

УДК 553.048 (26)

© В.В.Авдонин, Н.Е.Сергеева, 2006

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗМЕЩЕНИЯ ОКСИДНЫХ РУД МИРОВОГО ОКЕАНА

В.В.Авдонин, Н.Е.Сергеева (Московский государственный университет)

Оксидные руды океана относятся к числу перспективных геолого-промышленных типов, интерес к которым в последние годы постоянно возрастает. Освоение этих образований требует решения сложных научных и практических проблем. Важнейшие вопросы их генезиса, закономерностей размещения, возможностей промышленного освоения рассматриваются в работах С.И.Андреева, Г.Н.Батурина, Ю.А.Богданова, В.В.Круглякова, Т.И.Лыгиной, М.Е.Мельникова, И.Н.Пономаревой, Т.Е.Седышевой, В.М.Юбко и многих других исследователей.

Оксидные руды Мирового океана характеризуются высокими содержаниями и грандиозными

ресурсами Mn, Ni, Co, Cu и других металлов (табл. 1).

Оксидные руды океана отличаются более высокими содержаниями основных компонентов по сравнению с рудами континентальных месторождений (в особенности российских), содержание металлов в которых обнаруживает устойчивую тенденцию к снижению (табл. 2). Что касается марганца, то в железомарганцевых конкрециях и корках он представлен оксидными рудами металлургического сорта, значительно превосходящими по качеству карбонатные руды российских месторождений. По извлекаемой ценности содержащихся в них

1. Сопоставление прогнозных ресурсов и содержаний металлов в рудах Мирового океана и суши, по С.И.Андрееву и др.

Основные виды океанического минерального сырья	Металлы	Мировой океан		Суша		Соотношение прогнозных ресурсов океана/суши
		Содержания, %	Прогнозные ресурсы, млн. т	Содержания, %	Прогнозные ресурсы, млн. т	
Оксидные железомарганцевые образования — конкреции и корки	Ni	0,6–1,4	569,5	0,3–2,44	87,7	6,5
	Cu	0,4–1,2	348,5	0,6–4,0	619,0	0,56
	Co	0,2–0,8	339,2	0,1–0,6	6,14	55,2
	Mn	20–42	18 153	20–4	15 571	1,2
	Pt	0,5–0,8 г/т	11,1 тыс.т	3,9–4,2 г/т	24,0 тыс. т	0,47
	Mo	0,04–0,06	30,2	0,01–0,12	11,6	2,6

2. Содержание металлов в добываемых рудах России и в месторождениях Мирового океана, по Е.Козловскому, 2004

Металлы	Содержание металла, %						
	Суша					Мировой океан	
	1990 г.	1995 г.	2000 г.	2005 г.	2010 г.	ЖМК	КМК
Ni	0,79	0,76	0,74	0,72	0,70	1,28	0,46
Co	0,048	0,047	0,045	0,043	0,040	0,20	0,60
Cu	0,82	0,86	0,82	0,80	0,79	1,02	0,40
Vn	22,0	20,0	20,5	20,2	20,0	26,8	22,6

3. Извлекаемая ценность полезных компонентов, по И.Ф.Глумову, И.И.Кузнецову, М.С.Проказовой, 2002

Типы руд	Извлекаемая ценность р./т
Сплошные сульфидные медно-никелевые	325–341
Вкрапленные сульфидные медно-никелевые	115–122
ЖМК	252–344
КМК	697–727

компонентов оксидные руды могут рассматриваться как богатые (табл. 3).

Важный показатель высокого качества оксидных руд — коэффициент извлечения металлов. Разработаны два способа переработки руд: пирометаллургический и гидрометаллургический. Сквозное извлечение металлов при использовании указанных методов составляет соответственно Ni 90 и 94, Cu 88 и 83, Co 86 и 92, Mn 74 и 82%.

Кроме того, оксидные руды — высокоэффективный природный сорбент. Расчеты показывают, что использование конкреций, корок и продуктов их переработки для очистки сбросовых вод промышленных (металлургических, металлообрабатывающих и др.) предприятий обеспечит повышение за счет сорбции содержания металлов — Cu и Ni в 5–10, Co в 20–25 раз.

Среди оксидных железомарганцевых образований океанского дна выделены формации железо-

марганцевых конкреций абиссальных котловин (ЖМК) и кобальтоносных железомарганцевых корок подводных поднятий (КМК) [1, 2].

Основная масса скоплений железомарганцевых конкреций размещается в интервале от 35°с.ш. до 42°ю.ш., образуя единый планетарный пояс, протягивающийся вдоль экватора через Тихий, Индийский и Атлантический океаны (рис. 1). В пределах пояса выделяются рудные провинции, приуроченные к крупным морфоструктурам дна — участкам глубоководных котловин. В Тихом океане наиболее важными в промышленном отношении являются провинции Кларион-Клиппертон, Калифорнийская, Центрально-Тихоокеанская в северной его части и Перуанская, Чилийская, Южно-Тихоокеанская — в южной. В Индийском океане известны провинции Центрально-Индийская, Западно-Австралийская, Джемонтина. В меньшей степени скопления конкреций развиты в Атлантическом океане, где вы-

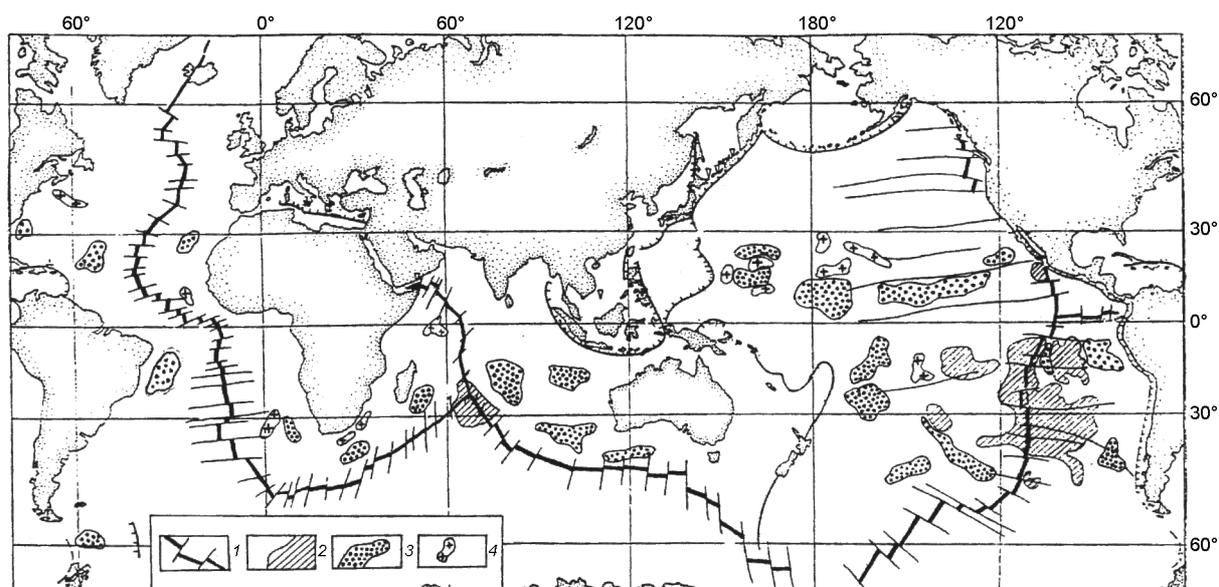


Рис. 1. Схема распространения металлоносных осадков, ЖМК и КМК в Мировом океане, с использованием материалов Г.Н.Батурина, Е.Г.Гурвича, А.П.Лисицына и др.:

1 — рифтовая зона COX; 2 — области распространения металлоносных осадков; 3 — крупнейшие провинции ЖМК; 4 — районы распространения кобальтоносных корок на подводных горах

делены Северо-Американская, Бразильская и Капская провинции.

Всего в Мировом океане выявлено 26 конкреционных объектов, отличающихся различной площадью, продуктивностью, содержаниями металлов.

Железомарганцевые конкреции, как и корки, относятся к сырью комплексного типа. Основные элементы конкреций — Mn, Ni, Co, Cu. Попутно могут извлекаться еще 29 элементов — благородные металлы (Au, Ag, МППГ), рассеянные (W, Te, Ta, Bi, Rb, Hf), редкие (V, Zr) и некоторые редкоземельные элементы группы церия и иттрия. Уровень содержания попутных компонентов в конкрециях характеризуется следующими показателями: Mo 0,06%, Au 0,03 г/т, Ag 1,1 г/т, Pt 0,12 г/т, TR 0,5 кг/т.

Фонд прогнозных ресурсов ЖМК в Мировом океане оценивается от 30–40 до 102 млрд. т сухой массы; по другим оценкам, только в Тихом океане прогнозные ресурсы конкреций достигают 349 млрд. т [6]. Железомарганцевые конкреции океанических котловин располагаются на глубинах 4000–5000 м на больших площадях; плотность залегания конкреций достигает 20 кг/м². Технико-экономические расчеты подтверждают техническую возможность и экономическую целесообразность обработки месторождений ЖМК.

Сбор конкреций со дна не требует разрушения донной поверхности, поскольку они залегают на мягких глинах. Опыты по подъему конкреций на поверхность проводились в США и Японии. Рассматривались два способа. Это эрлифт, разрабатываемый в США, и многоковшовая система на каналах нейтральной плавучести – в Японии.

Наиболее богатая рудная провинция Клариион-Клиппертон в Тихом океане Международным органом по морскому дну ООН разделена между странами и международными консорциумами. Часть площади зарезервирована для тех стран, которые к настоящему времени не имеют возможности (или необходимости) вести геологоразведочные работы, разрабатывать добычное устройство, технологию передела, т.е. осваивать месторождение. В провинции выделены участки площадью по 75 000 км² Российской Федерации (СССР), Японии, Франции, Китаю, Республике Корея и международным организациям (консорциумам) ОМІ, ОМСО, ЮОМ и др. Индия получила такой же участок в Центральной котловине Индийского океана. Начало собственно освоения месторождений — добычи конкреций — будет определено в общем случае конъюнктурой рынка металлов, а для каждой страны или консорциума технической готовностью и геологической обеспеченностью процесса добычи и металлургического передела руды.

Провинция Клариион-Клиппертон находится в северной приэкваториальной части глубоководной Северо-Восточной котловины Тихого океана. Ограничена субширотными трансформными разломами протяженностью около 5000 км, шириной 1000–1200 км. Глубина океана в этой части от 4,5 до 5,5 км. Земная кора трехчленного строения имеет мощность 10,6–10,8 км. Возраст базальтов фундамента омолаживается с запада на восток от позднемиоценового (74–77 млн. лет) до раннемиоценового (20–21 млн. лет). Мощность осадочного чехла от 100 до 300 м. Структура провинции имеет «клавишный» характер, обусловленный чередованием субмеридиональных вулканотектонических блоков, заключенных между параллельными субширотными разломами.

Железомарганцевые конкреции образуют поле шириной 300–700 км, длиной >3500 км. Наиболее продуктивные скопления приурочены к осевой части полосы (разлом Безымянный) шириной 100–150 км. Ресурсы провинции оцениваются в 5–12 млрд. т сухой массы конкреций; среднее содержание металлов, %: Ni 1,04, Cu 0,22, Co 0,25, Mn 27,18.

Участок, выделенный России, состоит из двух частей.

Предполагается, что этап промышленной разработки составит 20 лет. Годовое производство никеля предусматривается на уровне 465 тыс. т, что соответствует 3–5 млн. т сухой массы конкреций.

Рудные тела (залежи) вписываются в «клавишную» структуру и имеют полосовидную в плане форму. Протяженность их достигает десятков километров при ширине до 10–15 км и более (рис. 2).

При выделении рудных залежей исходят из того, что минимальная промышленная плотность залегания (весовая концентрация) конкреций составляет 12,5 кг/м² во влажной массе, а минимальное значение плотности при оконтуривании — 7 кг/м² [6].

Если закономерности пространственного размещения формации ЖМК, а именно приуроченность рудных провинций к крупным морфоструктурам дна — участкам абиссальных котловин, можно считать в достаточной степени выявленными, то вопросы генезиса этих образований остаются дискуссионными. Важные сведения о механизмах осаждения рудного вещества и этапах формирования конкреций и корок могут быть получены при расшифровке закономерностей строения их слоистого разреза и в особенности из анализа состава и строения микрослойков, слагающих массы железомарганцевых образований. Железомарганцевые конкреции сложены слабокристаллизованными гидроксидами железа и марганца, имеют концент-

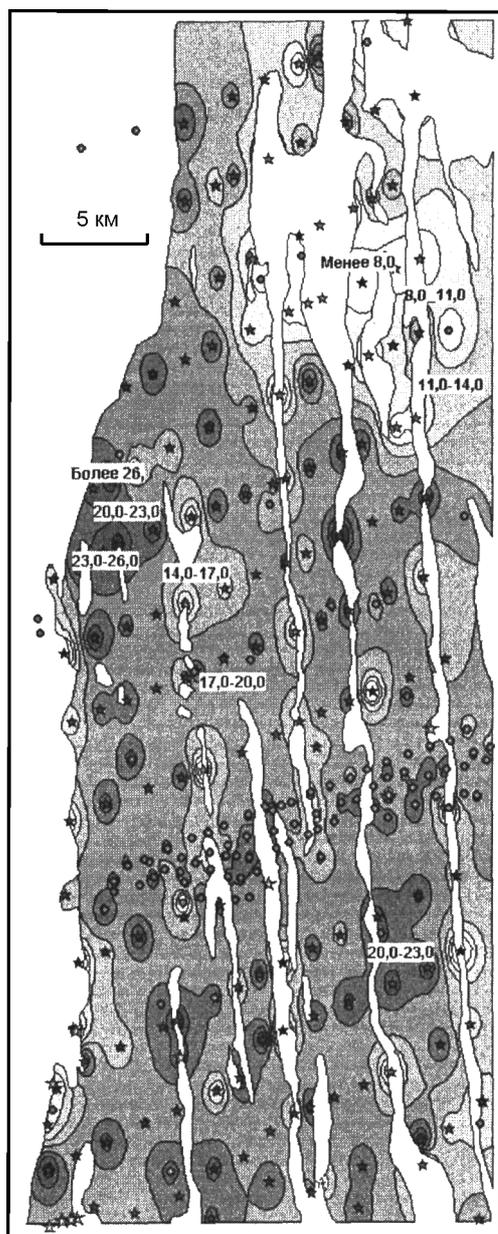


Рис. 2. Фрагмент рудной залежи конкреционного месторождения. Распределение весовой концентрации ЖМК, кг/м², по [6]

рически-слоистое строение, обусловленное последовательным нарастанием слоев различного состава и структуры. В строении оболочки конкреций всех генотипов выделяются слои трех уровней:

макрослои, облегающие всю конкрецию и разделенные между собой перерывами, несогласиями, следами процессов деструкции. К их контактам часто приурочены скопления обломочного материала, аутигенные нерудные минералы, остатки микрофауны и т.д. Мощность макрослоев в среднем от 0,5 до 1,5 см;

микрослои, согласно налегающие друг на друга. По текстурным особенностям они разделяются на волнисто-слоистые, дендритовые и др. и ритмично чередуются в разрезе макрослоев. Микрослои не обязательно прослеживаются по всей поверхности конкреции — они часто прерываются, выклиниваются. Толщина микрослоев в среднем 1,5–5 мм;

субмикроскопические слои толщиной 1–10 мкм, чередование которых определяет текстурный рисунок микрослоев. Они отчетливо индивидуализированы благодаря резкой разнице состава и представлены двумя чередующимися фазами рудного вещества, условно названными кристаллической и аморфной.

В кристаллической фазе преобладают минералы марганца, среди которых наиболее распространены тодорокит, бузерит, асболан, вернадит и др. Железо находится главным образом в виде аморфного гидратированного оксида, наряду с которым присутствуют гётит, феррооксигит, ферригидрит и др. Обращает на себя внимание отчетливо контрастное распределение железа в кристаллической и аморфной фазах. Во всех случаях максимальные зафиксированные содержания железа в кристаллических фазах меньше минимальных содержаний в соответствующих им аморфных [2].

Итак, внутреннее строение конкреций характеризуется ритмичным чередованием контрастных по составу субмикроскопических слоев.

Охарактеризованные закономерности состава и чередования субмикроскопических слоев позволяют привлечь для объяснения механизма их формирования гипотезу автоколебательного осаждения рудного вещества, которая впервые была предложена в работе [5]. Несмотря на то что детали процесса в полной мере не ясны и кинетические уравнения реакций осаждения не изучены, принципиальные положения этого механизма позволяют считать его наиболее приемлемым для объяснения особенностей формирования конкреций на субмикроскопическом уровне [2].

Формация кобальтоносных железомарганцевых корок образует покровы на коренных породах на склонах подводных гор крутизной 12–20°. Они распространены преимущественно на глубинах 1000–3500 м, облекая привершинные части гайотов (рис. 3).

Наибольшее количество подводных гор с кобальтовым оруденением сосредоточено в западной части Тихого океана на поднятиях Мидпасифик, Маркус-Уэйк-Неккер, Магеллановых гор, в районах островов Лайн, Гавайских, Маршалловых, Туамоту (см. рис. 1). Мощность корок варьирует от первых

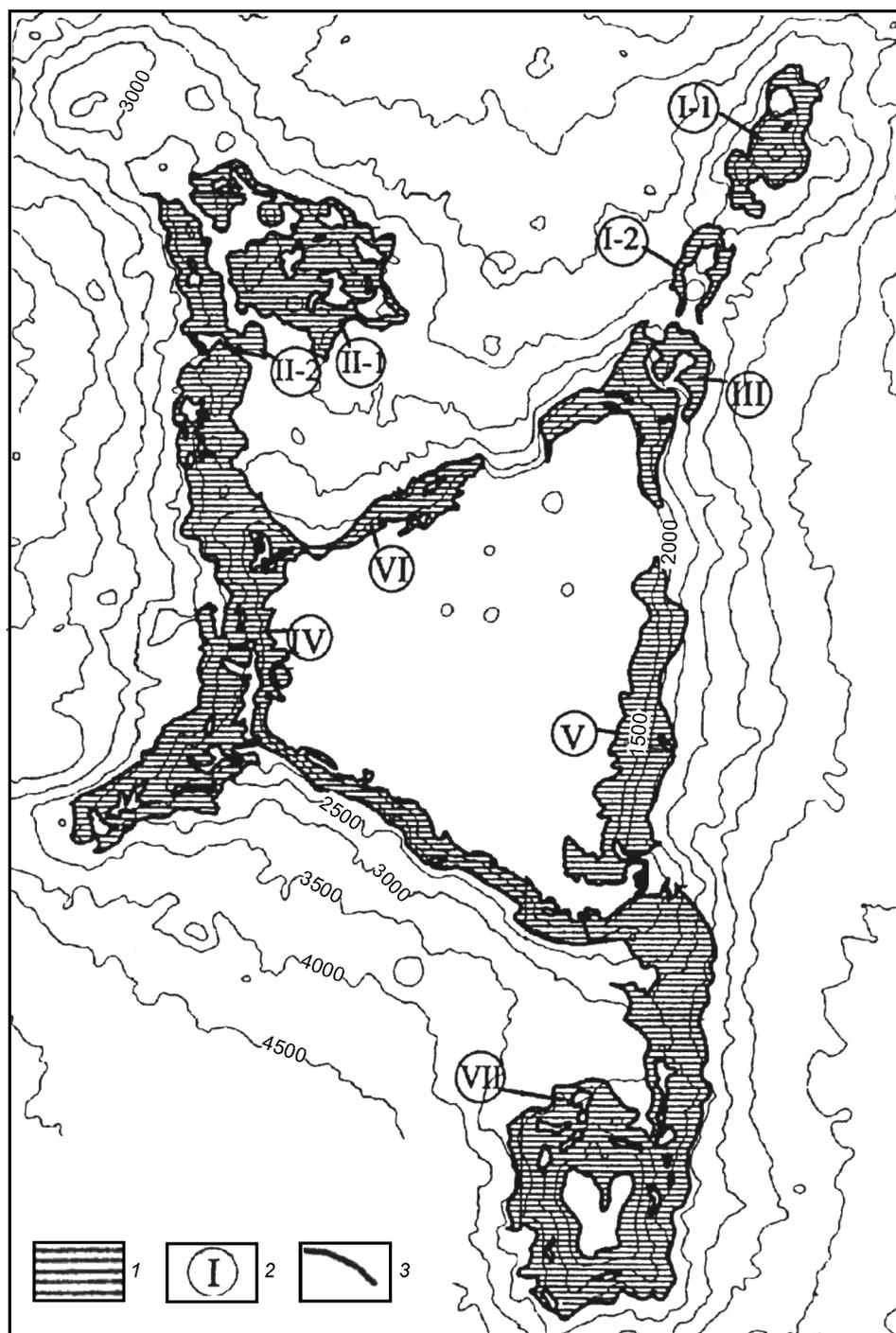


Рис. 3. Батиметрическая карта гайота Альба со схемой расположения рудных залежей корок:

1 — рудные залежи; 2 — номера рудных залежей; 3 — изобаты сечением 500 м

сантиметров до 15–20 см, при этом весовые концентрации достигают 150–180 кг/м² сухой массы [4].

В отличие от конкреций, в которых преобладает марганец, корки содержат почти равные количества Fe и Mn, а Co в них примерно в 3 раза больше, чем в конкрециях. По содержанию

Ni, Zn, Cu они уступают конкрециям. Корки представляют собой кондиционные руды по содержанию Mn и Co, попутно из них могут извлекаться Ni, Cu, Pt, Mo, V, TR. Они содержат до 20% Mn, около 15% Fe, от 0,3 до 0,8%, иногда до 2% Co.

Ресурсы КМК в северо-западной части Тихого океана, по оценке С.И. Андреева и др., 1995, составляют 30 млрд. т сухой рудной массы, т.е. 30% от прогнозных ресурсов железомарганцевых образований океана в целом.

Площади развития корок весьма значительны: на гайоте Федорова они занимают 1198,63 км², на гайоте Альба — 1152,47 км²; площади отдельных залежей от 10 до 428,2 км². Наиболее крупные залежи на детально изученных гайотах соответствуют уникальным месторождениям по запасам кобальта (более 50 тыс. т) и средним — по ресурсам марганца [4].

Кобальтоносные железомарганцевые корки — образования родственные конкрециям. Они имеют близкий минеральный и химический составы, характеризуются почти аналогичными текстурно-структурными особенностями, связаны между собой промежуточными разностями. Основными рудными минералами являются Fe-вернадит и Mn-ферроксигит. В существенных количествах в них присутствуют нерудные компоненты — апатит, кварц, глинистые минералы, цеолиты и др.

Для корок западной части Тихого океана установлена отчетливая стратификация [4]: наиболее древний реликтовый слой датируется от позднего мела до позднего палеоцена. Слой I-1 отнесен к позднему палеоцену — раннему эоцену, I-2 — к среднему—позднему эоцену. Слой II имеет миоценовый, а слой III — плиоцен-четвертичный возраст.

Реликтовый слой сложен чередующимися полосами параллельно-слоистой и дендритовой текстуры. Микрослойки по содержаниям марганца подразделяются на две контрастные по составу группы. Слои, сложенные преимущественно вернадитом, подобны кристаллической фазе конкреций; среднее содержание Mn в них составляет 27,81%, отношение Mn/Fe достигает 40,08. Другие слои подобны аморфной фазе конкреций с содержанием Mn 7,12% и отношением Mn/Fe 3,71 [2]. На этом основании можно сделать вывод, что, по крайней мере, в некоторых случаях формирование реликтового слоя осуществлялось по тому же механизму, что и конкреций.

Следует отметить, что среди чередующихся железомарганцевых слоев присутствуют слои фосфатного состава, расположенные согласно с ними. Очевидно, что фосфатный материал отлагался в последовательном чередовании с железом и марганцем [3].

Последующие слои корок I, II, III достаточно однородны. Корки в отличие от конкреций, вероятнее всего, имеют гидрогенную природу. При гидрогенном механизме, действующем в условиях активного гидродинамического режима, смена состава осаждающихся слоев обусловлена сменой концент-

раций в подаваемых к контакту порций придонной морской воды, и этим обусловлены более однородный их состав и постепенная смена концентраций рудных компонентов. Подтверждением этому служит стабильный состав марганцовистых и фосфатных фаз, являющихся продуктом повторяющихся однотипных реакций.

Анализ закономерностей строения слоистого разреза конкреций и корок позволяет получить достаточно обоснованную информацию генетического характера. При этом различные иерархические уровни слоистости отражают генетические аспекты разного типа. На субмикроскопическом уровне могут быть решены некоторые проблемы, касающиеся способов и механизмов осаждения рудного вещества; микроскопический уровень отражает флуктуации фациальных условий; макроуровень позволяет осветить проблемы стратификации и этапов вулканизма.

Изученные особенности строения конкреций и корок, проявляющиеся на уровне субмикроскопических слоев, позволяют высказать некоторые предположения о механизмах формирования этих руд. Железомарганцевые корки в целом можно отнести к гидрогенным отложениям. Исключение — реликтовый слой, резко отличающийся от последующих. Его генезис, возможно, связан с процессами гальмиролиза.

Рост ЖМК определяется действием автоколебательного механизма осаждения вещества, что обусловило главнейшую особенность строения конкреций — ритмически-слоистое чередование контрастных по содержанию железа и марганца слоев. Формирование ЖМК происходит в среде активного слоя донных осадков, точнее, в среде, определяемой взаимодействием активного слоя с придонным слоем морской воды.

Важнейшей проблемой генезиса конкреций является определение источников обогащения активного слоя рудными компонентами. В настоящее время в качестве поставщиков рудных компонентов рассматриваются самые разные процессы — это и терригенный снос с континентов, и подводная гидротермальная деятельность в осевых зонах СОХ, и гальмиролиз, и др. [1].

Одним из решающих факторов при определении источников рудного материала служит макростроение конкреций, наглядно отражающее пульсирующий характер их роста. Известно, что рост конкреций неоднократно прерывался длительными периодами неотложения рудного вещества, растворения и разрушения их поверхности. Наиболее приемлемое объяснение этот факт находит в признании в качестве ведущего источника рудных компонен-

тов очагов базальтового вулканизма. В периоды активизации вулканических процессов активный слой обогащается рудными компонентами и служит своеобразным промежуточным коллектором для образования конкреций. Когда компоненты из этого слоя концентрируются в конкрециях, истощая его, рост конкреций прекращается. Если интервал между вспышками активного вулканизма был слишком продолжительным, то процессы деструкции могут привести к разрушению конкреции, и к моменту следующего этапа активизации обломки этих конкреций могут стать ядрами новых. В строении конкреций так же, как в корках, проявлены элементы стратификации, при этом общие черты чередования макрослоев проявляются на значительных расстояниях. Можно полагать, что поля распространения конкреций представляют своеобразную удаленную фацию рудоносных осадков вулканогенно-осадочного происхождения, в которой накопившийся в верхнем слое осадка рудный материал превращается в конкреции до начала литификации осадка или в самом начале его. Некоторые исследователи считают возможным выделение процесса конкрециеобразования в самостоятельную стадию пелагического литогенеза, отличную от стадий седиментогенеза и диагенеза.

Авторы выражают признательность геологам НПО «Южморгеология» В.В.Круглякову, М.Е.Мельникову, И.Н.Пономаревой, В.М.Юбко и др. за представленные материалы для изучения и многолетнее сотрудничество.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Авдонин В.В., Кругляков В.В.* Металлогения Мирового океана. – М.: Изд-во МГУ, 2005.
2. *Авдонин В.В., Сергеева Н.Е.* Об особенностях формирования железомарганцевых конкреций и корок // Вестн. МГУ. Сер. 4. Геология. 2003. № 5. С. 31–39.
3. *Авдонин В.В., Сергеева Н.Е.* Фосфатизация железомарганцевых корок гайотов Магеллановых гор (Тихий океан) // Бюл. МОИП. Отд. геол. 2004. Т. 79. Вып. 6. С. 39–45.
4. *Мельников М.Е.* Месторождения кобальтоносных марганцевых корок. – Геленджик: ФГУГП ГНЦ «Южморгеология», 2005.
5. *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.
6. *Юбко В.М., Лыгина Т.И.* Возраст железомарганцевых конкреций рудной провинции Кларифон-Клиппертон Тихого океана (по геологическим данным) // Геология твердых полезных ископаемых Мирового океана. Геленджик. С. 21–46.