

УДК 553.078

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

ФАЦИАЛЬНЫЕ ОБСТАНОВКИ ФОРМИРОВАНИЯ ОКСИДНЫХ РУД МИРОВОГО ОКЕАНА

Анализ слоистого разреза ЖМК (рудная провинция Кларион–Клиппертон) и КМК (гайоты Магеллановых гор), изучение микротекстур, выявление и диагностика аксессуарных минералов позволили установить, что формирование залежей оксидных руд сопровождалось активным внутриплитным вулканизмом и образованием сульфидных построек типа черных курильщиков.

Ключевые слова: железомарганцевые конкреции, кобальтоносные железомарганцевые корки, провинция Кларион–Клиппертон, Магеллановы горы.

Examinations of bedded structure of manganese nodules from the Clarion–Clipperton ore province and Co-rich ferromanganese crusts from guyots of the Magellan seamount as well as investigations of their microtextures and characteristic accessory minerals confirmed formation of oxide ores accompanied active intra-plate volcanism and formation of sulfide constructions similar to black smokers.

Key words: manganese nodules, Co-rich ferromanganese crusts, Clarion–Clipperton ore province, guyots of the Magellan seamount.

Введение. Железомарганцевые руды на дне Мирового океана образуют две самостоятельные формации: формацию железомарганцевых конкреций абиссальных котловин (ЖМК) и формацию кобальтоносных железомарганцевых корок подводных поднятий (КМК). Основная масса рудных скоплений размещена в интервале широты 40° с.ш. — 40° ю.ш., образуя единый планетарный пояс, в пределах которого ЖМК и КМК занимают обособленное положение, будучи приуроченными к различным структурам океанского дна (рис. 1). Экзогенные рудные объекты океана не имеют аналогов на континенте ни по условиям образования, особенностям залегания и составу, ни по масштабам проявления [Авдонин, 2004].

Железомарганцевые конкреции развиты на обширных площадях глубоководных (4000–5000 м) котловин Мирового океана; они залегают на поверхности дна, обычно наполовину и более погружены в рыхлый осадок; весовая плотность залегания — от 1 до 50–70 кг/м².

Корки образуют обширные покровы на коренных породах склонов подводных гор крутизной 12–20°, они распространены преимущественно на глубине 1000–3500 тыс. м, облекая привершинные части гайотов. Мощность корок варьирует от нескольких сантиметров до 15–20 см, при этом весовая концентрация достигает 150–180 кг/м² сухой массы.

Строение и состав оксидных руд. Рудная провинция Кларион–Клиппертон, в пределах которой сосредоточены наиболее богатые поля распространения

ЖМК, расположена в центральной части Северо-Восточной абиссальной котловины Тихого океана между одноименными трансформными разломами. Провинция протягивается в субширотном направлении на 4700 км при ширине около 1100 км (рис. 2). Она представляет собой абиссальную равнину, ступенчато погружающуюся в западном направлении; глубина океана по мере удаления от ВТП увеличивается от 3800 до 5400 м. Земная кора в этом регионе мощностью 10,6–10,8 км имеет типичное трехчленное строение; соотношение мощности слоев 1:15:50. Фундамент сложен продуктами толеит-базальтового и ферробазальтового магматизма рифтогенной стадии. Возраст базальтов омолаживается с запада на восток от позднемиоценового (74–77 млн лет) до раннемиоценового (20–21 млн лет). Залегающая на базальтах фундамента осадочная толща сложена чередующимися кремнисто-глинистыми и карбонатными породами; мощность осадочного чехла от 100 до 300 м.

На территории провинции часто наблюдаются структуры вулканического происхождения. Постройки конической, куполообразной формы сложены субщелочными базальтами, относящимися к постспрединговому этапу вулканизма, охватывающему возрастную диапозон от позднего мела до современности [Инженерная геология, 2004].

КМК — образования, родственные конкрециям, они близки им по минеральному и химическому составу, текстурно-структурным особенностям и генезису. Рудные залежи корок в виде замкнутых по-

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

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

³ Институт экспериментальной геологии РАН, ст. науч. сотр., *e-mail:* kvv@iem.ac.ru

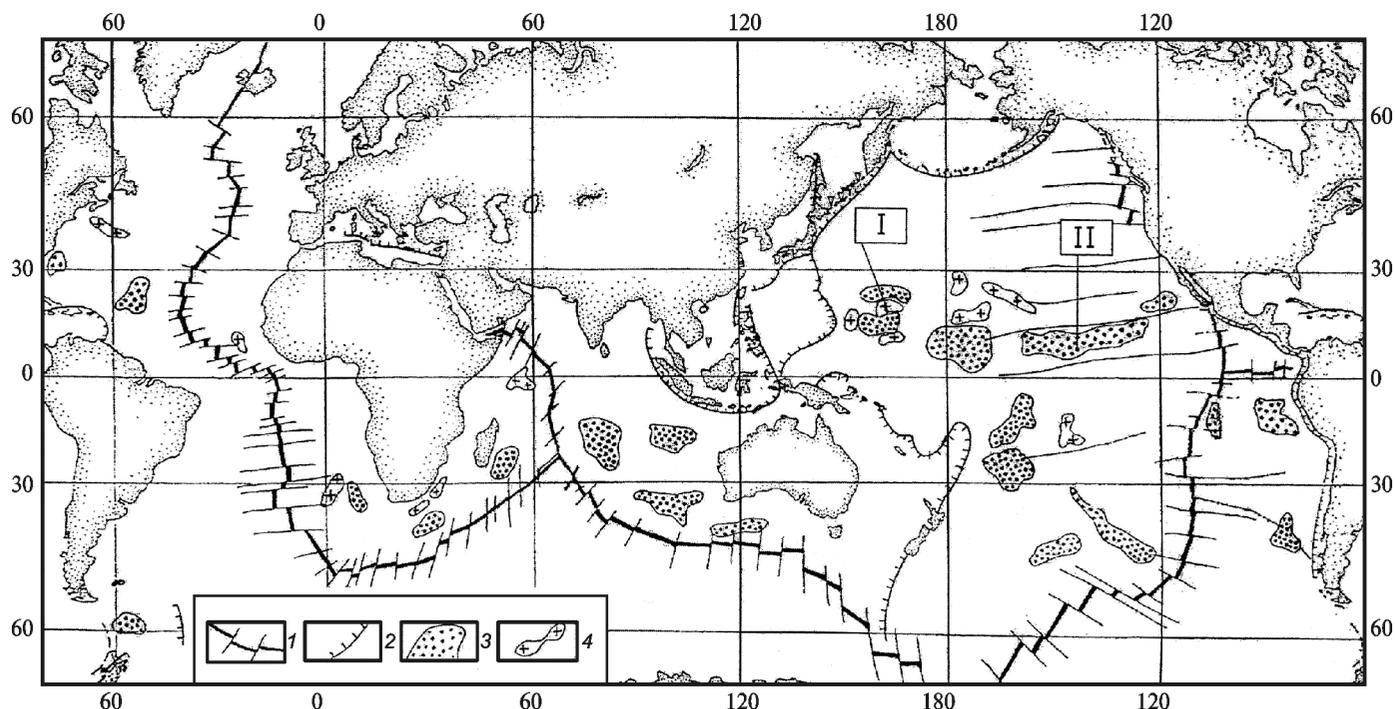


Рис. 1. Схема распространения окисных руд в Мировом океане. Составлена с использованием материалов Г.Н. Батурина, Е.Г. Гурвич, А.П. Лисицына и др.: I — провинция гайотов Магеллановых гор; II — конкреционная провинция Кларийон–Клиппертон; 1 — рифтовая зона СОХ; 2 — островные дуги и окраинные желоба; 3 — крупнейшие провинции ЖМК; 4 — районы распространения кобальтоносных корок на подводных горах

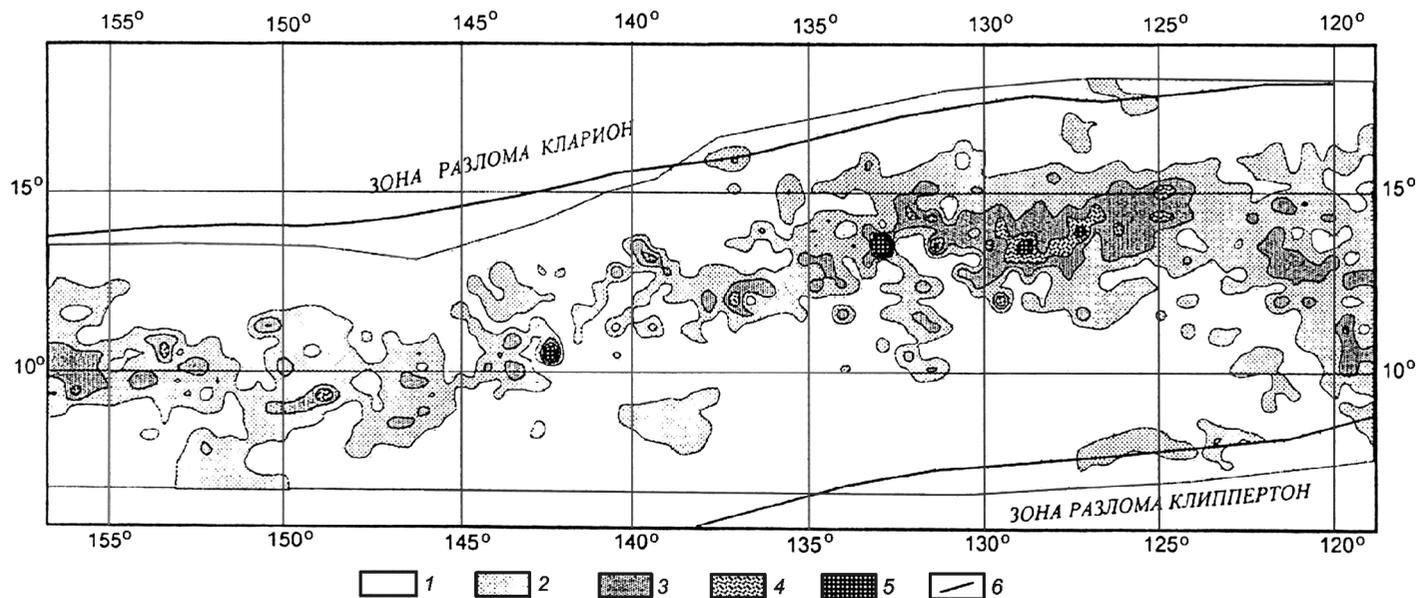


Рис. 2. Обзорная схема конкреционности провинции Кларийон–Клиппертон, по [Авдонин, Сергеева, 2003]: значения весовой концентрации ЖМК, кг/м²: 1 — < 5; 2 — от 5 до 10; 3 — от 10 до 15; 4 — от 15 до 20; 5 — > 20; 6 — разломы

лос шириной от нескольких сотен метров до 2–3 км обрамляют безрудные области вершинных поверхностей гайотов. Поэтому каждое из подобных горных сооружений можно рассматривать как отдельное месторождение (иногда как рудное поле).

На плоских вершинах гор встречаются редкие конкреции и маломощные корки, у подножий гайотов развиты корково-конкреционные образования, скопления мелких конкреций. Наибольшее число подводных гор с кобальтоносным оруденением сосредото-

чено в западной части Тихого океана на поднятиях Мидпасифик, Маркус-Уэйк-Неккер, Магеллановых гор, в районах островов Лайн, Гавайских, Маршалловых, Туамоту. Наиболее изучена в настоящее время провинция Магеллановых гор (рис. 3).

Корки — более древние образования, чем конкреции (они начали формироваться в позднемеловую эпоху), и связаны с иными вулканическими комплексами. В частности, начало образования формации КМК Магеллановых гор совпадает с эпохой станов-

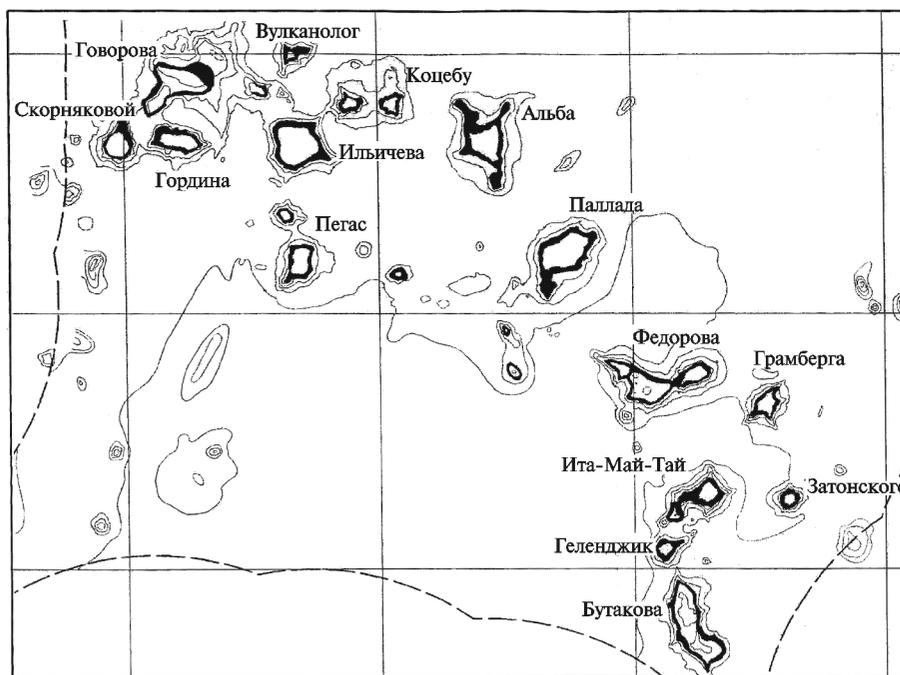


Рис. 3. Залежи КМК на гайотах Магеллановых гор, по [Мельников, 2005]

ности состава, текстурных особенностей, аксессуарных минералов в макро- и мезослоях позволяет восстановить фациальную обстановку, господствовавшую на различных этапах формирования руд. Взаимоотношения субмикроскопических слоев иллюстрируют детали осаждения рудного вещества

Таким образом, различные иерархические уровни слоистого разреза конкреций и корок отражают генетические аспекты разного типа: механизм осаждения рудного вещества (субмикроскопические слои), изменчивость фациальных условий (мезослои), чередование этапов вулканической активности (макрослои).

С целью выявления текстурно-структурных особенностей оксидных руд на микроуровне, обнаружения и диагностики аксессуарных

минералов изучены коллекции конкреций и образцов корок, полученные от сотрудников НПО «Южморгеология» В.В. Круглякова и М.Е. Мельникова, на растворе электронном микроскопе «Tescan-Vega/xmu» в лаборатории рентгено-спектрального микроанализа ИЭМ РАН.

минералов изучены коллекции конкреций и образцов корок, полученные от сотрудников НПО «Южморгеология» В.В. Круглякова и М.Е. Мельникова, на растворе электронном микроскопе «Tescan-Vega/xmu» в лаборатории рентгено-спектрального микроанализа ИЭМ РАН.

Текстурно-структурные особенности оксидных руд. Основные текстурные элементы оксидных руд можно подразделить на две группы: А — элементы роста и Б — деструктивные элементы.

Текстурно-структурные особенности оксидных руд. Основные текстурные элементы оксидных руд можно подразделить на две группы: А — элементы роста и Б — деструктивные элементы.

Элементы роста в свою очередь тоже можно разделить на две группы: *первая* — элементы, связанные с накоплением железомарганцевого материала, это слои различного масштаба и дендриты, сложенные минералами железа и марганца; *вторая* — элементы накопления глинистого и обломочного материала: прослой, линзы, полости, вписывающиеся в слоистую текстуру. Накопление этого материала может проходить и в «секущих» формах — в виде заполнения междендритовых полостей и трещин.

Среди элементов роста преобладают волнисто-слоистые и столбчато-дендритовые образования. И те и другие обычно составляют основу макро- и мезослоев. В конкрециях и корках слои волнисто-слоистой текстуры чередуются со слоями дендритового строения. В этих случаях они обычно разделены резко выраженными перерывами (рис. 4, а, б). Наряду с этим указанные элементы часто бывают связаны между собой постепенными переходами; их вариации образуют различные сочетания. Волнисто-слоистые элементы текстуры иногда переходят в так называемые фестончатые разности, которые часто служат основаниями растущих дендритов (рис. 4, в, г). Столбчато-дендритовые элементы условно можно

Фосфатная минерализация свойственна преимущественно рудным коркам и представлена обычно вкрапленными, гнездово-вкрапленными, прожилковыми выделениями апатита, который локализуется в основании корковых залежей в концентрических и радиальных трещинах, в интерстициях между дендритами, часто в ассоциации с глинисто-гидролюидными минералами.

Важнейшая особенность оксидных руд — слоистость. В слоистых разрезах конкреций и корок заключена обширная информация о фациальной обстановке формирования руд и механизмах отложения рудного вещества. Выделяются слои трех иерархических уровней: макрослои (толщина 0,5–1,5 см в конкрециях и 2–3 см в корках), мезослои (1,5–5 мм), субмикроскопические слойки (1–10 мкм) [Авдонин, Сергеева, 2003]. С одной стороны, слоистость конкреций и корок служит основой стратификации этих образований, определения возрастных интервалов образования макрослоев [Мельников, 2005; Мельников и др., 2003]. С другой стороны, расшифровка последовательной изменчи-

Элементы роста в свою очередь тоже можно разделить на две группы: *первая* — элементы, связанные с накоплением железомарганцевого материала, это слои различного масштаба и дендриты, сложенные минералами железа и марганца; *вторая* — элементы накопления глинистого и обломочного материала: прослой, линзы, полости, вписывающиеся в слоистую текстуру. Накопление этого материала может проходить и в «секущих» формах — в виде заполнения междендритовых полостей и трещин.

Среди элементов роста преобладают волнисто-слоистые и столбчато-дендритовые образования. И те и другие обычно составляют основу макро- и мезослоев. В конкрециях и корках слои волнисто-слоистой текстуры чередуются со слоями дендритового строения. В этих случаях они обычно разделены резко выраженными перерывами (рис. 4, а, б). Наряду с этим указанные элементы часто бывают связаны между собой постепенными переходами; их вариации образуют различные сочетания. Волнисто-слоистые элементы текстуры иногда переходят в так называемые фестончатые разности, которые часто служат основаниями растущих дендритов (рис. 4, в, г). Столбчато-дендритовые элементы условно можно

разделить на собственно столбчатые — они очень часто встречаются, особенно в корковых образованиях (рис. 5, *a, б*), и ветвящиеся (рис. 4, *д*; 5, *в, д*). Непременные элементы строения дендритов — «маркирующие» слойки, которые подчеркивают последовательность роста дендритов и их связь с процессами послойного роста. Интересно, что столбики дендритов часто соединяются перемычками некоторых слойков (рис. 5, *a, б*), пожалуй, чаще в такой роли выступают слойки преимущественно железистого состава. Эти перемычки обычно запечатывают, «консервируют» полости между столбиками дендритов, заполненные обломочным материалом (рис. 5, *б*). Если волнисто-слоистые элементы естественно и постепенно сменяются вырастающими на них дендритами, то смена дендритового слоя волнисто-слоистым элементом происходит только после перерыва и деструкции.

Слоистые и слоисто-дендритовые образования создают общую структуру макрослоев конкреций и корок.

Кроме того, выделяются обособленные, *автономные* элементы, не связанные с общей структурой. Это разнообразны — оолитовые, глобулярные, почковидные и другие — образования, расположенные в полостях основного каркаса. Эта группа в количественном отношении играет подчиненную роль. Автономные образования наиболее выразительны в полостях и трещинах корок, где наблюдаются почки, гроздь, розетки, ветвящиеся дендриты (рис. 5, *з, д*). Иногда они связаны со стенками (т.е. прикреплены к ним), иногда создается впечатление, что они расположены свободно среди ила и обломочного материала и не касаются стенок полости или трещины.

Среди элементов роста можно выделить те, которые возникают и растут постепенно по мере осаждения вещества, а также возникающие вследствие захвата определенных порций осадка. Этот захваченный и запечатанный материал в междендритовых полостях также, возможно, осадочный материал в виде линз, прикрепившихся к конкреции и обрастающих последующими слоями (рис. 4, *e*).

Деструктивные элементы — это, во-первых, проявления процессов разрушения, растворения ранее накопленного материала, а во-вторых, трещины различной природы.

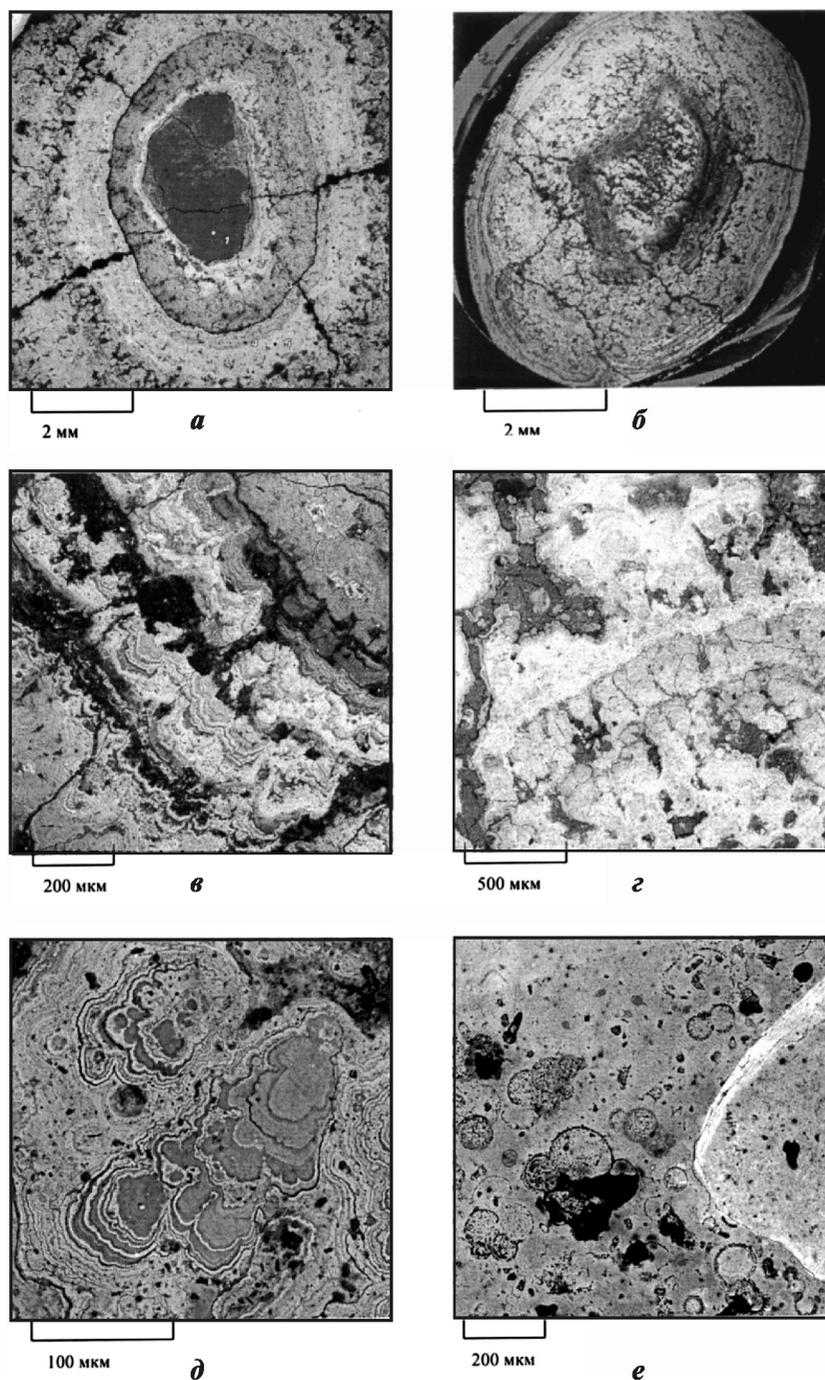


Рис. 4. Основные текстурные элементы оболочек конкреций: *a, б* — чередование макрослоев, имеющих волнисто-слоистое, дендритовое и обломочное строение; *в, г* — взаимоотношения волнисто-слоистых, фестончатых и дендритовых микрослойков в рудной оболочке конкреций; микрослои заметно различаются по составу, в промежутках между слоями и в междендритовых полостях содержатся многочисленные мелкие обломки акцессорных минералов; *д* — крупные разветвляющиеся дендриты; *e* — прослой кремнистого осадка с фауной

Процессы разрушения, растворения ранее накопленного материала обозначают перерывы в росте конкреций и корок и фиксируются обычно образованием прослоев и линз обломочного материала, часто обогащенного фаунистическими остатками и пр.

Трещины в течение длительного времени остаются зияющими. Постепенно они заполняются оса-

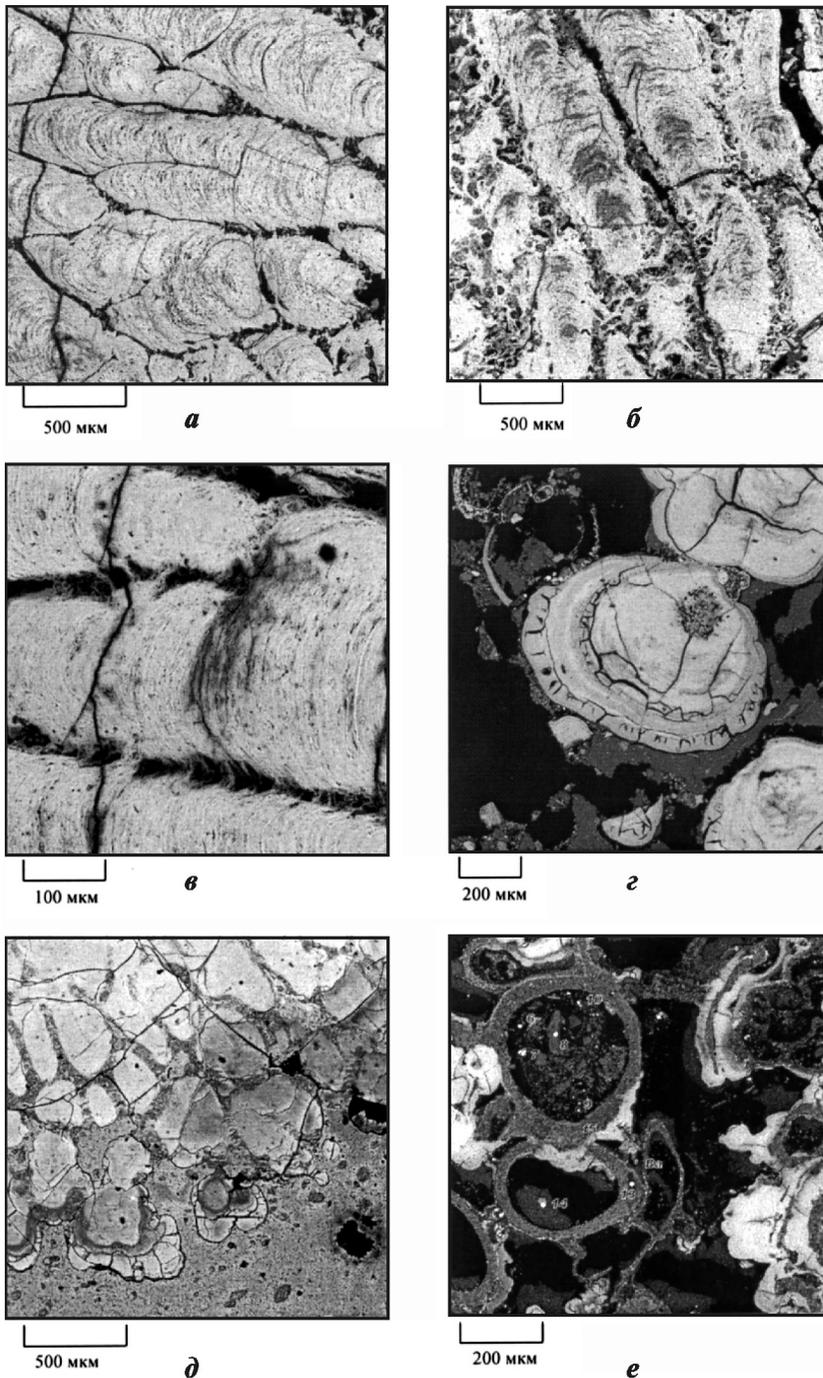


Рис. 5. Микротектурные элементы корок: *a* — столбчатые дендриты с многочисленными перемычками; *b* — осадочный материал в пазах между дендритами; *c* — разветвляющиеся дендриты; *г* — почковидные образования в зияющих полостях; *д* — лапчатые дендриты, врастающие в карбонатно-фосфатный ил; *e* — пузырчатая текстура (стенки «пузырей» сложены тонкообломочным материалом и обрастают железомарганцевыми слоями)

дочным материалом, в них формируются различные автономные элементы.

В конкрециях и корках иногда обнаруживаются редкие, нетипичные элементы. К ним можно отнести, в частности, *скорлуповатые* текстуры корок неясной природы. Иногда эти образования похожи на остатки фауны, в других случаях напоминают оболочки газовых пузырей, проходящих сквозь нелитифицированный ил и сохранившихся в нем (рис. 5, *e*).

Особенности состава субмикроскопических слоев. Наиболее мелкие, условно неделимые элементы текстурных обособлений — субмикроскопические слои. Они слагают все текстурно-структурные элементы: и волнисто-слоистые участки, и все виды дендритов. В строении и чередовании субмикроскопических слоев отчетливо проявлены элементы однотипной ритмичности — каждый субмикроскопический слой начинается с осаждения наиболее железистого материала и далее вверх по мощности он постепенно, без видимых резких колебаний сменяется более марганцевистым. В самом верху он имеет максимально марганцевистый состав, после чего осаждение материала прекращается. Затем, после некоторого совсем незначительного (часто просто незаметного) перерыва, вновь откладывается наиболее железистый материал. Такое непрерывное ритмичное наслаивание хорошо видно на рис. 6. Заметим, что перерывы могут быть весьма длительными.

Разделение слоев по составу выявляет наличие двух обособленных групп. Одна из них характеризуется повышенным содержанием железа, кремнезема, титана, кобальта, а также фосфора и кальция, другая обогащена марганцем, никелем, медью, щелочами.

Подобные элементы слоистого разреза, сложенные совокупностями контрастных слоев, встречаются в оболочках конкреций и в корках. Как отмечалось ранее, последовательное нарастание контрастных слоев, скорее всего, является следствием механизма автоколебательных реакций [Пунин и др., 1995]. Очевидно, что такой механизм может быть реализован главным образом в условиях застойного режима. Именно поэтому линзы ритмических контрастных субмикроскопических слоев чаще всего встречаются в оболочках конкреций. В корках подобные образования наблюдались преимущественно в базальных слоях.

Основные различия всех типов руд проявляются на уровне состава и строения макрослоев. В них действительно находят отражение и фациальная обстановка и история формирования.

Акцессорные минералы оксидных руд. В рудных оболочках ЖМК и в корках содержится огромное количество обломков различных минералов. Отдельные зерна неравномерно рассеяны по всей рудной массе. Кроме того, в конкрециях и корках наблюдаются прослои и линзовидные обособления обломочного материала; они фиксируют периоды деструкции, пе-

перывы роста. Скопления обломков присутствуют также в промежутках между крупными дендритами. Прослой и междендритовые полости заполнены обломками разрушенных железомарганцевых слоев, фрагментами фаунистических остатков, глинистым материалом активного слоя, кристаллами и обломками минералов, имеющих различную природу.

Анализ природы разных типов акцессорных минералов в слоистом разрезе позволяет оценить в общих чертах проявление процессов, сопутствующих росту рудных образований: импульсы вулканизма, разрушение обнаженных на океанском дне пород различных магматических комплексов, возникновение и разрушение гидротермальных рудных построек и их состав [Авдонин, Сергеева, 2003].

Среди акцессорных минералов можно выделить несколько групп. *Первую*, наиболее многочисленную, группу составляют породообразующие минералы базальтовых комплексов: плагиоклазы, пироксены, амфиболы, магнетит, титаномагнетит, ильменит, рутил, хромит. Обломки породообразующих минералов отличаются наиболее крупными размерами. К этой группе, возможно, относится и некоторое количество сульфидов — пирита, пирротина, редкая вкрапленность которых характерна для базальтов. Минералы породообразующей группы, вероятно, рассеиваются в водной толще при подводных вулканических извержениях и таким путем могут попадать в конкреции и корки. Источником некоторой части породообразующих минералов (вероятно, небольшой) могут быть разрушающиеся базальты, обнаженные на поднятиях и подводных горах.

Ко *второй* группе можно отнести мельчайшие частицы самородных металлов и интерметаллических соединений. Они имеют форму чешуек, пластинок, лент, проволок. Состав их весьма разнообразен: железо (часто с примесями других металлов), медь, цинк, золото, молибден, алюминий с примесью меди, марганца, хрома и др. Происхождение этих включений дискуссионно; большинство исследователей чаще всего связывают присутствие восстановленных форм самородных металлов в окисленной матрице железомарганцевых руд с возникновением микроочагов с восстановительными условиями. Восстановительные очаги обусловлены локальными скоплениями органического вещества.

Особого внимания заслуживает присутствие в окисдных рудах минералов, которые следует отнести к *третьей* — гидротермальной группе. Это прежде всего сульфиды, среди которых безусловно преобладают пирит, пирротин, халькопирит. Помимо этого

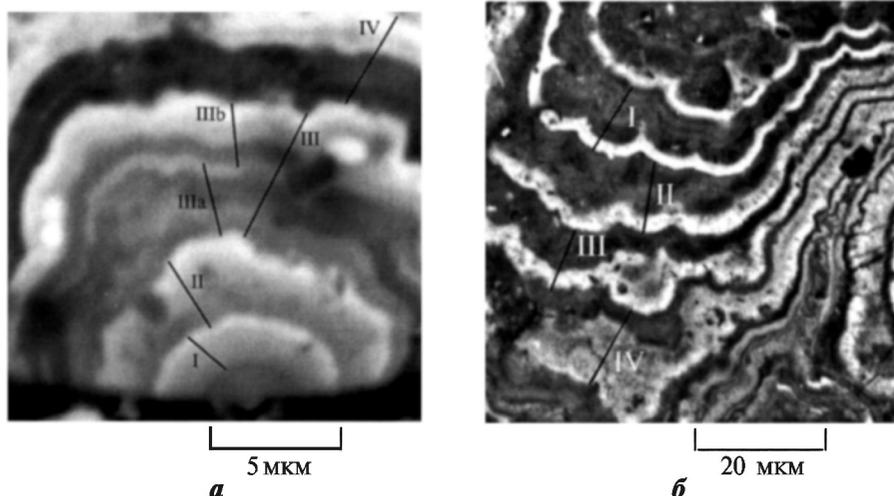


Рис. 6. Ритмичность в строении субмикроскопических слоев (а, б): ритмы I–IV (субритмы IIIa, IIIb) начинаются с отложения более железистого материала (темное), затем увеличивается количество марганца, заканчивается ритм отложением наиболее марганцевого (белое) материала; новый ритм опять начинается с железистого материала

нередко встречаются марказит, сфалерит, галенит, арсенопирит, блеклая руда, халькозин, ковеллин, борнит, никелин, миллерит, молибденит. Эта группа минералов интересна в первую очередь тем, что все они типичны для сульфидных руд черных курильщицков. Очень часто в большом количестве встречается барит. Изредка фиксируется флюорит, неоднократно встречались урановые минералы (типа тьюмунита и др.).

Минералы гидротермальной группы, как и перечисленные выше включения, присутствуют в виде редких, мелких (несколько микрометров) зерен в массе железомарганцевых минералов; наиболее многочисленные скопления отмечаются в обломочных прослоях.

Наряду с рудными минералами в окисдных рудах (главным образом в обломочных прослоях) встречаются кварц, минералы кремнезема, монтмориллонит, слюдистые минералы, т.е. гидротермальные минералы, обычно распространенные в измененных вмещающих породах, сопровождающих залежи современных колчеданных руд.

В *четвертую* группу можно объединить обнаруженные в рудах микроклин, касситерит, вольфрамит, колумбит, редкоземельные минералы. Эти минералы традиционно считаются представителями лейкократовой, гранитоидной ассоциации. Источник подобных минералов неясен, присутствие их в окисдных рудах трудно объяснить. Можно предположить, что в пределах рудоносной провинции или на относительно близком расстоянии от нее (в зонах трансформных или других разломов) во вскрытых глубинных частях разреза присутствуют породы кислых комплексов. Вследствие тектонических процессов или вулканических взрывов эти породы могли стать источником подобных экзотических обломков

Наличие гидротермальных минералов однозначно указывает на то, что во время формирования конкре-

ций и корок в области их накопления или в непосредственной близости от нее происходило образование и разрушение гидротермальных рудных построек, в первую очередь имеются в виду сульфидные руды типа черных курильщиков.

Обилие зерен барита в оксидных рудах связано, по-видимому, с разрушением либо тех же сульфидных построек, обогащенных баритом, либо самостоятельных баритовых гидротермальных построек.

Анализ распределения акцессорных минералов и их состава позволяет в общих чертах оценить фациальную обстановку формирования руд. Эта обстановка определялась развитием сопутствующих росту конкреций и корок процессов: извержение подводных вулканов, выветривание и разрушение обнаженных

на океанском дне магматических комплексов, образование гидротермальных рудных построек.

Заключение. Указанные факты свидетельствуют не только о том, что в пределах рудоносных гайотов, конкреционных полей или в непосредственной близости от них возникали и разрушались гидротермальные постройки и отдельные минералы «захватывались» растущими конкрециями. Они дают основание считать, что и сами гидротермальные растворы могли участвовать в формировании рудного материала. Иными словами, наличие рудных минералов можно рассматривать как указание на то, что образование конкреций сопровождалось активными вулканическими и поствулканическими процессами, поставившими рудный материал.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Авдонин В.В. Экзогенная металлогения Мирового океана: роль базальтоидного вулканизма // Изв. вузов. Геология и разведка. 2004. № 1. С. 28–33.

Авдонин В.В., Сергеева Н.Е. Об особенностях формирования железомарганцевых конкреций и корок // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2003. № 5. С. 31–39.

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

Мельников М.Е., Юбко В.М., Берберьян Т.К. и др. О стратификации железомарганцевых конкреций рудной

провинции Кларион–Клиппертон // Геология твердых полезных ископаемых Мирового океана. Геленджик: НИПИ-океангеофизика, 2003. С. 61–77.

Инженерная геология рудной провинции Кларион–Клиппертон в Тихом океане. СПб.: Наука, 2004. 281 с. (Тр. ВНИИОкеангеологии. Вып. 197).

Пунин Ю.О., Сметанникова О.Г., Демидова Г.Е., Смольская Л.С. О динамике формирования океанических железомарганцевых конкреций // Литология и полезные ископаемые. 1995. № 1. С. 40–50.

Поступила в редакцию
21.06.2010