

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПЕКТРОСКОПИИ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЙЯНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МАГНИТОБАКТЕРИЙ

А.Г. Савченко¹

algsav@gmail.com

В.В. Шутова²

vshutova@yandex.ru

Г.В. Максимов³

gmaksimov@mail.ru

О.В. Слатинская³

slatolya@mail.ru

¹ НИТУ МИСИС, Москва, Российская Федерация

² МГУ им. Н.П. Огарева, Саранск, Российская Федерация

³ МГУ, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Проведено сравнение магнитных свойств и структуры природных и искусственных магнитных наночастиц с использованием метода спектроскопии комбинационного рассеяния. Исследована морфология, состав и магнитные свойства магнитных наночастиц из бактерии *Geoalkalibacter ferrihydriticus*. Магнитные свойства образца определяются в основном агрегатами. Удельная намагниченность магнитных наночастиц составляет $2,7\sigma_s \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{кг}$, коэрцитивная сила по намагниченности $JH_c = 31,8 \text{ кА/м}$. Удельная намагниченность искусственной магнитной наночастицы равна $69,7\sigma_s \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{кг}$, коэрцитивная сила намагниченности $JH_c = 5,3 \text{ кА/м}$. Значение удельной намагниченности бактерии в 25,8 раза меньше удельной намагниченности искусственной наночастицы, а коэрцитивная сила по намагниченности бактерии в 6 раз больше, чем искусственной. Вероятно, причиной снижения отношения $JH_6/JH_{\text{МНЧ}}$ может быть частичное окисление магнитной наночастицы. По мнению авторов, структура магнитных наночастиц бактерий близка к структуре $\text{Fe}_3\text{OP}_4\text{Gd}_3$ (полосы 250, 350, 950 см^{-1} соответствуют характерным полосам КР-спектра 247, 350, 950 см^{-1} в области скопления магнитных наночастиц бактерии)

Ключевые слова

Спектроскопия комбинационного рассеяния, бактерии, *Geoalkalibacter ferrihydriticus*, магнитные наночастицы

Поступила 19.06.2024

Принята 19.07.2024

© Автор(ы), 2025

Введение. Некоторые бактерии способны восстанавливать оксиды и гидроксиды железа в анаэробных условиях, получая таким образом энергию для роста и метаболизма. Магнитотактические бактерии (МТБ) обладают

уникальной способностью формировать внутриклеточные включения с магнитными свойствами — магнетосомы. Магнетосомы окружены двухслойной мембраной и у микроаэробных видов содержат наночастицы магнетита Fe_3O_4 , а у строго анаэробных — грейгита Fe_3S_4 . Диссимиляторные железоредуцирующие бактерии (ЖРБ), железоредукторы, используют атомы Fe^{3+} в качестве акцептора электронов, ацетат, этанол и H_2 — в качестве донора. Кристаллы минерала (магнитные наночастицы (МНЧ)) представляют собой однодоменные структуры размером 35...120 нм разнообразной формы (гексагональной, ромбической или зубовидной) [1–3]. Магнитотактические бактерии являются звеном биогеохимического цикла железа [4] и принимают активное участие в формировании осадочных железистых кварцитов, состоящих преимущественно из слоев кварца, гематита, магнетита и маггемита ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$). Особый интерес к МТБ, способным биоминерализовать различные соединения железа, вызван тем, что в лабораторных условиях можно получить МНЧ магнетита и ферригидрита [5, 6].

Факторы, участвующие в формировании МНЧ, до сих пор недостаточно изучены. На примере бактерий *Shewanella putrefaciens* CN-32 доказано, что лимитирующими факторами редукции железа могут выступать арсенаты, фосфаты, силикаты, цитраты, гуминовые вещества и экстрацеллюлярные полимеры [7]. Как правило, на процесс осаждения Fe(III) влияет сочетание абиотических и биотических процессов, которые приводят к образованию низкокristаллических гидроксидов, ферригидритов, гетита, лепидокрокита, магнетита и так называемых минералов *green rust* и Fe(III) -фосфатов [8, 9]. Разнообразие МНЧ может быть результатом различных механизмов энзиматического окисления Fe(II) , особенностей взаимодействия бактериальной клетки и соединений железа, а также условиями среды [10, 11]. Магнетит может быть продуктом диссимилятивной редукции Fe(III) , в которой участвуют иммобилизованные бактерии *Shewanella oneidensis* MR-1 [12]. При окислении органических веществ (ОВ) ЖРБ Fe(III) служит терминальным акцептором электронов [13].

Железоредуцирующие микроорганизмы *Geoalkalibacter ferrihydriticus* (*G. ferrihydriticus*) используют атомы Fe^{3+} в качестве внешнего акцептора электронов, осуществляют этот процесс вне клетки для получения энергии и синтеза АТФ. В настоящей работе исследованы морфология и свойства магнитных частиц, синтезируемых *G. ferrihydriticus*, которая является алкалофильной бактерией, способной восстанавливать гидроксид Fe(III) , антрахинон-2,6-дисульфонат (синтетический аналог гуминовых кислот), Mn(VI) и SO (оксид серы(II)), окисляя ацетат за счет постоянного транспор-

та протона через клеточную мембрану в цитоплазму. Эти грамположительные бактерии содержат толстую клеточную стенку (до 80 нм) и белково-углеводный S-слой. Механизм мембраносвязанной железоредуктазной активности *G. ferrihydriticus* аналогичен для родов *Geobacter* и *Shewanella* [14].

Использование МТБ для синтеза железосодержащих минералов является одной из задач современной биотехнологии. Магнитные наночастицы широко используются в медицине для терапии (для магнитной гипертермии или доставки лекарств) и диагностики (формирование контраста в магнитно-резонансной томографии). При создании МНЧ важен контроль процедуры синтеза, так как необходимо получить требуемую морфологию, состав и магнитные свойства, включая намагниченность, остаточную намагниченность, коэрцитивную силу, что и исследовано в настоящей работе. Магнитные наночастицы оксида железа использовались для разделения клеток и контрастного вещества (особенно, магнетит ввиду его простого получения, стабильности и биосовместимости) [12, 14]. Некоторые наночастицы оксида железа одобрены международными организациями и применяются в медицинских испытаниях.

Цель работы — исследование морфологии и свойств МНЧ бактерии *G. ferrihydriticus* методами КР-спектроскопии и лазерной интерференционной микроскопии.

Материалы и методы. *Объект исследования:* бактерия *G. ferrihydriticus* Z-0531T (ВКМ В-2349Т). Царство: *Bacteria* “*Gracilicutes*”, *Proteobacteria*. Семейство: *Geobacteraceae* в *Desulfuromonadaceae*. Клетки *G. ferrireducens* выращивали на среде с замещением ферригидрита с низким содержанием биогенного магнетита (общее количество нерастворимого железа 600 мМ). Для анализа структуры МНЧ бактерий использовали искусственные магнитные наночастицы¹ FeGd₃ и Fe₃OP₄Gd₃.

Для определения характеристик магнитных свойств МНЧ использовали комплекс для автоматизированных измерений магнитных свойств материалов в широком диапазоне магнитных полей и температур СКВИД (SQUID, Superconducting Quantum Interference Device, JDAW-20000 VSM). Система для точных измерений магнитной восприимчивости в диапазоне значений температуры 1,9...1000 К и $H_{\max} = 1497$ кА/м.

Для исследования молекулярной структуры искусственных МНЧ и клеток применяли метод КР-спектроскопии. Предполагалось установить молекулярный состав в различных участках клетки или культуры бактерий. Ре-

¹ Частицы синтезированы на кафедре физического материаловедения МИСИС.

гистрацию КР-спектров проводили с использованием конфокального микроскоп-спектрометра NTEGRA-SPECTRA (NT-MDT, Россия) в диапазоне значений частотного сдвига $100 \dots 1800 \text{ см}^{-1}$ с шагом измерения 1 см^{-1} , температура охлаждения CCD-камеры $-50 \text{ }^\circ\text{C}$, объектив $5\times$ с апертурой $0,15$, решетка 600 , мощность лазера на образце менее 3 мВт , длина волны возбуждения 633 нм , время регистрации одного спектра $15 \dots 30 \text{ с}$, число накоплений сигнала 3 . Для регистрации сигнала образец наносили на покровное стекло (Menzel-Glaser, $24 \times 24 \text{ нм}$) и проводили регистрацию сигнала с капли при наведении лазерного пучка на скопление МНЧ. Для обработки результатов использовали программное обеспечение *Origin 2017* (Microcal Inc., США). Обработка сигнала включала в себя усреднение спектральных линий и проведение нормировки на максимум интенсивности спектра.

Для исследования морфологии магнитных клеток и МНЧ использовали метод лазерной интерференционной микроскопии (ЛИМ), разработанный во ВНИИОФИ на базе микроинтерферометра Линника МИИ-4 (ЛОМО, Россия) с объективом $30\times$ ($NA = 0,65$), полупроводниковым лазером $\lambda = 650 \text{ нм}$ (мощность лазера на объекте менее 2 мВт). Размер регистрируемого кадра $195 \times 145 \text{ мкм}$. Для анализа полученных изображений использовали ПЗС-видеокамеру VS-415U (NPK Videoscan, Россия) размером матрицы $6,5 \times 4,83 \text{ мм}$ и разрешением 782×582 точек. Общее время регистрации изображения 10 с [10, 11]. Образец наносили на предметное стекло с зеркальной поверхностью и накрывали сверху предметным стеклом. На получаемом псевдоизображении по оси z представлена величина, пропорциональная толщине клетки. Для фазовых изображений по оси z указана оптическая разность хода (ОРХ) [нм]. В каждой точке $ОРХ = (k - k_0)z$, где k, k_0 — показатели преломления объекта и раствора; z — геометрическая (настоящая) толщина объекта [15]. Для восстановления фазового изображения по девяти регистрируемым интерферограммам методом фазовых шагов использовали программу *WinPhast* (ВНИИОФИ, Россия), для последующей работы с изображениями — программы *FIJI* (США) и *Origin 2017* [15, 16].

Для исследования ультраструктуры клеток бактерии и МНЧ использовали метод сканирующей микроскопии (СЭМ), фиксируя клетки и МНЧ на стеклянных подложках. Измерения выполняли при ускоряющих напряжениях ($1 \dots 3 \text{ кВ}$) на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM 7800F с разрешающей способностью $1,2 \text{ нм}$ (при 1 кВ) с системой *Gentle Beam*.

Результаты и обсуждение. Получены СЭМ-изображения распределения бактерий *G. ferrihydriticus*, культивированных на стеклянной

поверхности, распределения элементного состава, компонентов железа и намагниченности образцов (рис. 1). Установлено, что размеры бактериальных клеток имеют длину около 0,7...1,4 мкм и ширину примерно 0,3...0,5 мкм. Результаты коррелируют с ранее опубликованными [17]. Клетки обладают высокой адсорбцией к стеклу и минеральным частицам. Продуктами при росте на аморфном гидроксиде железа являются сидерит и магнетит.

В серии экспериментов проведены исследования намагниченности образцов (рис. 1, 2). Установлено, что образец с бактерией обладает следующими магнитными свойствами: удельная намагниченность $2,7\sigma_s \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{кг}$, коэрцитивная сила по намагниченности 31,8 кА/м. Удельная намагниченность искусственной МНЧ $69,7\sigma_s \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{кг}$, коэрцитивная сила намагниченности 5,3 кА/м. Значение удельной намагниченности бактерии в 25,8 раза меньше удельной намагниченности искусственной МНЧ, а коэрцитивная сила по намагниченности бактерии в 6 раз больше, чем МНЧ. Возможной причиной снижения отношения $JH_6 / JH_{\text{МНЧ}}$ может быть частичное окисление МНЧ.

Выявлена характерная зависимость намагниченности бактерии от температуры (см. рис. 1, 2): быстрое снижение намагниченности при температуре 100 К является характерной особенностью нестехиометрического магнетита как неорганического, так и биогенного происхождения [18, 19]. Магнитные свойства целых клеток и выделенных магнитосом различны. В частности, для *Magnetospirillum magneticum* АМВ-1 отношения $H_{cr} / H_c = 1,25$ и $M_{rs} / M_s = 0,46$ для образца целых клеток и $H_{cr} / H_c = 1,5$ и $M_{rs} / M_s = 0,33$ для магнитосом. Различия связаны с однодоменным состоянием МНЧ в клетке и увеличением вклада суперпарамагнитного состояния в случае изолированных магнитосом. Отметим, что температура перехода, характерная для магнетита [19], может быть в пределах 90...120 К, причем более низкие значения соответствуют более окисленным состояниям МНЧ.

Для визуализации образца и ассоциатов клеток (*G. ferrihydriticus*), а также выявления локализации кластеров магнитных частиц на подложке и в клетке использовали ЛИМ. Фазовое изображение образца (в псевдографике), которое представляет собой трехмерную проекцию клетки, приведено на рис. 2. В условиях многослойных пленок с использованием ЛИМ установлено распределение клеток и локализация МНЧ. Поскольку пленки состоят из нескольких слоев клеток, разрешение метода позволяет судить лишь о наличии ассоциатов МНЧ. Возможно, железосодержащие МНЧ малых размеров могут находиться внутри слоев клеток.

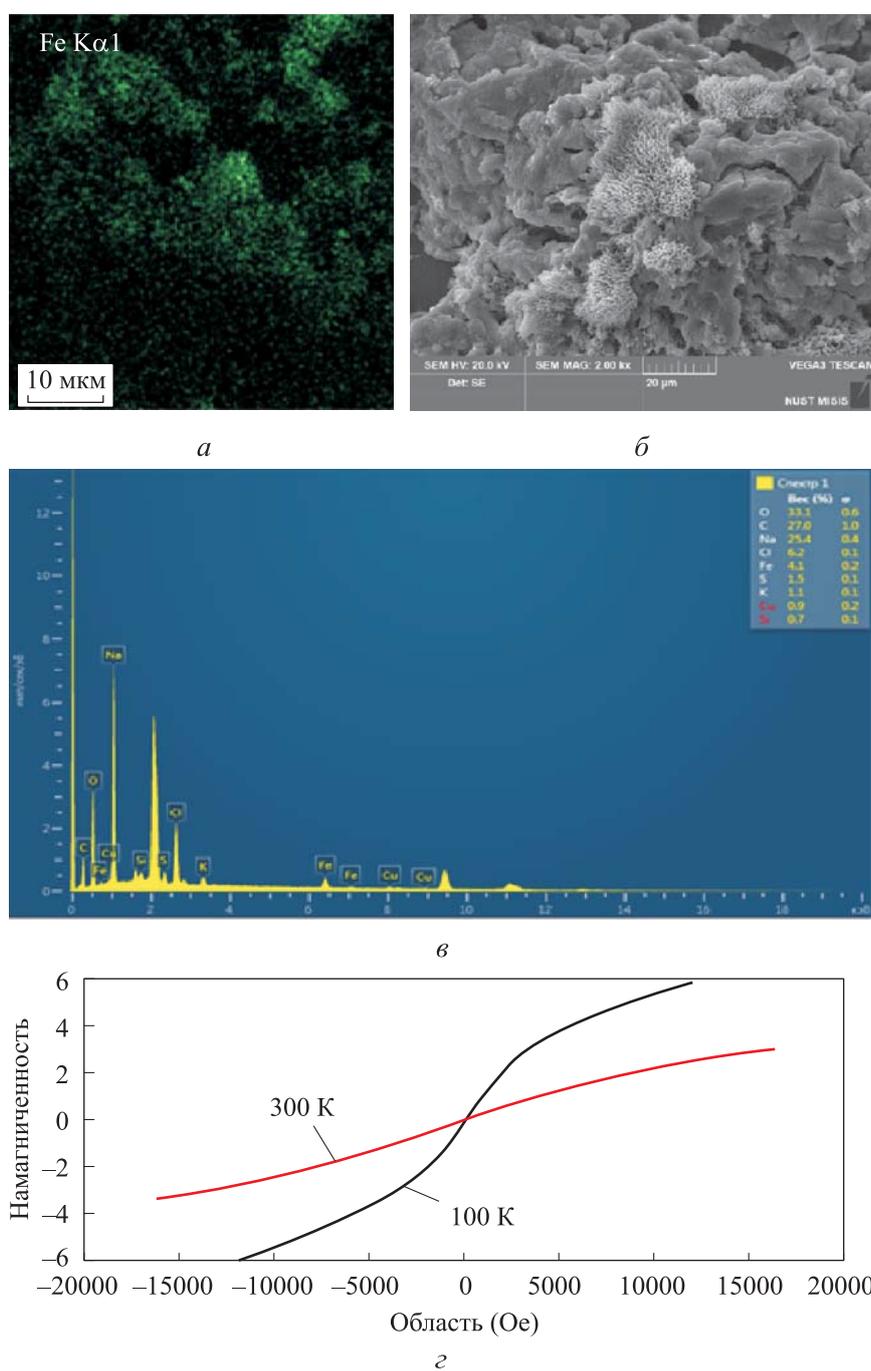


Рис. 1. СЭМ-изображения распределения бактерий (а), элементного состава проб (б), компонентов железа (в) и намагниченности образцов (г)

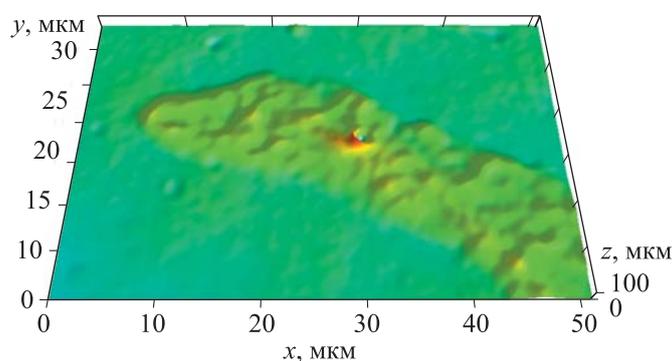


Рис. 2. ЛИМ-изображение культуры магнитобактерий

Результаты исследования с использованием КР-спектроскопии молекулярной структуры МНЧ бактерии и сопоставление КР-спектров природных и искусственных МНЧ (FeGd_3 и $\text{Fe}_3\text{OP}_4\text{Gd}_3$) представлены на рис. 3 и 4.

В области локализации МНЧ выявлены полосы КР-спектра 699 и 1077 см^{-1} . В отличие от КР-спектра МНЧ бактерии, в синцитии клеток определены новые полосы, см^{-1} : 659 , 686 , 928 , 1040 , 1062 и 1325 . Полосы КР-спектра в области $500 \dots 700 \text{ см}^{-1}$ обусловлены скелетными δ (CC_3) и δ (CH) деформациями аминокислот, а полосы 735 и 1075 см^{-1} — колебаниями гликозидной связи клеточной стенки ЖРБ. Возможно, что КР-спектры этих бактерий, как и у *Staphylococcus aureus*, обусловлены липидами клеточных стенок и мембран (область КР-спектра $930 \dots 1130 \text{ см}^{-1}$ соответствует мембранным фосфолипидам бактерии) [20].

Полосы КР-спектра вблизи 700 и 1370 см^{-1} характерны для маггемита (характерные линии 700 , 1370 , 1560 см^{-1}), полосы КР-спектра 220 , 247 , 412 , 498 , 613 и 1320 см^{-1} — для гематита [17]. В проведенных экспериментах установлено, что максимумы КР-спектра с длинами волн 109 , 139 , 156 , 250 , 320 , 350 , 475 , 650 , 950 и 1320 см^{-1} соответствуют структуре искусственной МНЧ $\text{Fe}_3\text{OP}_4\text{Gd}_3$, а максимумы с длиной волны 700 см^{-1} — FeGd_3 . Определено, что в области скопления природных МНЧ характерные полосы КР-спектра выявлены при 156 , 247 , 350 , 950 и 1120 см^{-1} . Единственная полоса при 670 см^{-1} соответствует $\text{A}1\text{g}$ -колебаниям магнетита [18]. Наличие узких полос с максимумами в области 220 , 247 , 412 и 498 см^{-1} свидетельствует о перекристаллизации магнетита в гематит. Появление широких полос в диапазоне значений $1200 \dots 1650 \text{ см}^{-1}$, харак-

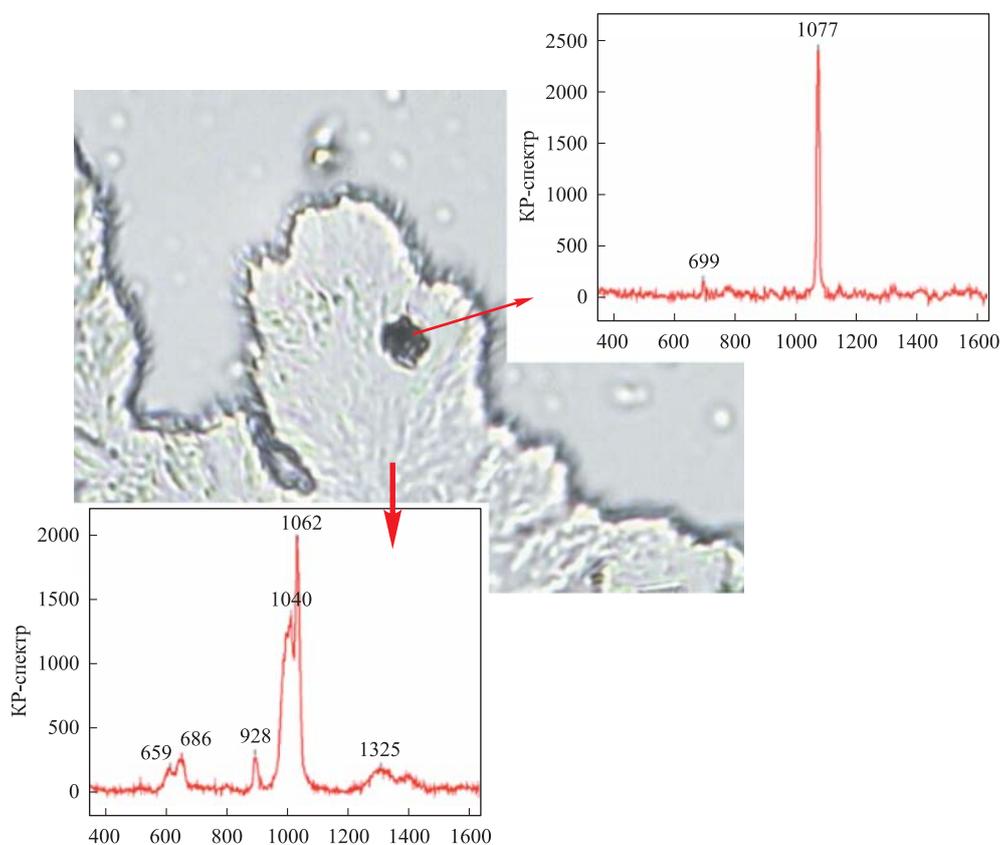


Рис. 3. КР-спектры молекул бактерии *G. ferrihydriticus*, полученные при регистрации от агрегатов МНЧ и синцития клеток

терных для различных форм углерода, может быть связано с наличием в МНЧ органического вещества. Интенсивность полос 1200...1650 см^{-1} при разрушении ЖРБ снижается, что, вероятно, вызвано частичным удалением органических веществ мембраны магнитосом, хотя полосы КР-спектра, характерные для гематита, остались неизменными. Следует отметить, что наблюдаемый сдвиг линий гематита в сторону более низких частот относительно основного материала [19] характерен для наноразмерных частиц оксида железа [18, 21]. Кроме того, узкие малоинтенсивные линии вблизи 700 и 1370 см^{-1} подтверждают наличие маггемита (характерные линии 700, 1370, 1560 см^{-1}) и гематита (220, 247, 412, 498, 613, 1320 см^{-1}). Результаты свидетельствуют о том, что основной объем кристаллической фазы изолированных магнитосом состоял из магнетита размером от десятков до сотен нм.

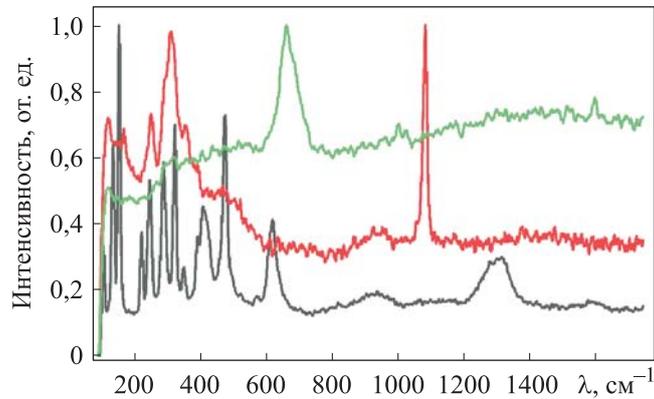


Рис. 4. КР-спектры искусственных магнитных наночастицы FeGd_3 (—) и $\text{Fe}_3\text{OP}_4\text{Gd}_3$ (—) и природных МНЧ (—), для КР-спектра Fe_2O_3 характерно наличие полос 220 и 400 см^{-1}

Заклучение. Проведено сравнение магнитных свойств и структуры частиц природных и искусственных МНЧ. Исследована морфология, состав и магнитные свойства МНЧ из ЖРБ. Магнитные свойства образца контролируются в основном случайными агрегатами МНЧ с незначительным вкладом сохранившихся МНЧ. В результате исследования установлено следующее: удельная намагниченность образца с бактерией $2,7\sigma_s \text{ А} \cdot \text{м}^2/\text{кг}$, коэрцитивная сила по намагниченности $31,8 \text{ кА/м}$; удельная намагниченность искусственной МНЧ $69,7\sigma_s \text{ А} \cdot \text{м}^2/\text{кг}$, ее коэрцитивная сила намагниченности $5,3 \text{ кА/м}$. Отметим, что значение удельной намагниченности бактерии в $25,8$ раза меньше удельной намагниченности искусственной МНЧ, а коэрцитивная сила по намагниченности бактерии в 6 раз больше, чем искусственной МНЧ. Причиной снижения отношения $J_{H_6} / J_{\text{МНЧ}}$ может быть частичное окисление МНЧ. В проведенных экспериментах определено, что максимумы КР-спектра с длинами волн $250, 350, 950\text{ см}^{-1}$ соответствуют структуре $\text{Fe}_3\text{OP}_4\text{Gd}_3$ и, следовательно, характерным полосам КР-спектра $247, 350, 950\text{ см}^{-1}$ в области скопления МНЧ бактерии.

Благодарности

Авторы выражают благодарность чл.-корр. РАН, д-ру биол. наук, профессору Е.А. Бонч-Осмоловской (МГУ) за предоставление культуры бактерий *G. ferrihydriticus*.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Балашов В.В., Заварзин Г.А. Анаэробное восстановление окисного железа водородной бактерией. *Микробиология*, 1979, т. 48, № 5, с. 773–778.
- [2] Lovley D.R., Stolz J.F., Nord G., et al. Anaerobic production of magnetite by a dissimilatory iron-reducing microorganism. *Nature*, 1987, vol. 330, no. 6145, pp. 252–254. DOI: <https://doi.org/10.1038/330252a0>
- [3] Zavarzina D.G., Kolganova T.V., Boulygina E.S., et al. *Geoalkalibacter ferrihydriticus* gen. nov. sp. nov., the first alkaliphilic representative of the family *Geobacteraceae*, isolated from a soda lake. *Microbiology*, 2006, vol. 75, no. 6, pp. 673–682. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0026261706060099>
- [4] Слободкин А.И., Заварзина Д.Г., Соколова Т.Г. и др. Диссимиляционное восстановление неорганических акцепторов электронов термофильными аэробными прокариотами. *Микробиология*, 1999, т. 68, № 5, с. 600–622. EDN: VMSGOV
- [5] Заварзина Д.Г. Железоредукторы содовых озер — реликты «железного века»? *Природа*, 2013, № 9, с. 59–67. EDN: RNEORT
- [6] Райхер Ю.Л., Степанов В.И., Столяр С.В. и др. Магнитные свойства биоминеральных наночастиц, продуцируемых бактериями *Klebsiella oxytoca*. *Физика твердого тела*, 2010, т. 52, № 2, с. 277–284. EDN: RCRTCR
- [7] O’Loughlin E.J., Gorski C.A., Scherer M.M., et al. Effects of oxyanions, natural organic matter, and bacterial cell numbers on the bioreduction of lepidocrocite (γ -FeOOH) and the formation of secondary mineralization products. *Environ Sci. Technol.*, 2010, vol. 44, iss. 12, pp. 4570–4576. DOI: <https://doi.org/10.1021/es100294w>
- [8] Кондратьева Л.М., Голубева Е.М. Образование минералов железа на цеолитовой матрице. *Геология и геофизика*, 2014, т. 55, № 12, с. 1738–1747. EDN: TEAOTX
- [9] Захарова Ю.Р. Микроорганизмы, окисляющие железо и марганец в донных осадках озера Байкал. Дис. ... канд. биол. наук. Владивосток, Дальневост. гос. ун-т, 2007.
- [10] Hallberg R., Ferris F.G. Biomineralization by *Gallionella*. *Geomicrobiol. J.*, 2004, vol. 21, iss. 5, pp. 325–330. DOI: <https://doi.org/10.1080/01490450490454001>
- [11] Sarkar D., Mandal M., Mandal K. Domain controlled magnetic and electric properties of variable sized magnetite nano-hollow spheres. *J. Appl. Phys.*, 2012, vol. 112, iss. 6, art. 064318. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4754018>
- [12] Coker V.S., Byrne J.M., Telling N.D., et al. Characterisation of the dissimilatory reduction of Fe(III)-oxyhydroxide at the microbe-mineral interface: the application of STXM-XMCD. *Geobiology*, 2012, vol. 10, iss. 4, pp. 347–354. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1472-4669.2012.00329.x>
- [13] Bonneville S., Van Cappellen P., Behrends T. Microbial reduction of iron(III) oxyhydroxides: effects of mineral solubility and availability. *Chem. Geol.*, 2004, vol. 212, iss. 3-4, pp. 255–268. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2004.08.015>

[14] Greene A.C., Patel B.K., Yacob S. *Geoalkalibacter subterraneus* sp. nov., an anaerobic Fe(III)- and Mn(IV)-reducing bacterium from a petroleum reservoir, and emended descriptions of the family *Desulfuromonadaceae* and the genus *Geoalkalibacter*. *Int. J. Syst. Evol. Microbiol.*, 2009, vol. 59, iss. 4, pp. 781–785.

DOI: <https://doi.org/10.1099/ijs.0.001537-0>

[15] Юсипович А.И., Берестовская Ю.Ю., Шутова В.В. и др. Новые возможности исследования микробиологических объектов методом лазерной интерференционной микроскопии. *Биофизика*, 2011, т. 56, № 6, с. 1091–1098.

EDN: OQRBPL

[16] Jiang W., Yin Z. Seeing the invisible in differential interference contrast microscopy images. *Med. Image Anal.*, 2016., vol. 34, pp. 65–81.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.media.2016.04.010>

[17] Gareev K.G., Grouzdev D.S., Kharitonskii P.V., et al. Magnetic properties of bacterial magnetosomes produced by *Magnetospirillum caucaseum* SO-1. *Microorganisms*, 2021, vol. 9, iss. 9, art. 1854. DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms9091854>

[18] Al'myashev V.I., Gareev K.G., Ionin S.A., et al. Investigation of the structure, elemental and phase compositions of Fe₃O₄-SiO₂ composite layers by scanning electron microscopy, X-ray spectroscopy, and thermal nitrogen desorption methods. *Phys. Solid State*, 2014, vol. 56, no. 11, pp. 2155–2159.

DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063783414110031>

[19] Jubb A.M., Allen H.C. Vibrational spectroscopic characterization of hematite, maghemite, and magnetite thin films produced by vapor deposition. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2010, vol. 2, iss. 10, pp. 2804–2812. DOI: <https://doi.org/10.1021/am1004943>

[20] Hardiansyah A., Chen A.Y., Liao H.L., et al. Core-shell of FePt@SiO₂-Au magnetic nanoparticles for rapid SERS detection. *Nanoscale Res. Lett.*, 2015, vol. 10, art. 412.

DOI: <https://doi.org/10.1186/s11671-015-1111-0>

[21] Slavov L., Abrashev M.V., Merodiiska T., et al. Raman spectroscopy investigation of magnetite nanoparticles in ferrofluids. *J. Magn. Magn. Mater.*, 2010, vol. 322, iss. 14, pp. 1904–1911. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2010.01.005>

Савченко Александр Григорьевич — канд. физ.-мат. наук, заведующий кафедрой физического материаловедения НИТУ МИСИС (Российская Федерация, 119049, Москва, Ленинский пр-т, д. 4, стр. 1).

Шутова Виталина Викторовна — канд. биол. наук, доцент, доцент кафедры биотехнологии, биохимии и биоинженерии факультета биотехнологии и биологии МГУ им. Н.П. Огарева (Российская Федерация, 430005, Саранск, Большевистская ул., д. 68).

Максимов Георгий Владимирович — д-р биол. наук, профессор, профессор кафедры биофизики Биологического факультета МГУ (Российская Федерация, 119234, Москва, Ленинские горы, д. 1).

Слатинская Ольга Вадимовна — канд. биол. наук, младший научный сотрудник кафедры биофизики Биологического факультета МГУ (Российская Федерация, 119234, Москва, Ленинские горы, д. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Савченко А.Г., Шутова В.В., Максимов Г.В. и др. Использование спектроскопии комбинационного рассеяния для исследования магнитобактерий. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2025, № 2 (119), с. 78–92.

EDN: KYXDAA

USING RAMAN SPECTROSCOPY TO STUDY MAGNETOBACTERIA

A.G. Savchenko¹

V.V. Shutova²

G.V. Maksimov³

O.V. Slatinskaya³

algsav@gmail.com

vshutova@yandex.ru

gmaksimov@mail.ru

slatolya@mail.ru

¹ NUST MISIS, Moscow, Russian Federation

² MRSU, Saransk, Russian Federation

³ MSU, Moscow, Russian Federation

Abstract

In the article, using the method of Raman spectroscopy, a comparison was made of the magnetic properties and structure of natural and artificial magnetic nanoparticles (MNPs). The morphology, composition and magnetic properties of MNPs from the bacterium *Geoalkalibacter ferrihydriticus* were studied. The magnetic properties of the sample are determined mainly by MNP aggregates and are: specific magnetization, $2.7\sigma_s \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$, and magnetization coercive force 31.8 kA/m. On the other hand, the magnetization of the artificial magnetic NP was: specific magnetization $69.7\sigma_s \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$, and coercive magnetization force 5.3 kA/m. So, the value of the specific magnetization of a bacterium is 25.8 times less than the specific magnetization of an artificial NP, and the coercive magnetization force of a bacterium is 6 times greater than that of an artificial NP. It is likely that the reason for the decrease in the JH_b/JH_{MNP_s} ratio may be the partial oxidation of MNPs. According to the authors, the structure of bacterial MNPs is close to the structure of $\text{Fe}_3\text{OP}_4\text{Gd}_3$ (the bands at 250, 350, 950 cm^{-1}

Keywords

Raman spectroscopy, magnetobacteria, Geoalkalibacter ferrihydriticus, magnetic nanoparticles

correspond to the characteristic Raman spectrum bands of 247, 350 and 950 cm^{-1} in the region where bacterial MNPs accumulate)

Received 19.06.2024

Accepted 19.07.2024

© Author(s), 2025

REFERENCES

- [1] Balashov V.V., Zavarzin G.A. Anaerobic reduction of iron oxide by hydrogen bacteria. *Mikrobiologiya*, 1979, vol. 48, no. 5, pp. 773–778 (in Russ.).
- [2] Lovley D.R., Stolz J.F., Nord G., et al. Anaerobic production of magnetite by a dissimilatory iron-reducing microorganism. *Nature*, 1987, vol. 330, no. 6145, pp. 252–254. DOI: <https://doi.org/10.1038/330252a0>
- [3] Zavarzina D.G., Kolganova T.V., Boulygina E.S., et al. *Geoalkalibacter ferrihydriticus* gen. nov. sp. nov., the first alkaliphilic representative of the family *Geobacteraceae*, isolated from a soda lake. *Microbiology*, 2006, vol. 75, no. 6, pp. 673–682. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0026261706060099>
- [4] Slobodkin A.I., Zavarzina D.G., Sokolova T.G., et al. Dissimilatory reduction of inorganic electron acceptors by thermophilic anaerobic prokaryotes. *Microbiology*, 1999, vol. 68, no. 5, pp. 522–542.
- [5] Zavarzina D.G. Iron reducers of soda lakes: relicts of “iron age”? *Priroda*, 2013, no. 9, pp. 59–67 (in Russ.). EDN: RNEORT
- [6] Raikher Yu.L., Stepanov V.I., Stolyar S.V., et al. Magnetic properties of biomineral particles produced by bacteria *Klebsiella oxytoca*. *Phys. Solid State*, 2010, vol. 52, no. 2, pp. 298–305. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063783410020125>
- [7] O’Loughlin E.J., Gorski C.A., Scherer M.M., et al. Effects of oxyanions, natural organic matter, and bacterial cell numbers on the bioreduction of lepidocrocite (γ -FeOOH) and the formation of secondary mineralization products. *Environ Sci. Technol.*, 2010, vol. 44, iss. 12, pp. 4570–4576. DOI: <https://doi.org/10.1021/es100294w>
- [8] Kondratyeva L.M., Golubeva E.M. Formation of iron minerals on zeolite matrix. *Russ. Geol. Geophys.*, 2014, vol. 55, no. 12, pp. 1387–1394. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2014.11.003>
- [9] Zakharova Yu.R. Mikroorganizmy, okislyayushchie zhelezo i marganets v donnykh osadkakh ozera Baykal. Dis. kand. biol. nauk [Microorganisms oxidizing iron and manganese in bottom sediments of lake Baikal. Cand. Sc. (Biol.). Diss.]. Vladivostok, DSU, 2007 (in Russ.).
- [10] Hallberg R., Ferris F.G. Biomineralization by *Gallionella*. *Geomicrobiol. J.*, 2004, vol. 21, iss. 5, pp. 325–330. DOI: <https://doi.org/10.1080/01490450490454001>
- [11] Sarkar D., Mandal M., Mandal K. Domain controlled magnetic and electric properties of variable sized magnetite nano-hollow spheres. *J. Appl. Phys.*, 2012, vol. 112, iss. 6, art. 064318. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4754018>
- [12] Coker V.S., Byrne J.M., Telling N.D., et al. Characterisation of the dissimilatory reduction of Fe(III)-oxyhydroxide at the microbe-mineral interface: the application of STXM-XMCD. *Geobiology*, 2012, vol. 10, iss. 4, pp. 347–354. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1472-4669.2012.00329.x>

- [13] Bonneville S., Van Cappellen P., Behrends T. Microbial reduction of iron(III) oxyhydroxides: effects of mineral solubility and availability. *Chem. Geol.*, 2004, vol. 212, iss. 3-4, pp. 255–268. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2004.08.015>
- [14] Greene A.C., Patel B.K., Yacob S. *Geoalkalibacter subterraneus* sp. nov., an anaerobic Fe(III)- and Mn(IV)-reducing bacterium from a petroleum reservoir, and emended descriptions of the family *Desulfuromonadaceae* and the genus *Geoalkalibacter*. *Int. J. Syst. Evol. Microbiol.*, 2009, vol. 59, iss. 4, pp. 781–785. DOI: <https://doi.org/10.1099/ijs.0.001537-0>
- [15] Yusipovich A.I., Berestovskaya Yu.Yu., Shutova V.V., et al. New possibilities of studying microbial objects by laser interference microscopy. *Biophysics*, 2011, vol. 56, no. 6, pp. 1063–1068. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0006350911060224>
- [16] Jiang W., Yin Z. Seeing the invisible in differential interference contrast microscopy images. *Med. Image Anal.*, 2016., vol. 34, pp. 65–81. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.media.2016.04.010>
- [17] Gareev K.G., Grouzdev D.S., Kharitonskii P.V., et al. Magnetic properties of bacterial magnetosomes produced by *Magnetospirillum caucaseum* SO-1. *Microorganisms*, 2021, vol. 9, iss. 9, art. 1854. DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms9091854>
- [18] Al'myashev V.I., Gareev K.G., Ionin S.A., et al. Investigation of the structure, elemental and phase compositions of Fe₃O₄-SiO₂ composite layers by scanning electron microscopy, X-ray spectroscopy, and thermal nitrogen desorption methods. *Phys. Solid State*, 2014, vol. 56, no. 11, pp. 2155–2159. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063783414110031>
- [19] Jubb A.M., Allen H.C. Vibrational spectroscopic characterization of hematite, maghemite, and magnetite thin films produced by vapor deposition. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2010, vol. 2, iss. 10, pp. 2804–2812. DOI: <https://doi.org/10.1021/am1004943>
- [20] Hardiansyah A., Chen A.Y., Liao H.L., et al. Core-shell of FePt@SiO₂-Au magnetic nanoparticles for rapid SERS detection. *Nanoscale Res. Lett.*, 2015, vol. 10, art. 412. DOI: <https://doi.org/10.1186/s11671-015-1111-0>
- [21] Slavov L., Abrashev M.V., Merodiiska T., et al. Raman spectroscopy investigation of magnetite nanoparticles in ferrofluids. *J. Magn. Magn. Mater.*, 2010, vol. 322, iss. 14, pp. 1904–1911. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2010.01.005>

Savchenko A.G. — Cand. Sc. (Phys.-Math.), Head of Department of Physical Materials Science, NUST MISIS (Leninskiy prospekt 4, str. 1, Moscow, 119049 Russian Federation).

Shutova V.V. — Cand. Sc. (Biol.), Assoc. Professor, Department of Biotechnology, Biochemistry and Bioengineering, Faculty of Biotechnology and Biology, MRSU (Bolshhevistskaya ul. 68, Saransk, 430005 Russian Federation).

Maksimov G.V. — Dr. Sc. (Biol.), Professor, Department of Biophysics, Faculty of Biology, MSU (Leninskie Gory 1, Moscow, 119234 Russian Federation).

Slatinskaya O.V. — Cand. Sc. (Biol.), Junior Research Fellow, Department of Biophysics, Faculty of Biology, MSU (Leninskie Gory 1, Moscow, 119234 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Savchenko A.G., Shutova V.V., Maksimov G.V., et al. Using Raman spectroscopy to study magnetobacteria. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2025, no. 2 (119), pp. 78–92 (in Russ.). EDN: KYXDAA