

## 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

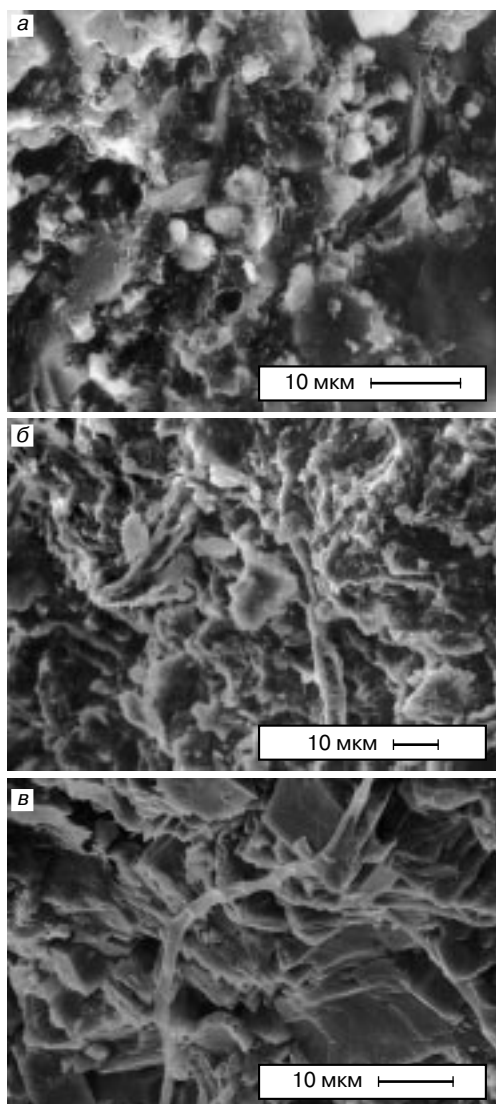
Московский государственный университет  
им. М.В. Ломоносова

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).

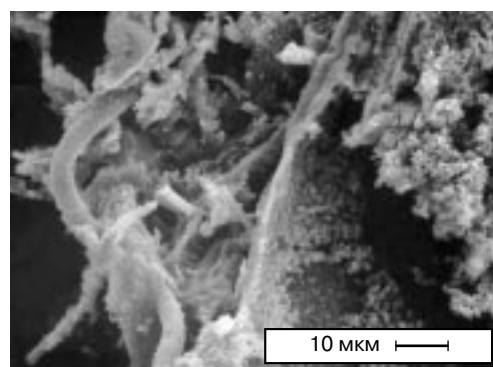
Серьезный прорыв произошел, когда более или менее одновременно стали изучать, но уже с помощью электронного микроскопа древние фосфориты и высокоуглеродистые породы (черные сланцы, битуминозные карбонатные породы). В результате выяснилось, что эти породы буквально напичканы окаменевшими микроорганизмами (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-

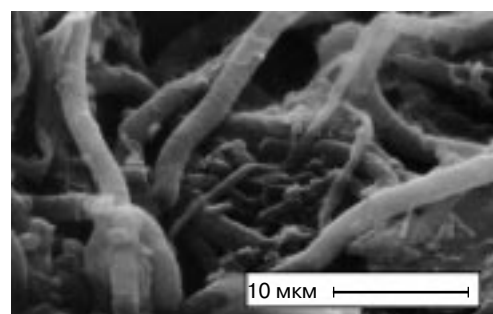


**Рис. 2.** Цианобактерии (нити) и пурпурные бактерии из кембрийского фосфорита Монголии

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.



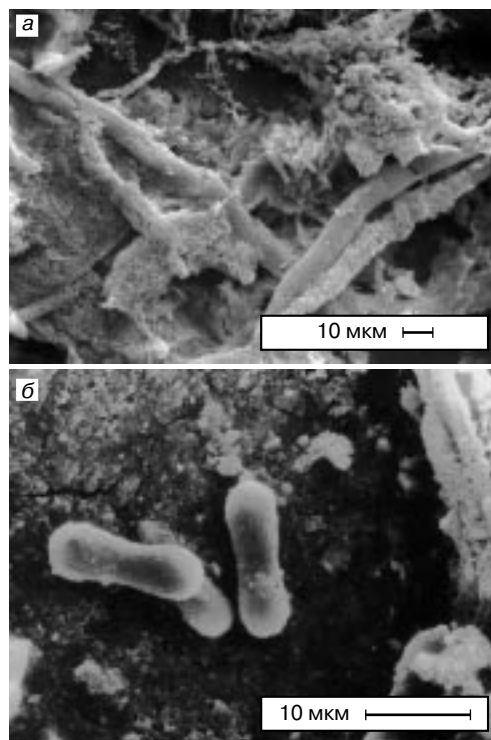
**Рис. 3.** Фоссилизированные современные цианобактерии

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 ( $\text{FeS}_2$ ) 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 фоссилизованные 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

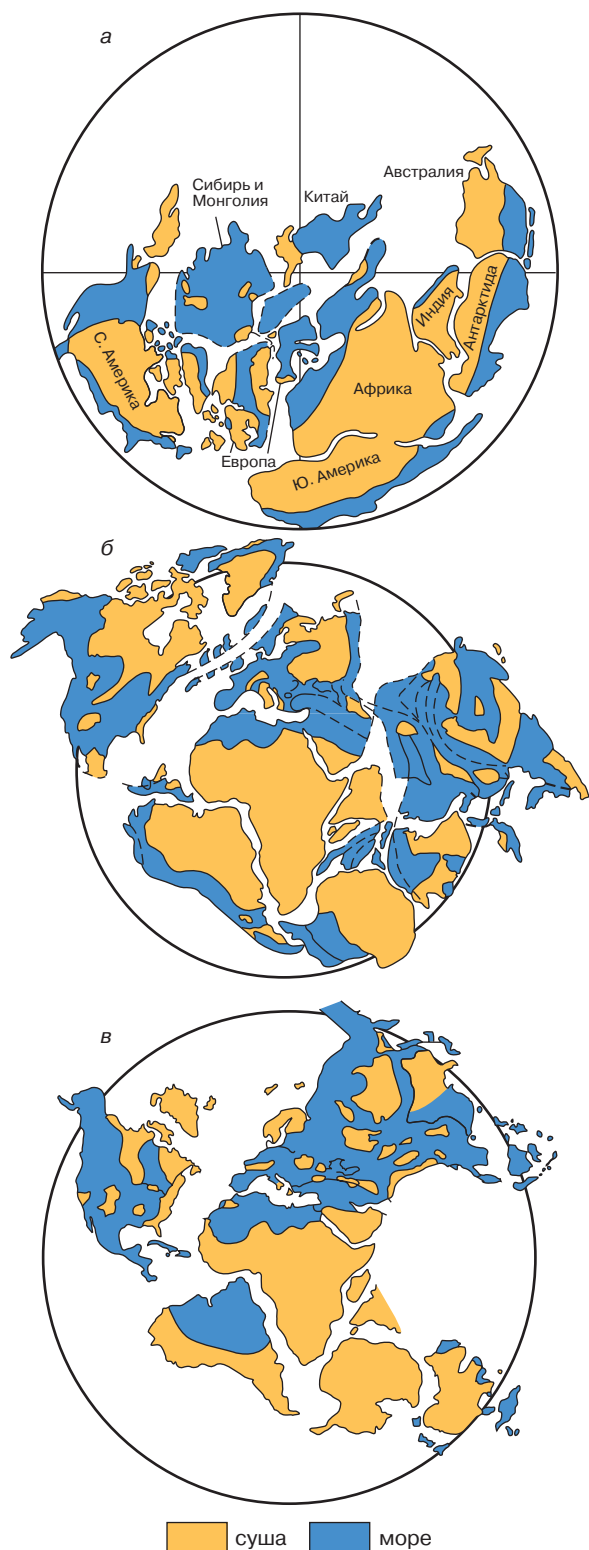
накопления Fe и вулканический источник поступления Fe в воды Мирового океана вполне могут быть совмещены в единую концепцию. Не так давно в рамках Международной программы геологической корреляции обсуждался специальный проект по биогенному накоплению Fe и Mn [5].

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 P в волютиновых гранулах внутри клетки. При соответствующих условиях P 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.