РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫЕ **БОГАТСТВА ОКЕАНА**

ЖЕЛЕЗОМАРГАНЦЕВЫЕ КОНКРЕЦИИ (ЖМК) И КОРКИ ЯВЛЯЮТСЯ УНИКАЛЬНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ. НА СУШЕ НЕТ НИЧЕГО ПОДОБНОГО НИ ПО ОБЪЕМАМ, НИ ПО СОДЕРЖАНИЯМ. МНОГИЕ СТРАНЫ ПРОЯВЛЯЮТ АКТИВНЫЙ ИНТЕРЕС К ВОЗМОЖНОСТИ ВОВЛЕЧЕНИЯ ЭТИХ ОБРАЗОВАНИЙ В РАЗРАБОТКУ. ОДНАКО ВОЗРАСТ И ГЕНЕЗИС ЖМК ДО СИХ ПОР ОСТАЮТСЯ ПРЕДМЕТОМ НАУЧНЫХ ДИСКУССИЙ. ЧТОБЫ РАЗОБРАТЬСЯ В ЭТИХ ВОПРОСАХ, МЫ ОБРАТИЛИСЬ К СПЕЦИАЛИСТУ В ОБЛАСТИ ГЕОХИМИИ РЗЭ В ОКЕАНЕ АЛЕКСАНДРУ ДУБИНИНУ

ТЕКСТ Владислав Стрекопытов
ФОТО Александр Дубинин

Дубинин Александр Владимирович
доктор химических наук, заведующий лабораторией геохимии Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН. Автор более 130 работ в области геохимии редких и редкоземельных элементов в океане и в процессах пелагического литогенеза и раннего диагенеза, специалист в области аналитической химии редких и редкоземельных элементов.

ПОСЛЕ ТОГО КАК ЭКСПЕДИЦИЯ «ЧЕЛЛЕНДЖЕРА» в 1873 году подняла первые железомарганцевые конкреции в районе Канарских островов в Атлантическом океане, про ЖМК надолго забыли, и только в 1963 году появилась широко известная работа по составу редкоземельных элементов (РЗЭ) в этих глубоководных образованиях [Goldberg et al., 1963]. В работе впервые были представлены составы всех РЗЭ в конкреции в нормализованном виде. Исследование редких земель в то время представляло серьезную проблему, потому что ни один метод не давал возможности без обогащения проанализировать содержание всех РЗЭ. Метод нейтронной активации, который очень активно развивался в 1960-х годах, без радиохимической подготовки не давал возможности анализировать все редкие земли. Необходимо было предварительно выделить концентрат РЗЭ, затем облучить его, а только потом производить измерения. Метод был дорогой, требовал больших периодов остывания, поэтому одну пробу могли анализировать около полугода. Прорыв произошел в 1988 году, когда появились первые коммерческие масс-спектрометры, работающие по методу ICP-MS — масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. Эти приборы позволяли относительно недорого определять содержания всех без исключения РЗЭ в природных образцах без предварительного обогащения. С тех пор началось интенсивное исследование редких земель в конкрециях, корках и металлоносных осадках.

ГДЕ И КАК КОНЦЕНТРИРУЮТСЯ ЖМК В ОКЕАНЕ?

Основные места распространения конкреций — это глубоководные котловины океанов. Будь то в Тихом, Атлантическом или Индийском океанах, если котловина достаточно удалена от континентов, с большой долей вероятности можно сказать, что там конкреции есть. Причем — именно в виде достаточно постоянных (не прерывистых) конкреционных полей в поверхностном слое осадков.

Продуктивность таких полей измеряется в килограммах на квадратный метр. В Атлантическом океане самым продуктивным местом является Капская котловина, расположенная у южной оконечности Африки. Другие котловины Атлантического океана — Северо-Американская, Канарская и Бразильская — гораздо менее продуктивные, хотя и глубины, и удаленность от континента примерно такие же. В Тихом океане наиболее изученной и продуктивной является зона Кларион-Клиппертон. По сути дела — это бортовая часть котловины, склон Восточно-Тихоокеанского поднятия (ВТП), являющегося источником металлов. ВТП в отличие от Срединно-Атлантического хребта (САХ) имеет пологие склоны. В центре ВТП расположен быстроспрединговый хребет (скорость спрединга около 15 см/год), и нет рифтовой долины, как у САХ. Поэтому металлы выходящих здесь гидротерм (Fe, Mn) в форме оксигидроксидов разносятся на тысячи километров. Во время этой длительной транспортировки на них осаждаются многие элементы, в том числе редкие земли. Например, фосфор высаживается из океанской воды практически полностью. В САХ не так. Там рифтовая долина ограничивает выходы гидротермальных «факелов», и поэтому в прилегающих котловинах металлоносных осадков практически не образуется. Эта разница в морфологии морского дна приводит к тому, что гидротермальные источники и конкреционные накопления разделены в океане.

Будь то в Тихом, Атлантическом или Индийском океанах, если котловина достаточно удалена от континентов, с большой долей вероятности можно сказать, что там конкреции есть

А ЧТО В ИНДИЙСКОМ ОКЕАНЕ?

Площадь котловин в Индийском океане, пожалуй, наименьшая из всех океанов. Сейчас в Индийском океане работают в основном индийские ученые. Проявляют интерес к океанским исследованиям китайские ученые, несмотря на то, что Китай — крупнейший в мире экспортер редкоземельных элементов. Они начали работы не так давно, около 20 лет назад, но сейчас уже очень много проведено исследований, особенно в Тихом океане. Российская академия наук сдавала научные суда в аренду Индии для проведения исследований в океане, потому что на собственные экспедиции денег не нашлось. Институт океанологии сумел сохранить научный флот практически полностью. Самые большие суда — «Академик Сергей Вавилов» и «Академик Иоффе» — сейчас возят туристов с Огненной Земли в Антарктиду. На попутных рейсах этих судов мы пытаемся проводить небольшие научные экспедиции. Такая возможность есть два раза в год, когда эти суда ходят на текущий ремонт из Ушуайа (Аргентина) в Калининград. Раньше, в советские времена, были комплексные целевые экспедиции длительностью 2–3 месяца, по 70 ученых на судне. Сейчас же удается в лучшем случае дней десять поработать в океане и далеко не каждый год. И совершенно непонятно, как будут дальше развиваться исследования.

ИЗВЕСТНО ЛИ ЧТО-ТО ПРО ЖМК В АРКТИКЕ?

В Арктике проводятся исследования на шельфе. Основные интересы при этом сосредоточены вокруг возможных месторождений нефти и газа. Осадочный покров в Северном Ледовитом океане до сих пор слишком плохо изучен, поскольку в районы арктических котловин практически не было исследовательских рейсов. Известны конкреции в Карском, Белом и Баренцевом морях — это железистые стяжения с небольшим содержанием марганца. Они образуются в непосредственной близости от континента, растут быстро и не успевают накапливать редкие земли и другие ценные компоненты.

ТАК КАКОВ ВСЕ-ТАКИ МЕХАНИЗМ НАКОПЛЕНИЯ РЕДКИХ ЗЕМЕЛЬ В ЖМК?

По мере удаления от континентов роль терригенного источника вещества резко уменьшается, и на первый план выходит гидрогенный источник вещества. Это вещество представлено прежде всего оксигидроксидами Fe и Mn, полученными за счет окисления и последующего гидролиза Fe^{3+} и Mn^{4+} в поверхностных хорошо перемешиваемых водах океана. Являясь хорошими сорбентами, оксигидроксиды Fe и Mn накапливают из океанских вод целый комплекс микроэлементов, в том числе и редкоземельные элементы. Помимо оксигидроксидной составляющей в конкрециях присутствует и литогенная часть — это может быть алюмосиликатный осадочный материал, мелкие камни и т. п. Его доля в составе РЗЭ небольшая. Что касается состава, то в составе редких земель ЖМК преобладает церий, составляя 40–70% от суммы РЗЭ. Так называемая положительная цериевая аномалия, которая наблюдается во всех ЖМК и корках негидротермального генезиса (рис. 3), связана с тем, что у церия окислительно-сорбционный механизм накопления. Это единственный элемент из группы редкоземельных элементов, который окисляется в нормальных условиях в океане. Изначально трехвалентный церий окисляется до степени окисления 4^{+}, что и обнаружено в конкрециях. Формируемая положительная аномалия Ce в ЖМК приводит к тому, что в воде мы наблюдаем отрицательную цериевую аномалию. По этому признаку мы можем отличить гидрогенные Fe-Mn образования (с положительной цериевой аномалией) от гидротермальных (рис. 3). ЖМК, которые могут рассматриваться в качестве потенциальных рудных образований, имеют в основном гидрогенно-диагенетический генезис. В целом железомарганцевые конкреции

РИС. 1. «Мостовая» из конкреций на океанском дне. Фото ГНЦ ФГУГП «Южморгеология»

имеют концентрически-слоистое строение (рис. 2а и 2б), что свидетельствует о последовательном нарастании слоев различного состава и структуры, и сложены слабоокристаллизованными гидроксидами железа и марганца. Редкометальный и редкоземельный интерес представляют только пелагические конкреции. Главным фактором, ограничивающим рост пелагических конкреций, является высокая скорость осадконакопления, которая обусловлена поставкой литогенного, биогенного и вулканогенного вещества. При высокой скорости образования карбонатных и кремнистых осадков конкреции оказываются погребенными под толщей этих осадков еще до того, как они успевают вырасти. Однако, к примеру, район Кларион-Клиппертон находится в зоне кремненакопления, относящейся к так называемому радиоляриевому поясу. Скорости осадконакопления здесь в 10 раз выше, чем в котловинах Тихого океана (10–30 мм за 1000 лет). Но в районе встречены значительные конкреционные поля. Образованию ЖМК не способствует карбонатонакопление на дне океанов. Все основные поля конкреций расположены ниже глубины карбонатной компенсации (ГКК).

ЗАВИСИТ ЛИ ЗОНАЛЬНОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЖМК И ИХ СОСТАВА ОТ ПОТОКА ТЕРРИГЕННОГО ВЕЩЕСТВА С КОНТИНЕНТОВ?

Конечно. По мере удаления от прибрежной зоны в пелагиаль падает скорость осадконакопления. Поток осадочного вещества складывается из нескольких источников. Литогенный (континентальный) снос мешает росту конкреций. Высокая скорость осадконакопления биогенного вещества также не способствует росту ЖМК. Однако ниже ГКК все вещества, накопленные в планктоне, вновь растворяются и затем могут попасть в конкреции. Уровень ГКК в океанах разный. Он зависит прежде всего от насыщения вод углекислотой, которое возрастает в более старых глубинных водах Тихого океана. В Атлантике ГКК находится на глубине около

Являясь хорошими сорбентами, оксигидроксиды Fe и Mn накапливают из океанских вод целый комплекс микроэлементов, в том числе и редкоземельные элементы

ТАБЛИЦА 1. СРЕДНИЕ СОДЕРЖАНИЯ РЗЭ В ЗЕМНОЙ КОРЕ, ЖЕЛЕЗОМАРГАНЦЕВЫХ КОРКАХ И КОНКРЕЦИЯХ ОКЕАНА

Элемент, г/т	Средние содержания РЗЭ в земной коре, сланец PAAS	Средние содержания РЗЭ в Fe-Mn корках	Средние содержания РЗЭ в Fe-Mn конкрециях
La	38.2	243	124
Ce	79.6	1041	618
Pr	8.83	44.2	33.1
Nd	33.9	202	135
Sm	5.55	40.0	31.0
Eu	1.08	10.1	7.4
Gd	4.66	47.9	31.3
Tb	0.774	7.8	4.9
Dy	4.68	41.6	27.3
Ho	0.991	7.8	5.2
Er	2.85	24.5	14.6
Tm	0.405	3.5	2.0
Yb	2.82	23.4	13.5
Lu	0.433	3.8	2.0
Источник	McLennan, 1989	Дубинин, 2006	Дубинин, 2006

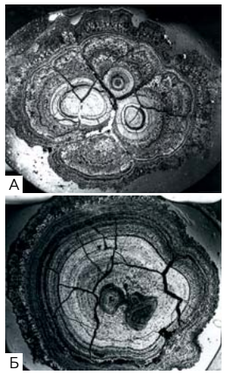


РИС. 2. Внутреннее строение конкреции из района Кларион-Клиппертон (А) и из Центрального бассейна Индийского океана (Б). Фотографии предоставлены Т.Ю. Успенской

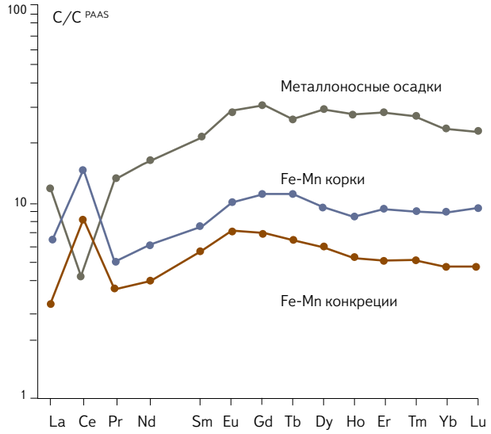
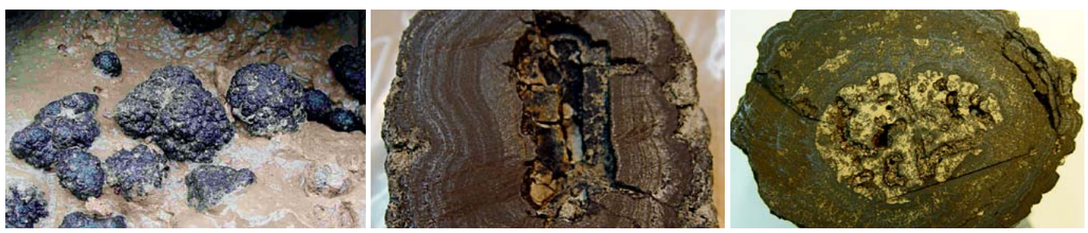


РИС. 3. Средние составы РЗЭ в железомарганцевых корках и конкрециях океана, нормализованные на состав РЗЭ в сланце PAAS. Для сравнения показан состав РЗЭ в металлоносных осадках Южной котловины Тихого океана.

5000 м, а в Тихом океане — на уровне 4200–4500 м. Самые богатые редкими землями и редкими металлами гидрогенные (седиментационные) конкреции находятся в котловинах центральной и южной частях Тихого океана, на максимальном удалении от берега. А самая низкая скорость осадконакопления в Тихом океане — в Южной котловине, расположенной к востоку от Новой Зеландии.

БОЛЬШОЙ ВОПРОС — ВОЗРАСТ КОНКРЕЦИЙ. ПОЧЕМУ ТАК ВАЖНО ЕГО ЗНАТЬ?

Если мы знаем, с какой скоростью идет генерация конкреционных руд, то мы можем оценить, с какой скоростью «растет» их запас в океанах и накапливаются элементы в конкрециях. Для оценки скорости роста конкреций чаще всего используют методы измерения абсолютного возраста по изотопам уран-ториевого ряда и космогенным изотопам ^{26}Al, ^{10}Be, ^{3}He. Большая часть данных показывает, что конкреции растут на несколько мм за миллион лет. Однако имеются некоторые результаты, которые показывают скорости роста конкреций в 1000 раз больше. Например, не так давно российские ученые оценивали скорость конкреции из района Кларион-Клиппертон по космогенному изотопу ^{3}He и получили скорости роста в районе первых миллиметров за 1000 лет, то есть сопоставимые со скоростью осадконакопления [Ануфриев и др., 1999]. Метод определения возраста по космогенным изотопам основан на предположении о постоянстве космогенного потока элементов из атмосферы. Но на самом деле интенсивность этого потока в геологической истории могла сильно меняться. Если конкреции растут со скоростью осадконакопления (первые миллиметры за тысячу лет), то исчезает необходимость объяснять эффект «непотомляемости» конкреций. В зависимости от скорости формируется и состав. Если конкреционные поля расположены вблизи континентов и скорость роста конкреций высокая, то редкометальная минерализация в них крайне низкая — железа и марганца много, а редких элементов очень мало.



ЕСТЬ ЛИ ЗАКОНОМЕРНОСТЬ В РАСПРЕДЕЛЕНИИ ЖМК В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВОЗРАСТА ОКЕАНСКОЙ КОРЫ, РАССТОЯНИЯ ОТ ЦЕНТРОВ СПРЕДИНГА? МОЖЕТ ЛИ ЭТО ПОМОЧЬ В ОПРЕДЕЛЕНИИ ВОЗРАСТА КОНКРЕЦИЙ?

По скорости спрединга и палеомагнитной зональности можно определить лишь возраст базального фундамента и сказать, что конкреции должны быть моложе. ЖМК лежат на осадках. Для осадков используют методы определения возраста (а значит скорости осадконакопления), которые основаны на магнитной восприимчивости осадков, биостратиграфические методы и методы изотопной геохронологии. «Красные пелагические глины», с которыми часто связаны ЖМК, датировать достаточно сложно. Биостратиграфический метод здесь не работает. Обычно используют методы геохронологии в комбинации с палеомагнитными методами. Можно использовать U-Th метод изотопной геохронологии в интервале примерно до 300 тысяч лет, но разрешение может быть плохим из-за небольших скоростей осадконакопления. При скоростях осадконакопления не более первых миллиметров за тысячу лет мы можем определить возраст только верхних слоев пелагических осадков. Хорошие результаты дает стронциевая изотопная стратиграфия для карбонатов и биогенного апатита в пелагических осадках. Так, мы получили данные для Бразильской котловины, где возраст верхнего слоя осадков, на которых лежат конкреции, составляет 25 миллионов лет. Если предположить, что конкреции не могут быть древнее подстилающего осадка, то тогда скорости роста этих конкреций находятся в районе 1–3 мм за миллион лет!

ПОЧЕМУ ИМЕННО К ЗОНЕ КЛАРИОН-КЛИППЕРТОН ПРИКОВАНО ОСОБОЕ ВНИМАНИЕ?

Зона Кларион-Клиппертон, расположенная в Тихом океане, является на сегодняшний день наиболее изученной. Провинция Кларион-Клиппертон привлекла внимание наличием качественных (по сумме никеля и кобальта) конкреционных руд продуктивностью более 5 кг/м^2 и покрытием площади дна более 25%. Если рассмотреть накопление никеля и меди в конкрециях на меридиональном разрезе в Тихом океане, то мы увидим самое большое накопление этих элементов именно в зоне разломов Кларион-Клиппертон (рис. 4). ЖМК здесь очень крупные и распространены повсеместно, океанское дно выглядит как мостовая (рис. 1). Российские ученые внесли огромный вклад в исследование конкреций этой зоны. Было выделено два вида конкреций: так называемые конкреции «холмов» и конкреции «котловин» (табл. 2 и рис. 5). Именно благодаря исследованиям отечественных ученых из Института океанологии и ГНЦ «Южморгеология», про-

Если мы знаем, с какой скоростью идет генерация конкреционных руд, то мы можем оценить, с какой скоростью «растет» их запас в океанах и накапливаются элементы в конкрециях

ТАБЛИЦА 2. СОДЕРЖАНИЯ ГЛАВНЫХ И РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В КОНКРЕЦИЯХ ПРОВИНЦИИ КЛАРИОН-КЛИППЕРТОН И МЕТАЛЛОНОСНЫХ ОСАДКАХ ЮЖНОЙ КОТЛОВИНЫ ТИХОГО ОКЕАНА

Элемент	Конкреции «котловин», станция 2483	Конкреции «холмов», станция 2483	Металлоносный осадок Южной котловины, станция 35
Mn	23.9	17.9	3.50
Fe	4.55	14.0	13.2
Al	2.77	2.19	4.18
P	0.318	0.191	1.71
La	90.5	208	411
Ce	208	801	343
Pr	27.6	52.3	106
Nd	115	211	477
Sm	28.8	47.4	102
Eu	6.68	11.3	26.1
Gd	27.5	47.6	119
Tb	4.23	7.46	17.2
Dy	25.1	42.6	115
Ho	4.68	8.10	23.1
Er	12.8	22.8	67.9
Tm	1.83	3.31	9.35
Yb	12.1	21.9	57.1
Lu	1.78	3.25	8.54
Источник	Дубинин и др., 1997	Дубинин и др., 1997	Дубинин, Свальнов, 2000

Железо, марганец, алюминий и фосфор даны в %, остальные элементы — в г/т.

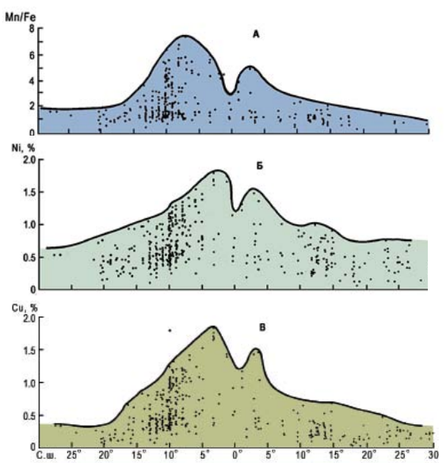


РИС. 4. Вариации отношения Mn/Fe и содержания никеля и меди в конкрециях по широтам в пределах центральной части Тихого океана («Железомарганцевые конкреции центральной части Тихого океана», 1986).

веденным в 1980-х годах, удалось составить детальные карты этой богатейшей глубоководными конкрециями зоны. С точки зрения количества РЗЭ конкреции зоны Кларион-Клиппертон не уникальны. Конкреции «холмов» содержат больше РЗЭ с большей положительной аномалией церия (рис. 5), чем конкреции «котловин». Кроме редких земель, они содержат массу других редких элементов. Там есть и молибден, и таллий, и вольфрам, и другие редкие металлы в больших количествах. И технология обогащения достаточно простая. Чтобы перевести редкие металлы в раствор, достаточно простой обработки соляной кислотой. Редкие земли при такой обработке переходят в раствор на 99%.

НАСКОЛЬКО ТАКОЙ МЕТОД МОЖНО ИСПОЛЬЗОВАТЬ В ПРОМЫШЛЕННЫХ МАСШТАБАХ?

Этот вопрос нужно адресовать технологам. Сейчас у нас разрабатываются промышленные методы обогащения, основанные на выщелачивании конкреций серной кислотой, так как более подходящая соляная кислота является более дорогой. В промышленных масштабах необходимо будет использовать десятки и сотни тысяч тонн кислоты. Метод сам по себе дорогой и не экологичный. Вопрос, куда сбрасывать отработанный раствор? Будут также образовываться хвосты, содержащие радиоактивные уран и торий. Да и результаты по выщелачиванию не очень хорошие, так как при использовании серной кислоты образуется сульфат кальция в виде гипса. И редкие земли в большой степени соосаждаются с сульфатом кальция, замещая кальций. Конечно, проблема технологии извлечения существует.

АМЕРИКАНЦЫ И ЕВРОПЕЙЦЫ ПИШУТ О ГРЯДУЩЕМ КРИЗИСЕ РЗЭ В МИРЕ. НЕХВАТКА ТРАДИЦИОННЫХ ИСТОЧНИКОВ, МОНОПОЛИЯ КИТАЯ ЗАСТАВЛЯЮТ ИСКАТЬ АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ИСТОЧНИКИ РЗЭ. И ПРЕЖДЕ ВСЕГО РЕЧЬ ЗАХОДИТ О ЖМК, ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ РЗЭ В КОТОРЫХ ПРЕВОСХОДЯТ ВСЕ ИЗВЕСТНЫЕ ЗАПАСЫ НА КОНТИНЕНТАХ. НАСКОЛЬКО АКТИВНЫ СЕЙЧАС НА ЗАПАДЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЗЭ В ЖМК?

Дефицит чувствуется в промышленно развитых странах: США, Японии и Западной Европы. Япония ведет себя очень активно в изучении Тихого океана, там собрана большая группа ученых и перелопачен огромный материал по донным отложениям. Япония проявляет особенный интерес к металлоносным осадкам Тихого океана, так как сейчас она полностью зависит от импорта редких земель из Китая. Особенно велик интерес к рудам

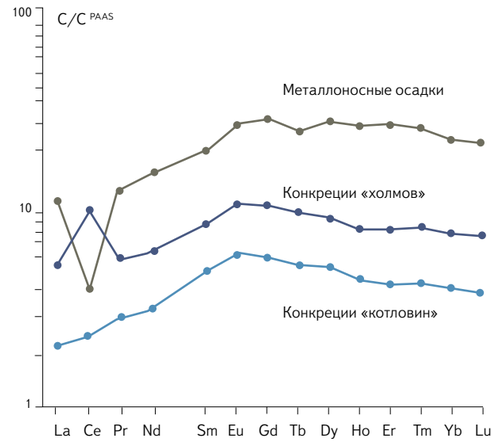


РИС. 5. Составы РЗЭ в железомарганцевых конкрециях «холмов» и «котловин» провинции Кларион-Клиппертон (станция 2483) и в металлоносных осадках (станция 35). Данные нормализованы на состав РЗЭ в сланце PAAS.

с обогащением тяжелыми РЗЭ (рис. 3 и 5). А это как раз металлоносные осадки, но не гребня ВТП, а его флангов, вернее, западного фланга. Также активно альтернативные источники РЗЭ ищут Соединенные Штаты. Но они в качестве потенциального источника РЗЭ рассматривают в первую очередь континентальные фосфориты, так как добыча морских железомарганцевых конкреций все-таки представляет собой проблему.

ПРЕДПОЛАГАЕТСЯ, ЧТО В 2016 ГОДУ МОЖЕТ НАЧАТЬСЯ РАЗРАБОТКА ЖМК В ОТКРЫТОМ ОКЕАНЕ. ЧТО ВЫ ДУМАЕТЕ ПО ЭТОМУ ПОВОДУ?

Добывать ЖМК в 2016 году, скорее всего, не будут. Задача сейчас — застолбить участки. У меня большие сомнения, что современные технологии позволят эффективно добывать конкреции с глубины 5000 м. Мы не говорим уже об экологических последствиях отработки глубоководных отложений открытыми драгами. Было предложение закачивать кислоту на дно, там проводить выщелачивание, а раствор с редкими элементами качать на поверхность. В любом случае надо понимать, что это —пелагические районы, там осадконакопление очень медленное, и имеющееся равновесие в окружающей среде крайне хрупкое. Я, честно говоря, со страхом думаю о перспективе добычи ЖМК со дна океана. К тому же известно, что обогащенность ЖМК ценными металлами связана с их высокой сорбционной активностью, а это значит, что роль их в поддержании равновесия в составе морской воды огромна.

КРОМЕ ЖМК, ЕСТЬ ЖЕ ЕЩЕ МЕТАЛЛОНОСНЫЕ ГЛУБОКОВОДНЫЕ ОСАДКИ?

Я о них уже упоминал. Очень перспективный источник РЗЭ — металлоносные отложения Восточно-Тихоокеанского поднятия (рис. 3, 5 и табл. 2). Речь идет о так называемых медленно накапливающихся металлоносных осадках флангов ВТП. Это железомарганцевые рудные илы с очень высоким содержанием редких земель (рис. 3, 5). Но в отличие от конкреций состав РЗЭ здесь другой, и железо и марганец в этих илах имеют гидротермальный генезис. Там, где есть поток гидротермальных оксигидроксидов железа и марганца на дно, осадки котловин, прилежащих к ВТП, обогащены Fe и Mn. К примеру, содержание Mn может быть до 4–5% (в обычных осадках котловин — 0,5–0,6%), а содержание Fe может достигать 14% (табл. 2). При очень низких скоростях литогенного осадконакопления ниже ГКК формируются рыхлые осадки, в которых имеются очень высокие содержания редких земель с характерным дефицитом Ce (так называемый гидротермальный цериевый минимум) и большим количеством тяжелых редких земель (рис. 3). Такие глубоководные металлоносные осадки обнаружены на больших площадях только в Тихом океане. В Атлантике их образование в принципе невозможно из-за небольших расстояний от берегов и наличия троговой долины в пределах Срединно-Атлантического хребта. ●

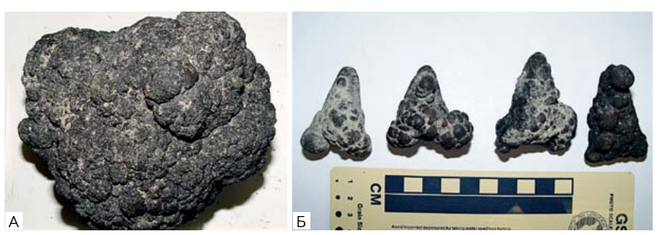



РИС. 6. Морфологически ЖМК представляют собой округлые, эллипсоидальные, лепешковидные или шарообразные обособления диаметром от долей мм до десятков см. Часто встречаются сростковые конкреции (А). Биогенные остатки в ядрах иногда представлены зубами рыб (Б).