

УДК 550.382.3+551.583.7+551.794

ОСТАТКИ МАГНИТОТАКТИЧЕСКИХ БАКТЕРИЙ В ОТЛОЖЕНИЯХ СОВРЕМЕННЫХ ОЗЕР – НОВЫЙ ИНСТРУМЕНТ ПАЛЕОГЕОФИЗИКИ

*Д.К. Нурғалиев, Э.В. Утемов, П.Г. Ясонов,
Н.Г. Нурғалиева, Л.Р. Косарева*

Аннотация

Проведено разложение коэрцитивных спектров осадков озер Нарочь, Свирь, Кандрыкуль и Аральского моря на гауссовы компоненты с использованием вэйвлет-разложения. Обнаружены две компоненты биогенного происхождения, показано их сходство и различие в осадках различных озер, что позволяет использовать их для реконструкции палеолимнологических и палеоклиматических условий.

Ключевые слова: магнитотактические бактерии, магнетит, грейгит, озерные осадки, Аральское море, озеро Нарочь, озеро Свирь, озеро Кандрыкуль, палеолимнология.

Введение

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]. Например, качественные палеомагнитные записи в этих осадках возникают благодаря наличию в них биогенных магнитных минералов [2]. Однако до настоящего времени вариации свойств биогенных магнитных зерен не использовались для получения палеоклиматической информации. Хотя уже можно сказать, что возникает принципиально новый раздел палеонтологии – **магнитная нанопалеонтология**. В настоящее время установлено несколько типов биогенных магнитных минералов, среди которых можно выделить две основные группы [3]:

– биологически индуцированные минералы (БИМ) являются результатом жизнедеятельности бактерий использующих в своем жизненном цикле железо, минералы которого наблюдаются за пределами клетки;

– биологически контролируемые минералы (БСМ) используются в жизненном цикле бактерии и находятся внутри клетки. Такие бактерии называются магнитотактическими бактериями (МБ), они уникальны тем, что выращивают кристаллы (магнитосомы) магнитных минералов (магнетит – Fe_3O_4 или грейгит – Fe_3S_4) внутри клетки и используют их для различных целей [4].

Предполагается, что магнитосомы используются бактериями для ориентировки в пространстве – вдоль силовых линий геомагнитного поля [5]. Такие бактерии существуют в водной среде в условиях наличия достаточно резкой окислительно-восстановительной границы (ОВГ) и именно вблизи этой грани-

цы [4]. Плавая вдоль силовых линий, бактерии пересекают ОВГ (кроме случая магнитного экватора) в ту и другую сторону, что и необходимо им для жизнеобеспечения. В процессе эволюции магнитосомы приобрели оптимальные параметры (размеры, форму, состав), которые позволяют их узнавать. Это стехиометрия кристаллов, их специфичная форма, наличие множества совершенно идентичных кристаллов, в том числе и в цепочках [4]. Обнаружив в природе подобные кристаллы, можно с большой долей уверенности полагать их биогенное происхождение. Достаточно сильный магнетизм и некоторые особенности этих магнитных зерен (однодоменность, стехиометричность) открывают широкие возможности экспрессных магнитных методов для диагностики этих объектов. Несомненно, абсолютная идентификация остатков магнитотактических бактерий возможна только с использованием электронного микроскопа, но если удастся проводить предварительное распознавание остатков в осадках и осадочных породах с использованием макроскопических магнитных методов, то это повысит шансы использования этих новых палеонтологических объектов для палеоэкологических и палеоклиматических реконструкций.

В работе [6] впервые был представлен достаточно полный обзор методов магнитной диагностики остатков магнитосом в осадках. После этого было опубликовано большое количество работ, в которых эти методы были развиты. В последнее время развиваются методики детектирования остатков МБ с использованием техники ферромагнитного резонанса [7]. Это интересное направление исследований имеет как свои преимущества, так и недостатки [4]. Мы предложили использовать для диагностики и определения свойств остатков МБ в осадках результаты разложения коэрцитивных спектров нормального остаточного намагничивания и перемагничивания [8], получаемые с использованием коэрцитивного спектрометра [9].

В настоящей работе мы использовали гистерезисные параметры для выявления некоторых особенностей остатков магнитотактических бактерий в осадках нескольких современных озер. Целью работы являлась демонстрация изменчивости магнитных параметров ансамблей остатков магнитотактических бактерий в осадках разных типов современных озер. В работе впервые показана значительная изменчивость этих параметров и возможность использования указанных данных для реконструкции изменений окружающей среды в геологическом прошлом.

Описание объектов

Для исследований были использованы образцы донных отложений озер Нарочь, 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.

Озера Нарочь (54°51' с. ш., 26°51' в. д.) и Свирь (54°47' с. ш., 26°30' в. д.) расположены в северо-западной части Белоруссии, в зоне типичного рельефа сформированного Валдайским оледенением [10]. С литологической точки зрения о. Нарочь представляет интерес как внутриконтинентальный бассейн интенсивного карбонатного накопления. Весь осадок сильно известковистый,

представлен в основном известковистой гиттией, только в нижней части имеется слой известковистого песка, а выше залегает сильно известковистая глина (почти мергель). Мощность осадка не превышает 7 м. Осадок в о. Свирь представлен сапропелем с высоким содержанием органического материала. Мощность осадка достигает 7–8 м. Сверху вниз цвет сапропеля переходит от темно-зеленого до практически черного.

Озеро Кандрыкуль (54°30'10" с. ш., 54°03'50" в. д.) [11] расположено в юго-западной части Республики Башкортостан на Бугульминско-Белебеевской возвышенности. Котловина озера имеет карстово-тектоническое происхождение. Вода слабоминерализованная (пресная), относится к сульфатно-натриевому типу. Мощность донных отложений в основном постоянная на всей центральной части озера и достигает 6–8 м. Отложения относятся к ряду ил (глинистый сапропель с различным содержанием органического и карбонатного материала). В нижней части колонок содержание глинистого материала увеличивается.

В настоящей работе использованы образцы отложений Аральского моря, отобранные из колонок Аг-7, Аг-4-04 и Aral-5-04 (Западный Арал, залив Чернышева). Возраст осадков составляет не более 1500 лет, и сформировались они в самых различных условиях: как в эпоху высокого уровня моря при различном соотношении биопродуктивности и терригенного привноса материала, так и в эпоху падения уровня моря и резкого повышения солености, вплоть до полного пересыхания озера [12]. Минерализация воды составляет более 100 г/л с преобладанием SO_4^{2-} , Cl^- , Na^+ [13]. В осадках преобладают три компонента – органическая гиттия, терригенная (глина, алеврит, песок) и хемогенная (гипс, соль) компоненты. Встречаются практически все варианты смеси указанных компонент [12].

Таким образом, 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 палеоэволюционных вариациях элементов геомагнитного поля [12, 14].

Методика измерений и обработки коэрцитивных спектров

Коэрцитивные спектры образцов были получены с помощью коэрцитивного спектрометра [16] – прибора, позволяющего в автоматическом режиме измерять кривые нормального остаточного намагничивания (НОН) образцов объемом около 1 см^3 при непрерывном росте внешнего магнитного поля. При том что прибор обладает не очень высокой по сравнению с криомагнитометром чувствительностью, он позволяет получать высокоразрешенные кривые НОН для достаточно слабомагнитных образцов [17]. Но главным преимуществом прибора является его высокая производительность, время регистрации одной кривой составляет не более 10 минут. Это принципиально меняет отношение к кривым НОН – открывается возможность делать измерения огромных коллекций, получать совершенно иные объем и качество информации.

Одна из наиболее интересных групп данных заключена в коэрцитивных спектрах нормального остаточного намагничивания. Некоторые количественные характеристики кривых НОН были получены еще в самом начале исследований

магнетизма горных пород [17], также известно множество примеров удачного использования разложения коэрцитивных спектров на компоненты [18]. 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 – B_{md} , ширины спектра – B_w , намагниченности компоненты – M_c). Это предположение, очевидно, не выполняется при наличии магнитостатического взаимодействия между зёрнами [18], 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 [18], лишено этих недостатков и позволяет получить целый ряд замечательных результатов [19–21]. Однако усложнение формы элементарных спектров (обобщенное гауссово распределение [18]) привело к тому, что решение обратной задачи разложения спектров на компоненты стало более сложным, количество параметров резко возросло, задача стала существенно нелинейной, увеличилась неоднозначность решения, обусловленная субъективностью выбора значений некоторых параметров.

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. 1, А показан пример кривых намагничивания, полученных с помощью коэрцитивного спектрометра (обр. 1030, о. Нарочь). Кривые намагничивания и перемагничивания показаны на рис. 1, Б. Амплитуда кривой перемагничивания обычно в ~ 2 раза больше амплитуды кривой остаточного намагничивания, за исключением некоторых случаев. Чтобы привести кривую перемагничивания к виду, удобному для визуального сопоставления, мы вычитаем из кривой перемагничивания кривую намагничивания (рис. 1, В). Полученная разностная кривая перемагничивания очень похожа на кривую намагничивания, но заметно «мягче» (рис. 1, В). Спектры кривой нормального остаточного намагничивания и разностной кривой остаточного перемагничивания (рис. 1, Г) 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 зёрен [22]. Обычно такого не наблюдается, даже когда в образце присутствуют только однодоменные зёрна, 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 она представлена ансамблем невзаимодействующих (слабовзаимодействующих) однодоменных зёрен. И наоборот, если максимумы спектров сильно отличаются, вероятно, что ансамбль представлен многодоменными

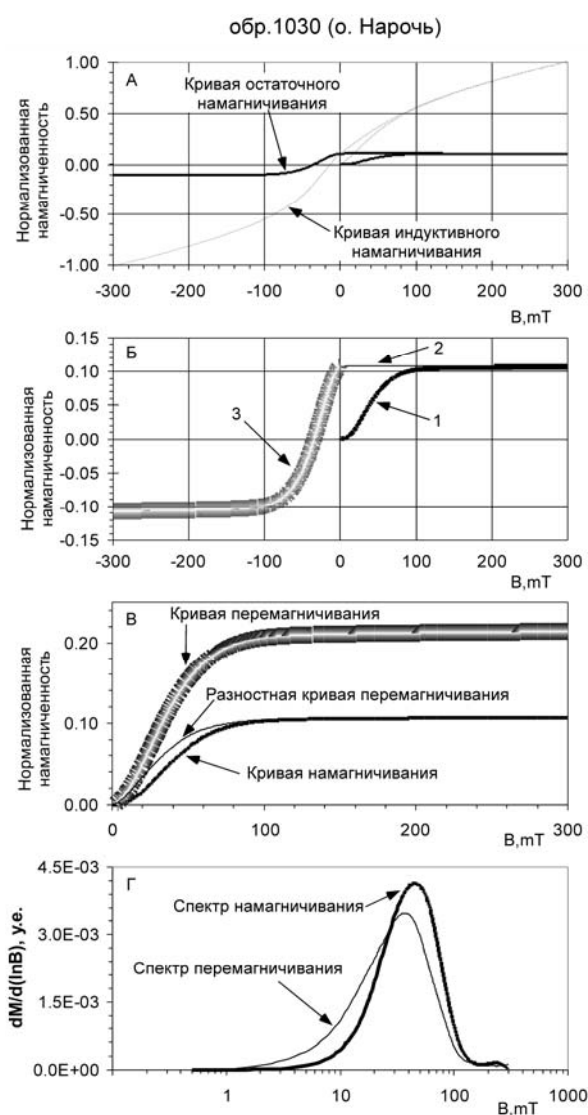


Рис. 1. Кривые изотермического (нормального) намагничивания обр. 1030 из осадков о. Нарочь. А – кривые индуктивного (тонкая линия) и остаточного намагничивания (толстая линия) образца. Б – кривая нормального остаточного намагничивания и перемагничивания, состоящая из трех частей: кривая намагничивания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

зернами. Сравнение этих спектров можно использовать как очень простой и надежный способ оценки доменной структуры зерен [23]. Иногда сопоставление этих двух спектров также позволяет лучше увидеть компоненты, так как различное смещение максимумов компонент приводит к различной разрешенности спектров.

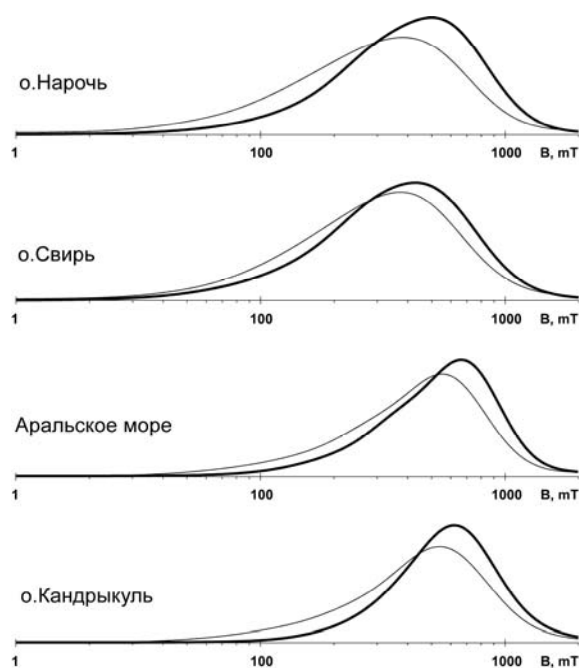


Рис. 2. Суммы коэрцитивных спектров намагничивания (жирная линия) и перемангничивания (тонкая линия) всех образцов по каждому из озер. Вертикальная шкала в условных единицах

Спектр перемангничивания всегда «мягче» и шире спектра намагничивания, а максимальная амплитуда – меньше. Обычно коэрцитивные спектры образцов донных отложений современных озер достаточно гладкие и похожие друг на друга (рис. 2). Например, спектры образцов отложений озер Нарочь и Свирь очень похожи, но отличаются от спектров образцов о. Кандрыкуль и Аральского моря. В то же время спектры отложений озера Кандрыкуль и Аральского моря достаточно похожи, но на спектре образцов из Аральского моря более отчетливо, чем на спектрах образцов из озера Кандрыкуль проявляется компонента с максимумом спектра в области, немногим более 40 мТл. Эта компонента превалирует в отложениях озер Нарочь и Свирь. Многокомпонентность даже представленных здесь, очень гладких и однообразных спектров очевидна. Спектры явно асимметричны, и эта асимметрия заметно варьируется от образца к образцу. Разложение этих спектров на компоненты могло бы дать новую информацию как для решения палеоклиматических задач, так и для улучшения оценки записей палеонапряженности в осадках указанных озер.

В настоящей работе мы использовали способ разложения коэрцитивных спектров с использованием аппарата вэйвлет-разложения [8]. Результатом такого разложения является обнаружение компонент (логнормального вида), из которых складывается суммарный спектр. Каждая компонента характеризуется намагниченностью, шириной спектра и положением максимума коэрцитивного спектра (ПМКС).

Одним из преимуществ данной методики является возможность автоматизации процесса отыскания параметров компонент, что позволяет за приемлемое время выполнить расчеты для большого количества образцов.

Результаты и обсуждение

На рис. 3 показаны результаты обработки коэрцитивных спектров намагничивания и перемагничивания образцов донных отложений Аральского моря и озер Кандрыкуль, Свирь, Нарочь в виде зависимости ПМКС от ширины спектров. Такое изображение позволяет наиболее отчетливо увидеть группы компонент. Увидеть и оценить вклад каждой компоненты в общую намагниченность образцов можно при построении зависимости ПМКС от намагниченности компонент. Анализ позволяет выделить среди обнаруженных компонент по крайней мере 5-ти групп по величинам ПМКС. Очень слабомагнитные компоненты с намагниченностью менее 10^{-5} А/м были отфильтрованы при подсчете средних. Все компоненты мы назвали по аналогии с работой [21], где подобные компоненты были выделены в результате разложения коэрцитивных спектров с использованием обобщенного гауссового распределения.

1. Самая магнитожегкая группа компонент “Н” с ПМКС от 115 мТл и выше является малочисленной и обнаруживается только в ~ 10% образцов из всех озер, исключение составляют образцы о. Кандрыкуль. Можно отметить некоторое сходство этих компонент в отложениях озер Нарочь, Свирь и Аральского моря: спектры компоненты располагаются достаточно далеко от ближайшей компоненты и не перекрываются ею. Компонента “Н” 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. Указанная компонента имеет несколько другой характер в отложениях о. Кандрыкуль. Во-первых, группа образцов, обладающих этой компонентой, хорошо выделяется только по данным спектров перемагничивания (рис. 3). 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 данная компонента сформировалась за счет окисления магнитомягких зерен магнетита и грейгита в процессе хранения образцов.

2. Группа компонент “ВН”, ПМКС которой обнаруживается в диапазоне ~ 45–72.5 мТл на спектрах намагничивания и в диапазоне ~ 36–72.4 мТл на спектрах перемагничивания. Средние значения ПМКС этой компоненты для различных озер достаточно близки – от ~ 55 до ~ 68.9 мТл. Различия ПМКС на спектрах намагничивания и перемагничивания составляют от ~ 3.2 до ~ 10.5 мТл. Это свидетельствует о наличии магнитостатического взаимодействия между зернами данной компоненты. Похожая компонента, обнаруженная в работе [21], имеет максимум спектра в области ~ 60–80 мТл.

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

~ 40–50 мТл. В отложениях озер Нарочь, Свирь и Кандрыкуль компонента “BS” имеет более широкий спектр, чем компонента “BH”. Только в отложениях Аральского моря обе компоненты имеют одинаковую ширину спектров.

4. Следующая группа компонент очень хорошо прослеживается в образцах озер Нарочь и Свирь (рис. 3) по спектрам нормального намагничивания в интервале полей ~ 6–16 мТл, а в спектрах перемагничивания практически не смещается. Среднее ПМКС компонент составляют ~ 11.6 и ~ 10.3 мТл в образцах озер Нарочь и Свирь соответственно. В образцах о. Кандрыкуль среднее ПМКС этой компоненты составляет ~ 24.1 мТл, и она имеет очень большую амплитуду. В образцах Аральского моря эта группа практически сливается с предыдущей, а среднее ПМКС составляет ~ 20.3 мТл. Различие ПМКС намагничивания и перемагничивания составляет в среднем до ~ 6.2 мТл. Мы назвали эту группу компонент “D+EX” по аналогии с [21]. Компонента “D” неплохо разрешается в отложениях озер Нарочь и Свирь, она имеет узкий спектр намагничивания, а спектр перемагничивания сильно смещается в область меньших полей (возможно, это многодоменные зерна). Такая компонента, несомненно, отсутствует (не является систематической) в отложениях Аральского моря.

5. Малочисленная группа компонент – самая магнитомягкая и слабомагнитная в области полей менее ~ 8–9 мТл. Вероятно, эти компоненты представлены очень мелкими, практически суперпарамагнитными зёрнами 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, хотя имеются и некоторые существенные различия. Это также видно по визуальному анализу самих коэрцитивных спектров (рис. 3).

Величины ПМКС групп компонент “BH” и “BS”, обнаруженные в настоящей работе, несколько меньше аналогичных полученных ранее по отложениям других современных озер [21]. 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 и ~ 25–55 мТл, то можно с большой уверенностью предположить наличие в образцах остатков магнитосом. Действительно, одновременно в бассейне могут успешно существовать несколько типов магнитотактических бактерий [4]:

1) несколько выше границы окислительной и восстановительной зон (ГОВЗ) могут жить бактерии-производители кристаллов магнетита;

2) непосредственно на самой границе могут также существовать бактерии-производители магнетита;

3) ниже ГОВЗ в непосредственной близости к ней живут бактерии производящие грейгит, интересно, что некоторые из них могут также производить и магнетит;

4) на большей глубине, которая намного ниже ГОВЗ, также могут жить магнитотактические бактерии, производящие грейгит.

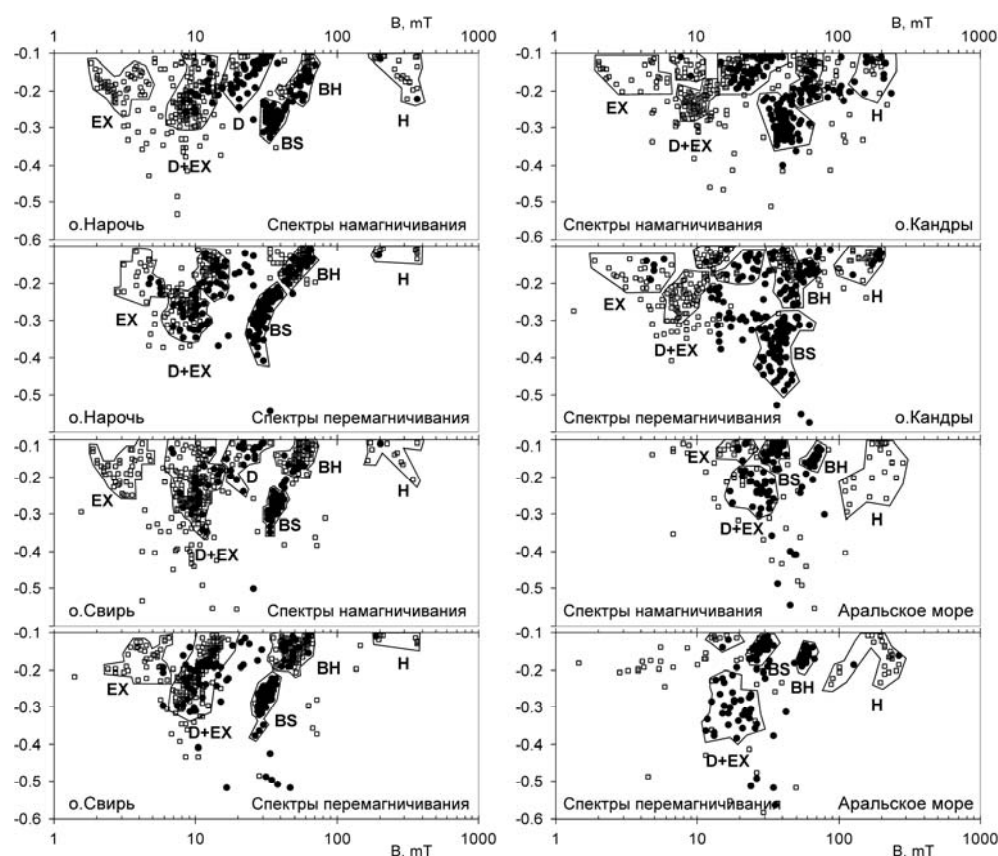


Рис. 3. Отображение магнитных компонент осадков современных озер на плоскости «положение максимума коэрцитивного спектра (B , мТл) – ширина коэрцитивного спектра компоненты (по вертикали – в усл. ед)»

Остатки всех этих бактерий попадают в осадок и захороняются там. Таким образом (по крайней мере, в современное время), в осадке могут быть обнаружены остатки различных магнитотактических бактерий, имеющие различные свойства (форму, размеры зерен, состав, степень чистоты состава, совершенства структуры). Кроме этих фундаментальных свойств магнитосом, несомненно, большое значение играет сохранность зерен – их размеров, формы, состава и структуры. Кристаллы магнетита, произведенные бактериями, живущими выше и на самой ГОВЗ, попадают вниз, где условия далеко не благоприятны для существования магнетита. Здесь зерна биогенного магнетита начинают растворяться. В некоторых случаях они могут раствориться полностью [4].

Кроме всего вышеуказанного, на магнитные свойства осадков сильно влияет характер пространственного распределения магнитных зерен в осадке. Если зерна рассеяны в осадке и нет скоплений большого числа зерен, то спектры компонент могут быть очень узкими, и наоборот, наличие скоплений зерен может привести к существенному уширению распределения и смещению его максимума. Если в осадках содержатся несколько компонент и их ПМКС различаются не очень сильно, к тому же каждое из распределений достаточно широкое, то выделение этих компонент отдельно может оказаться невозможным.

Одной из причин наблюдаемых различий является также то, что использованная гауссова модель, вероятно, не точно описывает реальную форму спектров. Об этом свидетельствует наклон распределения точек компонент (в особенности “ВН” и “BS”) на рис. 3. Тот факт, что уширение спектра приводит к смещению ПМКС, свидетельствует, скорее всего, о том, что вид спектра, используемый как базовый при разложении, – неправильный. К сожалению, простая теоретическая форма спектра вряд ли может быть получена, и эту особенность распределений необходимо учитывать при интерпретации полученных распределений.

Сопоставление компонент, обнаруженных в осадках разных озер, позволяет сделать следующие выводы:

– коэрцитивные спектры биомангнитных минералов из осадков Аральского моря принципиально отличаются от спектров для других озер, что, вероятно, обусловлено принципиальным отличием лимнологических условий (резкими изменениями уровня озера и высокой минерализацией);

– почти идеальное сходство спектров биогенных компонент в осадках озер Нарочь и Свирь, располагающихся близко друг от друга, но достаточно сильно различающихся по лимнологическим условиям, свидетельствует о сильном влиянии локальных условий (климата, состава поверхностных и подземных вод, состава горных пород) на видовой состав МБ;

– детритные компоненты (фракция D) являются характерными также для каждого из озер, что позволяет получить информацию о типе привносимого в озеро материала;

– окисление образцов приводит к усложнению интерпретации спектров из-за появления новых компонент и изменения свойств первичных компонент.

Заключение

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

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.

Обнаружены три компоненты, имеющие биогенное происхождение с высокой долей вероятности. Это “EX”, “ВН” и “BS”. Параметры (ширина спектров, соотношения намагниченностей, положение максимумов) спектров биогенных компонент отличаются для различных озер, что позволяет предположить возможность их использования для реконструкции палеолимнологических условий.

Работа выполнена при поддержке гранта Минобрнауки «Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2010 годы)» (проект № 6286).

Summary

D.K. Nurgaliev, E.V. Utemov, P.G. Yassonov, N.G. Nurgalieva, L.R. Kosareva. Remains of Magnetotactic Bacteria in Modern Lake Sediments as a New Tool of Paleogeophysics.

Decomposition of coercive spectra of sediment probes from lakes Naroch, Svir, Kandrykul and the Aral sea into Gaussian components has been carried out by wavelet decomposition. Two biogenic components have been discovered. Their similarities and differences are shown in sediments of various lakes, which allows using them to reconstruct the paleolimnologic and paleoclimatic environments.

Key words: magnetotactic bacteria, magnetite, greigite, lake sediments, the Aral Sea, lake Naroch, lake Svir, lake Kandrykul, paleolimnology.

Литература

1. *Evans M., Heller F.* Environmental Magnetism. Principles and Applications of Environmental Magnetism. – San Diego: Acad. Press, 2003. – 299 p.
2. *Fortin D.T., Langley S.* Formation and occurrence of biogenic iron-rich minerals // *Earth-Science Rev.* – 2005. – V.72. – P. 1–19.
3. *Bazylinski D.A., Moskowitz B.M.* Microbial biomineralization of magnetic iron minerals: Microbiology, magnetism and environmental significance, *Geomicrobiology: interactions between microbes and minerals* // *Rev. Miner.* – 1997. – V. 35. – P. 181–223.
4. *Kopp R.E., Kirschvink J.L.* The identification and biogeochemical interpretation of fossil magnetotactic bacteria // *Earth-Science Rev.* – 2008. – V. 86. – P. 42–61.
5. *Simmons S.L., Bazylinski D.A., Edwards K.J.* South-seeking magnetotactic bacteria in the northern hemisphere // *Science.* – 2006. – V. 311. – P. 371–374.
6. *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.
7. *Kopp R.E., Weiss B.P., Maloof A.C., Vali H., Nash C.Z., Kirschvink J.L.* Chains, clumps, and strings: Magnetofossil taphonomy with ferromagnetic resonance spectroscopy // *Earth Planet. Sci. Lett.* – 2006. – V. 247. – P. 10–25.
8. *Утёмов Э.В., Нурғалиев Д.К.* «Естественные» вейвлет-преобразования гравиметрических данных: теория и приложения // *Физика Земли.* – 2005. – № 4. – С. 88–96.
9. *Нурғалиев Д.К., Утёмов Э.В., Ясонов П.Г.* Разложение коэрцитивных спектров на компоненты и диагностика биогенного магнетита в осадках современных озер // *Физика Земли.* – 2010. – В печати.
10. *Якушко О.Ф.* Белорусское Поозерье. История развития и современное состояние озер Северной Белоруссии. – Минск: Высш. шк., 1971. – 336 с.
11. *Андреева М.А.* Озера Среднего и Южного Урала. – Челябинск: Юж.-Урал. кн. изд-во, 1973. – 270 с.
12. *Nourgaliev D.K., Heller F., Borisov A.S., Hajdas I., Bonani G., Yassonov P.G., Oberhaensli H.* Very high resolution paleosecular variation record for the last 1200 years from the Aral Sea // *Geophys. Res. Lett.* – 2003. – V. 30, No 17. – P. 4-1-4-4. – doi:10.1029/2003GL018145.
13. *Friedrich J., Oberhaensli H.* Hydrochemical properties of the Aral Sea water in summer 2002 // *J. Marine Systems.* – 2004. – No 47. – P. 77–88.
14. *Nourgaliev D.K., Heller F., Borisov A.S., Hajdas I., Yassonov P.G., Chernova I.Yu.* Principal features (master curve) of geomagnetic field variations in Belorussia during the last 12 thousand years // *Russ. J. Earth Sci.* – 2005. – V. 7, No 2. – P. 1–16.

15. Буров Б.В., Нурғалиев Д.К., Ясонов П.Г. Палеомагнитный анализ. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1986. – 167с.
16. Iassonov, P.G., Nourgaliev D.K., Burov B.V., Heller F. A modernized coercivity spectrometer // *Geologica Carpathica*. – 1998. – V. 49. – P. 224–226.
17. Шолто Л.Е. Использование магнетизма горных пород для решения геологических задач. – Л.: Недра. – 1977. – 182 с.
18. Egli R. Characterization of individual rock magnetic components by analysis of remanence curves. 1. Unmixing natural sediments // *Studia Geophys. Geodaet.* – 2004. – V. 48. – P. 391–446.
19. Spassov S., Heller F., Kretzschmar R., Evans M.E., Yue L. P., Nourgaliev D.K. Detrital and pedogenic magnetic mineral phases in the loess/paleosol sequence at Lingtai (Central Chinese Loess Plateau) // *Phys. Earth Planet. Inter.* – 2003. – V. 140. – P. 255–275.
20. Spassov S., Egli R., Heller F., Nourgaliev D.K., Hannam J. Magnetic quantification of urban pollution sources in atmospheric particulate matter // *Geophys. J. Int.* – 2004. – V. 159. – P. 555–564.
21. Egli R. Characterization of individual rock magnetic components by analysis of remanence curves. 3. Bacterial magnetite and natural processes in lakes // *Physics and Chemistry of the Earth*. – 2004 – V. 29, No 13–14. – P. 869–884.
22. Dunlop D.J., Özdemir Ö. *Rock Magnetism: Fundamentals and Frontiers*. – Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2001. – 573 p.
23. 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) // *Russ. J. Earth Sci.* – 2005. – V. 7, No 3. – P. 1–6.

Поступила в редакцию
07.09.09

Нурғалиев Данис Карлович – доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий кафедрой геофизики Казанского государственного университета.
E-mail: danis.nourgaliev@ksu.ru

Утемов Эдуард Валерьевич – кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геофизики Казанского государственного университета.

Ясонов Павел Георгиевич – кандидат геолого-минералогических наук, доцент, ведущий научный сотрудник НИЛ палеомагнетизма и магнетизма горных пород геологического факультета Казанского государственного университета.

Нурғалиева Нурия Гавазовна – доктор геолого-минералогических наук, доцент кафедры геологии нефти и газа Казанского государственного университета.

Косарева Лина Раисовна – аспирант кафедры геофизики Казанского государственного университета.