

УДК 550.72:552.14

БАКТЕРИАЛЬНОЕ ПОРОДООБРАЗОВАНИЕ – РЕАЛЬНОСТЬ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

А.И. Антошкина

Аннотация

В статье дан краткий обзор работ, в которых отражена важная роль бактерий в формировании разнообразных горных пород и концентрации рудных месторождений. Проведенный анализ показал объективную необходимость обобщения и систематизации всех данных для разработки общей теории седименто- и породообразования, в которой предлагается выделить самостоятельное направление – бактериальный литогенез.

Ключевые слова: бактерии, цианобактерии, бактериолиты, электронная микроскопия, спектроскопия, биоминерализация, рудообразование.

Введение

В настоящее время имеется много доказательств того, что микроорганизмы, и прежде всего археи и бактерии, играют огромную роль в геологических процессах. Благодаря ничтожным размерам бактерии легко проникают в трещины и поры. Они приспособлены к неблагоприятным условиям: высыханию, холодам, нагреванию до 80–90 °С, не теряя при этом жизнеспособности, а их споры выдерживают кипячение. К настоящему времени в связи с применением новых методов исследований на наноуровне появилась возможность распознавать биогенную природу многих горных пород, считавшихся абиогенными. Выяснилось, что некромаassa цианобактериального сообщества содержит ряд веществ липидной природы, которые не разлагаются в анаэробных условиях. Обрывки фотосинтетических мембран цианобактерий сохраняются долго и переходят в кероген [1]. Недавно биохимики обнаружили у некоторых микробов необычный фермент с двойной функцией, участвующий в синтезе глюкозы. Свойства фермента и положение его обладателей на эволюционном дереве согласуются с гипотезой о том, что жизнь зародилась в горячих вулканических источниках, а первые живые организмы получали энергию из простых окислительно-восстановительных реакций и самостоятельно производили органику из CO₂, то есть были хемоавтотрофами [2]. Немецкими химиками было установлено, что в гидротермальных источниках при температуре свыше 80 °С может происходить абиогенный синтез органических веществ, в частности аминокислот, из угарного газа, цианистого водорода и других неорганических соединений. Этот научный факт является важным аргументом для подтверждения гипотезы, согласно которой жизнь на Земле зародилась в горячих вулканических источниках [3]. Возможно, именно такая ранняя микробиосфера определила активную роль бактерий во всех геологических процессах.

Таким образом, блестяще подтверждается мысль В.И. Вернадского *о заселении всей оболочки Земли бактериальной жизнью*. Сохранение бактерий в ископаемом состоянии определяется их высокой скоростью минерализации, и для окаменения, например, чехлов нитей цианобактерий требуется всего несколько часов [4]. В настоящей статье делается попытка обратить внимание геологов разных направлений на вездесущность бактериального влияния при формировании и преобразовании горных пород и руд и на необходимость выделения в осадочном породообразовании направления «бактериальный литогенез».

1. Современные и ископаемые бактериолиты

Применение метода электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) к изучению отложений разного возраста позволило выявить широкое участие разных типов бактерий в формировании известняковых, доломитовых, сульфатных и кремневых образований, железомарганцевых конкреций и др., тем самым были существенно дополнены данные, полученные с помощью электронного микроскопа ([5, 6] и др.). Уникальная сохранность бактериальных клеток позволила распознать бактериальную природу в наиболее древних карбонатных архейских породах. Были также установлены микробиально индуцированные седиментационные текстуры (microbially induced sedimentary structures – MISS) в современных и архейских терригенных пляжевых отложениях [7].

Благодаря современным методам наноисследований для бактериальных образований широко применяется термин «бактериолит», заимствованный у микробиологов. Используя его, постараемся хотя бы кратко осветить участие микробиальных организмов в образовании пород разного типа и возраста.

Строматолитовые бактериолиты. В том, что в структуре современных и рифейских строматолитов цианобактерии играют наиболее важную роль не только в качестве ее строителей, но и как фильтры и адсорбенты разных элементов, тем самым четко отражая особенности окружающей среды во время роста, в настоящее время никто не сомневается. Однако уже в 1915 г. Ч. Волкотт сообщил, что в докембрийских строматолитах Йеллоустона обнаружены бактерии в виде цепочек клеток, подобных *Micrococci* [8]. Позднее в породах Онфервахт (Ю. Африка) возрастом 3.4 млрд. лет [9] и Варравуна (Австралия) возрастом 3.5 млрд. лет [10] было установлено множество цианобактерий, которые ничем особенно не отличались от современных. М. Шидловским [11] опубликованы данные о наличии органического углерода в породах возрастом 3.8 млрд. лет из массива Исуа в Гренландии, затем в них были найдены бактерии в виде нитчатых и округлых образований. В биоморфных структурах архея Карелии встречены нитевидные и кокковидные формы бактерий, часто развиты структуры, подобные цианобактериальным матам [12].

Джеспилитовые бактериолиты. Изучение участия бактерий в образовании докембрийских джеспилитов началось в начале XX в., когда Ч. Лейс [13] одним из первых предположил биогенное происхождение коричнево-красных полосчатых джеспилитов, которые датировались возрастом 2.8–1.6 млрд. лет. Затем эта идея была поддержана Л. Кайё [14, 15], Е. Муром [16] и др. В 1943 г. А.Г. Волгодин [17] опубликовал данные о присутствии железобактерий в виде округлых

телец в железистых кварцитах Курской магнитной аномалии, а последующие исследования подтвердили их бактериальную природу. В 60-е годы были описаны случаи сохранения микроорганизмов в кремнях джеспилитов, а в 90-е было обнаружено, что пурпурные бактерии способны окислять Fe в ходе анаэробного фотосинтеза, используемого ими для получения энергии из света и двуокиси углерода.

Железомарганцевые бактериолиты. Железобактерии известны давно, еще в 1836 г Х.Г. Эренберг высказал предположение об их участии в образовании железных руд. В ходе своей жизнедеятельности микроорганизмы активно преобразуют соединения железа, марганца, серы, фосфора, образуя пириты, гетиты, фосфориты ([18–20] и др.). О существенном влиянии биогенного фактора на образование железомарганцевых конкреций свидетельствуют их почти мгновенное с геологической точки зрения формирование на морском и океанском дне и многочисленные находки тонкодисперсных самородных металлов. Например, рудные железомарганцевые пласты среди девонских яшм Южного Урала [21] сложены минералами, такими как вернадит, литиофорит, пирит, гематит, в которых отчетливо выявляется присутствие биоморфных структур. Как показали исследования железомарганцевых конкреций Тихого океана [22], в конкрециях рентгеноаморфные фазы оксидов марганца (тодорокит) являются минерализованным гликокаликсом. В межслоевом пространстве конкреций широко распространены цианобактериальные маты и биопленки, сложенные бактериоморфами, состав которых соответствует оксидам марганца. Среди нижневизейских аргиллитово-кремнистых отложений на Приполярном Урале присутствуют многочисленные сидеритовые желваки. Выяснилось, что они полностью сложены бактериоморфными образованиями нитчатых, тонкотрубчатых или пластинчатых форм. В их ориентировке отчетливо просматривается распределение бактериальных клеток по наслоению, отражая рост конкреции (рис. 1). Железомарганцевые колонии пещеры Золушка [23] представлены бактериоформами разных типов, качественное изучение которых показало, что кроме органики в них присутствуют в значительных количествах Fe, Ca, P, As, Cl, Mn (рис. 2).

Фосфоритовые бактериолиты. Бактериоморфные образования были впервые выявлены в фосфатных копролитах в конце XIX века, а к концу XX века в фосфоритах были установлены все основные группы микробиальных форм [24]. Изучение древних фосфоритов (рис. 3, а) и высокоуглеродистых пород показало, что эти породы обильно насыщены цианобактериями и пурпурными бактериями [25]. Изучение верхнемеловых континентальных фосфоритов из озерно-аллювиальных отложений [26] показало, что основная масса фосфата представлена микробными массами в основном из кокковидных, реже нитчатых форм бактерий (рис. 3, б). В итоге были установлены типоморфные особенности бактериальных фосфатов кальция [27]. Наночастицы в фосфоритовых конкрециях из диатомовых илов шельфа Намибии представлены преимущественно колломорфными выделениями, шаровидными и палочковидными бактериоформами, образующими агрегаты различной формы [28].

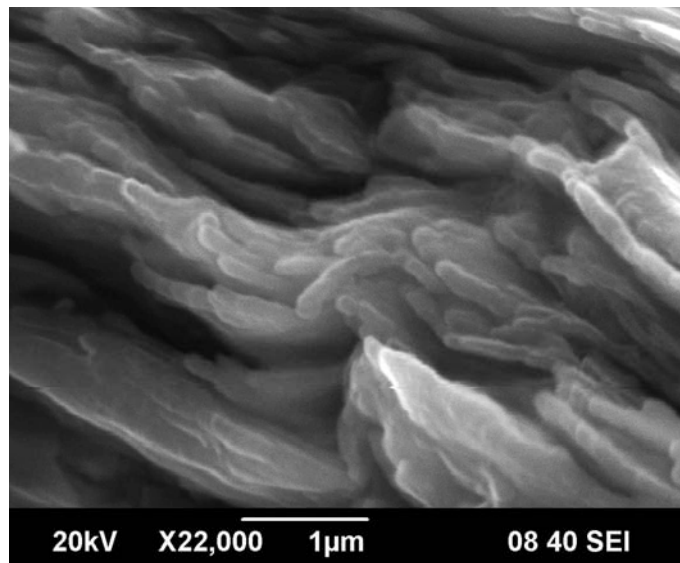


Рис. 1. Бактериоморфы в сидеритовых желваках из нижнекаменноугольных отложений р. Кожим на Приполярном Урале. Фото Л.В. Леоновой

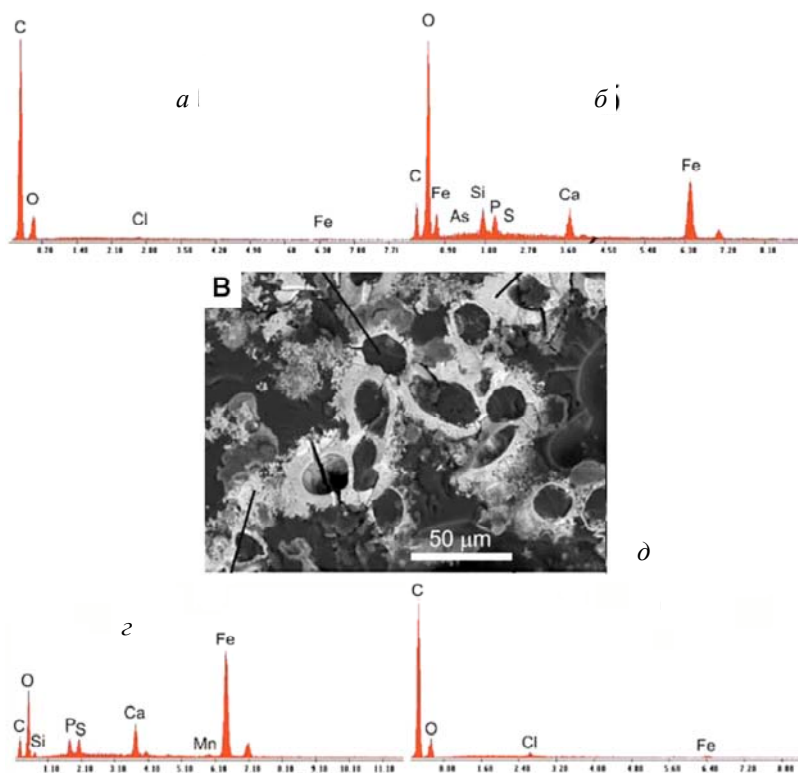


Рис. 2. Качественная характеристика органической массы с кувшинообразными бактериоформами из железомарганцевых бактериолитов в пещере Золушка (по [23]): *а* – наполнитель; *б* – стенка; *в* – общий вид образца; *г* – пористые скопления «панцирного» вещества; *д* – вмещающая органическая масса

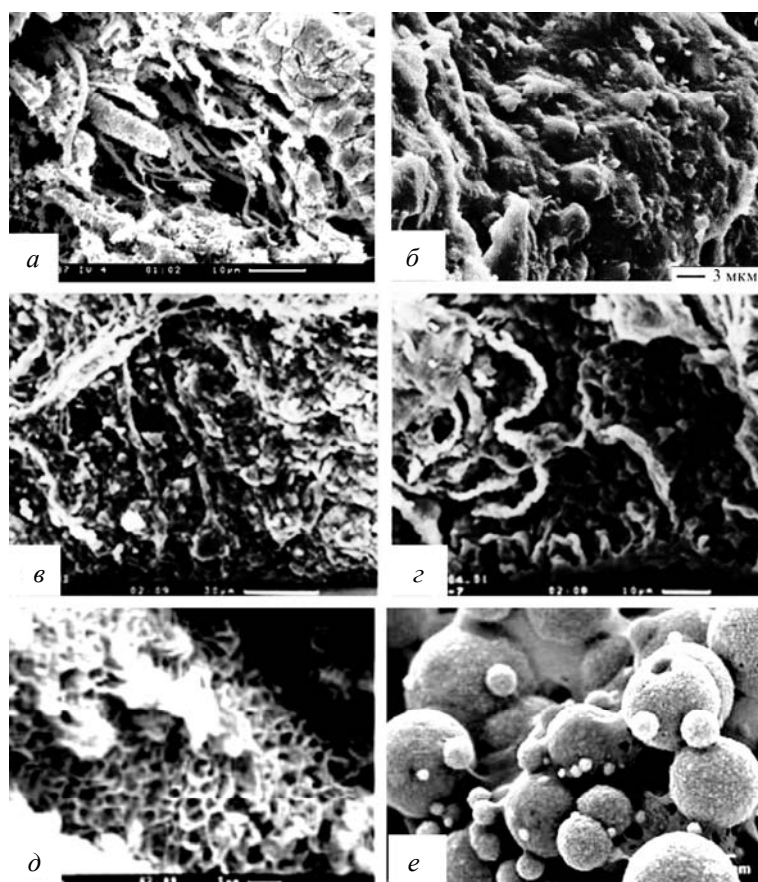


Рис. 3. Бактериоморфы разного состава: *a* – фоссилизированные нити цианобактерий, слагающие нижнекембрийские фосфориты (по [25]); *б* – нитчатые цианобактерии (? гликокаликс), окружающие коккоидные бактерии в каменноугольных белых глинах, карьер Пески (по [12]); *в*, *г* – микробные биоформы в боксите (по [29]); *д* – нитчатые бактерии с глюкокаликсом, среди бактериоморф из верхнемеловых фосфоритов, образец протравлен (по [26]); *е* – биосфалерит – шарики цинка в пленке сульфатредуцирующих бактерий (по [30])

Бактериолиты кор выветривания. О существенной роли микроорганизмов в выветривании пород и образовании минералов в корях выветривания было отмечено еще И.Н. Гинсбургом [31]. Современное изучение протерозойских и архейских кор выветривания Карелии выявило в них комплекс фоссилизированных микроорганизмов: нитчатые, кокковидные, более крупные шаровидные формы, биопленки и т. д. (рис. 3, *в*, *г*). Довольно часто породы состоят практически полностью из разрушенных кокков, гантелевидных форм и обрывков нитей [12, 32]. До недавнего времени роль биогенов в бокситообразовании рассматривалась только как фактор, ускоряющий процесс выветривания вследствие появления обильных продуктов метаболизма. Т.В. Аристовской и Л.В. Зыкиной [33] были проведены исследования природных образцов бокситов различного возраста и генезиса. В древних бокситах плохая сохранность фоссилизированных клеток бактерий может, вероятнее всего, объясняться их постседиментационными преобразованиями. В настоящее время достаточно интенсивно обсуждается роль

участия железобактерий и других микробов в формировании залежей бокситов [29]. Существовало мнение, что глинистые минералы, являющиеся один из важных продуктов выветривания, будь они биотического или абиотического происхождения, практически не различаются по структуре и химическому составу. Однако на примере каменноугольных белых глин Московского бассейна [34], которые долгое время считались терригенными, было установлено, что они являются биогенными (рис. 3, б). Описано формирование силикатных слоев на оболочках бактериальных клеток в пресноводных микробиальных матах, одновременно с которыми внутри и на оболочках клеток осаждались водные оксиды железа, марганца, кремния и алюминия [35].

Карбонатные бактериолиты. Многие карбонатные микриты, особенно распространенные в биогермных и рифовых ассоциациях, являются результатом деятельности кальцимикробов и цианобактерий ([36–38] и др.). В последнее время все большее значение придается доломитообразованию с участием водорослей и цианобактерий ([39, 40] и др.), и в настоящее время становится все больше сторонников микробиальной теории доломитообразования [37]. Возможно, диагенетическое доломитообразование в осадках, обогащенных органическим веществом (ОВ), осуществляется через сульфатредукцию и метанообразование. Большинство бактерий, за исключением цианобактерий, не зависят от света, и осаждение карбоната, контролируемое бактериями, не ограничивается мелководными обстановками.

Формирование биоиндуцированных минералов следует из действий организмов на их внешнюю окружающую среду без необходимого определенного взаимодействия с органической матрицей. С помощью метода ЭПР (рис. 4, в) выяснилось, что цемент ранних генераций в ассельских биоцементолитах является мономинеральным беспримесным продуктом жизнедеятельности кальцимикробов, аккрегированных на биопленке палеоаплизины, то есть биологически индуцированным карбонатом [41]. ОВ в них является остатками микробов и не несет структурообразующей роли.

Сульфатные бактериолиты. Признается также бактериальное участие и в образовании сульфатов. Выявлены осаднения гипса при высоких значениях pH пурпурными бактериями, которые окисляют сероводород, выделяющийся при разложении ОВ [42]. Известно, что галобактерии растут при очень высоких содержаниях NaCl и оптимальных температурах роста 30–50 °С, придают красный цвет солям и образуют в большом количестве каротиноиды. В результате поглощения света этими пигментами повышается температура, и ускоряются испарение воды и кристаллизация соли.

Флюидные бактериолиты. Доказано, что из угарного газа и цианистого водорода в результате химических реакций в горячих вулканических источниках образуются аминокислоты и простейшие липиды [3]. В 80-х годах XX в. обнаружены уникальные сообщества у выходов метановых и сероводородных газовыделений и флюидов, получившие название фауны холодных высачиваний или сиповой. Позднее был открыт метанотрофный синтез ОВ за счет использования углерода метана [43]. Масштабность процессов бактериального синтеза ОВ в океане свидетельствует об огромной геохимической роли хемоавтотрофных и метанотрофных микроорганизмов [44]. В местах сочтения гидротерм постройки образуют нитевидными организмами – микробиальными матами.

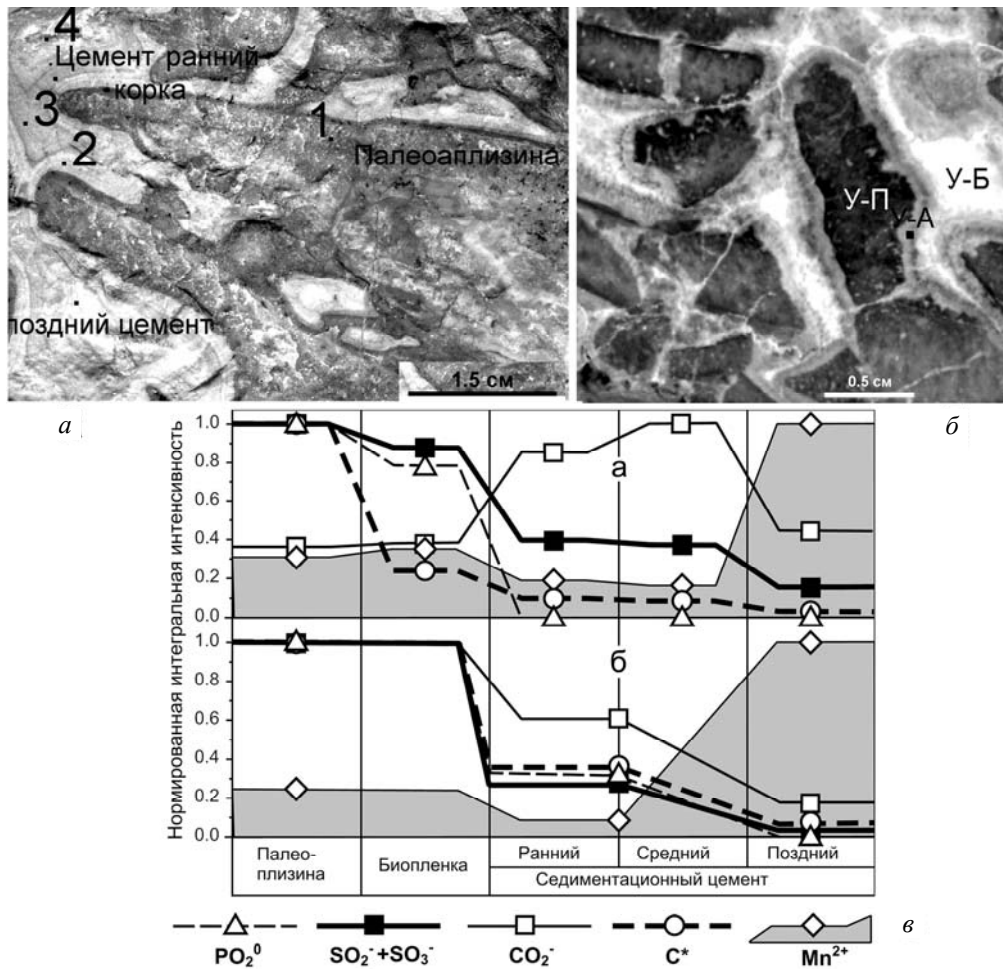


Рис. 4. Спектроскопическая характеристика биоиндуцированных цементов ассельских микробиально-палеоаплизинных биоцементолитов: *a* – биогермный биоцементолит, обр. Ш-1/91; *б* – биокластовый биоцементолит, обр. П-У-28/112-09; *в* – вариации концентраций парамагнитных центров в карбонате биоцементолитов

Установлено, что такие обрастания характерны для любых содержащих растворенный сероводород экотопов и на суше, и в океане. При изучении высачивания железных вод на побережье выявлено, что биоминерализация представлена агрегатами оксидов железа, инкрустирующими поверхности бактериальных оболочек [20]. Активное участие микроорганизмов в процессах минералобразования кальция, кремния, железа и мышьяка выявлено в Вилючинской гидротермально-магматической рудообразующей системе [45]. Эти процессы протекают за счет как механизмов активной сорбции, так и накопления на поверхности клеточной стенки, на что указывает присутствие бактериальных клеток с плотной многослойной оболочкой-капсулой и клеток, имеющих чехол из наноминеральных частиц.

2. Роль бактерий в рудообразовании

Впервые гипотезу о роли сульфатредуцирующих бактерий в образовании сульфидных руд выдвинул Е. Бастин в 1926 г. Исследования М.В. Иванова [46] на месторождении Шор-Су показали, что в результате деятельности сульфатредуцирующих и тионовых бактерий в сутки на месторождении откладывается около 170 г серы, а количество бактерий достигает 100 000 клеток в 1 г руды. В условиях обычных температур и давления сероводород без деятельности бактерий не образуется. Таким путем могут образоваться как сингенетические, так и эпигенетические месторождения. Доказано участие анаэробных бактерий в формировании золотоносных руд [47, 48], выявлена последовательность осаждения разных соединений в присутствии бактерий [49]. При исследовании затопленной шахты свинцово-цинкового месторождения Пикетт (Piquette) в штате Висконсин [50] оказалось, что стенки тоннелей были покрыты толстым слоем красно-оранжевой слизи и белыми сгустками из различных анаэробных бактерий. Оранжевая слизь – места деятельности бактерий, окисляющих железо, а белые сгустки представлены наночастицами сфалерита – результат деятельности сульфатредукторов *Desulfobacteriaceae*. В биопленке образуются не только наночастицы сфалерита, но и относительно крупные (около микрона) шарики (рис. 3, е), которые получают за счет образования связей между наночастицами сернистого цинка и цистеинсодержащими пептидами, выделяемыми клетками бактерий. Исследования с сульфидами цинка с помощью высокоразрешающей инфракрасной спектроскопии на микрозонде показали тесную ассоциацию белков со сфероидальными образованиями нанокристаллов биогенного цинкового сульфида как примера внеклеточной биоминерализации [51]. Бактериальное участие в формировании сфероидального пирита уже давно признается многими исследователями. Существует немало работ зарубежных и отечественных исследователей на тему взаимосвязи разнообразных металлов и бактерий и отмечается, что металлы являются энергетическим источником для микроорганизмов [52, 53].

3. Бактериальная деструкция

Роль микроорганизмов в разрушении минералов класса силикатов одним из первых изучал Н.А. Красильников [54]. Он установил, что поверхность базальтов и туфов в горах Армении покрыта продуктами выветривания до глубины около 5 мм, при этом количество сапрофитов, принимающих участие в процессе выветривания, исчислялось сотнями тысяч на 1 г и снижалось по мере углубления слоя. За последние годы получен обширный экспериментальный материал по исследованию деструкции минералов, который частично обобщен в работе [55]. Во всех случаях при сравнении с абиогенным процессом отмечается высокая интенсивность биогенного выщелачивания силикатов и даже весьма трудно разлагаемого кварца. Ни один из компонентов силикатов и алюмосиликатов практически не усваивается силикатными бактериями ([19] и др.), а развитие живых гетеротрофных клеток на силикатном субстрате происходит как на органической основе. При бактериальном разрушении алюмосиликатов появляются совместно скоагулированные гидрогели кремния и алюминия. При бактериальном

выщелачивании альбитизированного микроклина отчетливо различаются поверхности после химического и биогенного опытов. В первом случае наблюдается почти исходная поверхность образца. После деятельности бактерий вся поверхность пластинки оказывается покрытой ажурным агрегатом, состоящим из шаров, качественное исследование которых выявило в их составе кремний, алюминий, калий, натрий и кальций, то есть все элементы полевых шпатов.

Заключение

Основные выводы из всего вышесказанного таковы: 1) бактерии и биопленки хорошо сохраняются в ископаемом состоянии, они присутствуют во всех осадочных породах, так как фоссилизуются всего за несколько часов; 2) бактерии встречаются везде, в любых средах и на любых поверхностях, и участвуют в выветривании, переносе материала, седиментации и диагенезе осадков. Кроме того, установлено, что в приповерхностной литосфере функционирует углеводородоокисляющий бактериальный фильтр, а в глубоких горизонтах литосферы – углекисло-водородный бактериальный фильтр [56]. Выявлено, что измененное вулканическое стекло имеет два типа структур: один интерпретируется как результат абиотического диффузионного обменного процесса, а другой – как биогенный. Стекло с различимой биоструктурой доминирует в верхних 300 м океанской коры и было найдено почти во всех океанских бассейнах и во многих офиолитах и изверженных породах зеленокаменных поясов возраста 3.5 млрд. лет [57].

Итак, способность бактерий производить превращения огромного количества веществ объясняется невероятной быстротой их размножения, легкой приспособляемостью к разнообразным условиям внешней среды и тем, что для выработки энергии, расходуемой на построение своего тела, они должны перерабатывать огромные количества вещества, в сотни, тысячи раз превышающие их собственный вес [58]. Бактериальные сообщества участвуют в разных процессах. ОВ цианобактериальных матов и других микробов может служить источником ОВ, а сам цианобактериальный мат может осаждавать на себе определенные компоненты. Элементоспецифические микробы способны концентрировать даже редкоземельные элементы. Так, их содержания более 10%, включая Nb, в Томторском месторождении Сибири обязаны цианобактериальным матам [17]. Джеспилиты связаны с активностью пурпурных бактерий. Fe-бактерии и другие микробы участвуют в формировании кор выветривания. С участием бактерий могут образовываться соединения урана, меди, цинка, а также псевдоморфозы золота. Даже в глинистых породах, если они содержат хотя бы минимальное количество углерода, обнаруживаются фоссилизированные остатки микробов.

Н.М. Страхов при разработке теории литогенеза отмечал, что диагенетические процессы в литификации осадка с участием бактерий имеют большее значение. Интересным в связи с этим является факт находки реальных бактерий, аналогичных сфероидальным живущим бактериям *Entophysalidacea*, в среднепротерозойских манганитовых и родохрозитовых рудах, в которых ОВ претерпело стадии катагенеза и метагенеза [30]. Полностью отразить огромную и важную роль микробного мира в пороодообразовании очень сложно, но важно

было показать, что при современном уровне знаний и владения нанотехнологическими методами исследований ее необходимо учитывать.

Огромное количество накопленной информации вызывает объективную необходимость ее обобщения и систематизации для построения общей теории осадочного породообразования, в котором необходимо выделить отдельное направление – бактериальный литогенез. В связи с этим перед литологией стоит задача разработки принципиально новых моделей седиментации и литогенеза с учетом бактериального фактора.

Summary

A.I. Antoshkina. Bacterial Rock Formation: The Reality of Modern Research Methods.

The article gives a brief review of the works which reveal an important role of bacteria in the formation of various rocks and the concentration of ore deposits. The analysis showed the objective necessity of generalization and systematization of all data for working out a general theory of sediment and rock formation, where it is proposed to distinguish an independent branch – bacterial lithogenesis.

Key words: bacteria, cyanobacteria, bacteriolytes, electron microscopy, spectroscopy, biomineralization, ore formation.

Литература

1. *Заварзин Г.А.* Становление биогеохимических циклов // Палеонтол. журн. – 2003. – № 6. – С. 16–24.
2. *Martin W., Baross J., Kelley D., Russell M.J.* Hydrothermal vents and the origin of life // Nat. Rev. Microbiol. – 2008. – V. 6, No 11. – P. 805–814.
3. *Huber C., Wächtershäuser G.* α -Hydroxy and α -Amino Acids under Possible Hadean, Volcanic Origin-of-Life Conditions // Science. – 2006. – V. 314. – P. 630–632.
4. *Розанов А.Ю.* Ископаемые бактерии, седиментогенез и ранние стадии эволюции биосферы // Палеонтол. журн. – 2003. – № 6. – С. 41–49.
5. *Вотяков С.Л., Галеев А.А., Галахова О.Л., Леонова Л.В., Ильиных А.С.* ЭПР как метод исследования органической компоненты биогенных карбонатных пород (на примере строматолитсодержащих пород рифея Южного Урала) // Ежегодник-2005. – Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2006. – С. 39–47.
6. *Леонова Л.В., Главатских С.П., Галеев А., Королев Э.А.* Участие микробиальных организмов в образовании доломитовых обособлений из верхнепермских отложений Среднего Поволжья // Минералогические перспективы: Материалы Междунар. минерал. семинара. – Сыктывкар: Геопринт, 2011. – С. 86–88.
7. *Noffke N.* Turbulent lifestyle: Microbial mats on Earth's sandy beaches – Today and 3 billion years ago // GSA Today. – 2008. – V. 18, No 10. – P. 4–9.
8. *Walcott Ch.D.* Discovery of Algonkian Bacteria // Proc. Natl. Acad. Sci. – 1915. – V. 1, No 4. – P. 256–257.
9. *Schopf J.W., Barghoorn E.S.* Alga-like fossils from the early Precambrian of South Africa // Science. – 1967. – V. 158. – P. 508–521.
10. *Schopf J.W., Parker B.M.* Early Archean (3.3 billion to 3.5 billion-year-old) microfossils from Warrawoona Group, Australia // Science. – 1987. – V. 237. – P. 70–73.
11. *Schidlowski M.* A 3,800-million-year isotopic record of life from carbon in sedimentary rocks // Nature. – 1988. – V. 333. – P. 313–318.

12. *Астафьева М.М.* Архей Карелии и бактериальная палеонтология // Эволюция биосферы и биоразнообразие. – М.: Товарищество науч. изд. КМК, 2006. – С. 120–128.
13. *Leith C.K.* The Mesabi iron-bearing district of Minnesota // Memoir U.S. Geological Survey. – 1903. – V. 43. – 316 p.
14. *Knoll A.H., Barghoorn E.S., Awramik S.M.* New microorganisms from Aphebian Gunflint Iron Formation, Ontario // J. Paleontol. – 1978. – V. 52, No 5. – P. 976–992.
15. *Сергеев В.Н.* Окремненные микрофоссилии докембрия: природа, классификация и биостратиграфическое значение. – М.: ГЕОС, 2006. – 279 с.
16. *Moore E.S.* The Iron-Formation on Belcher Islands, Hudson Bay, with Special Reference to Its Origin and Its Associated Algal Limestones // J. Geol. – 1918. – V. 26, No 5. – P. 412–438.
17. *Розанов А.Ю.* Ископаемые бактерии и новый взгляд на процессы осадкообразования // Соросов. образов. журн. – 1999. – № 10. – С. 63–67.
18. *Кузнецов С.И.* Геологическая деятельность микроорганизмов // Вестн. АН СССР. – 1952. – № 2. – С. 78–92.
19. *Яхонтова Л.К., Нестерович Л.Г., Любарская Г.А., Андреев П.К., Пыжов В.Х., Блинова Г.К.* Разрушение силикатов с помощью бактерий // Минерал. журн. – 1983. – Т. 5, № 2. – С. 28–38.
20. *Wu Z., Yuan L., Jia N., Wang Y., Sun L.* Microbial biomineralization of iron seepage water: Implication for the iron ores formation in intertidal zone of Zhoushan Archipelago, East China Sea // Geochem. J. – 2009. – V. 43, No 3. – P. 167–177.
21. *Леонова Л.В., Королев Э.А., Галахова О.А. и др.* К проблеме формирования марганцевых рудных пропластков в девонских яшмовых толщах Южного Урала // Верхний палеозой России: стратиграфия и фациальный анализ: Материалы Второй Всероссий. конф. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2009. – С. 252–254.
22. *Лысюк Г.Н.* Процессы биогенного марганцеобразования на дне океана // Минералогия и жизнь: происхождение биосферы и коэволюция минерального и биогенного миров, биоминералогия: Материалы IV Междунар. минерал. семинара. – Сыктывкар: Изд-во ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2007. – С. 113–114.
23. *Андрейчук В., Климчук А., Бостон П., Галускин Е.* Уникальные железо-марганцевые колонии микроорганизмов в пещере Золушка (Украина-Молдова) // Спелеология и карстология. – 2009. – № 3. – С. 5–25.
24. *Занин Ю.Н.* Микробиальные формы в фосфоритах – первые сто лет изучения // Литосфера. – 2005. – № 2. – С. 159–165.
25. *Розанов А.Ю., Жегалло Е.А.* К проблеме генезиса древних фосфоритов Азии // Литол. и полезн. ископ. – 1989. – № 3. – С. 67–82.
26. *Жегалло Е.А., Школьник Э.Л.* Изучение в сканирующем электронном микроскопе континентальных фосфоритов из Амурской области // Эволюция биосферы и биоразнообразие. К 70-летию А.Ю. Розанова. – М.: Товарищество науч. изд. КМК, 2006. – С. 129–133.
27. *Глинская Л.Г., Занин Ю.Н., Рудина Н.А.* Бактериальный генезис фосфатов кальция в организме человека и в природе // Литол. и полезн. ископ. – 2007. – № 1. – С. 63–75.
28. *Батурин Г.Н., Титов А.Т.* Биоморфные образования в современных фосфоритах // Океанология. – 2006. – Т. 46, Вып. 5. – С. 711–715.
29. *Школьник Э.Л., Жегалло Е.А., Богатырев Б.А. и др.* Биоморфные структуры в бокситах (по результатам электронно-микроскопического изучения). – М.: Эслан, 2004. – С. 3–13.

30. Chan C., Druschel G., Welch S., Labrenz M., Moreau J., Skatvold A., Thomsen-Ebert T., Banfield J. Biogeochemical Cycling and Biomineralization in the Piquette Mine, Tennyson, WI // The Outcrop. – Madison, WI: Univ. Wisconsin-Madison, Dep. Geol. Geophys., 2000. – P. 27–28. – URL: http://www.geology.wisc.edu/outcrop/00/00_pdfs/biogeochemical.pdf, свободный.
31. Гинсбург И.Н. Роль микроорганизмов в выветривании пород и образовании минералов. Кора выветривания. – М.: Изд-во АН СССР, 1952. – Вып. 1. – С. 6–35.
32. Алфимова Н.А., Матреничев В.А. Особенности строения профилей химического выветривания раннего докембрия Карелии // Материалы 17-й молодеж. конф. – Петрозаводск: Изд-во ИГ КарНЦ РАН, 2006. – С. 127–129.
33. Аристовская Т.В., Зыкина Л.В. Биогенный механизм формирования бокситов // Роль биохимических исследований в расширении минерально-сырьевой базы. – Л.: Наука, 1986. – С. 95–103.
34. Астафьева М.М., Розанов А.Ю. Древнейшие коры выветривания (на примере Карелии) и микрофоссилии // Палеопочвы и индикаторы континентального выветривания в истории биосферы. Сер. «Гео-биологические системы в прошлом». – М.: ПИН РАН, 2010. – С. 10–22.
35. Tazaki K. Biomineralization of layer silicates and hydrated Fe/Mn oxides in microbial mats: an electron microscopical study // Clays Clay Minerals. – 1997. – V. 45, No 2. – P. 203–212.
36. Антошкина А.И. Рифообразование в палеозое (на примере севера Урала и сопредельных территорий). – Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2003. – 303 с.
37. Кузнецов В.Г. Эволюция карбонатакопления в истории Земли. – М.: ГЕОС, 2003. – 262 с.
38. Flügel E. Microfacies of carbonate rocks: analysis, interpretation and application. — Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2004. – 976 p.
39. Vasconcelos Cr., McKenzie J.A. Microbial mediation of modern dolomite precipitation and diagenesis under anoxic conditions (Lagoa Vermelha, Rio de Janeiro, Brazil) // J. Sediment. Res. – 1997. – V. 67, No 3. – P. 378–390.
40. Седаева К.М., Антошкина А.И. Прокариоты и их роль в осадочном процессе // Материалы 1-го Всерос. литолог. совещ. – М.: Изд-во ГИН, 2000. – С. 212–217.
41. Лютоев В.П., Антошкина А.И., Пономаренко Е.С. Парамагнитные маркеры стадийности отложения карбонатов палеоапличиновых биоцементолитов // Рифы и карбонатные псефитолиты: Материалы Всерос. литолог. совещ. – Сыктывкар: Геопринт, 2010. – С. 205–207.
42. Заварзин Г.А., Колотилова Н.Н. Введение в природоведческую микробиологию. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 2001. – 129 с.
43. Леин А.Ю., Москалев Л.И., Богданов Ю.А., Сагалевич А.М. Гидротермальные системы океана и жизнь // Природа. – 2000. – № 5. – С. 47–55.
44. Леин А.Ю., Иванов И.В., Пименов Н.Б. Генезис метана холодных метановых сипов Днепровского каньона в Черном море // Докл. РАН. – 2002. – Т. 387, № 2. – С. 242–244.
45. Округин В.М., Белькова Н.Л., Тазаки К. Биогенное минералообразование на современных гидротермальных системах Камчатки (Мутновско-Асачинский вулканогенно-рудный центр) // Сохранение биоразнообразия Камчатки и прилегающих морей: Материалы III науч. конф. – Петропавловск-Камчатский: Изд-во КамчатНИРО – 2002. – С. 82–85.
46. Иванов В.И. Влияние некоторых факторов на окисление железа культурами *Thiobacillus ferrooxidans* // Микробиология. – 1961. – № 5. – С. 795–799.

47. Ковальчук М.С., Крошко Ю.В. Биоминерализация золота в осадочных образованиях Украины // Минералогические перспективы: Материалы Междунар. минерал. семинара. – Сыктывкар: Геопринт, 2011. – С. 61–62.
48. Блюман А.А. Биогенное и гидробиогенное золото линейной коры выветривания // Региональная геология и металлогения. – 2009. – № 37. – С. 94–106.
49. Герасименко Л.М., Орлеанский В.К., Ушатинская Г.Т. О последовательности осаждения фосфатов, карбонатов и кремнезема в присутствии бактерий в природных условиях и в эксперименте // Минералогические перспективы: Материалы Междунар. минерал. семинара. – Сыктывкар: Геопринт, 2011. – С. 37–38.
50. Labrenz M., Druschel G.K., Thomsen-Ebert T., Gilbert B., Welch S.A., Kemner K.M., Logan G.A., Summons R.E., De Stasio G., Bond G.Ph.L., Lai B., Kelly Sh.D., Banfield J.F. Biomineralization of nanocrystalline sphalerite (ZnS) from dilute solutions by natural communities of sulfate-reducing bacteria // Science. – 2000. – V. 290. – P. 1744–1747.
51. Moreau J.W., Weber P.K., Martin M.C., Gilbert B., Hutcheon I.D., Banfield J.F. Extracellular Proteins Limit the Dispersal of Biogenic Nanoparticles // Science. – 2007. – V. 316. – P. 1600–1603.
52. Shock E.L. Minerals as Energy Sources for Microorganisms // Econ. Geol. – 2009. – V. 104, No 4. – P. 1235–1248.
53. Красильников Н.А. Влияние разлагающихся корней на состав микрофлоры в почве // Почвоведение. – 1945. – № 2. – С. 131–135.
54. Silverman M.P. Biological and organic chemical decomposition of silicates // Trudinger P.A., Swain D.J. (Eds.) The Biogeochemical Cycling of Mineral-Forming Elements. – Amsterdam: Elsevier, 1979. – P. 445–465.
55. Бойко О.В., Оборин А.А., Рубинштейн Л.М. и др. Микробиологическая активность глубоких горизонтов земной коры (по данным исследований Уральской сверхглубокой скважины) // Разведка и охрана недр. – 2000. – № 7–8. – С. 31–35.
56. Staudigel H., Furnes H., Banerjee N.R., Dilek Y., Muehlenbachs K. Microbes and volcanoes: A tale from the oceans, ophiolites, and greenstone belts // GSA Today. – 2006. – V. 16, No 10. – P. 4–10.
57. Заварзин Г.А. Становление биосферы // Вестн. РАН. – 2001. – Т. 71, № 11. – С. 988–1001.
58. Fan D., Ye J., Li J. Geology, mineralogy, and geochemistry of the Middle Proterozoic Wafangzi ferromanganese deposits, Liaoning Province, China // Ore Geol. Rev. – 1999. – V. 15, No 1–3. – P. 31–53.

Поступила в редакцию
14.11.11

Антошкина Анна Ивановна – доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник Института геологии Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар.
E-mail: Antoshkina@geo.komisc.ru