

FOSSIL BACTERIA AND NEW VIEW ON THE SEDIMENTATION

A. Yu. ROZANOV

New methods of electronic microscopy permit to show the great value of bacteria in the formation of sedimentary rocks and essential minerals.

Внедрение новых методов исследования позволяет выявить огромную роль микробов в процессах образования горных пород и осадочных полезных ископаемых.

ИСКОПАЕМЫЕ БАКТЕРИИ И НОВЫЙ ВЗГЛЯД НА ПРОЦЕССЫ ОСАДКООБРАЗОВАНИЯ

А. Ю. РОЗАНОВ

Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова

О том, что микроорганизмы, и прежде всего археи и бактерии, играют огромную роль в геологических процессах, ученые догадывались давно. Не вызывало сомнений огромное значение микроорганизмов в процессах выветривания (разрушения) горных пород, в формировании месторождений полезных ископаемых, разрушении нефтей, переотложении некоторых пород и полезных ископаемых и т.д.

В конце прошлого века Н.И. Андрусов (1897 год) в своих лекциях обращал внимание на накопление S и Fe благодаря серо- и железобактериям. Однако в процессах седиментации (накопления) терригенных и даже карбонатных пород, которые составляют подавляющее большинство всех осадочных пород, роль микроорганизмов считалась весьма скромной или лишь теоретически допустимой. Совсем недавно, всего два-три десятка лет тому назад, мысль о том, что микробы могут сохраняться в ископаемом состоянии, особенно в массовых количествах, могла бы показаться абсурдной.

Когда в 1943 году член-корреспондент АН СССР А.Г. Вологдин описал округлые тельца как железобактерии из железистых кварцитов Курской магнитной аномалии (КМА), это вызвало огромный скепсис. В 60-е годы сначала американские, а затем российские и австралийские ученые открыли и описали случаи сохранения микроорганизмов в кремнях древних докембрийских пород. Тогда считалось, что окремнение бактерий — явление достаточно уникальное. Среди окремненных микроорганизмов часть была признана цианобактериями (в то время они назывались синезелеными водорослями).

Серьезный прорыв произошел, когда более или менее одновременно стали изучать, но уже с помощью электронного микроскопа древние фосфориты и высокоуглеродистые породы (черные сланцы, битуминозные карбонатные породы). В результате выяснилось, что эти породы буквально напичканы окаменевшими микроорганизмами (рис. 1). Основой этих ассоциаций микроорганизмов были цианобактерии и пурпурные бактерии, составляющие основную массу так называемых цианобактериальных матов. Особенно исследователей потрясла удивительная сохранность цианобактерий в древних

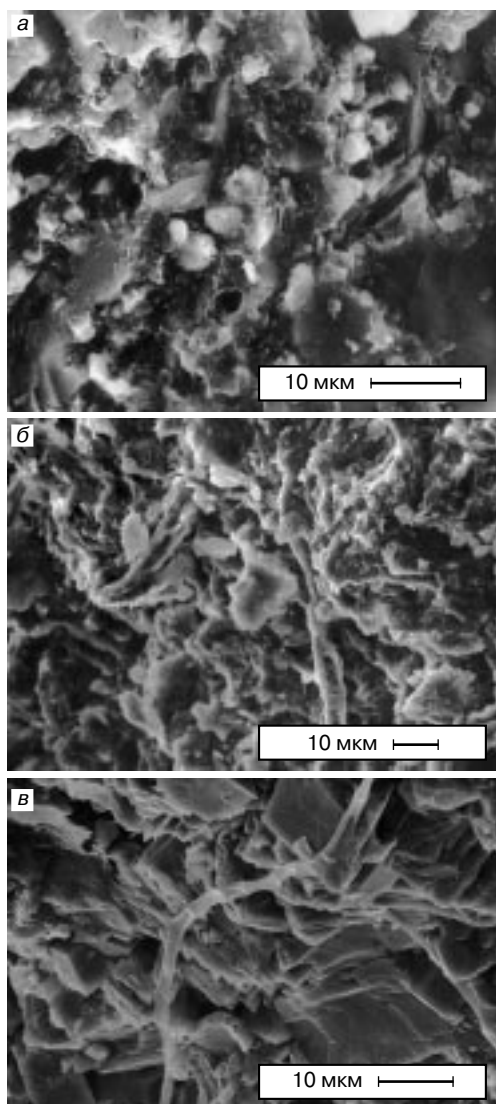


Рис. 1. Фоссилизированные цианобактерии в древних породах: *а* – сланцы среди протерозойских джеспилитов Курской магнитной аномалии. Диаметр кокков ~3 мк; *б* – глинистые сланцы венда (европейская часть России); *в* – глинистый известняк (кембрий, Австралия)

фосфоритах, которые всегда считались хемогенными, то есть осажденными химическим путем (рис. 2).

Сегодня можно видеть, что в большинстве научных журналов публикуются статьи о роли бактерий в формировании тех или иных пород. Большое внимание уделяется так называемым карбонатным микритам (очень мелкозернистым породам). Большинство исследователей сходятся во мнении, что образование микритов, особенно распространенных в биогермных и рифовых ассоциациях, является результатом деятельности бактерий. Конечно, следует помнить, что подавляющее количество кар-

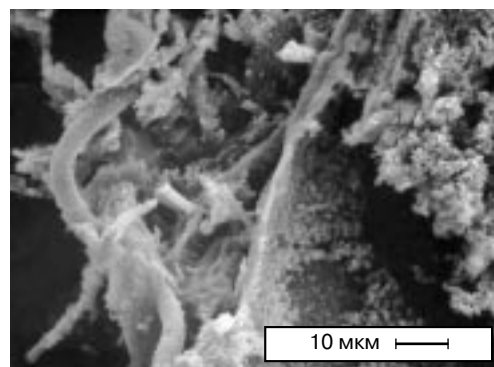


Рис. 2. Цианобактерии (нити) и пурпурные бактерии из кембрийского фосфорита Монголии

бонатов всегда образовывалось за счет деятельности организмов, накопления их самих (например, писчий мел) или за счет скопления обломков разных организмов с карбонатным скелетом (органогенно-обломочные известняки).

ЭКСПЕРИМЕНТЫ С СОВРЕМЕННЫМИ БАКТЕРИЯМИ И ИХ РОЛЬ В ПРИРОДЕ

Одновременно с электронно-микроскопическим изучением пород были начаты уникальные исследования по искусственной фоссилизации (литификации) ныне живущих цианобактерий. Эксперименты, проведенные в Институте микробиологии РАН, подтвердили, что цианобактерии, осаждающая карбонат или фосфат, фоссилируются с огромной скоростью. Всего несколько часов требуется для того, чтобы чехлы нитей цианобактерий окаменели. Быстрое окаменение (фоссилизация) бактерий, показанное в эксперименте, объяснило хорошую их сохранность в породах (рис. 3). Ранее предполагалось, что процесс фоссилизации должен быть достаточно длительным. Не имеющие скелетных оболочек организмы должны были разлагаться и поэтому не могли сохраняться в ископаемом состоянии.

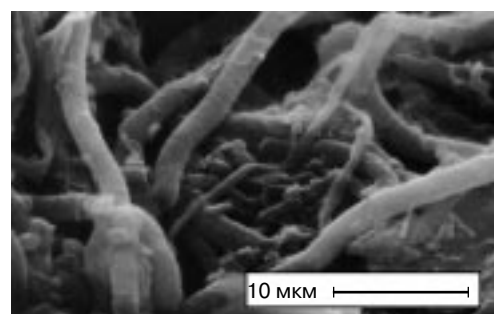


Рис. 3. Фоссилизированные современные цианобактерии

Изучение современных микроорганизмов — широко разветвленная область исследований, которыми занимаются не только отдельные ученые, но и институты [1–3]. Не касаясь практического значения этих исследований для генной инженерии, использования для получения биопродуктов, для очистки промстоков, а также вредного воздействия микроорганизмов на человека, на каменные и металлические конструкции, загрязнение водоемов, несомненный интерес представляет возможность участия микроорганизмов в формировании тех или иных соединений, минералов, пород. Так, например, пурпурные, некоторые зеленые бактерии и цианобактерии накапливают в клетках полифосфат в виде так называемых волютиновых гранул. Некоторые пурпурные серобактерии накапливают в клетках серу. Однако, вероятно, гораздо чаще бактерии не являются элементоспецифическими, а способствуют накоплению тех или иных элементов или соединений как катализаторы или фильтры.

Крайне интересными были исследования микробных сообществ в аномальных условиях, вероятно похожих на условия на Земле в архейское и протерозойское время. Это, с одной стороны, мелководные бассейны типа Сиваша, а с другой — условия вокруг терминальных источников. Справедливо предполагалось, что такие микробные сообщества из-за эволюционного консерватизма многих микроорганизмов и сходства условий могут более всего напоминать древние биоты Земли.

В последние годы исследования ископаемых бактерий приобрели в России и в других странах такой широкий размах, что это направление в палеонтологии получило название “бактериальная палеонтология” [4]. Микробы имеют частично простую морфологию (форму) [2] и с этой точки зрения представляют трудный для изучения объект. Действительно, морфологически это простые шарики, нитки, гантеле- и веретенообразные формы микронной и менее размерности (рис. 4). Основные различия современных микробов устанавливаются на биохимическом уровне. У ископаемых микробов ученые лишены возможности анализировать биохимические особенности. Остаются морфология и, что очень важно, продукты жизнедеятельности: Fe-бактерии образуют породы, богатые окислами Fe, для деятельности анаэробных бактерий, характерно образование пирита (FeS_2) и т.д.

Итак, образование многих осадочных пород сегодня можно связать с деятельностью микробов. Для фосфоритов, карбонатов и высокоуглеродистых пород это совершенно очевидно. Однако стало понятным, что и в обычных глинистых породах, особенно если они содержат хотя бы минимальное количество углерода, легко обнаружить фоссилизированные остатки микробов, в том числе цианобактерий. Недавно с этой точки зрения были хорошо изучены вендские породы Приуралья, где в

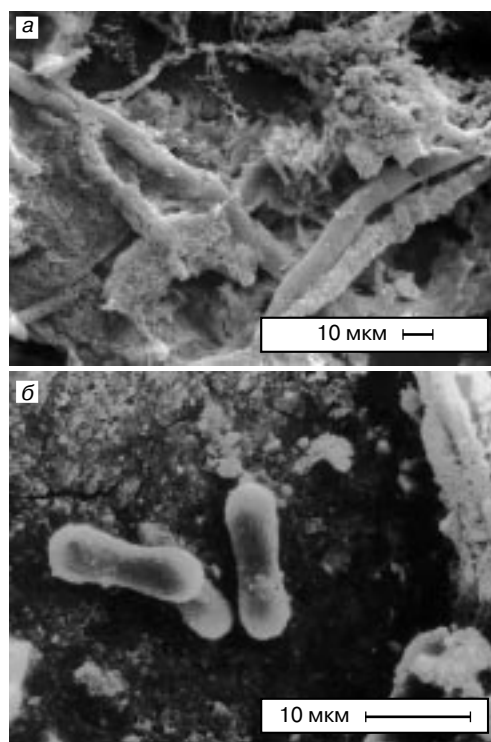


Рис. 4. Ископаемые бактерии: а – нитчатые (Монголия, нижний кембрий) и б – гантелевидные (Казахстан, нижний кембрий)

скважинах в обычных аргиллитах обнаружили нитевидные цианобактерии. Аналогичные результаты были получены и по глинистым породам нижнего кембрия Сибирской платформы и Южной Австралии (см. рис. 1, в).

Вероятно, следует особенно подчеркнуть: исследования древних пород наводят на мысль, что при накоплении глинистых осадков микробы, с одной стороны, могут играть роль организатора транспорта глинистых частиц на дно, а с другой — быть катализаторами образования аутигенных силикатов в слизистых чехлах цианобактерий. Последнее предположение требует дополнительной экспериментальной проверки.

Некоторое время тому назад казалось, что кроме грубообломочных пород, таких, как брекчии, конгломераты, песчаники, к числу абиогенно осаждающихся можно было бы отнести значительную часть эвапоритов (пород, образующихся в жарких, засушливых областях).

Во всяком случае считается, что осаждение доломита ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) и тем более солей не имеет отношения к деятельности микроорганизмов. Однако известно, что галобактерии растут при очень высоких содержаниях NaCl и оптимальных температурах роста 30–50°C. Отмечен рост галобактерий на поверхности рапы (насыщенного соляного раствора),

которая становится красной. Галобактерии образуют в большом количестве каротиноиды. В результате поглощения света этими пигментами повышается температура и ускоряются испарение воды и кристаллизация соли [3]. Можно предположить, что обычные для отложений солей розовые и красные прослои могут быть связаны с периодическим увеличением активности галобактерий.

ОБРАЗОВАНИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ОСАДОЧНЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Особенным является вопрос о значении микробных сообществ в формировании месторождений полезных ископаемых. Бактериальные сообщества могут выступать в этих случаях в самых разных ролях.

Во-первых, органическое вещество цианобактериальных матов и других микробов может служить источником органического вещества нефтематеринских пород, то есть пород, органическое вещество которых после переработки в течение геологического времени преобразуется в нефть и газ. Было показано, что для докембрийских и раннепалеозойских нефтематеринских толщ характерно присутствие в них ископаемых цианобактериальных матов. Таким образом, решается проблема органического вещества, необходимого для образования нефти в древних толщах. В этой связи существенно меняются и перспективы нефтеобразования и нахождения нефтяных месторождений в докембрийских породах, которые ранее считались маловероятными. Более того, долгое время находки нефти в древних толщах считались показателем более молодого, чем докембрийский, возраста пород.

Во-вторых, цианобактериальный мат может служить своеобразным фильтром, осаждавая на себе определенные компоненты. Так, сейчас известно, что ураганные содержания более 10% редкоземельных элементов (РЗЭ), включая Nb Томторского месторождения в Сибири, обязаны своим происхождением цианобактериальным матам. В этом случае накопление РЗЭ происходило в каком-то бассейне типа мелкого озера, где цианобактериальные маты постепенно увеличивали концентрации РЗЭ из вод, поступающих с окружающей суши.

В-третьих, эта работа элементоспецифических микробов, накапливающих, например, Fe, Mn, S. Выше были упомянуты железистые кварциты Курской магнитной аномалии. Вероятно, все джеспилиты (железистые кварциты) в мире имеют отношение к активности железобактерий. Интересно, что максимум образования джеспилитов приходится на всех континентах более или менее на одно время в начале протерозоя (1,9–2 млрд лет тому назад).

Следует помнить, что многие годы некоторые авторы настаивали на гидротермальном происхождении Fe в джеспилитах. Это нисколько не противоречит сказанному выше. Бактериальный способ

накопления Fe и вулканический источник поступления Fe в воды Мирового океана вполне могут быть совмещены в единую концепцию. Не так давно в рамках Международной программы геологической корреляции обсуждался специальный проект по биогенному накоплению Fe и Mn [5].

Огромную работу проделывают Fe-бактерии и другие микробы в образовании латеритов (кор выветривания), поэтому образование некоторых месторождений осадочных полезных ископаемых, связанных с латеритами, таких, как бокситы (алюминиевое сырье), вполне вероятно. Предстоят новые открытия в этой области.

В-четвертых, образование тех или иных пород или полезных ископаемых неэлементоспецифическими организмами. Например, цианобактерии в состоянии накапливать не только растворимый Р в волютиновых гранулах внутри клетки. При соответствующих условиях Р волютиновых гранул может преобразовываться в нерастворимые соединения (апатиты различных модификаций). А некоторые бактерии способны, например, образовывать внутри клеток магнетит.

В-пятых, сейчас известно по находкам бактерий, что с их участием могут образовываться соединения урана, меди, а также золотые псевдоморфозы. Изучение метаболизма (обмена веществ) бактерий и механизмов, влияющих на осаждение тех или иных элементов, еще только начинается.

Оставим в стороне все вопросы, связанные с участием микробов в образовании всевозможных газов [1], поступающих в атмосферу и затем имеющих естественное отношение к образованию некоторых пород, или газов, поступающих в воды бассейнов и создающих, например, “аноксические” условия. Естественен, однако, вопрос: почему, зная все это, седиментологи (специалисты, занимающиеся изучением закономерности осадкообразования) мало уделяли внимания роли микроорганизмов? Здесь две основные причины. Первая — это то, что только в последнее время после внедрения сканирующего электронного микроскопа и выяснения практически мгновенной скорости окаменения бактерий стали доступны их непосредственные наблюдения. И таким образом ученые осознали их повсеместное присутствие в прошлом. А вторая причина состоит в том, что актуалистические модели седиментации (процесса осадкообразования) не могут в полной мере объяснить закономерности седиментации прошлого. Дело в том, что сегодняшнее обилие суши с резкими контрастными глубинами океанов и высотой гор (высокое стояние материков) является достаточно уникальным в истории Земли. Гораздо чаще материки в значительной мере были покрыты морями, аналогов которых по своим параметрам практически сегодня нет. Эти бассейны у геологов называются эпиконтинентальными. Точно так же до определенного времени, вероятно, не

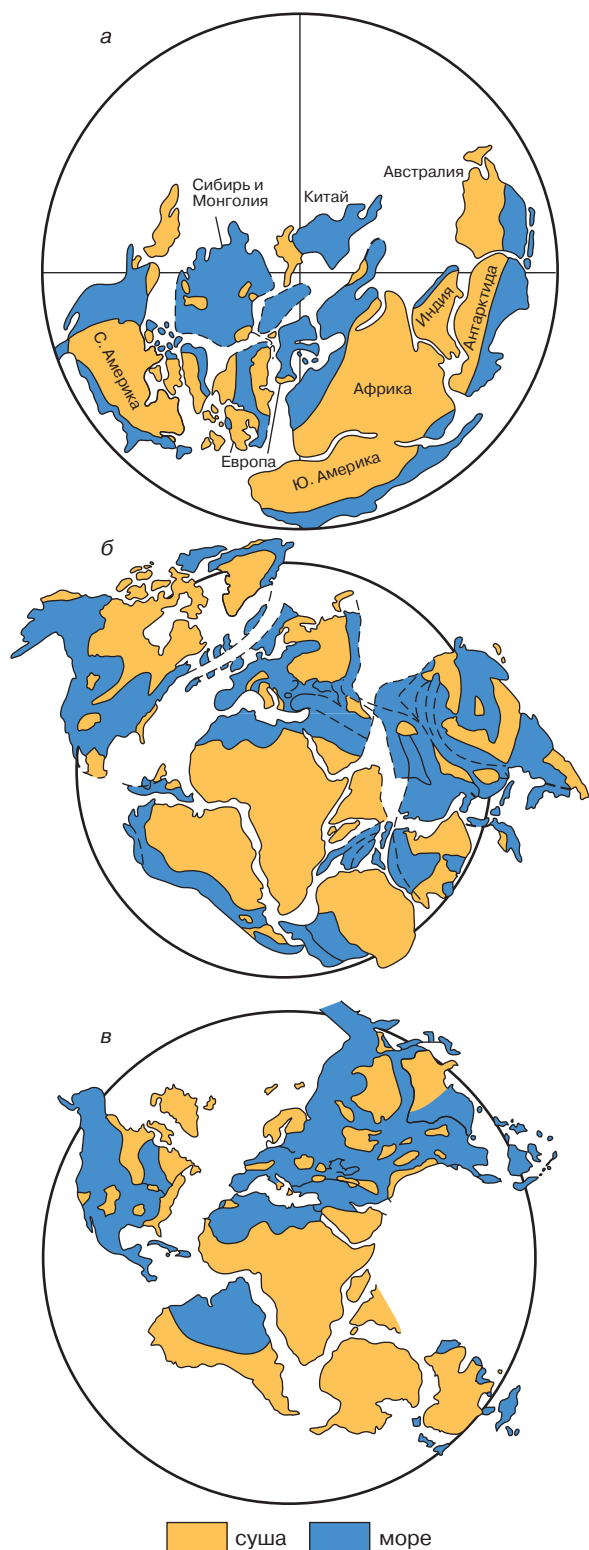


Рис. 5. Палеогеографические схемы раннего кембрия (а), раннего ордовика (б) и позднего девона (в). Показаны моря на современных континентах

было столь глубоких огромных океанов. Особенно не схожая с современностью картина была в палеозое (кембрий, ордовик, силур, девон, карбон и пермь). На палеогеографических картах можно хорошо видеть, сколь обширные участки современных континентов были заняты морями (рис. 5). Сравните современную картину с палеогеографическими картами, например, начала раннего кембрия (рис. 5, а), начала раннего ордовика (рис. 5, б) и конца девона (5, в).

Чем же отличались древние эпиконтинентальные бассейны? Прежде всего это были огромные по территории, исключительно мелководные (десятки, иногда первые сотни метров глубины) бассейны, у которых значительная часть дна находилась в пределах зоны фотосинтеза. Часто на этих акваториях возникали многочисленные и короткоживущие острова. Специфика древних бассейнов способствовала широкому развитию микроорганизмов и особенно цианобактериальных матов, которые могли иногда функционировать на тысячах квадратных километров (например, Сибирская платформа в докембрии). Поэтому в этих бассейнах роль бактерий и вообще микроорганизмов была огромна не только в формировании трофических связей, но и в формировании, а затем и преобразовании осадков.

В связи с этим перед седиментологией стоит сложная, но интересная задача разработки принципиально отличных от современных моделей седиментации в древних эпиконтинентальных бассейнах. Совершенно очевидно при этом, что огромная роль биогенного, и особенно бактериального, фактора должна быть учтена, поскольку за редким исключением все осадочные породы в той или иной степени образовывались с участием микробов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Заварзин Г.А. Бактерии и состав атмосферы / Отв. ред. А.А. Имшенецкий. М.: Наука, 1984. 189 с.
2. Громов Б.В. Цианобактерии в биосфере // Соросовский Образовательный Журнал. 1996. № 9. С. 35–39.
3. Кондратьева Е.Н. Автотрофные прокариоты: Учеб. пособие. М.: Изд-во МГУ, 1996. 312 с.
4. Розанов А.Ю., Заварзин Г.А. Бактериальная палеонтология // Вестн. РАН. 1997. Т. 67, № 3. С. 241–245.
5. Biomineralization Processes, Iron, Manganese / Ed. by H.C. Skinner, R.W. Fitzpatrick. Cremlingen, Germany: Catena Verlag, Catena Suppl. 21.

* * *

Алексей Юрьевич Розанов, доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры палеонтологии МГУ, член-корреспондент РАН, директор Палеонтологического института РАН. Область научных интересов – палеонтология, палеогеография и стратиграфия верхнего докембрия и кембрия, эволюция биосферы, бактериальная палеонтология. Автор более 250 работ, включая 21 монографию.