

ПОЛЕЗНЫЕ ИСКОПАЕМЫЕ,
МЕТОДИКА ИХ ПОИСКОВ И РАЗВЕДКИ

УДК 553. 048 (26)

БАКТЕРИАЛЬНЫЕ МАТЫ ОКСИДНЫХ РУД МИРОВОГО ОКЕАНА

В.В. АВДОНИН¹, Е.А. ЖЕГАЛЛО², Н.Е. СЕРГЕЕВА¹

¹*Московский государственный университет
119234, Россия, г. Москва, Ленинские горы, д. 1; e-mail: avdonin@geol.msu.ru*

²*Палеонтологический институт им. А.А. Борисяка РАН
117647, Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 123; e-mail: ezheg@paleo.ru*

Основным конструктивным элементом оксидных железомарганцевых руд океанского дна являются бактериальные маты, образованные последовательным нарастанием биопленок. Сообщество бактерий в биоплёнках в результате согласованного поведения регулировало строительство строматолитовых и онколитовых структур. Биоплёнки строматолитовых бактериальных матов представляют сообщество микроорганизмов, в котором агрегаты нитчатых бактерий образуют полигональную сеть, определяющую столбчатую структуру корок. Бактериальные маты конкреций имеют фестончатую форму. Биоплёнки в фестонах активно взаимодействуют с окружающей средой, усваивая петрогенные компоненты и поглощая осадочный материал.

Ключевые слова: оксидные руды; бактериальные маты; биоплёнки; нитчатые бактерии.

BACTERIAL MATS OF THE OXIDE ORES IN THE WORLD OCEAN

V.V. AVDONIN¹, E.A. ZHEGALLO², N.E.SERGEEVA¹

¹*Lomonosov Moscow State University
119991, Russian Federation, Moscow, Leninskie Gory, GSP-1; e-mail: avdonin@geol.msu.ru, nat@geol.msu.ru*

²*Borissiak Paleontological Institute of the Russian Academy of Sciences
117647, Russia, Moscow, Profsoyuznaya street, 123; e-mail: ezheg@paleo.ru*

Bacterial mats, formed by successively accumulating biofilms, are the main constructive component of the oxide ferromanganese ores on the oceanic floor. The coordinated behavior of the bacterial colonies in the biofilms controlled the growth of the stromatolites and onkolites structures.

Biofilms of the stromatolite bacterial mats represent the microbial community, with the thread bacteria forming a polygonal network that determines a pillar structure of the crusts.

Bacterial mats in nodules are festoon-shaped. Biofilms in festoons intensely interact with the environment, assimilating petrogenic components and consuming the sedimentary material.

Key words: oxide ores; bacterial mats; biofilms; thread bacteria.

Оксидные руды Мирового океана — железомарганцевые конкреции абиссальных котловин (ЖМК) и кобальтоносные корки подводных под-

нятий (КМК) имеют бактериальную природу и идентифицируются как строматолиты и онколиты [1]. Объектами многолетнего изучения были кон-

креции провинции Кларион-Клиппертон и корки Магеллановых гор в Тихом океане.

Одна из задач проведённых исследований состояла в изучении бактериальных матов, состава и строения биоплёнок и их роли в формировании строматолитовых и онколитовых структур. Полученные результаты изложены ниже.

И корки и конкреции рассматриваются нами как продукты жизнедеятельности бактериальных сообществ, которые в процессе эволюции приобрели способность окислять двухвалентные соединения железа и марганца и осаждать оксиды металлов в кристаллической или аморфной форме внутри и на поверхности клеток, формируя таким образом структурный каркас построек. Возможно, механизмы биологического поглощения марганца и железа из окружающей среды и осаждения этих металлов подобны тем, что описаны в [4, 6]. Вероятнее всего, продуктами окисления извлечённых металлов являются аморфные слабо окристаллизованные оксиды (гидрооксиды) марганца и железа, отлагающиеся в клетках, связывающиеся с клеточными стенками или накапливающиеся в гликокаликсе. Таким образом, происходит постепенное заполнение кристаллическими или аморфными минералами всех элементов бактериальной структуры. Впоследствии в процессе диагенеза они преобразуются в преобладающие в оксидных рудах вернадит, ферроксигит и другие минералы. Кстати, железо может изначально отлагаться не только в оксидной форме, но и в форме гидросиликатов, фосфатов, карбонатов и др.

На самом деле в состав и корок и конкреций входят не только оксиды железа и марганца (как продукты жизнедеятельности бактериальных сообществ), но и комплекс петрогенных компонентов. Часть этого материала попадает в растущие корки и конкреции из окружающей среды и легко распознается даже на микроскопическом уровне. А вот другая часть, скорее всего, является веществом самих бактериальных матов. Таким образом, это не постороннее вещество, попадающее в подобные структуры извне, а компоненты — такие же про-

дукты жизнедеятельности бактерий, как железо и марганец. Они поступали в растущие структуры одновременно с марганцем и железом. О такой их природе свидетельствует то обстоятельство, что они постоянно фиксируются по данным микроанализа субмикроскопических слоев, лишённых каких-либо заметных примесей.

Субмикроскопические слои соответствуют биоплёнкам. В ряде случаев бактериальные маты представлены чередованием различных по составу биоплёнок: одни характеризуются повышенными концентрациями Mn, в других заметно возрастает роль Fe. Поэтому условно выделены «марганцовистые» и «железистые» биоплёнки. В марганцовистых биоплёнках корок содержание Mn достигает 60 %, Fe — 1,5 %; в железистых слоях содержание Mn от 25 до 35, а Fe более 10 %. Похожие соотношения свойственны и конкрециям: марганцовистые слои содержат до 55 % Mn и 15—18 % Fe, а железистые — до 45 % Mn и более 25 % Fe (таблица). При этом отмечается определенная корреляция между Fe и Mn, с одной стороны, и петрогенными элементами — с другой. В участках, обогащённых Mn, содержится больше Mg, Al, K, а повышенные концентрации Fe сопровождаются увеличением Si, Ti, Ca. Следовательно, структура оксидных образований построена железомарганцевыми и петрогенными компонентами.

К этому необходимо добавить, что растущие корки и конкреции, обладая высокой пористостью, и тонкодисперсным строением, характеризовались большой сорбционной ёмкостью. По этой причине оксидные руды насыщались комплексом цветных, редких, редкоземельных металлов.

Детальное изучение субмикроскопических текстур и структур этих руд, сопоставление наблюдаемых форм с материалами микробиологических и бактериальных палеонтологических исследований позволило обосновать вывод о том, что основой их строения являются бактериальные маты [3, 7].

Структурная основа строматолитов КМК — столбчатые образования; основной структурный элемент ЖМК — фестоны. Столбцы корок и фес-

Средние составы субмикроскопических слоев (биоплёнок) в КМК и ЖМК (по данным микроанализа, мас.%)

| Компонент | КМК | | ЖМК | |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| | I | II | I | II |
| MnO | 59,79 | 35,56 | 54,9 | 44,91 |
| FeO | 1,41 | 10,96 | 16,72 | 25,97 |
| SiO ₂ | 0,35 | 10,98 | 6,55 | 9,39 |
| TiO ₂ | 0,14 | 1,0 | 1,61 | 2,17 |
| Al ₂ O ₃ | 7,59 | 4,44 | 1,73 | 1,58 |
| MgO | 11,69 | 3,58 | 3,81 | 2,10 |
| CaO | 3,97 | 15,93 | 3,23 | 3,72 |
| K ₂ O | 1,19 | 1,25 | 0,50 | 0,51 |

Примечание: I — марганцовистые, II — железистые биоплёнки.

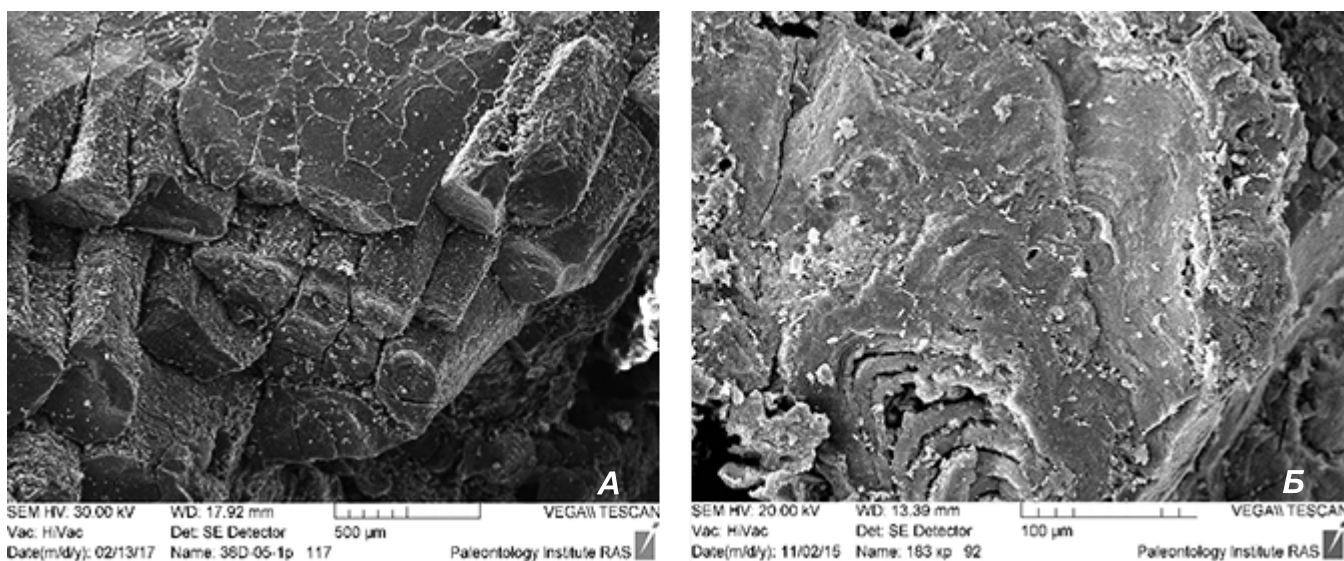


Рис. 1. Бактериальные маты: А — столбчатые КМК; Б — концентрические ЖМК

тоны конкреций — это разновидности бактериальных матов. Бактериальные маты сложены закономерно чередующимися горизонтально ориентированными (КМК) или концентрическими (ЖМК) бактериальными плёнками (рис. 1).

Корки на гайотах Магеллановых гор имеют слоистое строение. Возрастной диапазон макрослоёв от кампан-маастрихта до настоящего времени. В разрезе корок выделено четыре слоя, устойчиво прослеживающихся в пределах всей провинции: позднепалеоценовый — раннеэоценовый, средне—позднеэоценовый, миоценовый и плиоцен—четвертичный. Мощности каждого из слоёв достигают 2—4 см. Изредка основной разрез подстилают реликты более древних слоёв, с двумя возрастными диапазонами — кампан-маастрихтским и поздне-

палеоценовым [9]. Сопоставление корковых слоёв с одновозрастными образованиями осадочного чехла позволило установить, что два нижних слоя осаждались в условиях шельфа — верхней батиали (менее 600 м). Реликтовые слои могли формироваться в ещё более мелководных условиях, вплоть до фотической зоны. Рудообразование двух верхних слоёв происходило на глубинах, близких к современному, т. е. от 1200 до 3000 м [9].

Структура КМК — всегда совокупность параллельно ориентированных, направленных вертикально вверх от поверхности субстрата столбцов. Всё разнообразие свойственных им текстурных рисунков — короткостолбчатых, длинностолбчатых, тесно сомкнутых или разделённых промежутками и полостями, ветвящихся и других — это всего лишь разнообразие столбцов, отражающее изменчивость обстановок жизни бактериальных сообществ.

Но самая главная особенность столбчатых структур заключается в том, что в них отчётливо проявлена горизонтальная слоистость (рис. 2).

Столбчатые бактериальные маты корок сложены чередующимися фоссилизированными биоплёнками, в которых часто сохраняются многие признаки, позволяющие сопоставлять их с современными биоплёнками. Толщина биоплёнок колеблется в пределах от 0,5 до 1,5 м. Биоплёнки представляют собой совокупность микробных клеток, окружённых, а иногда погружённых, в массу внеклеточного полимерного органического вещества — гликокаликса [3]. Они отчётливо распознаются в изученных объектах. Реликты гликокаликса уверенно диагностируются в двух случаях. Во-первых, иногда наблюдаются относительно крупные скопле-

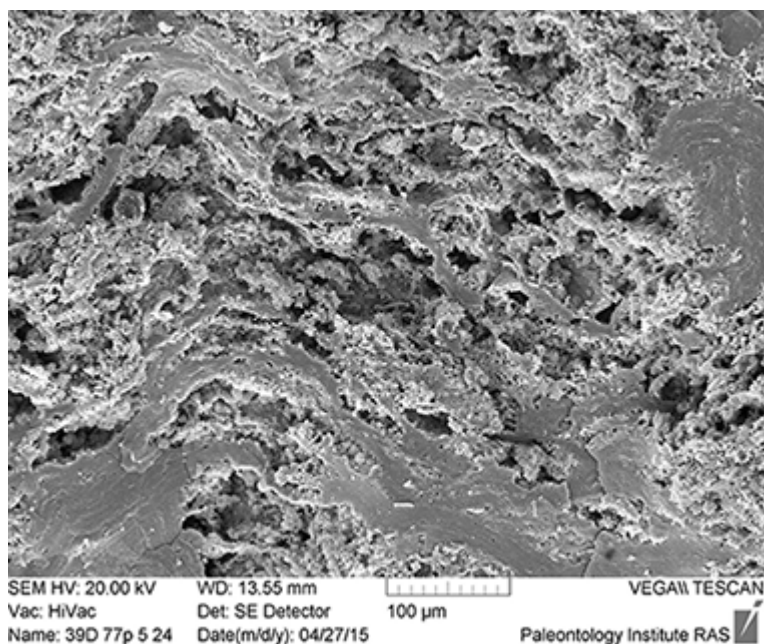


Рис. 2. Слоистость столбчатых бактериальных матов

ния его в межслоевом пространстве. Во-вторых, часто гликокаликс покрывает кокки, микроглобулы и другие микрочастицы (рис. 3).

Гликокаликс часто имеет пористую структуру; округлые или овальные отверстия диаметром 1—2 м подчеркивают слотстую текстуру матов, иногда образуют скопления, определяющие «пузырчатое» строение плёнки. Поры, как правило заняты микроорганизмами — кокками, нитчатыми бактериями. Трихомы нитчатых бактерий при диаметре 0,5 м достигают длины около 1,5 м. Изредка наблюдаются нити длиной до 12 м (рис. 4).

Биоплёнки, слагающие строматолитовые бактериальные маты, как и подобные им биоплёнки других видов, в процессе жизнедеятельности представляли собой целостное образование — сообщество микроорганизмов. Экспериментальными исследованиями установлено, что клетки и их структуры в биоплёнках способны получать информацию о пространстве, обмениваться ею с основной массой сообщества, и следовательно, проявлять «согласованное» поведение. Синхронный рост столбцов, образование упорядоченных дендритоподобных построек, скорее всего, — следствием именно этих функций биоплёнок [5, 8, 10].

Нитчатые бактерии, как утверждают исследователи, вероятно, выполняют защитные функции, они способны преодолевать негативное воздействие окружающей среды [10].

В биоплёнках столбчатых строматолитов нитчатые бактерии выполняют особую роль. Биоплёнки, как основной элемент строения бактериальных матов, ответственны за обеспечение взаимодействия бактерий, роста бактериального мата и т. д. В плёнках происходит объединение нитей в структурное и функциональное целое. Как показано в экспериментах [10], нити сначала образуют агрегаты, а затем полигональную сеть, состоящую из центров и соединяющих их лучей. Вероятно, подобные явления были свойственны бактериальным плёнкам, которые составляли бактериальные маты изученных оксидных руд. Если этот вывод справедлив, тогда находится правдоподобное объяснение особенностям текстуры строматолитов. Возникающая в плёнке полигональная сеть определяет полигональную (в плоскости роста) структуру столбцов (рис. 5).

Центры сети становятся центрами роста столбцов, действующих синхронно. Распределение пространства между центрами происходит по принципу «ближайшего района».

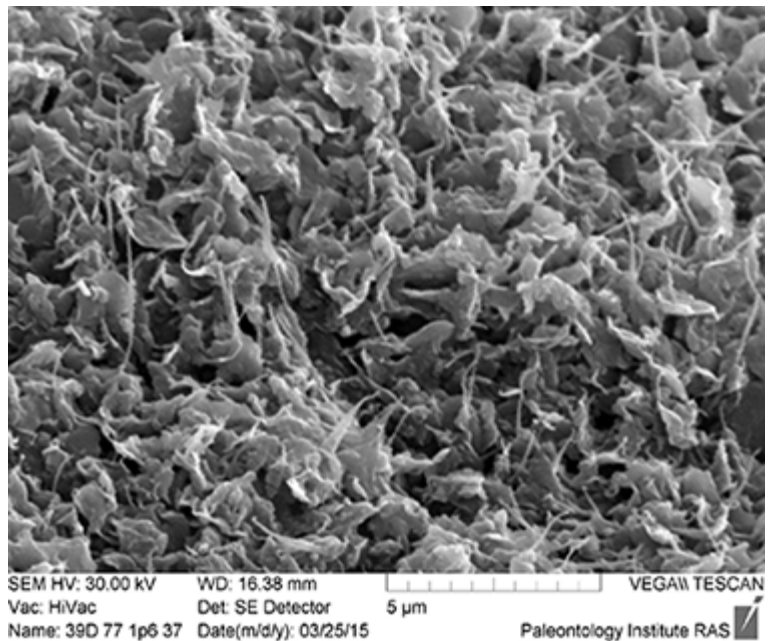


Рис. 3. Фоссилизированный гликокаликс

Бактериальные маты конкреций имеют фестончатую форму вследствие того, что конкреции свободно растут в радиальных направлениях от центра. Фестоны часто представлены тесным чередованием фоссилизированных биоплёнок, т. е. матами, подобными матам корок. В отличие от последних в них обычно наблюдаются биоплёнки относительно большой толщины, содержащие помимо бактерий минеральное вещество осадка. Это явление можно рассматривать как проявление защитных функций нитчатых бактерий биоплёнок. Ранее было отмечено, что биопленки — строители железомарганцевых строматолитов, взаимодействуя с

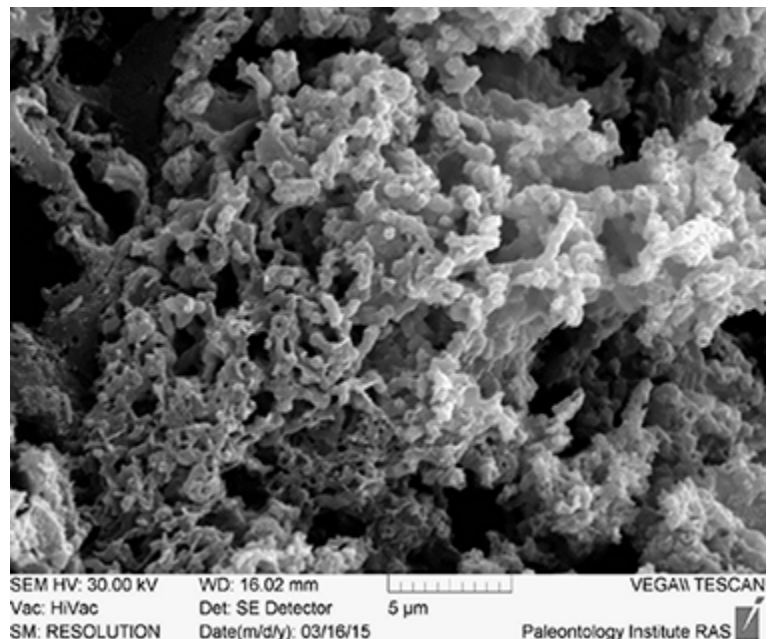


Рис. 4. Трихомы нитчатых бактерий

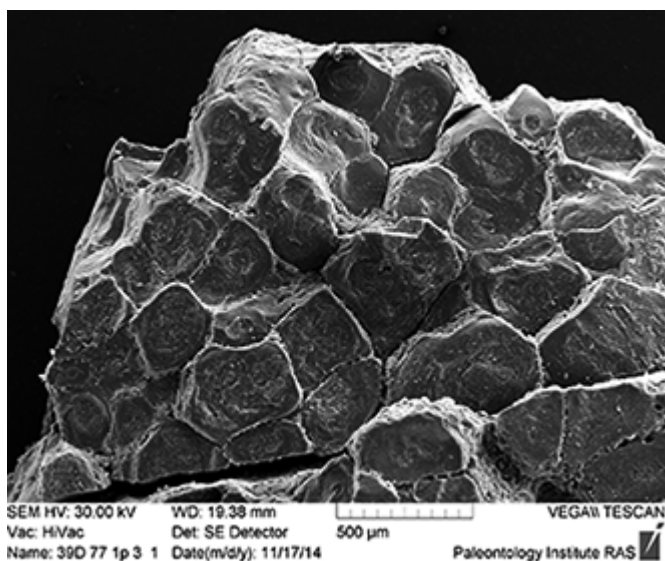


Рис. 5. Полигональная структура столбцов (поперечный скол)

окружающей средой (осадками), в борьбе за выживание приобретают способность усваивать некоторое количество петрогенных компонентов и встраивать их в свою структуру. Этот процесс, возможно, сыграл определяющую роль в возникновении онколитов (ЖМК) из биоплёнок коркового типа [2].

Таким образом, конкреции отличаются от корок не только формой бактериальных матов, но и способностью активного взаимодействия с окружающей средой. Последнее выражается в способности усваивать биоплёнками петрогенные компоненты, в поглощении конкрециями довольно значительных порций окружающего осадочного материала [2].

Заключение

Изложенные результаты изучения состава и строения оксидных руд океанского дна позволяют с уверенностью утверждать, что они представляют собой продукты жизнедеятельности бактериальных матов. Установлено, что бактериальные маты КМК и ЖМК по текстуре, особенностям развития, закономерностям размещения существенно различны. Выявлены микрокомпоненты матов — кокки, реликты нитчатых бактерий, что позволило реконструировать строение биоплёнок, их функции, особенности и механизмы взаимоотношения с окружающей средой. Установлены факты, подтверждающие взаимодействие бактерий, населяющих биопленки, создание ими полигональных сетей, определяющих формирование столбчатых текстур матов КМК.

Выполненные исследования способствуют решению проблемы генезиса оксидных океанских руд.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авдонин В.В., Еремин Н.И., Жегалло Е.А., Сергеев Н.Е. Биоморфные микроструктуры железомарганцевых строматолитов // Докл. РАН. 2016. Т. 471. № 3. С. 321–323.
2. Авдонин В.В., Жегалло Е.А., Сергеева Н.Е. Микростроение строматолитов и онколитов океанского дна // Изв. вузов. Геология и разведка. 2016. № 2. С. 27–32.
3. Бактериальная палеонтология / А.Ю. Розанов (ред.). М.: ПИН РАН. 2002. 188 с.
4. Герасименко Л.М., Орлеанский В.К., Зайцева Л.В. Накопление и осаждение Mn^{2+} клетками *Oscillatoria terebriformis* // Микробиология. 2013. Т. 82. № 5. С. 605–613.
5. Грузина В.Д. Коммуникативные сигналы бактерий // Антибиотики и химиотерапия. 2003. № 48 (10). С. 32–39.
6. Дубинина Г.А., Сорокина А.Ю. Нейрофильные литотрофные железоокисляющие прокариоты и их участие в биохимических процессах цикла железа // Микробиология. 2014. Т. 83. № 2. С. 127–142.
7. Ископаемые бактерии и другие микроорганизмы в земных породах и астроматериалах / Научные редакторы А.Ю. Розанов, Г.Т. Ушатинская. М.: ПИН РАН, 2011. 172 с.
8. Мальцев С.В., Мансурова Г.Ш. Что такое биопленка? // Природная медицина. 2013. № 1 (13). С. 86–89.
9. Мельников М.Е. Месторождения кобальтоносных марганцевых корок. Геленджик: ФГУП ГНЦ Южморгеология, 2005. 230 с.
10. Сумина Е.Л., Сумин Д.Л. Морфогенез в сообществе нитчатых цианобактерий // Онтогенез. 2013. Т. 44. № 3. С. 203–220.