

УДК 553.048 (26)

В.В. Авдонин¹, Н.Е. Сергеева², К.В. Ван³

ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЖЕЛЕЗОМАРГАНЦЕВЫХ СТРОМАТОЛИТОВ С ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДОЙ

Анализ субмикроскопических текстур кобальтоносных корок из Магеллановых гор показал, что биопленки — строители железомарганцевых строматолитов — извлекают петрогенные компоненты (SiO_2 , Al_2O_3 , P_2O_5 и др.) из окружающей среды и используют их для формирования столбчатой структуры.

Ключевые слова: строматолиты, кобальтоносные корки, Магеллановы горы.

The analysis of the submicroscopic textures of the cobalt-rich ferromanganese crusts Magellan mountains showed that biofilm — the builders of ferromanganese stromatolite — master petrogenetic components (SiO_2 , Al_2O_3 , P_2O_5 and others) from the environment and are used they for the formation of columnar structure.

Key words: stromatoliths, cobalt-rich crusts, Magellan seamounts.

Введение. Железомарганцевые строматолиты предположительно возникли после Великого мезозойского вымирания на рубеже мезозоя и кайнозоя и получили широкое распространение на океанском дне в виде корковых покровов и полей конкреций [Авдонин и др., 2013а, б].

Кобальтоносные корки из рудного района Магеллановых гор образуют обширные покровы на коренных породах привершинных склонов подводных гор — гайотов. Корки обладают слоистым строением, в их разрезе выделяют несколько рудных слоев средней толщиной 2–3 см, отличающихся обликом, структурой, физическими свойствами, нерудными примесями.

Слоистый разрез корок — своеобразная летопись мезозойско-кайнозойского железомарганцевого рудогенеза, который охватывает временной интервал от кампана—маастрихта до настоящего времени [Мельников, 2005]. В разрезе корок из Магеллановых гор выделено четыре макрослоя: позднепалеоценовый—раннеэоценовый (I-1), средне-позднеэоценовый (I-2), миоценовый (II) и плиоцен-четвертичный (III). Изредка основной разрез подстилают реликты ранее существовавших слоев (реликтовых, R) с двумя возрастными диапазонами — кампан-маастрихтским и позднепалеоценовым(?). Для каждого слоя установлены типичные ассоциации микротекстурных элементов.

Рост корок происходил с перерывами, иногда значительными, но постоянно возобновлялся. При этом, как правило, макрослои корок не разделены какими-либо осадками. В корковом разрезе можно проследить определенную эволюцию структурных форм строматолитов, которая выражается

в последовательном чередовании разнообразных столбчатых текстур.

Детальное изучение разреза корок позволило установить, что все макрослои состоят из совокупностей текстурных элементов, образующих типичные для каждого слоя ассоциации. Эволюция этих ассоциаций представляется следующей.

Реликтовым слоям свойственны волнисто-слоистые формы и крупные радиально-слоистые «постройки». Ведущим текстурным мотивом этого слоя можно считать рисунок, отражающий прорастание оксидных железомарганцевых микроформ сквозь фосфатный осадок.

Слой I-1 представлен тонкочешуйчатыми однородными массами, в которых проявлены волнисто-слоистые формы; в последних намечаются столбчатые образования. Наблюдаются также короткостолбчатые и фестончатые формы.

Слой I-2 — древовидные крупные столбчатые агрегаты с большими полостями между ними. В основании и завершении слоя — ряды тесно сомкнутых коротких столбцов.

Слой II имеет трехчленное строение: сверху и внизу развиты плотные ряды столбцов, в центре преобладают кустистые сростки ветвящихся столбцов.

Слой III сложен в основном плотными рядами прямолинейных тонких столбцов.

Таким образом, в целом создается вполне определенная картина существования и формирования единой общей структуры, развивающейся по единым законам. Столбчатые текстуры разнообразны, но рост столбцов всегда происходит синхронно, с одинаковой скоростью.

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии, геохимии и экономики полезных ископаемых, профессор, докт. геол.-минерал. н.; e-mail: avdonin@geol.msu.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии, геохимии и экономики полезных ископаемых, ст. науч. с.; e-mail: nat@geol.msu.ru

³ Институт экспериментальной минералогии РАН, ст. науч. с.; e-mail: kvv@iem.ac.ru

Изучение железомарганцевых корок из гайотов Магеллановых гор в Тихом океане с использованием сканирующего электронного микроскопа позволило установить, что они представляют собой особый тип железомарганцевых строматолитов. Столбчатые текстуры строматолитов представляют собой бактериальные маты, образованные чередованием фоссилизированных реликтов бактериальных пленок (рис. 1). По текстурному рисунку корковые строматолиты очень близки широко известным карбонатным строматолитам [Бактериальная..., 2002; Заварзин, 2003]. Реликты бактериальных пленок морфологически подобны современным цианобактериальным пленкам — в них можно проследить переплетение нитевидных и коккоидных форм цианобактерий, на что впервые обратили внимание китайские геологи [Bian Lizeng et al., 1996; Hu Wenxuan et al., 2000].

Строителями железомарганцевых строматолитов являются биопленки — сообщества микроорганизмов, прикрепленных к твердому субстрату. Биопленки формируют бактериальные маты — стратифицированные макроколонии, состоящие из прокариотных организмов [Ископаемые..., 2011; Пиневич, 2005]. Биологическое тело мата состоит из горизонтальных слоев толщиной от одного микрометра до нескольких миллиметров. Бактериальный мат растет по мере развития входящих в его состав микроорганизмов. Мат, пропитанный оксидами железа и марганца, представляет собой железомарганцевый строматолит.

Выпадение осадков препятствует росту корок: биопленки — строители строматолитов, будучи погребенными под обильными осадками, после непродолжительного этапа попыток продолжения роста в угнетенном состоянии прекращают существование. Фациальные обстановки формирования корок свидетельствуют о том, что на ранних этапах (формирование реликтовых слоев и слоев I-1 и I-2) рост строматолитов сопровождается накоплением карбонатно-фосфатных осадков. Поэтому нередко в массе бактериального мата среди чередующихся биопленок наблюдаются мелкие выделения фосфатов (рис. 1). На поздних этапах росту верхних слоев корок сопутствовало осаждение кремнистого материала.

Биопленки, слагающие строматолитовые цианобактериальные маты, как и подобные им биопленки других видов, представляют собой хорошо организованное взаимодействующее сообщество микроорганизмов [Мальцев, Мансурова, 2013]. Формирование биопленок — следствие согласованного группового поведения бактерий, которое определяется так называемым чувством кворума. Это одно из основополагающих понятий современной микробиологии [Грузина, 2004]. Вероятнее всего, все особенности текстурных характеристик оксидных руд в значительной степени — проявление именно этого феномена.

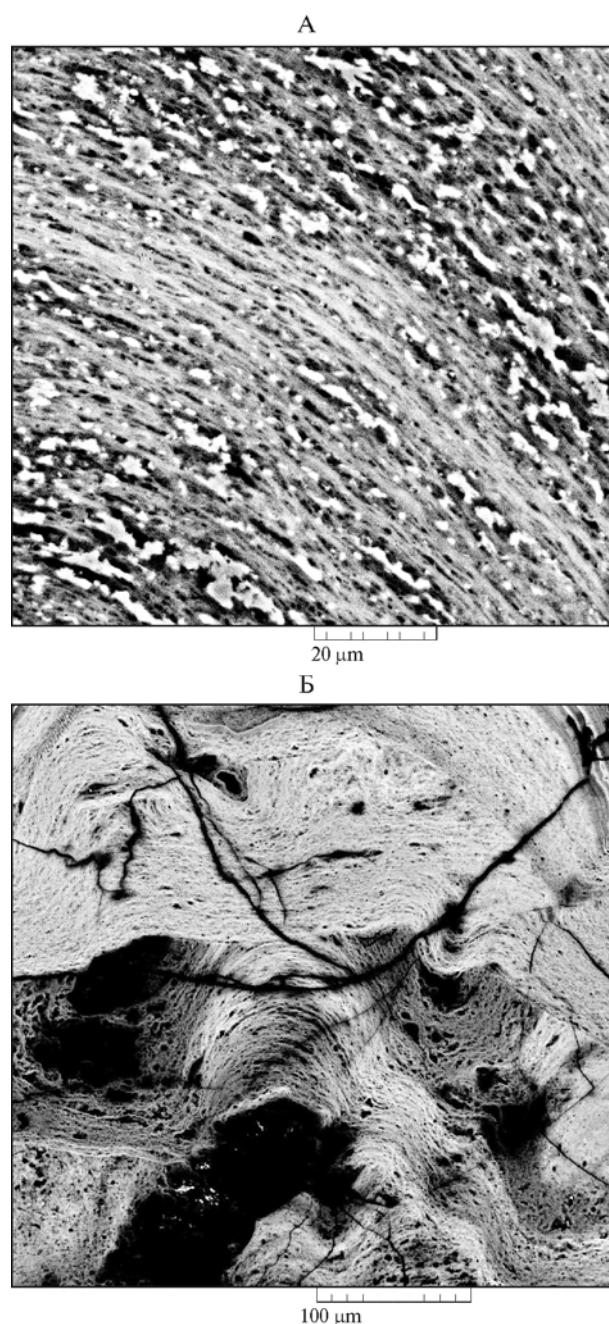


Рис. 1. Бактериальные маты: А — чередование фоссилизированных биопленок, белые комочки — частицы фосфата, захваченные в процессе роста; Б — взаимоотношения бактериальных матов различных генераций в столбчатой структуре железомарганцевого строматолита, видно несогласное наложение более молодой полосы на срезанную поверхность ранних образований

Синхронный рост столбцов, формирование упорядоченных дендритоподобных построек, возможно, происходят вследствие проявления специфического социального поведения бактериальных сообществ.

Основная структура корки — постройка, состоящая из чередования последовательно сформированных слоев. Но эта постройка осложнена многочисленными мелкими второстепенными элементами — полостями, трещинами, включениями постороннего материала, включениями

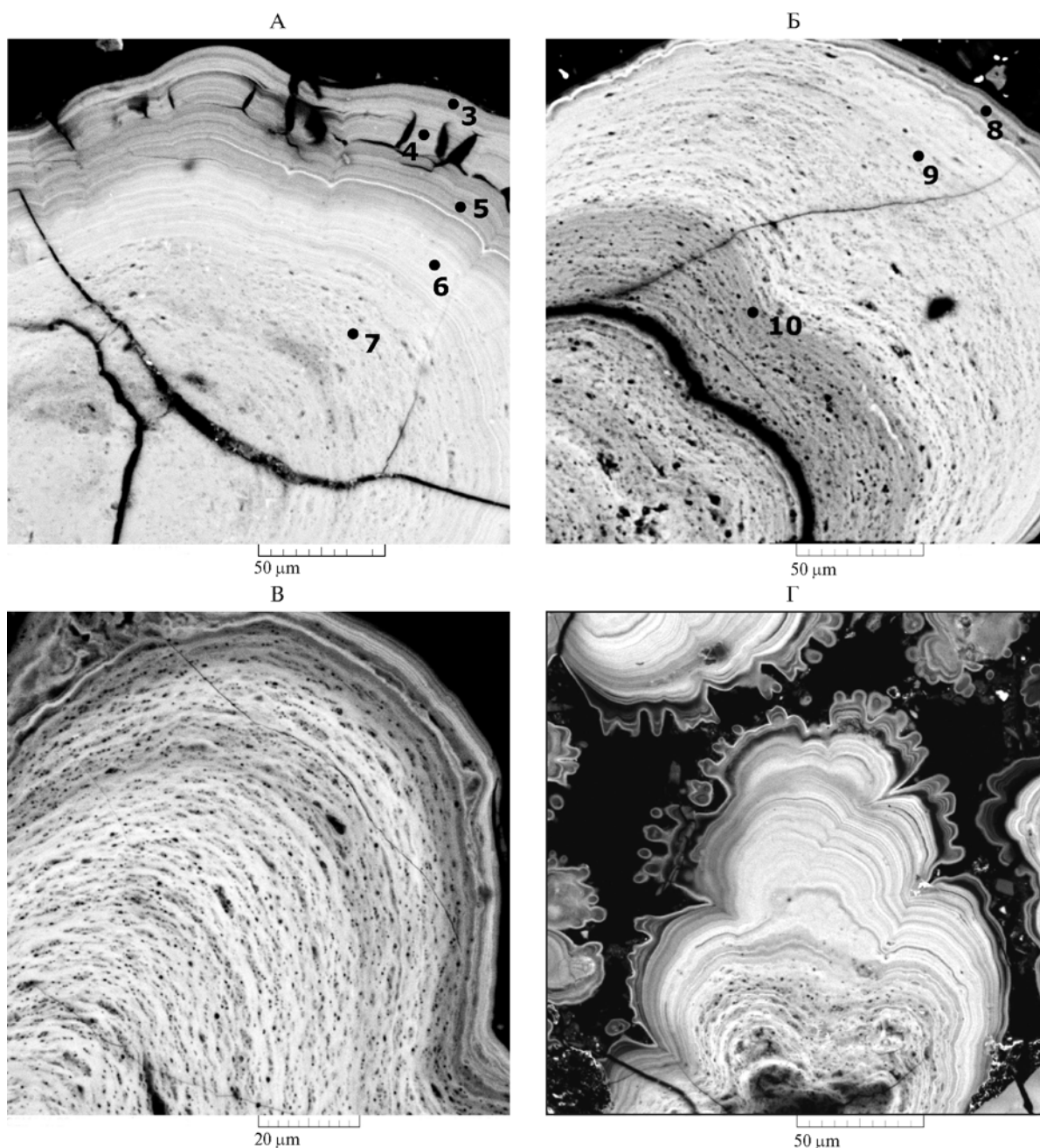


Рис. 2. Почки в полостях корковых слоев: А, Б — почки слоистой текстуры, по мере роста толщина бактериальных пленок уменьшается, крайние слои обогащаются кремнеземом, глиноземом, железом (табл. 1); В — чередование фоссилизированных пленок двух видов — однородных марганцовистых (светлые) и веретенообразных (серые) с округлыми порами (следами кокков); Г — почка в свободной полости, от основания к периферии бактериальные пленки становятся тоньше; почка обрамлена фестончатым венцом

фаунистических остатков и пр. Некоторые из этих второстепенных элементов обладают признаками (чертами) автономного существования, в которых сохраняются закрытые условия. Эти микротекстурные элементы очень важны для выяснения условий и результатов взаимодействия растущих организмов с окружающей средой.

В процессе роста корок постоянно возникают полости различной природы, типа, размера. Наиболее часто наблюдаются полости в промежутках между столбцами. Полости возникают на границах макрослоев, фиксируя перерывы рудонакопления, и т.д. Некоторые полости в течение длительного

времени остаются зияющими и подвергаются активному воздействию окружающей среды, другие — быстро замыкаются, и процессы, происходящие в них, не зависят от окружающей среды.

Возникновение полостей четко привязано к этапам роста строматолитов, их заполнение соответствует господствовавшей на данном этапе обстановке. Заполнение полостей осадочным материалом дает основание для оценки фациальных условий формирования слоев. В частности, установлено, что базальные слои корок практически повсюду содержат в полостях большое количество фосфатного материала. В верхних слоях фосфат-

Таблица 1

Состав слоев почек по данным микроанализа (масс.%), образец 38-2, см. рис. 2

Состав	Номер анализа								
	3	4	5	6	7	8	9	10	
SiO ₂	14,04	4,45	5,16	2,99	1,47	6,25	1,87	5,40	
Al ₂ O ₃	4,71	1,51	1,57	0,57	1,18	2,16	0,46	1,00	
FeO	19,80	23,26	23,41	18,80	11,46	30,02	14,80	23,34	
MgO	1,65	0,27	1,04	1,87	1,95	1,57	2,16	1,05	
MnO	23,83	25,88	23,73	33,56	41,81	17,41	37,70	24,86	
CaO	2,34	2,67	2,97	4,07	3,98	2,45	3,58	3,53	
Na ₂ O	0,39	0,27	0,99	2,70	2,74	1,19	2,37	0,99	
K ₂ O	0,83	0,19	0,21	0,38	0,76	0,30	0,47	0,19	
P ₂ O ₅	0,76	0,90	0,56	0,81	0,45	1,16	0,77	0,59	

ный материал в полостях, как правило, отсутствует. В них накапливаются силикатные илы — бескарбонатные и бесфосфатные.

В полостях наряду с фрагментами осадочного материала наблюдаются остатки микрофауны (в том числе руководящей для определения возраста корковых слоев), аксессуарные минералы. В течение всего времени роста корок в полостях обитают различные микроорганизмы, в том числе биопленки — строители строматолитов. Процесс жизнедеятельности биопленок продолжается в полостях. Биопленки, развивающиеся в свободном пространстве внутри полостей, образуют разнообразные формы — сплошные каемки на стенках, полусферические почки, лапчатые выросты, сферические обособления. Поскольку некоторые типы полостей представляют собой замкнутые пространства, происходящие в них процессы свободны от влияния посторонних факторов. Это обстоятельство позволяет рассматривать их как некие природные ячейки для экспериментального изучения различных деталей процессов роста строматолитов; в частности, для изучения взаимодействия биопленок с осадками.

Рассмотрим наиболее типичные случаи. На стенках полостей, свободных от осадков, развиваются почковидные образования с хорошо проявленными признаками строматолитового строения. Их текстура аналогична таковой бактериальных матов, слагающих столбцы корок, — это ритмичное чередование фоссилизированных биопленок. Однородные протяженные марганцевистые полосы (более светлые на микрофотографиях) перемежаются с железистыми веретенообразными полосами, содержащими многочисленные округлые поры. Отчетливо видно, как по мере роста почки от ее основания к поверхности постепенно толщина слоев уменьшается до исчезающе малых величин. Одновременно с этим в краевых полосах увеличивается содержание кремнезема, глинозема,

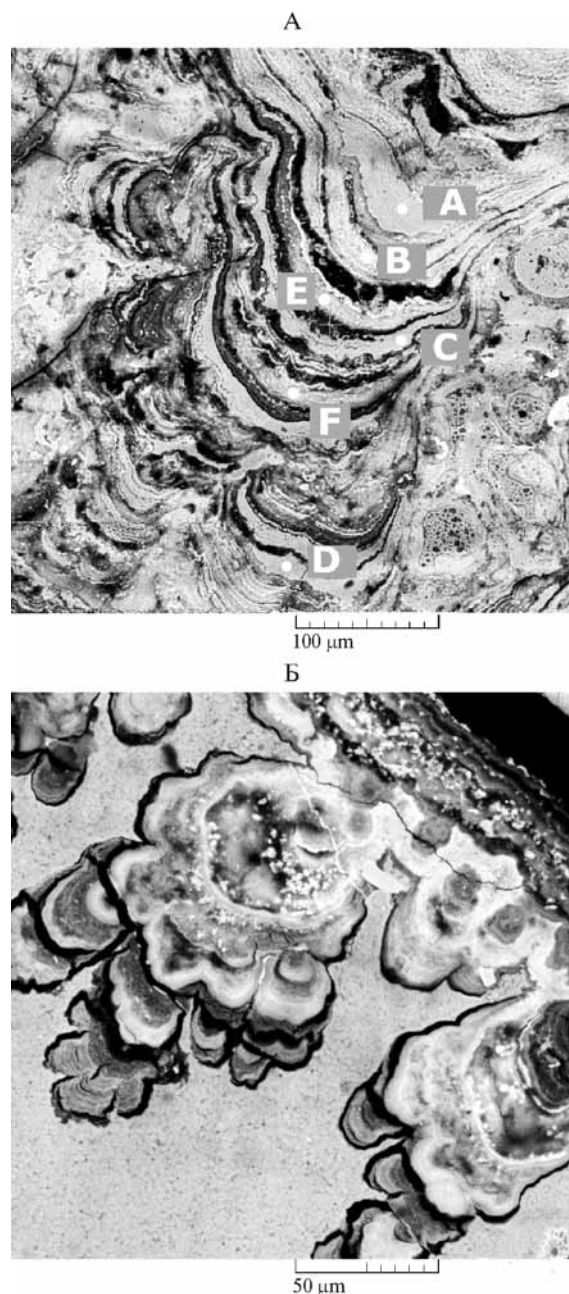


Рис. 3. Почки в фосфатной среде: А — чередование железомарганцевых и фосфатных слоев в почке: А, С, D — фосфатные слои (содержание P₂O₅ от 25 до 32%), В, Е, F — железомарганцевые слои (содержание P₂O₅ до 5,2%); Б — фосфатный материал, заполняющий полость, корродирует железомарганцевые почки

а также железа. Скорее всего, это связано с истощением питательной среды в замкнутом пространстве полости и с тем, что в первую очередь расходуется марганец (рис. 2, табл. 1).

Более наглядно подобные явления наблюдаются в полостях, в которых в момент роста почек присутствовал осадок кремнеземного состава. Внешние слои почек, растущих в этих условиях, насыщаются кремнеземом и глиноземом, заимствованными из осадка. Можно предположить, что петрогенные компоненты усваиваются биопленками наряду с марганцем и железом.

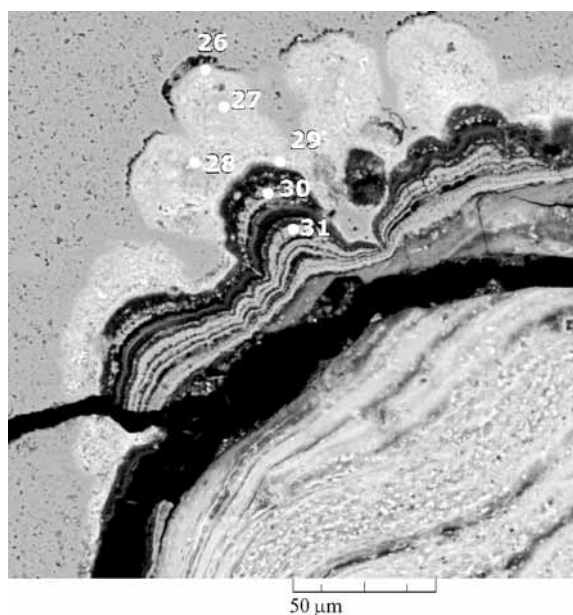


Рис. 4. Почковидные выросты в фосфатном прослое погребенной конкреции, видно чередование слоев (26–31) разного состава (табл. 2)

Но наиболее интересные и сложные явления характерны для взаимоотношений биопленок с фосфатными осадками. В базальных слоях корок, формирование которых происходило одновременно с накоплением карбонатно-фосфатных осадков, и столбчатые структуры, и почки нередко содержат микрослойки фосфатов (рис. 3, А). Природа этих образований выяснилась, когда удалось восстановить последовательность процессов, происходивших в некоторых полостях. Сначала в свободном пространстве вырастали столбчатые структуры из чередующихся железомарганцевых слойков. Поступление осадочного фосфатного материала препятствовало росту столбцов. Биопленки в борьбе с неблагоприятными условиями частично поглощали осадочный материал, включая его в свою структуру в виде микрослойков. Затем — перед полным прекращением жизнедеятельности биопленок — формировались угнетенные формы мелких почек, а в завершение этого процесса проявляются признаки деструкции вершин столбчатых структур (рис. 3, Б).

Наиболее яркие и необычные формы борьбы биопленок с враждебной фосфатной средой обнаружены в погребенных конкрециях. Так, некоторые погребенные конкреции, возникшие одновременно с ранними корковыми слоями I-1 и I-2, характеризуются тем, что их оболочки об-

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Авдонин В.В., Еремин Н.И., Мельников М.Е., Сергеева Н.Е. Мезо-кайнозойский железомарганцевый рудогенез Мирового океана // Докл. РАН. 2013а. Т. 456, № 6. С. 1–3.

Авдонин В.В., Мельников М.Е., Сергеева Н.Е. Субмикроскопические текстуры мезозойско-кайнозойских железомарганцевых строматолитов // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2013б. № 5. С. 289–294.

Таблица 2

Состав слойков почки по данным микроанализа (масс.%), образец 14 D, см. рис. 4

Состав	Номер анализа					
	26	27	28	29	30	31
SiO ₂	2,78	3,05	0,95	3,89	2,66	0,90
Al ₂ O ₃	3,75	2,79	2,69	2,47	0,96	0,57
FeO	4,36	3,25	1,34	4,40	2,38	1,76
MgO	4,90	2,86	4,49	3,12	0,90	0,27
MnO	36,91	24,70	54,19	29,16	10,29	4,94
CaO	13,55	21,95	2,18	19,54	36,58	46,89
Na ₂ O	1,12	1,38	1,78	0,91	1,04	0,97
K ₂ O	0,66	0,50	0,86	1,02	0,62	0,40
P ₂ O ₅	7,11	14,83	0,15	12,50	23,15	27,91

разовывались по механизму корок. Они, как и корки, отличаются большим количеством фосфатов. В частности, в них присутствуют слои или трещины отслоения, подобные прослоям, выполненные фосфатами. В этих прослоях развиваются железомарганцевые почковидные образования. Анализ наблюдаемых явлений показывает, что почки начали расти на свободной поверхности, а затем были погребены осадившимся фосфатным материалом. Какое-то время рост почек продолжается, затем фиксируется картина борьбы биопленок за выживание, в процессе которой они, прорастая сквозь осадок, усваивают некоторое количество материала, затем попытки дальнейшего роста воплощаются в образовании своеобразных шапок фосфатно-марганцевистого состава (рис. 4, табл. 2). Заметим, что в поздних фосфатных прожилках — трещинах, рассекающих ранние слои корок, почки не растут.

Закключение. Результаты исследований позволили сделать вывод, что биопленки — строители железомарганцевых строматолитов, взаимодействуя с окружающей средой (осадками), в борьбе за выживание приобретают способность усваивать некоторое количество петрогенных компонентов и встраивать их в свою структуру. Именно благодаря этому процессу возникают новые виды строматолитов.

Бактериальная палеонтология / Под ред. А.Ю. Розанова. М.: ПИН РАН, 2002. 188 с.

Грузина В.Д. Коммуникативные сигналы бактерий // Антибиотики и химиотерапия. 2003. Вып. 48 (10). С. 32–39.

Заварзин Г.А. Лекции по природоведческой микробиологии. М.: Наука, 2003. 348 с.

Ископаемые бактерии и другие микроорганизмы в земных породах и астроматериалах / Под ред. А.Ю. Розанова, Г.Т. Ушатинской. М.: ПИН РАН, 2011. 172 с.

Мальцев С.В., Мансурова Г.Ш. Что такое биопленка? // Природная медицина. 2013. № 1 (13). С. 86–89.

Мельников М.Е. Месторождения кобальтоносных марганцевых корок. Геленджик: ФГУГП ГНЦ «Южморгеология», 2005. 230 с.

Пиневич А.В. Микробиология железа и марганца. СПб.: Изд-во СПГУ, 2005. 373 с.

Bian Lizeng, Lin Chengyi, Zhang Fusheng et al. Pelagic manganese nodules — a new type of oncolite // Acta Geologica Sinica. 1996. Vol. 70, N 3. P. 287–294.

Hu Wenxuan, Zhou Huayang, Gu Lianxing et al. New evidence of microbe origin for ferromanganese nodules from the East Pacific deep sea floor // Sci. in China. Ser. D. 2000. Vol. 43, N 2. P. 187–193.

Поступила в редакцию
10.11.2015