A.V. (Eds.) Central Kazakhstan. Geological Description (Geology of the USSR, vol. XX, no. 2). Moscow, 1972. 320 p. (In Russian)
3. Sayadyan Yu.V., Milanovskii E.E., Aslanyan A.T., Sevastyanov D.V., Treshnikov A.F. History of Lakes Sevan, Issyk-Kul, Balkhash, Zaisan and Aral. Leningrad, Nauka, 1991. 301 p. (In Russian)
4. Sapozhnikov D.G. The Recent Sediments and Geology of Lake Balkhash. Moscow, Izd. AN SSSR, 1951. 207 p. (In Russian)
5. Tarasov M.N. Hydrochemistry of Lake Balkhash. Moscow, Izd. AN SSSR, 1961. 226 p. (In Russian)
6. Aubekerov B.Z., Nigmatova S.A., Voyakin D. Ecological change in the Balkhash Region during the last two Millennia. *The Second International Workshop "Toward a Sustainable Society in Central Asia: An Historical Perspective on the Future"*, Kyoto, Ili Project, Research Institute for Hu-manity and Nature, 2012, pp. 27–36.
7. Krylov P.S., Nurgaliev D.K., Yasonov P.G. The history of Lake Balkhash (Kazakhstan) based on high-resolution seismic profiles. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 2014, vol. 156, no. 1, pp. 128–136. (In Russian)
8. Borisov A.S. An engineering support system for the paleomagnetic investigations of modern lake sediments. Extended Abstract of Dr. Sci. (Geol.-Mineral.) Diss. Kazan, 2004. 46 p. (In Russian)
9. Nurgaliev D.K., Yasonov P.G. Coercivity Spectrometer. Utility Model Patent No. 81805, Fed. Inst. Ind. Prop. Bul. No. 9, 2009. (In Russian)
10. Jasonov P.G., Nurgaliev D.K., Burov B.V., Heller F. A modernized coercivity spectrometer. *Geologica Carpathica*, 1998, vol. 49, no. 3, pp. 224–225.
11. Sholpo L.E. The Use of Rock Magnetism for Solving Geological Problems. Leningrad, Nedra, 1977. 182 p. (In Russian)
12. 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, vol. 189, nos. 3–4, pp. 269–276.
13. Nourgaliev D.K., Iassonov P.G., Kosareva L.R., Kazanskii A.Yu., Fedotov A.P. The origin of magnetic minerals in the Lake Khubsugul sediments (Mongolia). *Russ. J. Earth Sci.*, 2005, vol. 7, no. 3, Art. ES3004, pp. 1–6. doi: 10.2205/2005ES000173.
14. Burov B.V., Nurgaliev D.K., Yasonov P.G. Paleomagnetic Analysis. Kazan, Izd. Kazan. Univ., 1986. 167 p. (In Russian)
15. 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, Art. P. EPM 4, pp. 1–22.
16. Nurgaliev D.K., Utemov E.V., Yasonov P.G., Nurgalieva N.G., Kosareva L.R. Remains of magnetotactic bacteria in modern lake sediments as a new tool of paleogeophysics. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 2009, vol. 151, no. 4, pp. 180–191. (In Russian)
17. Egli R. Characterization of individual rock magnetic components by analysis of remanence curves. 1. Unmixing natural sediments. *Stud. Geophys. Geod.*, 2004, vol. 48, no. 2, pp. 391–446.
18. Egli R. Characterization of individual rock magnetic components by analysis of remanence curves. 2. Fundamental properties of coercivity distributions. *Phys. Chem. Earth*, 2004, vol. 29, nos. 13–14, pp. 851–867.
19. Frankel R.B., Blakemore R.P., Wolfe R.S. Magnetite in freshwater magnetotactic bacteria. *Science*, 1979, vol. 203, no. 4387, pp. 1355–1356.

20. Balkwill D.L., Maratea D., Blakemore R.P. Ultrastructure of a magnetotactic spirillum. *J. Bacteriol.*, 1980, vol. 141, no. 3, pp. 1399–1408.
21. Farina M., Esquivel D.M.S., Lins de Barros H.G.P. Magnetic iron-sulphur crystals from a magnetotactic microorganism. *Nature*, 1990, vol. 343, no. 6255, pp. 256–258. doi: 10.1038/343256a0.
22. Frankel R.B., Papaefthymiou G.C., Blakemore R.P., O'Brien W. Fe₃O₄ precipitation in magnetotactic bacteria. *Biochim. Biophys. Acta*, 1983, vol. 763, no. 2, pp. 147–159.
23. Butler R.F., Banerjee S.K. Theoretical single-domain grain size range in magnetite and titanomagnetite. *J. Geophys. Res.*, 1975, vol. 80, no. 29, pp. 4049–4058.
24. Diaz Ricci J.C., Kirschvink J.L. Magnetic domain state and coercivity predictions for biogenic greigite (Fe₃S₄): A comparison of theory with magnetosome observations. *J. Geophys. Res.*, 1992, vol. 97, no. B12, pp. 17309–17315.

Received
December 25, 2013

Kosareva Lina Raisovna – Assistant Lecturer, Department of Geophysics and Geoinformation Technologies, Kazan Federal University, Kazan, Russia.

E-mail: Lina.Kosareva@mail.ru

Nurgaliev Danis Karlovich – Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Vice-Rector for Research, Kazan Federal University, Kazan, Russia.

E-mail: Danis.Nourgaliev@kpfu.ru

Fattakhov Artur Vildanovich – PhD Student, Department of Geophysics and Geoinformation Technologies, Kazan Federal University, Kazan, Russia.

E-mail: avfattakhov@gmail.com

Kuzina Dilyara Mtygullovna – PhD Student, Department of Geophysics and Geoinformation Technologies, Kazan Federal University, Kazan, Russia.

E-mail: di.gilmanova@gmail.com

Krylov Pavel Sergeevich – PhD Student, Department of Geophysics and Geoinformation Technologies, Kazan Federal University, Kazan, Russia.

E-mail: sprint@front.ru