

ДИАГНОСТИКА БИОГЕННОГО МАГНЕТИТА В ОСАДОЧНЫХ ПОРОДАХ

Д.К. Нургулиев, Э.В. Утемов, П.Г. Ясонов

Казанский государственный университет, Казань

Осадки современных озер являются великолепными палеогеофизическими архивами – в них, как правило, с хорошим разрешением записаны изменения климата, геомагнитного поля, других событий и в целом эволюции окружающей среды за последние тысячелетия [1]. Огромную роль в этих записях играют широко распространенные в осадках и осадочных породах биогенные магнитные минералы [2]. Бактерии-производители магнитных минералов существуют в водной среде в условиях наличия достаточно резкой окислительно-восстановительной границы (ОВГ) и именно вблизи этой границы [3]. В работе [4] впервые был представлен достаточно полный обзор методов магнитной диагностики остатков магнитосом в осадках. После этого было опубликовано достаточно большое количество работ, в которых эти методы были развиты. В последнее время развиваются методики детектирования остатков МБ с использованием техники ферромагнитного резонанса [3].

В данной работе мы рассмотрим использование коэрцитивных спектров нормального остаточного намагничивания для выявления остатков магнитотактических бактерий в осадках нескольких современных озер. Особенностями данной работы является то, что здесь использованы спектры, полученные с помощью коэрцитивного спектрометра [5]. Кроме того, впервые приводится анализ по более чем 1200 образцам (спектрам) из четырех различных озер, что позволяет увидеть, тем не менее, их общие черты и существенно повышает статистическую достоверность результатов. Новым является также и то, что для разложения коэрцитивных спектров используется очень эффективная техника взвешенного разложения по естественному базису, ранее использованная для решения обратных задач гравиразведки [6].

Для исследований были использованы образцы донных отложений озер Нарочь и Свирь, Кандрыкуль и Аральского моря. Образцы были отобраны в различные годы с использованием гидравлического пробоотборника, использованы для различного вида анализов, а остатки были высушены и сохранены в лаборатории. В исследованных образцах представлен широкий спектр типов осадков современных озер от практически эвтрофного (о.Свирь) до пересыхающего озера (Аральское море). По всем объектам ранее были получены палеомагнитные данные о палеовековых вариациях элементов геомагнитного поля [7; 8]. Коэрцитивные спектры образцов были получены с помощью коэрцитивного спектрометра [5], прибора позволяющего в автоматическом режиме измерять кривые нормального остаточного намагничивания (НОН) образцов объемом около 1 см³ при непрерывном росте внешнего магнитного поля. Некоторые количественные характеристики кривых НОН были получены еще в самом начале исследований магнетизма горных пород [9], также известно множество примеров удачного использования разложения коэрцитивных спектров на компоненты. Во всех этих работах использовалось предположение о логарифмически нормальном виде спектра каждой из компонент и их линейном сложении в образцах содержащих

несколько таких компонент с различными параметрами. Тогда каждая компонента характеризуется всего тремя параметрами (положением максимума спектра – V_{md} , ширины спектра – V_w , намагниченности компоненты – M_c). Это предположение видимо не выполняется в случае наличия магнитостатического взаимодействия между зернами, что приводит к асимметричному виду спектра. Тогда при разложениях на основе логнормальной формы спектров могут появляться дополнительные пики, смещаться максимумы и обнаруживаться другие искажения. Использование обобщенного гауссового распределения и алгоритма для аппроксимации спектров компонент предложенного в работе [10] лишено этих недостатков и позволило получить целый ряд замечательных результатов [10]. Однако, усложнение формы элементарных спектров (обобщенное гауссово распределение – [10]) привело к тому, что решение обратной задачи разложения спектров на компоненты осложнилось, количество параметров резко возросло, задача стала существенно нелинейной, в алгоритме также есть место для субъективности. Это, в сущности, ручная работа – интерпретация одного спектра может занять несколько дней. Конечно, накопление опыта работы с достаточно однородной коллекцией значительно упрощает работу и позволяет подобрать области изменения тех или иных параметров. Можно зафиксировать большинство параметров и искать лишь небольшое количество, а также измерять кривую с заранее определенной степенью детальности. Этот способ линеаризации задачи был успешно использован и показана его высокая эффективность [10].

Возможность получения полной петли гистерезиса одновременно по остаточной и индуктивной намагниченностям позволяет получить множество важных и интересных параметров, в том числе – кривую нормального остаточного перемагничивания, по которой определяют коэрцитивную силу остаточной намагниченности (B_{cr}). На рис. 1А показан пример кривых намагничивания, полученных с помощью коэрцитивного спектрометра (обр. 1030, о.Нарочь). Кривые намагничивания и перемагничивания показаны на рис. 1Б. Амплитуда кривой перемагничивания обычно в ~2 раза больше амплитуды кривой остаточного намагничивания, исключая некоторые случаи. Поэтому, чтобы привести кривую перемагничивания к виду удобному для визуального сопоставления мы вычитаем из кривой перемагничивания кривую намагничивания (рис. 1В). Полученная разностная кривая перемагничивания очень похожа на кривую намагничивания, но заметно «мягче» (рис. 1В). Спектры кривой нормального остаточного намагничивания и разностной кривой остаточного перемагничивания (рис. 1Г) это хорошо демонстрируют. Очевидно, что полное совпадение спектров намагничивания и перемагничивания может быть только в случае наличия в образце только однодоменных не взаимодействующих друг с другом зерен. Обычно такого не наблюдается даже в случае присутствия в образце только однодоменных зерен, слабое взаимодействие приводит к смещению максимумов спектров намагничивания и перемагничивания. Тем не менее, мы проводили анализ и разложение обоих спектров. Мы полагали, что если положение максимума спектра одной и той же компоненты, полученной по обоим спектрам совпадает (или очень близко) можно с большой долей уверенности утверждать, что компонента представлена ансамблем невзаимодействующих (слабовзаимодействующих) однодоменных зерен. И наоборот, если максимумы спектров сильно отличаются – вероят-

но, что ансамбль представлен многодоменными зернами. Сравнение этих спектров можно использовать как очень простой и надежный способ оценки доменной структуры зерен [8]. Иногда сопоставление этих двух спектров также позволяет лучше увидеть компоненты, так как различное смещение максимумов компонент приводит к различной разрешенности спектров.

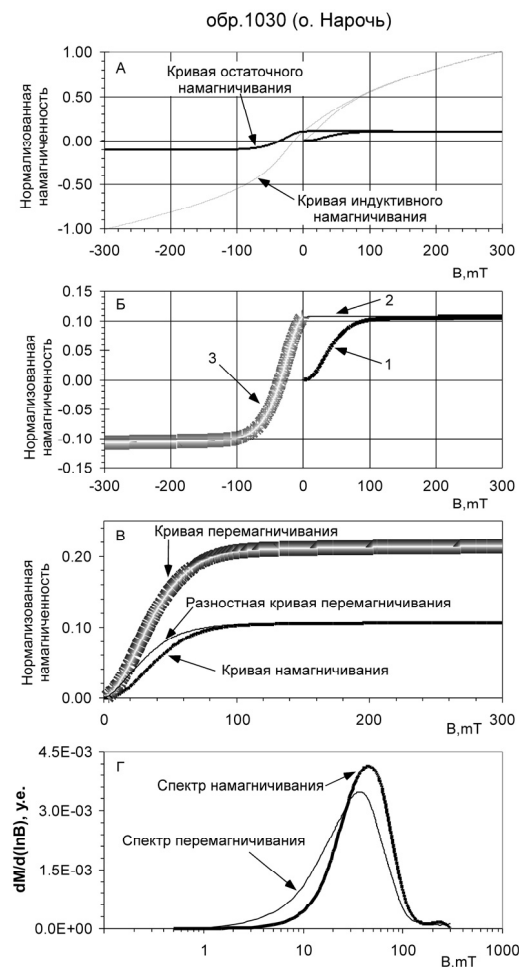


Рис. 1. Кривые изотермического (нормального) намагничивания обр. 1030 из осадков о. Нарочь. А – кривые индуктивного (тонкая линия) и остаточного намагничивания (толстая линия) образца. Б – отдельно показана кривая нормального остаточного намагничивания и перемангничивания, состоящая из трех частей: кривая намагничивания (1 – показана жирной линией), кривая спада поля или суперпарамагнитная кривая (2 – показана тонкой линией), кривая перемангничивания (3 – показана жирной двойной линией). В – вычитая из кривой перемангничивания (показана жирной двойной линией) кривую намагничивания (показана жирной линией) получаем разностную кривую перемангничивания (показана тонкой линией). Г – показаны спектры нормального остаточного намагничивания (показана жирной линией) и перемангничивания (показана тонкой линией).

В данной работе мы предлагаем способ разложения коэрцитивного спектра с использованием аппарата вэйвлет-разложения [6]. Одним из преимуществ данной методики является возможность автоматизации процесса отыскания параметров гауссианов, что позволяет достаточно быстро выполнить расчеты для большого количества образцов.

На рис. 2 показаны результаты обработки коэрцитивных спектров намагничивания и перемангничивания образцов донных отложений Аральского моря и озер Кандрыкуль, Свирь, Нарочь в виде зависимости местоположения максимума и

ширины спектра. Простой визуальный анализ позволяет выделить среди обнаруженных компонент по крайней мере 5 групп, по большинству из них получены средние значения положения максимума их коэрцитивного спектра (ПМКС). Очень слабомагнитные компоненты с намагниченностью менее 10^{-5} а/м были отфильтрованы при подсчете средних. Все компоненты мы называли по аналогии с работой [10], где подобные же компоненты были выделены в результате разложения коэрцитивных спектров с использованием обобщенного гауссового распределения.

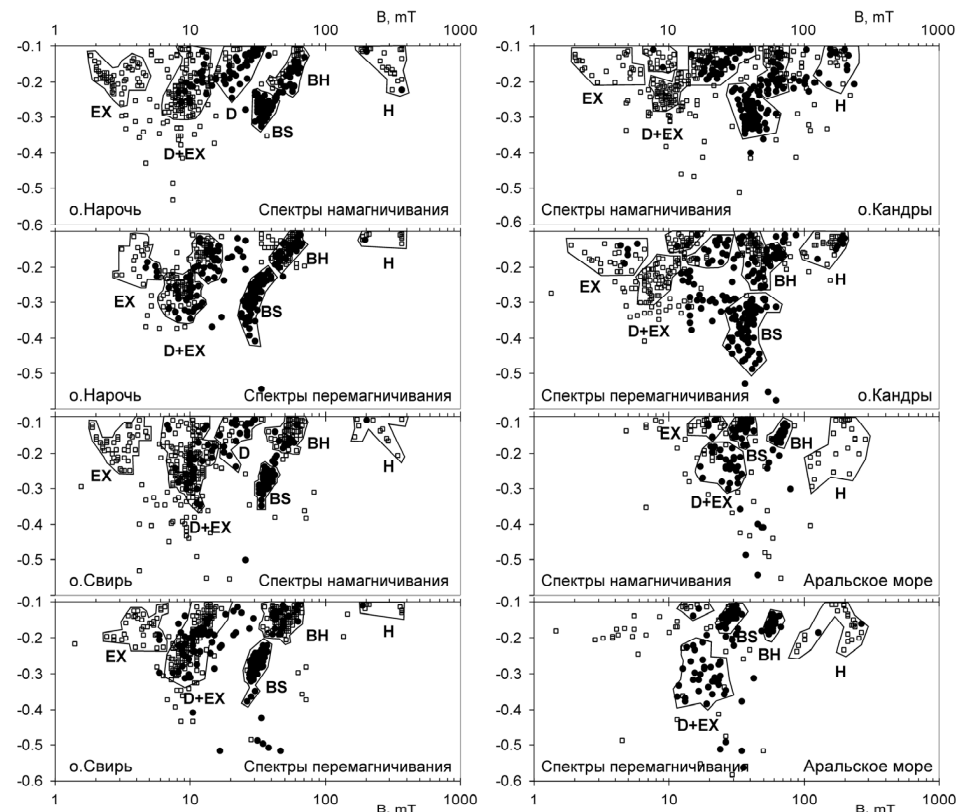


Рис. 2. Результаты обработки коэрцитивных спектров намагничивания и перемангничивания образцов донных отложений Аральского моря и озер Кандрыкуль, Свирь, Нарочь в виде зависимости местоположения максимума и ширины спектра.

1. Самая магнитожестькая группа компонент “Н” с ПМКС от 115 мТ и выше является малочисленной и обнаруживается только в ~10% образцов из всех озер, исключение составляют образцы о.Кандрыкуль. Можно отметить некоторое сходство этой компоненты в отложениях о. Нарочь, Свирь и Аральского моря – спектры компоненты располагаются достаточно далеко от ближайшей компоненты и не перекрываются с ней. Эта компонента присутствует в образцах из нижней части разреза (профундаль озер Нарочь и Свирь) или слоях с терригенным материалом (Аральское море), которые обогащены глинистыми минералами и могут содержать гематит и гидроокислы железа. Эта компонента имеет не-

сколько другой характер в отложениях о. Кандрыкуль. Во-первых, группа образцов, обладающих этой компонентой, выделяется неплохо только по данным спектров перемангничивания. Во-вторых, многие образцы, в том числе и не содержащие заметное количество терригенного материала обладают этой компонентой. Мы считаем, что в большинстве образцов донных отложений о. Кандрыкуль эта компонента сформировалась за счет окисления магнетитомыяких зерен магнетита и грейгита в процессе хранения образцов.

2. Группа компонент “ВН”, ПМКС которой обнаруживается в диапазоне ~45-72.5 мТ на спектрах намагничивания и в диапазоне ~36-72.4 мТ на спектрах перемангничивания. Средние значения ПМКС компонент для различных озер достаточно близки – от ~55 мТ до ~68.9 мТ. Различия ПМКС на спектрах намагничивания и перемангничивания составляют от ~3.2 до ~10.5 мТ. Это свидетельствует о наличии существенного магнитостатического взаимодействия между зернами данной компоненты. Похожая компонента, обнаруженная в работе [10], имеет максимум спектра в области ~60-80 мТ.

3. Компонента “BS”, ПМКС располагается в диапазоне ~23-47 мТ на спектрах намагничивания и в диапазоне ~21-45.4 мТ на спектрах перемангничивания. Средние значения ПМКС компонент для различных озер достаточно близки – от ~34.3 мТ до ~40.9 мТ. Различия ПМКС намагничивания и перемангничивания составляют от ~4.3 до ~6.4 мТ. Это свидетельствует о наличии магнитостатического взаимодействия между зернами данной компоненты. Аналогичная компонента, обнаруженная в работе [10] имеет максимум в области ~40-50 мТ.

4. Следующая группа компонент очень хорошо прослеживается в образцах о. Нарочь и Свирь по спектрам нормального намагничивания в интервале полей ~6-16 мТ, а в спектрах перемангничивания практически не смещается. Среднее ПМКС компонент составляют ~11.6 и ~10.3 мТ в образцах о. Нарочь и Свирь соответственно. В образцах о. Кандрыкуль среднее ПМКС этой компоненты составляет ~24.1 мТ и она имеет очень большую амплитуду. В образцах Аральского моря эта группа практически сливается с предыдущей, а среднее ПМКС составляет ~20.3 мТ. Различия ПМКС намагничивания и перемангничивания составляют в среднем до ~6.2 мТ. Мы назвали эту группу компонент “D+EX” по аналогии с [10].

5. Мы еще выделили малочисленную группу компонент, самую магнетомыякую и слабомагнитную в области полей менее ~8-9 мТ. Вероятно, что эти компоненты представлены очень мелкими, практически суперпарамагнитными зернами биологически индуцированных магнитных минералов (магнетит, грейгит и продукты их окисления).

Таким образом, можно полагать, что в целом структура коэрцитивных спектров исследованных образцов отложений современных озер достаточно однотипна. Величины ПМКС групп компонент “ВН” и “BS”, обнаруженные в данной работе несколько меньше аналогичных полученных ранее по отложениям других современных озер [10]. Видимо, точные значения ПМКС не являются диагностическим признаком наличия остатков магнитотактических бактерий в осадках. Но если в образцах отложений современных озер одновременно наблюдаются две группы компонент с ПМКС в диапазонах ~45-85 мТ и ~25-55 мТ, то можно с

большой уверенностью предположить наличие в образцах остатков магнитосом. Действительно, одновременно в бассейне могут успешно существовать несколько типов магнитотактических бактерий [3].

Заключение

1. Вэйвлет-разложение коэрцитивных спектров на компоненты с гауссовой формой спектра является хорошим инструментом для выявления в осадках современных озер магнитных ансамблей различного происхождения.

2. Применение указанного инструмента для исследования образцов донных отложений озер Нарочь, Свирь, Кандрыкуль и Аральского моря позволило обнаружить целый ряд компонент, которые могут быть идентифицированы с реальными магнитными фракциями, содержащимися в осадках.

Работа выполнена при поддержке гранта Минобрнауки «Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2010 годы)», проект 6286

1. Evans M., Heller F. Environmental Magnetism. Principles and Applications of Enviromagnetism. San Diego: Academic Press. 2003. 299 p.
2. Fortin D.T., Langley S. Formation and occurrence of biogenic iron-rich minerals // Earth-Science Reviews. 2005. V. 72. P. 1 –19.
3. Kopp Robert E., Joseph L. Kirschvink. The identification and biogeochemical interpretation of fossil magnetotactic bacteria // Earth-Science Reviews. 2008. V. 86. P. 42–61.
4. Moskowitz B.M., Frankel R.B., Bazylinski D.A. Rock magnetic criteria for the detection of biogenic magnetite // Earth Planet. Sci. Lett. 1993. V. 120. P. 283–300.
5. Буров Б.В., Нургалеев Д.К., Ясонов П.Г. Палеомагнитный анализ. Казань: Изд-во КГУ. 1986. 167с.
6. Утёмов Э.В., Нургалеев Д.К. Естественные вейвлет-преобразования гравиметрических данных: теория и приложения // Физика Земли. 2005. N4. С. 88-96.
7. Nourgaliev D.K., Heller F., Borisov A.S., Hajdas I., Bonani G., Iassonov P.G., Oberhaensli H. Very high resolution paleosecular variation record for the last 1200 years from the Aral Sea // Geophys. Research Letters. 2003. 30, 17, 1914. doi:10.1029/2003GL018145.
8. Nourgaliev D.K., Yasonov P.G., Kosareva L.R., Kazanskii A.Yu., Fedotov A.P. The origin of magnetic minerals in the Lake Khubsugul sediments (Mongolia) // Russian Journal of Earth Sciences. 2005. v. 7, 3. P. 1-6.
9. Шолто Л.Е. Использование магнетизма горных пород для решения геологических задач. Л.: Недра. 1977. 182 с.
10. Egli R. Characterization of individual rock magnetic components by analysis of remanence curves. 2. Fundamental properties of coercivity distributions // Phys. Chem. Earth. 2004a. 29. P. 851–867