

ПОЛЕЗНЫЕ ИСКОПАЕМЫЕ,
МЕТОДИКА ИХ ПОИСКОВ И РАЗВЕДКИ

УДК 553.32

О ПРИРОДЕ ОКСИДНЫХ ЖЕЛЕЗОМАРГАНЦЕВЫХ РУД ОКЕАНА

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

*¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
1, Ленинские горы, Москва 119991, Россия
e-mail: avdonin@geol.msu.ru, nat@geol.msu.ru*

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

Оксидные руды океана — кобальтоносные корки (КМК) и железомарганцевые конкреции (ЖМК) имеют бактериальную природу и идентифицируются как строматолиты и онколиты. Столбчатые структуры железомарганцевых строматолитов и фестончатые онколитов представляют собой бактериальные маты, образованные чередованием фоссилизированных бактериальных пленок. Возникновение рудообразующих видов прокариотного семейства и их эволюция определяются крупными биосферными событиями. На примере КМК Магеллановых гор и ЖМК провинции Клариян-Клиппертон выявлены основные этапы эволюции структурных форм бактериальных сообществ. Показано, что смена этапов обусловлена влиянием крупных тектонических, вулканических и других геологических событий.

Ключевые слова: оксидные руды; строматолиты; онколиты; бактериальные маты; биопленки.

ON THE NATURE OF OXIDE FERROMANGANESE ORES OCEAN

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

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

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

Oxide ores of the global ocean — cobalt-rich crusts and ferromanganese nodules are of bacterial origin and identified as stromatolites and onkolites. Pillar structure of ferromanganese stromatolites and festoon-shaped structures of onkolites represent the bacterial mats, formed by interbedding of fossilized bacterial biofilms. The appearance of ore-forming types of procaryotic family and their evolution are defined by major biosphere events. On the case study of the ferromanganese nodules of Magellanic mountains and cobalt-rich crusts of the province of the Clarion-Clipperton, the main stages of the evolution of structural forms of bacterial communities have been revealed. It has been shown that the change of phases happened due to the influence of major tectonic, volcanic and other geological events.

Keywords: oxide ores; stromatolites; onkolites; bacterial mats; biofilms.

Оксидные железомарганцевые руды океанского дна представлены двумя самостоятельными формациями. Одна из них — это кобальтоносные корки подводных поднятий, другая — железомарганцевые конкреции абиссальных котловин. Руды обеих формаций близки по химическому и минеральному составам и технологическим характеристикам. Однако существенные различия в особенностях размещения и локализации месторождений и рудных залежей, определяющих условия грядущей разработки, технические средства и технологии добычи рудных масс, являются достаточным основанием для выделения рудных объектов каждой формации в отдельный геолого-промышленный тип. Ресурсный потенциал каждого типа огромен [1].

С момента первого обнаружения конкреций и до настоящего времени природа оксидных руд остается загадочной. И это несмотря на то, что и конкреции, и корки чрезвычайно широко распространены на океанском дне и повсюду легко доступны для изучения. А изучением руд более 50 лет (с тех пор, как выяснилась их промышленная значимость) занимаются научные коллективы многих стран мира.

Длительный процесс исследования оксидных руд можно условно разделить на три этапа. В первый этап были получены сведения о пространственном размещении руд, произведена предварительная минералого-геохимическая и технологическая оценки главным образом на макрокопическом уровне. Основным содержанием второго этапа можно считать выделение промышленных объектов — месторождений, рудных залежей, перспективная оценка ресурсов. Изучение состава и строения руд проводилось главным образом на микроскопическом уровне и ограничивалось вниманием к пяти главным компонентам — Mn, Co, Ni, Cu, Mo. На третьем (современном) этапе проводится выделение эксплуатационных участков и блоков, детальная промышленная оценка их. Круг потенциально извлекаемых элементов расширился и охватывает цветные, редкие, благородные металлы.

Методика изучения оксидных руд базируется на использовании современных технических средств. Благодаря этому детальность изучения состава и строения руд поднялась до субмикроскопического уровня.

Детальность изучения оксидных руд прямо отразилась на эволюции представлений об их природе.

На первом этапе господствовали гипотетические предположения, основанные на известных данных о процессах седиментогенеза. Обсуждались возможные источники рудного вещества, предполагаемые механизмы его концентрации.

Второй этап ознаменовался накоплением более детальных сведений о минеральном составе, взаимоотношении минералов, концентрациях и формах вхождения многочисленных примесных ком-

понентов. На микроскопическом уровне конкреции предстали в виде тонкослоистых образований концентрического строения. В этих структурах отчетливо проявлено ритмическое чередование микрослоёв различного состава. Среди микрослоёв толщиной от 10 до 50 мкм были выделены «кристаллические» марганцовистые и «аморфные» железистые [16]. Среднее содержание в марганцовистых слоях Mn более 35, Fe 1,28%; в железистых слоях содержание Mn 19, Fe 17%. Полученные впоследствии результаты микроанализа близки к приведённым данным. Эти обстоятельства послужили поводом использовать механизм автоколебательных реакций для объяснения ритмичного строения руд [11].

Однако известно, что прямое осаждение оксидов железа и марганца из придонных вод невозможно, вследствие низкой концентрации этих компонентов [12].

На современном этапе благодаря использованию микроанализаторов открылась принципиально новая картина строения руд: они предстали в виде совокупности фоссилизированных биоформ различной степени сохранности. Целенаправленное изучение биоформ позволило обосновать бактериальную природу руд. Наиболее убедительные данные о биологической природе оксидных руд (в основном конкреций) впервые были получены китайскими исследователями [14, 15].

Постепенно стало очевидным, что корки и конкреции являются продуктами жизнедеятельности бактериальных сообществ.

В последние годы постепенно сформировалась и успешно развивается биологическая концепция, согласно которой кобальтоносные корки представляют собой железомарганцевые строматолиты, а конкреции — онколиты [4, 14, 15].

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 [5, 7—9].

Структурная основа строматолитов КМК — столбчатые образования; основной структурный элемент ЖМК — фестоны. Столбцы корок и фестоны конкреций — это разновидности бактериальных матов. Бактериальные маты сложены закономерно чередующимися горизонтально ориентированными (КМК) или концентрическими (ЖМК) бактериальными плёнками, которые в процессе эволюции приобрели способность окислять двухвалентные соединения железа и марганца и осаждавать оксиды металлов в кристаллической или аморфной форме на поверхности клеток и в межклеточном матриксе, в гликокаликсе.

Чередующиеся фоссилизированные биоплёнки бактериальных матов часто сохраняют многие при-

знаки, позволяющие сопоставлять первые с современными биоплёнками. Толщина биоплёнок колеблется в пределах от 0,5 до 1,5 мкм. Биоплёнки представляют собой совокупность микробных клеток, окружённых, а иногда погружённых, в массу внеклеточного полимерного органического вещества — гликокаликса [3]. В них обнаруживается переплетение нитевидных и коккоидных форм бактерий.

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, является следствием именно этих функций биоплёнок [6, 10, 13].

Упомянутые выше микрослойки это бактериальные маты или их фрагменты, поэтому биоплёнки, слагающие их, тоже подразделяются на марганцовистые и железистые. На современном предельно достигнутом уровне детальности можно попытаться установить природу этого явления. В результате многочисленных наблюдений было установлено, что биоплёнки с более высоким содержанием железа отчетливо выделяются в разрезах бактериальных матов обилием округлых, овальных пор (рис. 1). Именно эти биоплёнки содержат многочисленные скопления нитчатых бактерий. Отверстия — это следы «выхода» бактерий. Кроме того, среди чередующихся биоплёнок часто наблюдаются скопления трихом нитчатых бактерий (рис. 2). Микроаналитические исследования

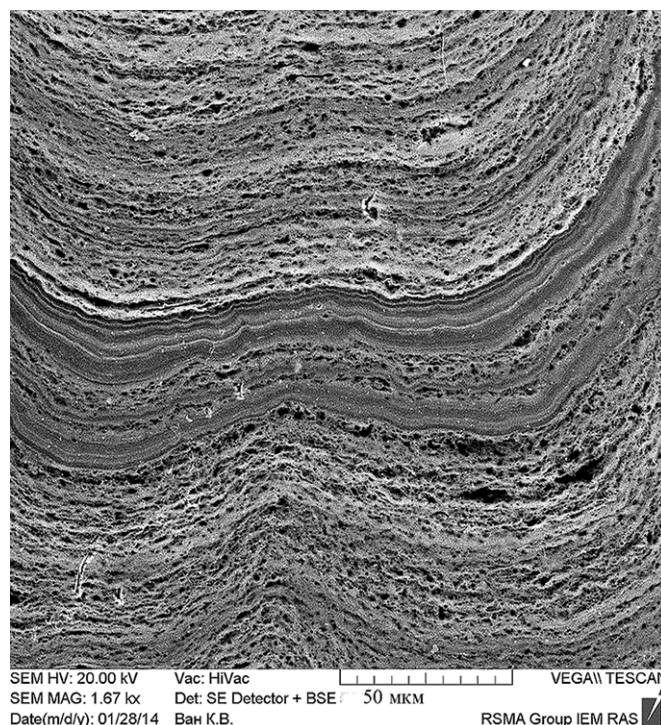


Рис. 1. Бактериальный мат железомарганцевого строматолита, поперечный разрез: чередование однородных «марганцовистых» микрослоев и пористых «железистых»

этих остатков свидетельствуют о том, что они отличаются повышенными концентрациями железа. Несмотря на сравнительно небольшое число микроанализов, закономерности достаточно очевидны. На диаграмме чётко выделяется группа нитчатых бактерий повышенной железистости и вторая группа плотных марганцовистых биоплёнок (рис. 3).

Таким образом, можно констатировать, что «железистость» биоплёнок обусловлена обилием

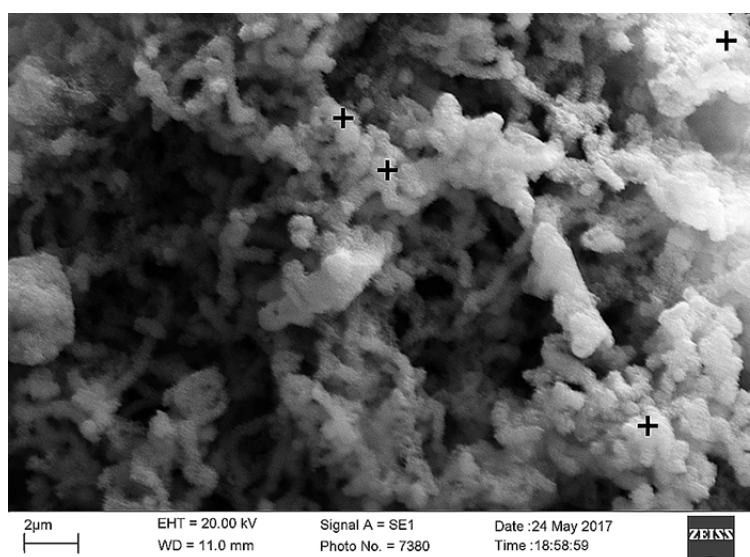


Рис. 2. Трихомы нитчатых бактерий: крестики — точки анализов, отображённых на рис. 3

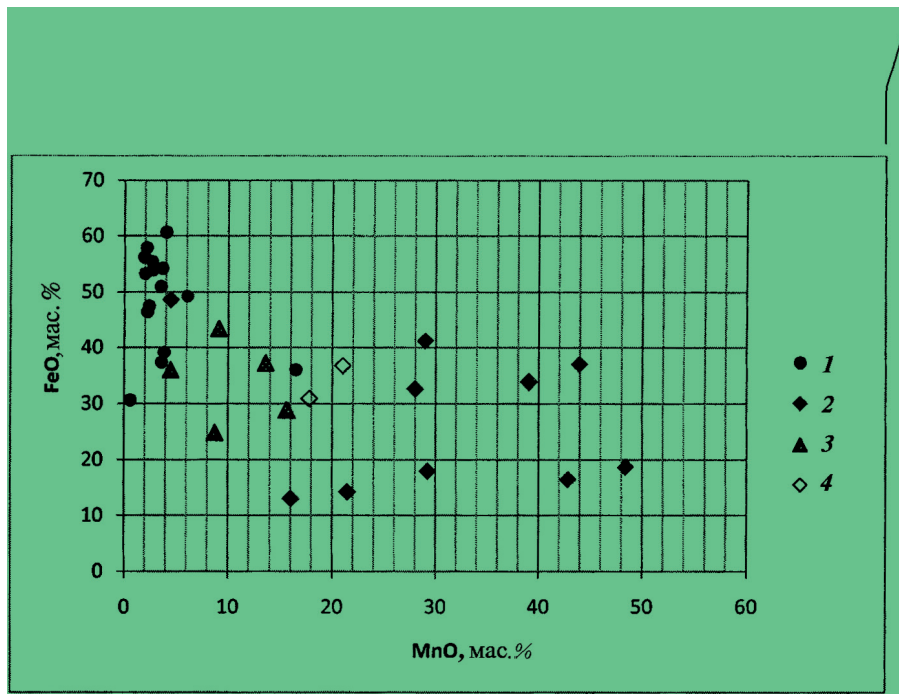


Рис. 3. Диаграмма содержаний марганца и железа в различных биоформах бактериального мата: 1 — нитчатые бактерии, кокки; 2 — плотные участки, 3 — рыхлые участки, содержащие бактерии; 4 — гликокаликс

нитчатых бактерий, а однородные марганцовистые биоплёнки помимо гликокаликса содержат бактерии, усваивающие главным образом марганец.

Нитчатые бактерии в биоплёнках строматолитов выполняют особую роль. Биоплёнки, как основной элемент строения бактериальных матов, обеспечивают взаимодействие бактерий, рост бактериального мата и т. д. Как показано в экспериментах [13], в плёнках нити объединяются в полигональную сеть. Вероятно, подобные явления были свойственны биоплёнкам — строителям строматолитов. Возникавшая в них сеть с центрами роста столбцов определяла полигональную (в плоскости роста) структуру столбцов (рис. 4).

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.

По нашим наблюдениям, зарождение онколитов имело место позднее, чем корок. Согласно геологическим данным они возникли после крупного олигоценового вымирания. Более того, вероятно, онколиты произошли от строматолитов вследствие того, что в критических условиях растущие бактериальные маты приобрели свойства активного взаимодействия с окружающими осадками [1]. Эти процессы сыграли определяющую роль в возник-

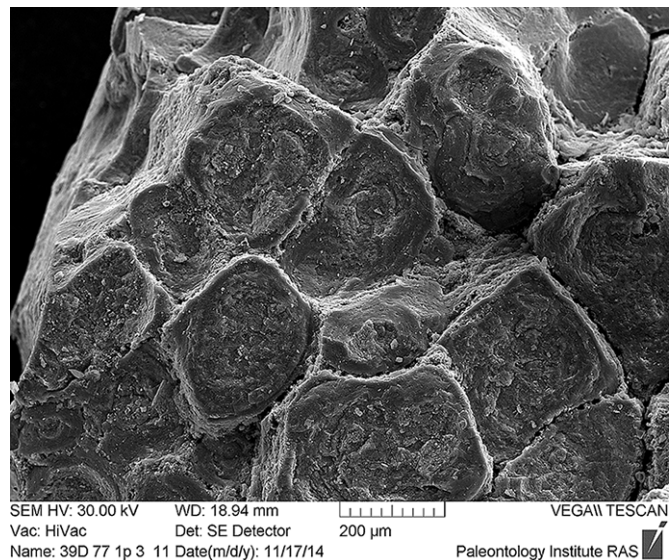


Рис. 4. Полигональная форма поперечных сечений тесно сомкнутых столбцов строматолита

новения онколитов из биоплёнок коркового типа [2].

Итак, эволюция структурных форм железомарганцевых строматолитов проявлена в двух направлениях. Одно зафиксировано последовательной сменой морфологических типов столбчатых образований в разрезах корок, второе связано с возникновением на определённой стадии онколитов, выработавших свойство постоянного активного взаимодействия с окружающим осадком.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авдонин В.В., Кругляков В.В., Лыгина Т.И., Мельников М.Е., Сергеева Н.Е. Оксидные железомарганцевые руды океана: генетическая интерпретация текстур и структур. М.: ГЕОС, 2014. 163 с.
2. Авдонин В.В., Еремин Н.И., Мельников М.Е., Сергеева Н.Е. Мезокайнозойский железомарганцевый рудогенез Мирового океана // Докл. РАН. 2013. Т. 456. № 6. С. 1–3.
3. Авдонин В.В., Жегалло Е.А., Сергеева Н.Е. Микростроение железомарганцевых строматолитов и онколитов океанского дна // Известия вузов. Геология и разведка. 2016. № 2. С. 27–32.
4. Авдонин В.В., Сергеева Н.Е., Ван К.В. Закономерности роста железомарганцевых конкреций провинции Кларин-Клиппертон (Тихий океан) // Известия вузов. Геология и разведка. 2013. № 4. С. 17–20.
5. Бактериальная палеонтология / Под ред. А.Ю. Розанова. М.: Изд-во ПИН РАН, 2002. 188 с.
6. Грузина В.Д. Коммуникативные сигналы бактерий // Антибиотики и химиотерап. 2003. Т. 48 (10). С. 32–39.
7. Заварзин Г.А. Лекции по природоведческой микробиологии. М.: Наука, 2003. 348 с.
8. Ископаемые бактерии и другие микроорганизмы в земных породах и астроматериалах / Научные редакторы А.Ю. Розанов, Г.Т. Ушатинская. М.: Изд-во ПИН РАН, 2011. 172 с.
9. Исследования марганцевой и железомарганцевой минерализации в разных природных обстановках методами сканирующей электронной микроскопии / Научный редактор Г.Н. Батурин, М.: Эслан, 2012. 472 с.
10. Мальцев С.В., Мансурова Г.Ш. Что такое биопленка? // Природная медицина. 2013. №1 (13). С. 86–89.
11. Пунин Ю.О., Сметанникова О.Г., Демидова Г.Е., Смольская Е.С. О динамике формирования океанических железомарганцевых конкреций // Литология и полезные ископаемые. 1995. № 1. С. 40–50.
12. Савенко В.С. Физико-химический анализ процессов формирования железомарганцевых конкреций в океане. М.: ГЕОС, 2004. 156 с.
13. Сумина Е.Л., Сумин Д.Л. Морфогенез в сообществе нитчатых цианобактерий // Онтогенез. 2013. Т. 44. № 3. С. 203–220.
14. Hu Wenxuan, Zhou Huayang, Gu Lianxing et al. New evidence of microbe origin for ferromanganese nodules from the East Pacific deep sea floor // Scie. in China. (Ser. D). 2000. Vol. 43, N 2. P. 187–193.
15. Qi, Pan Jianming & Zhang Haisheng. 2000. New evidence of microbe origin for ferromanganese nodules from the East Pacific deep sea floor // Scie. in China (Series D). Vol. 43. No. 2. April. P. 187–193.
16. Sore m R.K., Fewkes R.H. Manganese nodules, Research data and methods of Investigation. N.Y.: Plenum, 1979. 723 p.

REFERENCES

1. Avdonin V.V., Krugljakov V.V., Lygina T.I., Mel'nikov M.E., Sergeeva N.E. *Ocean iron-manganese oxide ores: genetic interpretation of textures and structures*. M., GEOS Publ, 2014, 163 p. (In Russian)
2. Avdonin V.V., Eremin N.I., Mel'nikov M.E., Sergeeva N.E. Meso-Cenozoic Ferromanganese Ore-Genesis in the World Ocean. *Doklady Earth Sciences*, 2013, vol. 456, no. 6, pp. 1–3. (In Russian)
3. Avdonin V.V., Zhegallo E.A., Sergeeva N.E. Microstructure of iron-manganese stromatolites and ocean floor oncoliths. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka — [Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration]*, 2016, no. 2, pp. 27–32. (In Russian)
4. Avdonin V.V., Sergeeva N.E. Van K.V. Regularities of growth of iron-manganese nodules in the province of Clarion-Clipperton (Pacific ocean). *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka — [Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration]*. 2013, no. 4, pp. 17–20. (In Russian)
5. Bacterial paleontology. Ed. by A. Rozanov. M., Publishing house of PIN RAS, 2002, 188 p. (In Russian)
6. Gruzina V.D. Communication signals of bacteria. *Antibiotics and chemotherapy*. 2003, vol. 48 (10), pp. 32–39. (In Russian)
7. Zavarzin A.G. *Lectures on natural history of Microbiology*. M., Nauka Publ., 2003, 348 p. (In Russian)
8. *Fossil bacteria and other microorganisms in earth rocks and astromaterials*. Ed. A. Rozanov, G.T. Ushatinskaya. M., Publishing house of PIN RAS, 2011, 172 p. (In Russian)
9. *Research of manganese and iron-manganese mineralization in different natural environments by scanning electron microscopy*. Ed. G.N. Baturin, M., Eslan Publ., 2012, 472 p. (In Russian)
10. Mal'cev S.V., Mansurova G.Sh. What is biofilm? *Natural medicine*, 2013, no. 1 (13), pp. 86–89. (In Russian)
11. Punin Ju.O., Smetannikova O.G., Demidova G.E. On the dynamics of formation of oceanic iron-manganese nodules. *Lithology and minerals*. 1995, no. 1, pp. 40–50. (In Russian)
12. Savenko V.S. *Physical and chemical analysis of the processes of formation of iron-manganese nodules in the ocean*. M., GEOS Publ., 2004, 156 p. (In Russian)
13. Sumina E. L., Sumin D. L. Morphogenesis in the community of filamentous cyanobacteria. *Ontogenesis*, 2013, vol. 44, no. 3, pp. 203–220. (In Russian)
14. Hu Wenxuan, Zhou Huayang, Gu Lianxing et al. New evidence of microbe origin for ferromanganese nodules from the East Pacific deep sea floor. *Scie. in China*. (Ser. D.), 2000. vol. 43, no. 2. pp. 187–193.
15. Qi, Pan Jianming & Zhang Haisheng. 2000. New evidence of microbe origin for ferromanganese nodules from the East Pacific deep sea floor. *Scie. in China* (Series D), vol. 43. no. 2, April. pp. 187–193.
16. Sore m R.K., Fewkes R.H. *Manganese nodules, Research data and methods of Investigation*. N.Y.: Plenum, 1979, 723 p.