

БИОМОРФНЫЕ СТРУКТУРЫ В БОГАТЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ РУДАХ КМА (ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭЛЕКТРОННО-МИКРОСКОПИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ)

М. Ю. Меркушова¹, Е. А. Жегалло²

¹Воронежский государственный университет

² Палеонтологический институт им. Борисяка РАН, Москва

Поступила в редакцию 19 мая 2016 г.

Аннотация: богатые железные руды Курской магнитной аномалии (КМА) связаны с палеозойской корой выветривания нижнепротерозойских железистых кварцитов. В результате изучения руд методом сканирующей электронной микроскопии были обнаружены разнообразные по морфологии минерализованные железобактерии и продукты их жизнедеятельности. Бактериальные организмы выполняли функции по регулированию условий минералообразования, переводили железо в нерастворимую форму и аккумулировали его на своей поверхности. Предполагается участие микроорганизмов на определенных стадиях развития коры выветривания в образовании богатых железных руд.

Ключевые слова: Курская магнитная аномалия, кора выветривания, богатые железные руды, железобактерии.

THE BIOMORPHIC STRUCTURES IN RICH IRON ORES KMA (BASED ON SEM EXAMINATION)

Abstract: rich iron ores of the Kursk magnetic anomaly are formed by paleozoic weathering crust on proterozoic jaspilites. As a result of studying ores by SEM were found a variety of morphology mineralized iron bacteria and their metabolic products. Bacteria performed functions for regulation mineralization conditions, transferred iron to insoluble form and accumulated iron on their surface. As a result, we can assume the microorganisms participation at certain stages of formation weathering crust in rich iron ore formation.

Keywords: Kursk Magnetic Anomaly, weathering crust, rich iron ore, iron bacteria.

Проблемы рудообразования являются одними из важнейших в геологии. Известно, что богатые железные руды КМА обязаны своим происхождением процессам выветривания, обусловленным климатическими, структурно-тектоническими и геоморфологическими факторами [1, 2]. Гораздо меньше изучена роль микроорганизмов в формировании коры выветривания железистых кварцитов. Развитие современных инструментальных методов сканирующей электронной микроскопии позволяет заниматься бактериально-палеонтологическим изучением на новом техническом уровне, в результате чего стало возможным установить присутствие fossilized микроорганизмов в богатых железных рудах КМА. Сохранение бактерий в ископаемом состоянии определяется высокой скоростью минерализации, порой составляющей несколько часов [3–5].

В настоящей работе представлены результаты электронно-микроскопического изучения богатых железных руд Яковлевского и Стойленского месторождений КМА. Руды Яковлевского месторождения

представляют собой продукты каменноугольного латеритного выветривания железистых кварцитов различных типов, Стойленского – продукты девонского гидрослюдисто-каолинового выветривания [6–8]. В качестве объектов исследования были выбраны мартитовые, железнослюдко-мартитовые, мартито-гидрогематитовые и гидрогематито-гетитовые руды. Анализировались свежие сколы пород площадью от 2 до 6 см². Образцы промывались последовательно в дистиллированной воде и, позже, в спирте для исключения поверхностного загрязнения, напылялись углеродом и золотом с палладием. Исследования проводились с помощью СЭМ TESCAN VEGA ПХМУ в Палеонтологическом институте РАН им. А. А. Борисяка РАН.

Главными минералами богатых железных руд являются: гематит, мартит, магнетит, гетит, гидрогетит, гидрогематит, кварц, встречаются глинистые минералы, представленные бертьерином, шамозитом, каолинитом и иллитом, а также карбонаты и сульфиды. Среди перечисленных минералов наиболее интересными с точки зрения исследования биоморфных структур яв-

ляются минералы железа, слагающие основную массу руд, образование которых, среди прочего, может происходить с участием бактериальных форм [5].

Биоминерализация – процесс образования и (или) преобразования минералов, протекающий в геологической среде с участием организмов. Участие может быть непосредственным путем вхождения в механизмы эволюции минералов («биологически контролируемая» минерализация), сопутствующим, когда организмы катализируют/ингибируют процессы минералообразования, или регулирующим, когда организмы регулируют параметры среды минералообразования («биологически-стимулированная» минерализация») [9].

Изучение участия железобактерий в образовании докембрийских джеспилитов началось в начале XX в., когда Ч. Лейс одним из первых предположил биогенное происхождение железистых кварцитов возрастом 2,8–1,6 млрд лет. Позже эта идея была поддержана Л. Кайё, Е. Муром и др [3]. В 1943 г. А. Г. Вологдин [10] опубликовал данные о присутствии железобактерий в виде округлых телец в железистых кварцитах КМА, а последующие исследования подтвердили их бактериальную природу. О существенной роли микроорганизмов в выветривании пород и образовании минералов в корах выветривания было отмечено еще И. Н. Гинзбургом [11]. Однако богатые железные руды КМА с точки зрения наличия в них биоморфных структур ранее не изучались.

Способность осаждать окислы железа на поверхности клеток присуща многим бактериям, различающимся морфологическими и физиологическими признаками и принадлежащим к разным таксономическим группам. С. Н. Виноградский впервые термин «железобактерии» применил для обозначения организмов, использующих энергию окисления Fe^{2+} до Fe^{3+} для ассимиляции CO_2 , т. е. способных существовать хемолитоавтотрофно. Х. Молиш к железобактериям относил все организмы, откладывающие вокруг клеток окислы железа или марганца, независимо от того, связан ли этот процесс с получением клеточной энергии. На основании морфологических характеристик все железобактерии разделяются на нитчатые и одноклеточные [12].

Накопление окислов железа на поверхности железобактерий есть результат двух взаимосвязанных процессов: аккумуляции клетками металла и окисления, сопровождающегося обильным отложением нерастворимых окислов на поверхности бактерий. Процесс аккумуляции металлов в основе имеет физико-химическую природу и в значительной мере обусловлен химическим составом и свойствами поверхностных структур клетки. Он включает связывание металлов внеклеточными структурами (капсулы, чехлы, слизистые выделения), клеточной стенкой и цитоплазматической мембраной [12].

В исследуемых образцах нами были обнаружены несколько биоморфных минералов железа. В железослюдково-мартитовой руде Яковлевского месторождения микроструктуры крайне разнообразны и

характеризуются неупорядоченным сочетанием нескольких типов. В частности, выделяются участки развития кристаллического гематита и участки, сложенные веществом комковатой структуры, расположенные, главным образом, в пустотах и трещинах. Под электронным микроскопом рассматриваемые образования сложены овальными формами различной степени сохранности размером 20–30 нм и их сростаниями (рис. 1А).

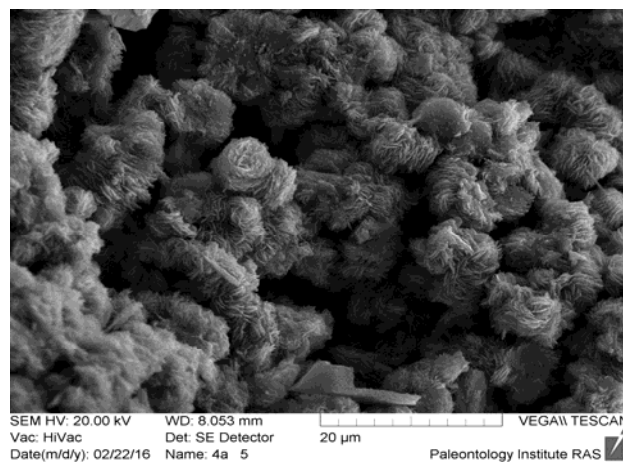
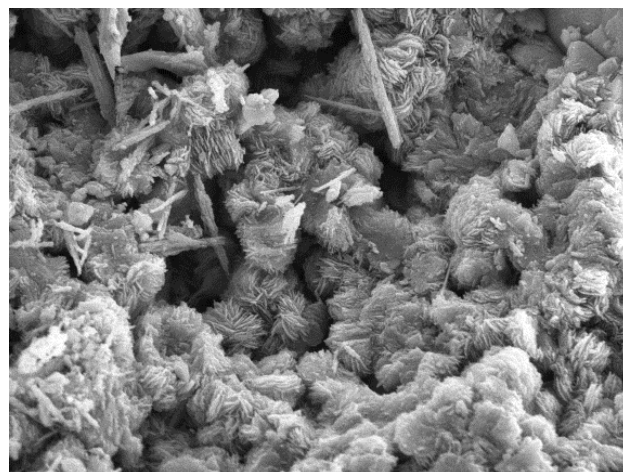


Рис. 1а. Биогенный гематит в образце железослюдково-мартитовой руды Яковлевского месторождения в виде сростков пластинчатых кристаллов, «железных роз» и «мотков пряжи».

В большом увеличении, видно, что подобные структуры состоят из сростков пластинчатых кристаллов, «железных роз» и «мотков пряжи». Из-за плотного расположения пластинчатых кристаллов местами общая поверхность приобретает спутанно-волоконистый вид (рис. 1Б).

Подобные формы были получены в результате эксперимента по синтезу гематита в присутствии органического вещества, впоследствии была определена значительная роль органических соединений в формировании структурно-морфологических разновидностей

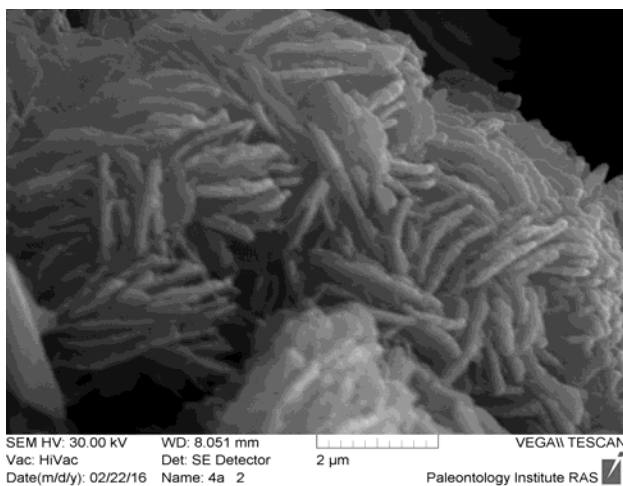
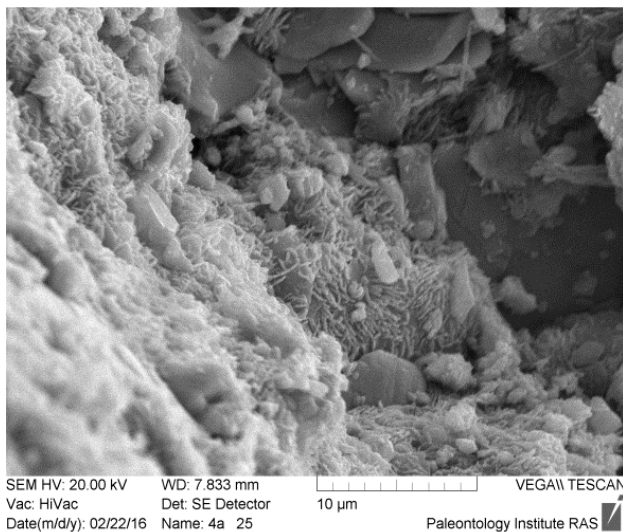


Рис. 1б. Биогенный гематит в образце железослюдково-мартитовой руды Яковлевского месторождения, образующий спутано-волоконистую текстуру.

тей и размеров минерала. Формы гематита, синтезированные с участием органики, оказались сложены эллипсоидами, состоящими из гексагональных кристаллов гематита размером 5–10 нм, подобными тем, что обнаружены в образце железослюдково-мартитовой руды Яковлевского месторождения (рис. 2А) [13, 14].

Помимо биогенного гематита значительная часть породы сложена его абиогенной кристаллической формой (рис. 2Б). Наличие разнообразных по морфологии гематитов, объясняется, вероятно, тем, что из-за высокой скорости фильтрации вод в коре выветривания, местами возникают условия, неблагоприятные для развития микробиоты, и там развивались псевдоморфозы гематита по магнетиту, т.е. мартит [13–16]. Биоморфный гематит образовался же, возможно, из аморфной гидроокиси трехвалентного железа в водной среде при pH 6 при участии органики, что и пытались проверить экспериментально Fischer and Schwertmann [13].

В образце железослюдковой руды Стойленского месторождения биоморфозы представлены ажурными изгибающимися формами похожими на минерализованный гликокаликс – слизь, обычно выделяемую клетками бактерий в процессе жизнедеятельности и выполняющую защитную функцию [4, 5]. Расположены такие формы по всей поверхности образца, не тяготея к отдельным порам и трещинам. Наряду с изолированными формами, наблюдаются их скопления в виде микроколоний (рис. 3). Важная для геохимии роль гликокаликса заключается в создании микроусловий вокруг организмов, благодаря которым происходят сорбция и концентрация некоторых элементов и соединений. Кроме того, он служит бентосным бактериям средством для колонизации твердых субстратов [16, 17].

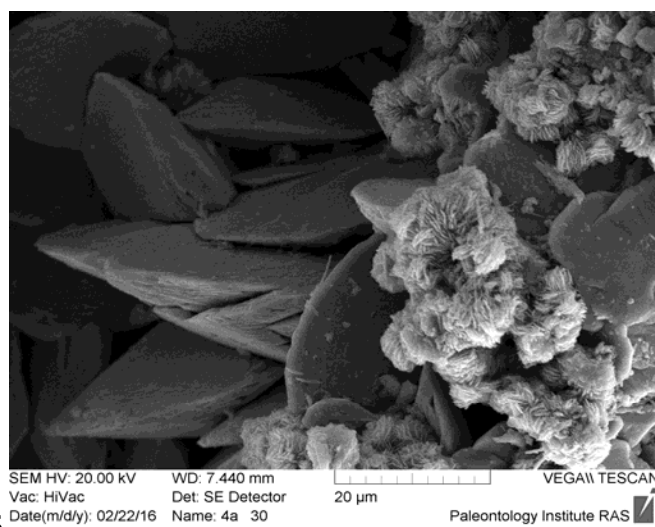
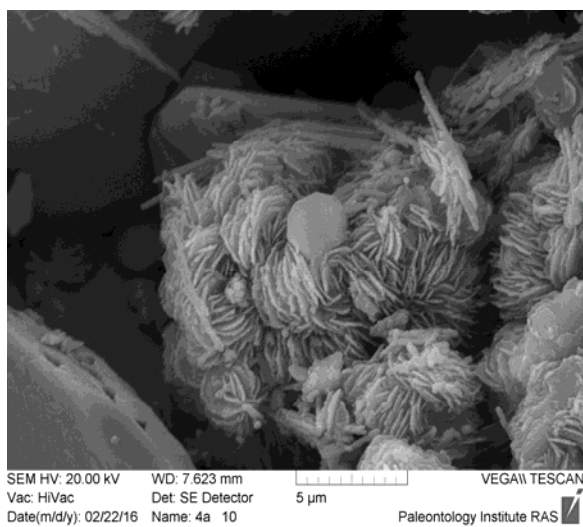


Рис. 2. А – биогенный гематит в образце железослюдково-мартитовой руды Яковлевского месторождения в виде пластинчатых кристаллов, образующих своеобразный фрамбоид; Б – биогенный гематит на фоне кристаллического гематита.

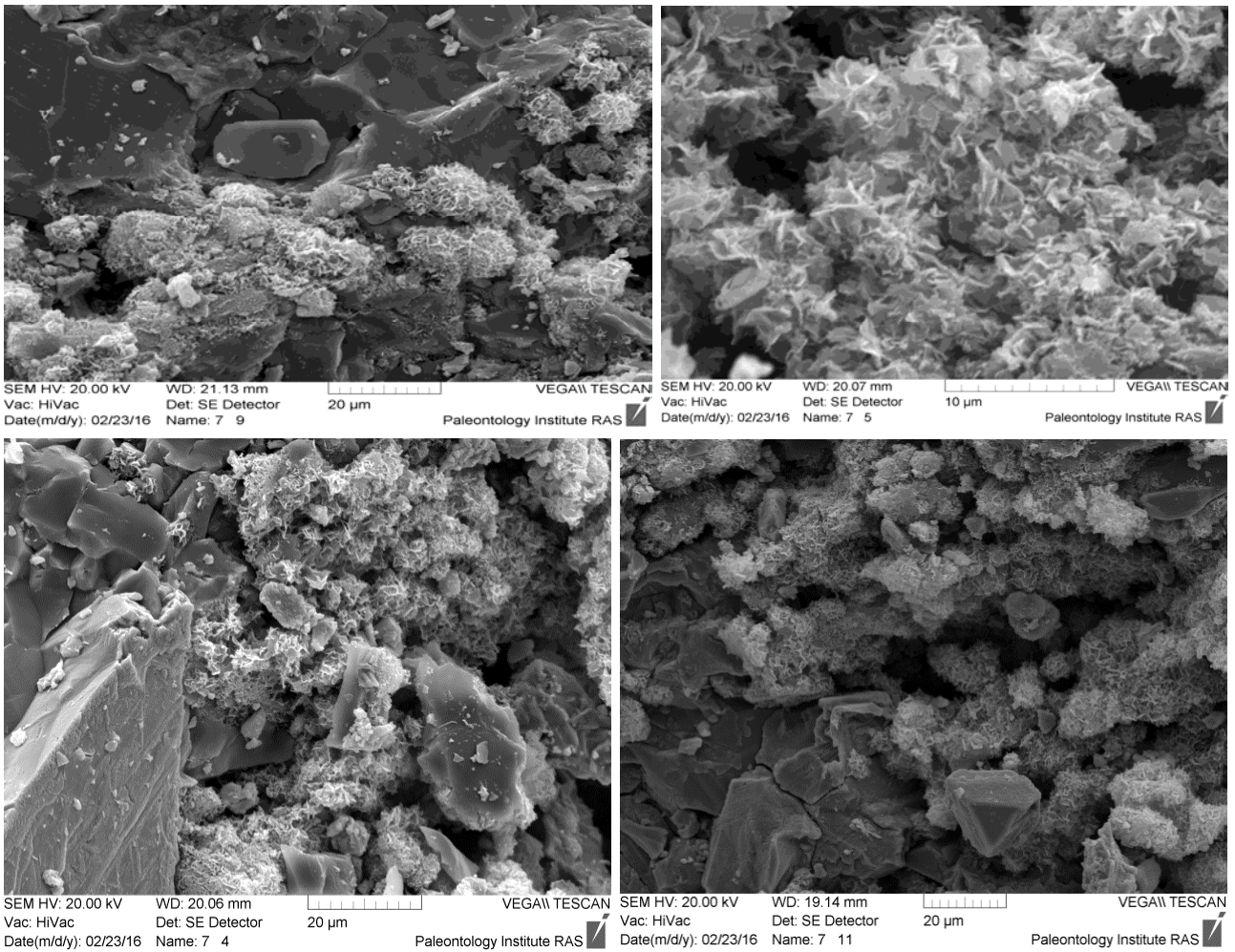


Рис. 3. Минерализованный гликокаликс в образце железнослюдковой руды Стойленского месторождения

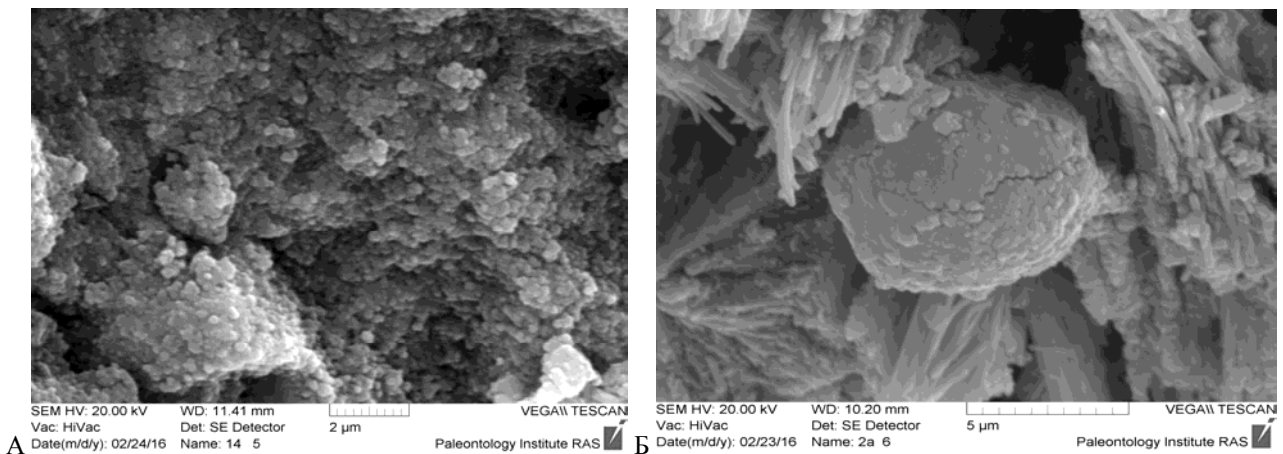


Рис. 4. А – сплошная коккоидная масса в образце маритовой руды Стойленского месторождения; Б – относительно крупный коккоид размером 5 нм в образце гидрогематито-гетитовой руды Яковлевского месторождения

Образец мартино-гидрогематитовой руды Стойленского месторождения, при сложен микробной массой, в основном коккоидной (рис. 4А). Коккоидные формы представляют собой остатки шаровидных бактерий диаметром до 3 нм, образующие плотные скопления. Подобные формы были обнаружены и в образ-

це гидрогематито-гетитовой руды Яковлевского месторождения. Редко встречаются отдельные кокки относительно крупных размеров, в окружении нитчатых форм, образующих прослои или пучки (рис. 4Б).

В химическом составе биогенного гематита любой генерации фиксируется присутствие Al и Si, при этом

в абиогенный гематит не содержит этих элементов. Это можно объяснить тем, что при аккумуляции бактериями вещества из растворов для своей жизнедеятельности, помимо железа ими были захвачены и эти элементы.

В результате проведенного исследования богатых железных руд КМА методом сканирующей электронной микроскопии установлены биоморфные структуры, образованные бактериальными организмами по минералам железа. В образцах были обнаружены несколько таких структур: во-первых, гематит, образованный в результате биологически-стимулированной минерализации, принимающий форму эллипсоида, состоящего из гексагональных кристаллов; во-вторых, минерализованный гликокаликс, выделяемый организмами в процессе жизнедеятельности; и, в-третьих, коккоидные формы, представленные как плотными скоплениями, так и одиночными крупными кокками. Микробиота в процессах выветривания выполняла несколько важных функций – регулирование условий минералообразования, перевод железа в нерастворимую форму и аккумуляцию продуктов окисления на своей поверхности. Присутствие фоссилизированных микроорганизмов позволяет предположить участие на определенных стадиях развития коры выветривания железобактерий, реликты которых сохранились в богатых железных рудах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Геология, гидрогеология и железные руды бассейна Курской магнитной аномалии / Под ред. И. Н. Леоненко. — Т. 3. Железные руды. М.: Изд-во «Недра». — 1969. — 319 с.
2. Железные руды КМА / Гл.ред. В. П. Орлов. — М.: ЗАО «Геоинформмарк», 2001. — 616 с.
3. Антошкина, А. И. Бактериальное породообразование – реальность современных методов исследования / А. И. Антошкина // Ученые записки Казанского университета. — Т. 153, кн. 4 Естественные науки. — 2011. — С. 114 – 126 с.
4. Астафьева, М. М. Ископаемые бактерии и другие микроорганизмы в земных породах и астроматериалах / М. М. Астафьева, Л. М. Герасименко, А. Р. Гептнер. — Москва, ПИН РАН. — 2011. — С. 173.
5. Бактериальная палеонтология. Под ред. А. Ю. Розанова. — М.: ПИН РАН, 2002. — 188 с.,
6. Савко, А. Д. Этапы формирования кор выветривания в верхнем протерозое и палеозое Воронежской антеклизы / А. Д. Савко, Н. П. Хожайнов // Литогенез в докембрии и фанерозое Воронежской антеклизы. — Воронеж. — 1975. — С. 46–59.
7. Никулин, И. И. Железорудные коры выветривания Белгородского района КМА / И. И. Никулин, А. Д. Савко / И. И. Никулин // Тр. НИИ геологии Воронеж. гос. ун-та. — Вып. 85. — Воронеж: Изд-во ВГУ. — 2015. — 102 с.
8. Никулин, И. И. Типы гипергенных богатых железных руд Белгородского района Курской Магнитной Аномалии / И. И. Никулин, А. Д. Савко, М. Ю. Меркушова // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер.: Геология. — 2015. — № 3. — С. 71–82.
9. Яхонтова, Л. К. Основы минералогии гипергенеза / Л. К. Яхонтова, В. П. Зверева. — Владивосток: Дальнаука. — 2000. — 331 с.
10. Вологдин, А. Г. Геологическая деятельность микроорганизмов / А. Г. Вологдин // Изв. АН СССР, 1947. — № 3. — С. 19–38.
11. Гинзбург, И. Н. Роль микроорганизмов в выветривании пород и образовании минералов / И. Н. Гинзбург // Кора выветривания. — М.: Изд-во АН СССР. — 1952. — Вып. 1. — 6–35 с.
12. Гусев, М. В. Микробиология / М. В. Гусев, Л. А. Минеева. — 4-е изд., стер. — М.: Изд-во «Академия». — 2003. — 464 с.
13. Schwertmann, U. The influence of organic compounds on the formation of iron oxides. / U. Schwertmann, W. R. Fischer // Clays and clay Mineral., 1975. — V. 23. — № 11. — P. 33–37.
14. Новиков, В. М. Состав, биота начальных продуктов выветривания и их индикаторная роль для климатической зональности территории (на примере Дальнего Востока России и Вьетнама) / В. М. Новиков, Э. Л. Школьник, Е. А. Жегалло // Тихоокеанская геология, 2005. — Т. 24. — № 2. — С. 78–94.
15. Новиков, В. М. Роль биоты в накоплении и преобразовании оксидов и гидроксидов железа в корях выветривания / Н. С. Бортников, Н. М. Боева, А. Д. Слукин [и др.] // II Всероссийское литологическое совещание. — 2013. — С. 321–325 с.
16. Школьник, Э. Л. Биоморфные структуры в бокситах (по результатам электронно-микроскопического изучения) / Э. Л. Школьник, Е. А. Жегалло, Б. А. Богатырев [и др.]. — М.: Эслан, 2004. — С. 112.
17. Розанов, А. Ю. Ископаемые бактерии, седиментогенез и ранние стадии эволюции биосферы / А. Ю. Розанов // Палеонтол. журн., 2003. — № 6. — С. 41–49.

Воронежский государственный университет

Меркушова Марина Юрьевна, магистр геологического факультета
E-mail: marina.merkushova@mail.ru

Палеонтологический институт им. А. А. Борисяка Российской академии наук, (ПИН РАН), Москва

Жегалло Елена Александровна, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник
E-mail: ezheg@paleo.ru
Тел.: +7 (495) 339-91-44

Voronezh State University

Merkushova M. Y., Master of the Geology Faculty
E-mail: marina.merkushova@mail.ru

Borisyak Paleontological Institute, Russian Academy of Sciences

Zhegallo E. A., the PhD of Geological and Mineralogical Sciences, Senior Researcher
E-mail: ezheg@paleo.ru
Tel.: +7 (495) 339-91-44