

**ОСОБЕННОСТИ ХИМИЧЕСКОГО И МИНЕРАЛЬНОГО СОСТАВА
ЖЕЛЕЗО-МАРГАНЦЕВЫХ КОНКРЕЦИЙ ЧУКОТСКОГО МОРЯ**

О.Н. Колесник, А.Н. Колесник

*Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,
690041, Владивосток, ул. Балтийская, 43, Россия*

Рассмотрены особенности химического и минерального состава дискоидальных, лепешковидных и плитчатых железо-марганцевых конкреций (ЖМК) Чукотского моря. Основными компонентами рудного вещества ЖМК являются Fe, Mn и P. Содержание микроэлементов (за исключением Ba и Sr) не превышает сотых долей процента. Максимальные концентрации большинства микроэлементов характерны для лепешковидных стяжений. В целом, интенсивнее всего в ЖМК накапливается Mn. За ним (в порядке убывания) следуют Ag (?), Co, Pb, Sr, Fe, P, Y, Ca и Ni, La, Zn, Cu. Что касается Ba, Cr, Mg, K, то эти элементы в ЖМК не накапливаются. Разбавление типично для Si, Al, Na и Ti. Основные рудные фазы — штрэнгит и аморфные гидроксиды марганца. Впервые для Чукотского моря отмечено, что такие металлы, как Cu, Zn, Sn, Ni, Pb, W, Bi, Cr, Fe, Ti, Ag, Au, Y, Zr, La-Nd, образуют в ЖМК самостоятельные микроразмерные минеральные фазы: самородные элементы, интерметаллоиды, оксиды, значительно реже вольфраматы, силикаты, фосфаты. Наиболее отчетливо и разнообразно аксессуарная рудная минерализация проявлена в плитчатых стяжениях. При том что ЖМК Чукотского моря имеют диагенетическую природу, источником микровключений в них различных аксессуарных рудных минералов, вероятнее всего, являются высокотемпературные флюиды.

Железо-марганцевые конкреции, химический и минеральный состав, генезис, Чукотское море.

**SPECIFIC CHEMICAL AND MINERAL COMPOSITION OF FERROMANGANESE NODULES
FROM THE CHUKCHI SEA**

O.N. Kolesnik and A.N. Kolesnik

The specific chemical and mineral composition of discoid, cake-shaped, and platy ferromanganese nodules (FMNs) from the Chukchi Sea are considered. The main ore components of these FMNs are Fe, Mn, and P. The contents of trace elements (except for Ba and Sr) do not exceed hundredths of percent. Maximum concentrations of most of these elements are specific for the cake-shaped nodules. In general, Mn accumulates most intensely in FMNs. Next (in order of decrease) are Ag(?), Co, Pb; Sr, Fe, P, Y, Ca; and Ni, La, Zn, Cu. As for Ba, Cr, Mg, and K, they do not accumulate in the FMNs. «Dilution» is typical of Si, Al, Na, and Ti. The main ore phases are strengite and amorphous Mn hydroxides. It has been revealed for the first time for the Chukchi Sea that Cu, Zn, Sn, Ni, Pb, W, Bi, Cr, Fe, Ti, Ag, Au, Y, Zr, and La–Nd lanthanides form individual mineral microphases in FMNs: native elements, intermetallic compounds, oxides, and, much more seldom, tungstates, silicates, and phosphates. Accessory ore mineralization is the best pronounced and most diverse in the platy nodules. Though the FMNs from the Chukchi Sea are diagenetic, high-temperature fluids are, most likely, the source of microinclusions of various accessory ore minerals.

Ferromanganese nodules, chemical and mineral composition, genesis, Chukchi Sea

ВВЕДЕНИЕ

Кроме прочих видов полезных ископаемых на арктическом континентальном шельфе, входящем в исключительную экономическую зону России, известны поля распространения ЖМК. Океанские железо-марганцевые образования (ЖМО) на сегодняшний день рассматриваются как комплексные руды с высоким содержанием целого ряда стратегически важных (Mn, Ni, Cu, Co), а также попутных (Mo, Au, Ag, Pt, Cd, Bi, Ti, Te, редкие земли (РЗЭ) и др.) металлов. При этом конкреции арктических морей Рос-

сии, выделенные в особый тип минерального сырья, считаются неперспективными в плане извлечения из них металлов, за исключением, может быть, только марганца [Голева, 2010]. Однако вывод о безрудности последних не может считаться окончательным без проведения соответствующих детальных геохимико-минералогических исследований на микроуровне. Подобные работы важны и с точки зрения построения общей схемы рудного процесса в океане, так как минеральные новообразования являются одним из критериев, по которым можно судить об особенностях того или иного типа литогенеза.

В настоящей статье рассмотрены особенности химического и минерального состава ЖМК Чукотского моря — наименее изученного в вопросе железо-марганцевого оруденения моря Российской Арктики.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Фактический материал. Материалом для исследований послужили образцы ЖМК, отобранные нами в Чукотском море в рамках международной российско-американской экспедиции «RUSALKA» на НИС «Профессор Хромов» в 2009 году [Астахов и др., 2010а]. ЖМК были подняты на трех станциях (ст.), две из которых находятся в пределах подводного каньона Геральд (глубина до 85 м), одна — в более глубоководной северо-восточной части внешнего шельфа (рис. 1). Прежде в Чукотском море поля ЖМК отмечались лишь в пределах Колючинской губы (Чукотский полуостров), а также севернее о. Врангеля и на северо-западном шельфе Аляски [Калиненко, Павлидис, 1982; Павлидис, 1982; Шнюков и др., 1987].

Среди ЖМК выделяются три морфологических типа. Первый, распространенный в пределах ст. 1, — дискоидальные стяжения (рис. 2, а). Размер варьируется от $2.5 \times 3 \times 0.8$ до $7 \times 7 \times 1$ см. Характерен резкий контраст между верхней и нижней поверхностями: верхняя (темно-бурого цвета с многочисленными следами жизнедеятельности морских организмов) — относительно плоская или вогнутая, что особенно заметно в центральной части — в области галечникового ядра, как правило, покрытого тонкой рудной корочкой; нижняя — более светлая, ботридоидальная (мелкобугорчатая). Края ограничены небольшим валиком рудного вещества, маркирующим положение стяжений в осадке. Второй морфологический тип ЖМК представлен поднятыми на ст. 3 лепешковидными образованиями. Их размер изменяется от $2 \times 2 \times 1$ до $9 \times 7 \times 4$ см (см. рис. 2, б). Нередко подобные конкреции испещрены густой системой трещин. Для ЖМК второго типа, как и для дискоидальных стяжений, типична шероховатая, бугристая поверх-

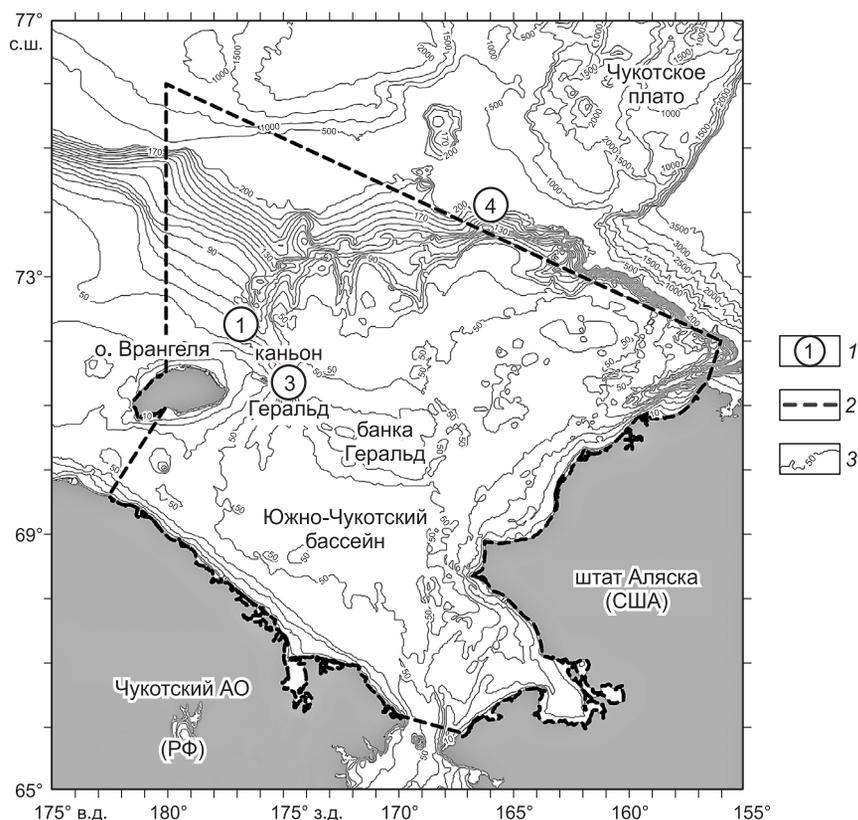


Рис. 1. Карта фактического материала.

1 — станция отбора железо-марганцевых конкреций; 2 — условная граница Чукотского моря; 3 — изобата.

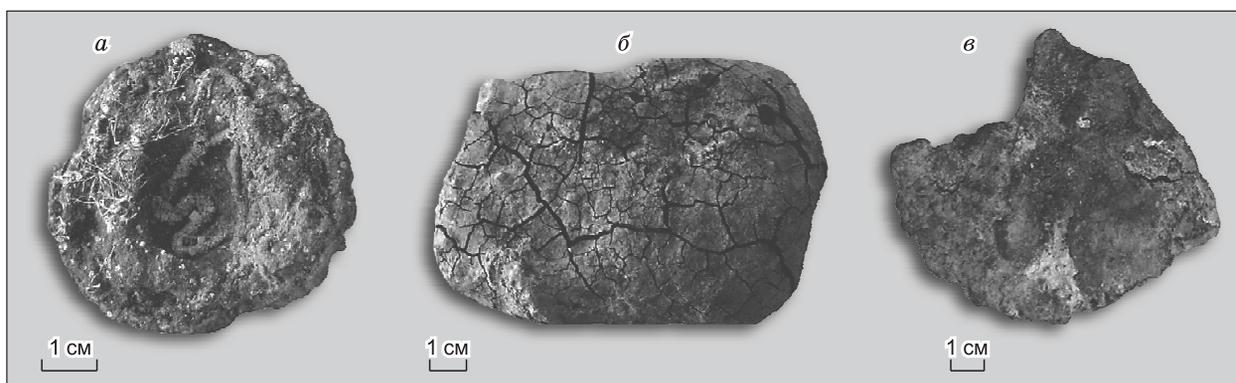


Рис. 2. Образцы железо-марганцевых конкреций Чукотского моря.

а—в — морфотипы: *а* — дискоидальный (ст. 1); *б* — лепешковидный (ст. 3); *в* — плитчатый (ст. 4).

ность, более темная сверху и светлая в нижней, погруженной в осадок, части. Следы жизнедеятельности морских организмов распространены в значительно меньшей мере, чем на поверхности конкреций первого морфотипа. Наконец, плитчатые ЖМК (см. рис. 2, *в*) с глинистой затравкой со ст. 4 выделены в третью группу. Размер образцов — до $9 \times 9 \times 1.5$ см. Они отличаются хрупкостью, рудная оболочка сложена темным охристым мажущим материалом. Поверхность бугристая, на ней видны небольшие поселения мшанок, губок и др. На изломе всех типов ЖМК заметно тонко- и скорлуповато-слоистое строение рудной оболочки.

Подстилающие и частично вмещающие ЖМК осадки ст. 1 и 4 представлены пелитами, ст. 3 — пелитами алевритовыми. Последнее, вероятно, объясняется более активной гидродинамической обстановкой в подводном каньоне Геральд [Grebmeier et al., 2006]. Поверхностный слой (0—3 см) донных отложений в районах станций, где были обнаружены ЖМК (см. рис. 1), характеризуется в среднем невысоким содержанием ведущих рудных компонентов (Fe — 2.57—5.54, Mn — 0.02—0.90, P — 0.09—0.16 мас. %), что не противоречит данным других исследователей по глинистым илам конкреционных полей Чукотского моря и подтверждает общую тенденцию дефицита перечисленных элементов в донных осадках этой части Северного Ледовитого океана [Калиненко, Павлидис, 1982; Кошелева, Яшин, 1999]. Содержание общего органического углерода ($C_{орг.}$) в верхнем слое осадков ст. 1 и 3 составляет 1—2 %, на ст. 4 оно меньше 1 % [Колесник и др., 2010].

Методика работ. При изучении ЖМК был использован комплекс аналитических методов. Так, предварительное изучение текстурно-структурных особенностей конкреций с целью отбора образцов для более детальных исследований осуществлялось на оснащенной микрокамерой поляризационном микроскопе Axioskop 40 A Pol (Carl Zeiss, Германия).

Определение содержания кремния выполнялось методом гравиметрии. Для разложения образца использовалось сплавление с безводным карбонатом натрия. С целью полного выделения кремнекислоты раствор выпаривали, осадок высушивали, прокаливали до постоянной массы и взвешивали. Далее, после обработки фтористо-водородной кислотой и отгонки летучих соединений кремния, выполнялось повторное взвешивание. Содержание кремния в навеске образца определяли по разности первого и второго взвешиваний.

Концентрации всех макро- (за исключением Si), а также некоторых микроэлементов (Ba, Sr, Zn, Co, Ni) были установлены методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-АЭС) на приборе ICAP-6500 DUO (Thermo Electron Corporation, США), остальных микроэлементов — масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС) на спектрометре Agilent 7500c (Agilent Technologies, США). При этом необходимо отметить, что содержание серебра определено на уровне полуколичественного анализа. Пробы предварительно истирали в агатовой ступке и просеивали через сито с размером ячейки 0.05 мм, высушивали до постоянного веса при температуре 105 °С, а затем вскрывали прямым кислотным разложением. В качестве внутреннего стандарта при анализе использовался 10^{-5} %-й раствор кадмия в первом случае и индия — во втором. Контроль качества элементопределений осуществлялся при помощи стандартных образцов океанических отложений (ЖМК) СДО-4 (ООПЕ601) и СДО-6 (ООПЕ603).

Минеральный состав ЖМК идентифицирован в ходе рентгеноструктурного анализа на дифрактометре ДРОН-3 (Россия). В работе использовалась рентгеновская трубка с медным анодом БСВ-23. Съем-

ка проводилась в интервале углов $2\Theta = 4\text{--}70^\circ$ в CuK_α -излучении. Напряжение анода рентгеновской трубки составляло 35 кВ, сила тока — 10 мА, угол отражения монохроматора — 13° . Присутствие в образце минеральной фазы считалось доказанным, если экспериментальные значения межплоскостных расстояний к порядку отражения от плоскости совпадали со справочными данными по 3—4 самым интенсивным линиям.

Для локального определения химического состава ЖМК была проведена электронно-микроскопическая съемка аншлифов. При изготовлении последних использовалась пропитка из эпоксидной смолы. Для полировки поверхности применялись алмазные пасты различной размерности на органической основе. Пасты не содержат в своем составе металлов в количествах предела обнаружения прибора JXA-8100 (JEOL Ltd., Япония) — 0.01 мас. %, на котором проводилась съемка. Перед анализом аншлифы напыляли слоем углерода толщиной 15 нм и плотностью 2.25 г/см³. Работа велась на энергодисперсионной приставке Oxford INCA Energy+. Энергетическое разрешение детектора на MnK_α -линии составляло 137 эВ, ускоряющее напряжение — 20 кВ, сила тока — 10^{-8} А, угол отбора рентгеновского излучения — 45° . Объем анализируемой области не превышал 4 мкм в диаметре. В ходе анализа применялся невстроенный набор эталонов. Автоматическая коррекция матричных эффектов производилась по схеме ХРР. Определение наиболее вероятных минеральных фаз проанализированных микроучастков поверхности аншлифов производилось на основе сопоставления полученного химического состава с составом «эталонных» минералов из справочной литературы.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Химический состав. По данным плазменной спектрометрии, диско- и лепешковидные конкреции ст. 1 и 3 (каньон Геральд) имеют в целом сходный химический состав. Основными рудными компонентами являются железо, марганец и фосфор: Fe — 18.20, 18.88; Mn — 6.18, 7.61; P — 0.46, 0.58 мас. % (табл. 1). Значения марганцевого модуля Mn/Fe — 0.33 и 0.42; $\Sigma(\text{Si, Al, Ti, Ca, Mg, K, Na})$ — 26.47 и 23.59 мас. %, соответственно (см. табл. 1). Концентрации микроэлементов, за исключением бария и стронция, не превышают сотых долей процента. Содержание легких РЗЭ относительно низкое, аномалия церия отрицательна ($\text{Ce}_{\text{ан}}$ — 0.73 и 0.84 для ст. 1 и 3, соответственно) — все это типично для железо-марганцевых отложений приконтинентальной области океанов и морей [Дубинин, 2006]. В дискоидальных стяжениях следует отметить максимальную для изученных ЖМК концентрацию меди, в лепешковидных — кальция, бария и стронция, а также кобальта, свинца, серебра, иттрия и легких РЗЭ. Плитчатые ЖМО ст. 4 по отношению в ЖМК каньона Геральд (ст. 1, 3) характеризуются уменьшением

Таблица 1. Химический состав железо-марганцевых конкреций Чукотского моря и уровень концентрации в них основных рудных и нерудных элементов

Элемент	1	3	4	Элемент	1	3	4
Fe, мас. %	18.88 ^{7.36}	18.20 ^{4.34}	12.40 ^{2.76}	Cu, г/т	250.10 ^{1.91}	130.50 ^{1.23}	87.65 ^{2.11}
Mn	6.18 ^{266.48}	7.61 ^{230.91}	4.49 ^{9.68}	Co	170.00 ^{17.26}	212.00 ^{17.31}	109.00 ^{2.34}
P	0.46 ^{5.38}	0.58 ^{3.72}	0.10 ⁻	Ni	67.00 ^{3.49}	83.00 ^{2.77}	116.00 ^{1.71}
Si	18.46 ^{0.54}	11.07 ^{0.38}	21.45 ^{0.84}	Zn	151.00 ^{2.25}	150.00 ^{1.50}	229.00 ^{1.54}
Al	2.07 ^{0.41}	2.89 ^{0.46}	6.17 ^{0.96}	Pb	75.00 ^{6.31}	142.80 ^{10.65}	40.60 ^{3.75}
Ca	2.28 ^{2.78}	4.65 ^{4.35}	0.63 ^{0.52}	Cr	52.28 ^{0.94}	77.12 ^{0.93}	109.55 ^{1.19}
Mg	0.87 ^{0.94}	1.29 ^{0.87}	1.56 ^{1.03}	Ag*	1.83 ^{24.88}	3.06 ^{34.67}	1.15 ⁻
K	1.34 ^{1.03}	2.27 ^{1.45}	2.46 ⁻	Y	48.57 ^{3.44}	75.41 ^{4.87}	28.52 ^{1.01}
Na	1.37 ^{0.79}	1.32 ^{0.62}	1.56 ⁻	La	37.11 ^{1.95}	55.56 ^{2.99}	40.68 ^{1.17}
Ti	0.08 ^{0.35}	0.10 ^{0.28}	0.23 ^{0.52}	Ce	59.44 ⁻	103.60 ⁻	80.92 ⁻
Ba	0.07 ^{1.32}	0.10 ^{1.65}	0.05 ^{0.74}	Pr	8.56 ⁻	12.87 ⁻	10.12 ⁻
Sr	0.13 ^{8.29}	0.19 ^{10.45}	0.02 ^{0.57}	Nd	36.67 ⁻	55.48 ⁻	41.07 ⁻

Примечание. Морфологический тип ЖМК: 1 — дискоидальная (ст. 1), 3 — лепешковидная (ст. 3), 4 — плитчатая (ст. 4). Химический состав определен методами атомно-эмиссионной и масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой в лаборатории аналитической химии ДВГИ ДВО РАН (ответственный исполнитель Н.В. Зарубина). Основание степени — содержание элемента в железо-марганцевой конкреции; показатель степени — коэффициент концентрации ($K_{\text{конц}}$) элемента в железо-марганцевой конкреции по отношению к подстилающему донному осадку (знак минус означает, что для расчета $K_{\text{конц}}$ отсутствуют данные по концентрации элемента в осадке).

* Содержание серебра следует оценивать на уровне полуколичественного анализа.

доли рудного вещества ($\Sigma(\text{Fe}, \text{Mn}, \text{P})$ — 16.99 против 25.52 и 26.39 мас. %, соответственно) с одновременным увеличением содержания терригенной примеси ($\Sigma(\text{Si}, \text{Al}, \text{Ti}, \text{Ca}, \text{Mg}, \text{K}, \text{Na})$ — 34.06 мас. %). В плитчатых стяжениях ст. 4 отмечаются повышенные (до максимальных среди изученных ЖМК) концентрации таких элементов, как кремний, алюминий, магний, натрий, титан, никель, цинк, хром, и, соответственно, пониженные (до минимальных) — железа, марганца, фосфора, кальция, бария, стронция, меди, кобальта, свинца, серебра, иттрия. Для плитчатых ЖМО (как, собственно, и для ЖМК каньона Геральд) типична отрицательная цериевая аномалия (Ce_{an} — 0.87).

Сравнение полученных результатов с данными, опубликованными для ЖМК Чукотского моря другими исследователями [Калиненко, Павлидис, 1982; Батурин, Дубинчук, 2011], показало хорошую сходимость значений по большинству химических элементов. Однако выявлены и некоторые различия. В частности, для изученных нами конкреций отмечено пониженное содержание фосфора, а также аномально высокое (ст. 1, 3) и аномально низкое (ст. 4) — стронция (см. табл. 1). Обращает на себя внимание и высокое содержание свинца (142.80 г/т) в ЖМК ст. 3. Кроме того, согласно нашим данным, в чукотоморских ЖМК содержится заметно большее количество меди (87.65—250.10 против 3.00—47.10 г/т), хрома (55.28 против 24.6—33.1 г/т) и серебра, хотя при оценке содержания последнего (в связи с определением концентрации лишь на уровне полуколичественного анализа) следует быть особенно осторожными. У нас, содержание металла в различных морфологических типах ЖМК составляет: дискоидальные (ст. 1) — 1.83 г/т, лепешковидные (ст. 3) — 3.06 г/т, плитчатые (ст. 4) — 1.15 г/т. У других исследователей концентрация серебра в чукотоморских конкрециях несоизмеримо ниже — 0.03—0.09 г/т [Батурин, Дубинчук, 2011], в единичной пробе ЖМК каньона Геральд (определение выполнено более точным, чем ИСП-МС, нейтронно-активационным методом) — 0.03 г/т [Астахов и др., 2010в]. Таким образом, наиболее точным является, вероятно, содержание на уровне сотых долей г/т.

Для оценки степени подвижности химических элементов в процессе конкрециеобразования нами рассчитан коэффициент концентрации ($K_{конц.}$) некоторых из них в ЖМК по отношению к подстилающему осадку (см. табл. 1). Наиболее ярко выраженной способностью к концентрированию большинства элементов отличаются лепешковидные конкреции ст. 3, наименьшей — плитчатые ст. 4. Это, скорее всего, результат различного соотношения в них рудной и нерудной частей (1:1 и 1:2 соответственно). Интенсивнее всего в конкрециях, если смотреть в целом, накапливается марганец ($K_{конц.}$ до 266.48). Далее в порядке убывания следуют серебро (?), кобальт, свинец и стронций, железо и фосфор (см. табл. 1). Слабовыраженная способность к концентрированию наблюдается у иттрия, кальция (только для ЖМК каньона Геральд) и никеля, а также лантана, цинка, меди. Содержание бария, хрома, магния, калия в ЖМК остается практически на том же уровне, что и в осадке ($K_{конц.}$ около 1). Элементами, испытывающими разбавление в процессе конкрециеобразования, являются кремний, алюминий, натрий, титан ($K_{конц.} < 1$). Причем концентрация последних уменьшается с ростом содержания марганца, железа и целого ряда других металлов. Следует отметить, что в работах других исследователей [Калиненко, Павлидис, 1982; Батурин, Дубинчук, 2011] для ЖМК Чукотского моря отмечены практически аналогичные

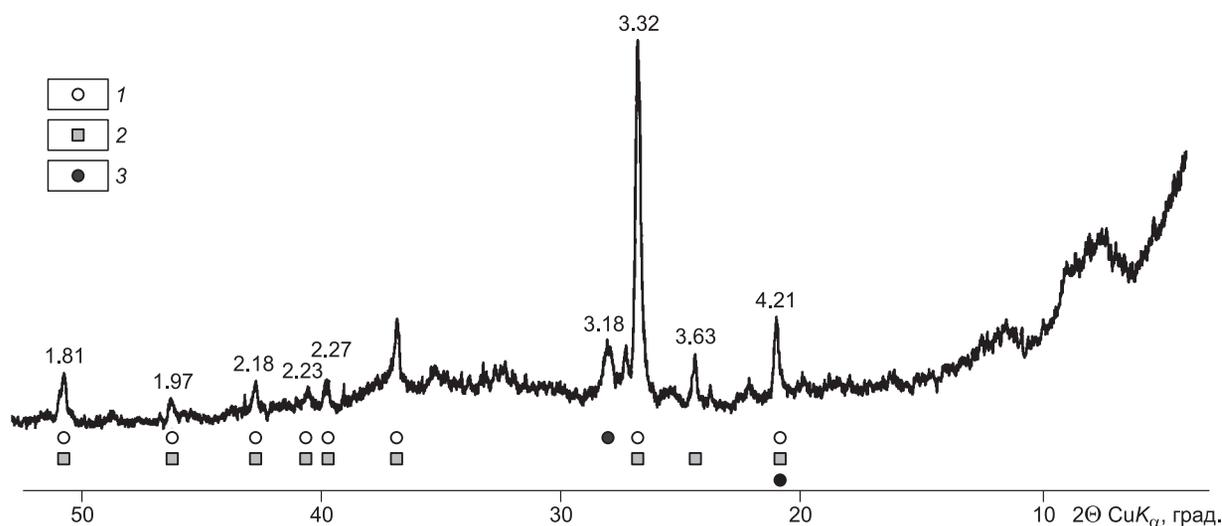


Рис. 3. Дифрактограмма образца железо-марганцевой конкреции Чукотского моря.

1—3 — наиболее интенсивные пики рентгеновского излучения, характерные для минералов фаз: 1 — α -кварца; 2 — штрэнгита; 3 — плагиоклазов.

Таблица 2. Химический состав зерен акцессорных рудных минералов и вмещающей матрицы в железо-марганцевых конкрециях Чукотского моря, мас. %

№ п/п	Fe	Mn	Cu	Zn	Sn	Ni	Pb	Sr	Cr	W	Ag	Au	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Th	O	Si	Al	Ca	Na	Mg	K	P	S	Cl	Сумма
1	24.82	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	49.03	7.41	2.07	1.97	2.47	1.51	1.25	5.40	—	0.61	96.53
2	2.00	40.17	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	27.68	4.92	2.09	1.51	2.59	0.92	1.19	—	0.21	0.16	83.44
3	2.33	0.60	90.64	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3.10	1.04	0.91	—	—	—	—	—	1.18	—	99.81
4	2.47	0.43	70.63	—	—	—	—	—	6.43	—	—	—	—	—	—	—	—	—	9.85	3.00	0.87	—	—	—	—	—	1.01	—	94.68
5	76.17	—	—	—	—	—	—	—	9.94	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4.40	1.22	0.72	0.23	0.98	0.23	0.36	—	0.41	—	94.67
6	50.35	1.76	—	—	—	5.97	—	—	10.52	—	—	—	—	—	—	—	—	—	11.65	9.26	3.17	—	0.99	0.56	0.85	—	0.26	—	95.33
7	1.67	—	39.42	33.26	0.76	21.99	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2.59	0.33	—	—	—	—	—	0.24	—	—	100.26
8	1.85	3.50	43.65	—	23.20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	16.87	3.95	1.78	0.52	—	0.60	—	0.22	0.32	0.26	96.72
9	6.69	2.48	—	47.74	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	27.82	8.48	1.10	0.62	—	0.86	0.26	0.41	0.18	0.48	97.12
10	0.61	1.02	0.79	—	89.76	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6.71	0.33	0.30	0.66	—	—	—	—	—	—	100.19
11	1.57	—	—	—	—	51.94	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	17.07	23.69	0.30	—	—	—	—	—	—	—	94.57
12	17.88	—	—	—	—	—	19.94	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	32.19	7.60	0.72	2.59	0.85	0.96	1.12	2.71	0.32	0.73	87.59
13	2.61	2.22	—	—	—	—	—	5.84	0.49	50.98	—	—	—	—	—	—	—	—	23.33	2.33	—	10.68	0.39	—	—	0.62	0.25	0.53	100.29
14	1.17	0.54	—	—	—	—	—	—	—	—	95.71	—	—	—	—	—	—	—	—	0.49	—	—	—	0.49	—	—	—	—	98.40
15	2.04	1.75	—	—	—	—	—	—	—	—	67.10	—	—	—	—	—	—	—	22.03	4.39	2.6	—	—	0.62	—	—	—	—	100.54
16	1.47	0.34	—	—	—	—	—	—	—	—	5.24	41.60	—	—	—	—	—	—	18.39	11.16	2.24	0.21	0.51	0.22	0.39	—	—	—	81.79
17	0.49	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	17.21	35.71	3.56	8.19	—	—	15.17	0.71	2.66	0.42	—	—	—	0.21	0.46	84.79	
18	0.97	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	10.64	24.19	2.86	11.30	2.20	—	23.32	0.93	0.28	—	—	—	—	—	—	—	91.14
19	1.95	—	—	—	—	—	—	3.84	—	—	—	—	3.00	7.58	0.88	3.63	—	—	44.21	3.69	14.45	0.27	0.31	0.51	10.18	0.32	—	94.82	

Матрица

Акцессорные рудные минералы

Примечание. Электронно-микрондовая съемка проведена авторами статьи в лаборатории рентгеновских методов ДВГИ ДВО РАН. Из-за чрезвычайно малых размеров зерен акцессорных рудных минералов в ходе электронно-микрондовой съемки, как правило, захватывалась окружающая матрица, которая (в том или ином количестве) присутствует в химическом составе практически всех проанализированных рудных зерен. Матрица ЖМК рыхлая, поэтому сумма элементов часто не достигает 100 мас. %.

ряды подвижности элементов. Заметно разнятся лишь значения $K_{\text{конц}}$ фосфора, бария и стронция (в отдельных случаях), свинца, хрома.

Минеральный состав. По данным рентгеноструктурного анализа, основным рудным минералом (вне зависимости от морфотипа ЖМК) является штрэнгит $\text{Fe}^{3+}[\text{PO}_4] \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (рис. 3). Гидроксиды марганца, скорее всего, обладают аморфной структурой, так как были идентифицированы лишь при электронно-микроскопической съемке. Терригенная компонента представлена главным образом кварцем и плагиоклазами, в меньшей степени — глинистыми минералами группы каолинита, хлоритами, слюдами. Несколько повышенное (относительно других морфотипов ЖМК) количество глинистого вещества — отличительная черта плитчатых стяжений.

Согласно другим исследователям, «реальная аутигенная минералогическая фаза, образующая главную часть (чукотских) конкреций, — это колломорфные высокогидратированные окислы железа и марганца» [Калиненко, Павлидис, 1982, с. 121]. С помощью просвечивающего микроскопа также установлено, что «в той или иной степени окристаллизованные минеральные фазы железа и марганца представлены главным образом гематитом, вернадитом и асболоном» [Батурин, Дубинчук, 2011, с. 93].

Химический состав микроучастков поверхности ЖМК. Как показало электронно-микроскопическое изучение шлифов, в ЖМК Чукотского моря встречаются участки различного химического состава. Съемка подтвердила данные рентгеноструктурного анализа, согласно которому основным рудным минералом конкреций является штрэнгит: в образцах выявлены участки железо-кремнисто-фосфатного состава (табл. 2, № 1), нередко в виде цемента терригенных зерен кварца. Последнее особенно свойственно дискоидальным стяжениям ст. 1. Кроме того, локализованы не обнаруженные при рентгенофазовом анализе аморфные гидроксиды марганца (см. табл. 2, № 2), более распространенные в ЖМК ст. 3 и 4. Встречены железо-кремнистая и кремнистая фазы. Обнаружены участки с существенным содержанием алюминия и кальция (до 7.87 и 8.64 мас. % соответственно): первое характерно для плитчатых стяжений, второе — лепешковидных. Подчеркнутая особенность находит свое непосредственное отражение в валовом химическом составе соответствующих морфотипов ЖМК: плитчатые конкреции отличаются максимальным содержанием алюминия, лепешковидные — кальция (см. табл. 1).

Структуры изученных ЖМК свидетельствуют о стадийности процесса рудообразования: железистая фаза, судя по всему, первична по отношению к марганцевой. Для последней типично обособление в виде микропрожилков, пятен сложной формы (нередко вдоль трещин, на границах основной массы и терригенных зерен), ажурно-дендровидное переслаивание с минеральными массами железо-кремнисто-фосфатного состава, как правило, разбитыми густой системой субпараллельных трещин (рис. 4, а).

Широко распространены в ЖМК хорошо окатанные зерна кварца, в меньшей степени — алюмосиликатов (см. рис. 4, б). Намного реже встречаются натриевый и калиевый полевые шпаты, глинистые минералы. Единичны включения доломита, сильвина, минералов группы граната (?).

Акцессорные рудные минералы. Впервые для ЖМК Чукотского моря установлено, что некоторые цветные (Cu, Zn, Pb, Sn, Ni, W, Bi, Cr, Ti), благородные (Ag, Au), редкие (Y, Zr) и редкоземельные (La-Nd) металлы образуют самостоятельные минеральные фазы — самородную, интерметаллоидную, оксидную; реже встречаются вольфраматы, силикаты, фосфаты. Ранее были опубликованы данные лишь о

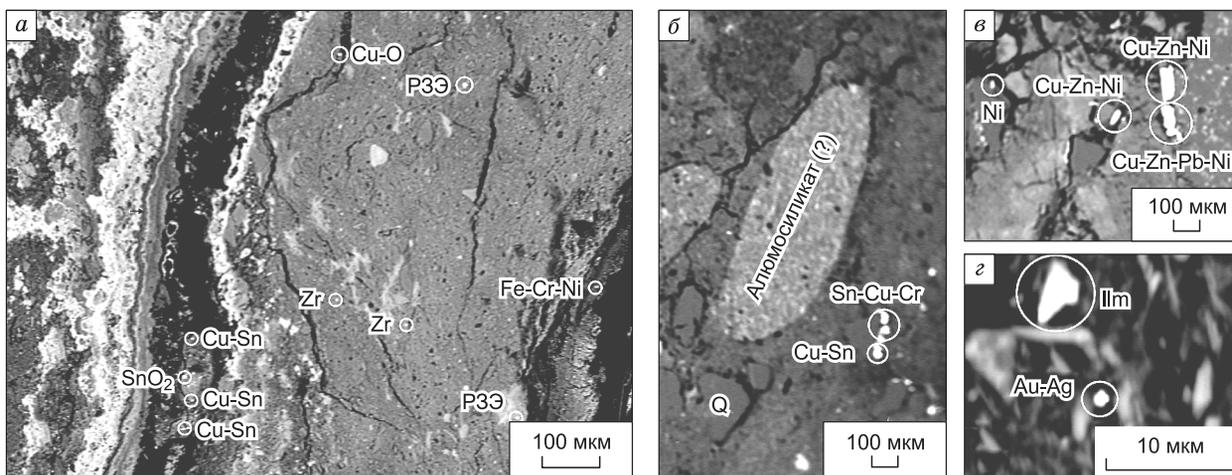


Рис. 4. Общий вид поверхности шлифов железо-марганцевых конкреций Чукотского моря в отраженных электронах.

а—г — описание см. в тексте. P3Э — минеральные фазы редкоземельных элементов, Ilm — ильменит, Q — кварц, Zr — циркон.

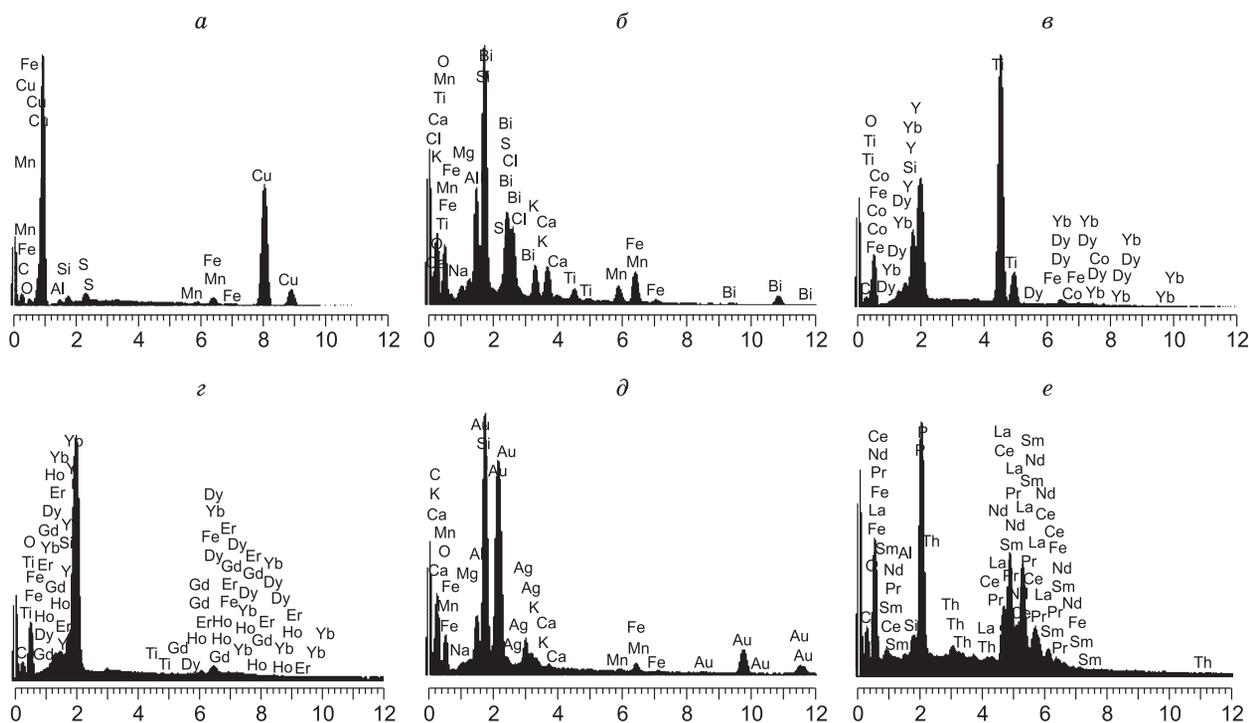


Рис. 5. Энергодисперсионные рентгеновские спектры зерен аксессуарных рудных минералов в железо-марганцевых конкрециях Чукотского моря.

a–e — минеральные фазы: *a* — самородная медь, частично окисленная; *б* — соединение висмута с кислородом (?); *в* — соединение Ti-Y-O (?) с примесью редких земель; *г* — ксенотим YPO_4 ; *д* — электрум Au-Ag; *е* — монацит $(Ce, La...)PO_4$. По оси абсцисс — энергия (кэВ), по оси ординат — интенсивность излучения.

находке в чукотоморских ЖМК микроскопических вкраплений пирита [Шнюков и др., 1987], а также рассеянных игольчатых кристаллитов рутила длиной до 3–4 мкм и единичных частиц самородного золота около 1 мкм в поперечнике [Батулин, Дубинчук, 2011].

Группа выявленных нами в ЖМК Чукотского моря самостоятельных минеральных фаз *цветных металлов* представлена самородной медью, часто окисленной (рис. 5, *a*; см. табл. 2, № 3); никелем (?) (см. рис. 4, *в*; табл. 2, № 11); 2–4-компонентными природными сплавами — латунью, иногда со свинцом и никелем, а также бронзой (см. рис. 4, *a–в*; табл. 2, № 7, 8, соответственно) и сплавом меди с хромом (см. табл. 2, № 4). Обнаружено в значительной степени окисленное соединение, в котором доминирует олово, а медь и хром находятся в подчиненном количестве. Встречены единичные кислородсодержащие выделения со значительным содержанием свинца (см. табл. 2, № 12), оксиды олова (см. рис. 4, *a*; табл. 2, № 10), титана (см. рис. 4, *г*), цинка, в ряде случаев с существенной долей алюминия (13.49 мас. %). Интересным представляется химический состав двух рудных зерен: Cu-O и Ti-Y-O с примесью РЗЭ (см. рис. 4, *a*; 5, *в*). В образце плитчатой ЖМК ст. 4 на краю трещины в марганцево-железо-кремнистой матрице найдено единичное зерно шеелита (?) со значительной примесью стронция (см. табл. 2, № 13), а также зерно, в состав которого входит более 20 мас. % висмута (см. рис. 5, *б*). Из сульфатов нами выявлено лишь несколько включений содержащего стронций (2.9 мас. %) барита. В плитчатой ЖМК ст. 4 найдено единичное зерно сфена $CaTiSiO_5$. Размер обнаруженных минеральных выделений цветных металлов, как правило, не превышает нескольких микрометров, однако наблюдаются отдельные частицы меди размером 4.5×14.5 мкм, оксида олова — 11.8×17.3 мкм, латуни — до 37.5×100.0 мкм. Форма включений чаще округлая, но встречается и вытянутая вплоть до палочковидной, сложная, а также угловатая, характерная для выделений титана (см. рис. 4, *г*). Отмечено разнообразие химического состава вмещающей матрицы с преобладанием железо-кремнистых комбинаций. Кроме того, зерна цветных металлов обнаружены на границе участков разного химического состава, в том числе терригенных зерен, а также вдоль и внутри трещин. *Благороднометаллическая минерализация* выявлена только в лепешковидных (ст. 3) и плитчатых (ст. 4) ЖМК и проявлена в форме пылеватой вкрапленности, как правило, изометричных округлых зерен кислородсодержащего серебра (иногда с примесью теллура до 0.19 мас. %) в матрице

преимущественно железо-кремнистого, реже марганцево-кремнистого состава (см. табл. 2, № 15). Включения благородных металлов (БМ) отмечены и в трещинах, а также на границе терригенных зерен кварца и матрицы, в зонах контакта участков различного состава. В плитчатой ЖМК ст. 4 идентифицировано два включения, по химическому составу соответствующих самородному серебру (см. табл. 2, № 14). Здесь же, в кремнистой матрице, встречено угловатое зерно электрума Au-Ag размером 0.87×1.02 мкм (см. рис. 4, з; 5, д; табл. 2, № 16). Из *редких металлов* обнаружены цирконий и иттрий. Первый металл во всех морфотипах ЖМК присутствует в виде немногочисленных выделений циркона размером до 10×17 мкм в матрице различного состава (см. рис. 4, а). Постоянной рудной примесью в цирконе является гафний. Единственным выявленным в ЖМК минералом иттрия, причем только в образце ст. 4, стал ксенотим с примесью РЗЭ (см. рис. 5, з). Интересные результаты получены нами при анализе химического состава одного из рудных зерен. Вероятнее всего, это амагутилит — разновидность циркона, содержащая до 16 % Y_2O_3 и 4—5 % P_2O_5 . При описании минеральных фаз, содержащих в своем составе редкие металлы, следует еще раз отметить соединение Ti-Y-O с примесью РЗЭ (см. рис. 5, в). Из *редкоземельных элементов* в ЖМК встречены все легкие, за исключением прометия, а также некоторые средние (Sm, Gd, Dy, Ho) и тяжелые (Er, Yb). Причем именно легкие РЗЭ образуют самостоятельные минеральные фазы, как правило, оксидные, реже — соединения с алюминием и кислородом (см. рис. 4, а; табл. 2, № 17). В лепешковидной и плитчатой ЖМК ст. 3 и 4 выявлены зерна, химический состав которых соответствует фосфату легких РЗЭ — монациту (см. рис. 5, е; табл. 2, № 18). В качестве второстепенных компонентов редкие земли входят в состав ксенотима (см. рис. 5, з). Экзотичен состав зерна, в котором кроме РЗЭ и кислорода заметную роль играют алюминий, фосфор, а также стронций (см. табл. 2, № 19). Возможно, это ассоциация минералов группы флоренсита $CaAl_3[PO_4]_2[OH]_6$ — голяцита $SrAl_3[PO_4][HPO_4][OH]_6$. Что касается морфологии минеральных выделений РЗЭ, то они представлены микрозернами, главным образом изометричными, реже вытянутыми или сложной формы размером до 51×65 мкм в матрице, преимущественно железо-кремнистого состава. Зерна встречаются по одному или небольшими группами. В лепешковидной ЖМК ст. 3 обнаружена целая россыпь из нескольких десятков включений минералов РЗЭ в ассоциации с минеральными выделениями других металлов.

Анализируя полученные данные, можно сделать вывод о том, что наиболее ярко и разнообразно акцессорная рудная минерализация проявлена в плитчатом стяжении (ст. 4), наименее — дискоидальном (ст. 1), хотя по максимальному содержанию большинства рудных компонентов первое место плитчатые ЖМК уже делят с лепешковидными (ст. 3) стяжениями (см. табл. 1). Получается, что общее содержание какого-либо металла в ЖМК не всегда определяет количество зерен его минералов. Видимо, то или иное количество элемента идет на образование собственных минеральных фаз, а часть находится в рассеянном состоянии в других (рудных и нерудных) минералах, причем это соотношение может варьироваться.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенные исследования позволили выявить в ЖМК Чукотского моря некоторые особенности, на которые следует обратить особое внимание. Во-первых, ЖМК различны по внешним признакам. Это дало возможность выделить среди них три морфологических типа — дискоидальный, лепешковидный и плитчатый, каждому из которых присущи определенные структурные особенности, химический и минеральный состав, акцессорная рудная минерализация. Ранее подобные морфотипы уже были описаны как для Чукотского моря [Калиненко, Павлидис, 1982; Батулин, Дубинчук, 2011], так и других арктических морей, например, Лаптевых и Бофорта [Naidu, 1974; Калягин и др., 2000]. Считается, что различия в морфологии — результат неодинаковых физико-химических и гидрогеодинамических условий среды [Калягин и др., 2000]. Значительная роль в образовании железо-марганцевых осадков Чукотского моря, согласно работе Е.Ф. Шнюкова с соавторами [1987], принадлежит тихоокеанским водам, поступающим через Берингов пролив. Отмечено, что на основной площади чукотоморского шельфа, в зонах, обогащенных органическим веществом (в подобных условиях обнаружены дискоидальные и, возможно, лепешковидные ЖМК ст. 1, 3), диагенез донных осадков происходит в восстановительной обстановке, тогда как в северной, более глубоководной части моря, в районах развития верхнего коричневатобурого слоя осадков с повышенными содержаниями железа и марганца и низкими концентрациями органического вещества (здесь на ст. 4 подняты плитчатые ЖМК) — в окислительной [Логвиненко, Огородников, 1980]. В описании ЖМК Ботнического залива (Балтийское море) указано [Ingri, Pontér, 1987], что плоские стяжения и дискоидальные конкреции образуются близко к границе восстановленных и окисленных осадков, а сфероидальные обнаруживаются всегда выше этой границы в окисленных осадках.

Что касается химического состава, то, по нашим данным, в рудной части чукотоморских ЖМК, вне зависимости от морфотипа, преобладает железо. По значению марганцевого модуля (Mn/Fe —

0.33—0.42) их можно причислить к марганцево-железистым [Скорнякова, 1976]. Именно к этому типу относятся, за редкими исключениями, практически все конкреции мелководных осадков морей [Волков, 1979]. Содержание фосфора, накопление которого вообще свойственно мелководным морским конкрециям [Волков, 1979], в изученных нами образцах ниже значений, полученных для ЖМК Чукотского моря ранее: 0.10—0.58 (см. табл. 1) против 0.77—2.39 мас. % [Калиненко, Павлидис, 1982; Батурин, Дубинчук, 2011]. Интересными представляются данные по увеличению содержания фосфора в ЖМК при движении от их верхней части (1.57 мас. %) через центральную (1.83 мас. %) к нижней (2.23 мас. %) [Батурин, Дубинчук, 2011]. Подобная тенденция отмечена и для некоторых других элементов (Fe, As, Ga, Sr, Te, V, Zn).

Редко для морских и глубоководных океанских ЖМО наблюдается положительная корреляция концентраций фосфора и железа. Такая зависимость объясняется связыванием элементов в общую минеральную фазу. В нашем случае это штрэнгит.

Считается [Гуревич, Яковлев, 1993], что в процессе формирования шельфовых ЖМО большую роль играет диффузионное и медленное фильтрационное поступление седиментационно-диагенетических восстановленных поровых растворов, несущих ионы железа и марганца из бассейнов современной аккумуляции на участки замедленной и «нулевой» седиментации. Имеющиеся литературные данные позволяют утверждать, что фосфор, подобно железу и марганцу, а также некоторым другим химическим элементам, поступает в ЖМК континентального шельфа из толщи осадков. Наиболее интенсивно процесс протекает в осадках районов с высокой биологической продуктивностью, характеризующихся большим исходным содержанием $C_{орг}$. [Савенко, 2010]. Интенсивность первичной продукции в значительной мере зависит от доступности лимитирующих ее биогенных элементов, в первую очередь фосфора. Он, растворенный в воде, потребляется фитопланктоном и поступает в составе биогенного детрита на дно [Froelich et al., 1982; Батурин, 2007]. Высвобождение элемента при деструкции органического вещества (ОВ) происходит уже в толще осадков, в результате чего в поровых растворах создаются концентрации растворенного минерального фосфора, достигающие 5—10 мг/л [Brooks et al., 1968; Савенко, 2010]. В вертикальном разрезе осадков подводных окраин континентов содержание элемента в поровых водах обычно возрастает относительно придонной воды, образуя пик на горизонте 10—30 см [Батурин, 2003]. Во многих работах отмечается, что в однородных приконтинентальных и гемипелагических осадках верхний слой обогащен фосфором по сравнению с нижележащим, что свидетельствует о его постседиментационной миграции к поверхности раздела вода—дно и частичном возвращении в водную толщу [Волков, Ягодинская, 1979; Reimers et al., 1996]. Что касается Чукотского моря, то при изучении биогеохимических процессов в его воде и донных отложениях обнаружены максимальные концентрации биогенных элементов (N, P, Si) и скорости микробного процесса сульфатредукции в поверхностном слое (0—3 см) осадков [Леин и др., 2007]. Предположено, что особенности биогеохимических процессов в море обусловлены сложной динамикой вод, высокой первичной продукцией (110—1400 мгС/м² сут), малой глубиной водоема, редуцированной пищевой цепью, высокой активностью микробных процессов. Полученные результаты свидетельствуют в пользу масштабной деструкции ОВ на геохимическом барьере вода—дно. Экспериментальные данные доказывают высокую ежегодную скорость минерализации ОВ на дне Чукотского моря [Леин и др., 2007]. Выводы подтверждаются и результатами других тематических исследований [Grebmeier et al., 2006; Саввичев и др., 2007; Колесник и др., 2010].

В ходе изучения под микроскопом и электронно-микрозондовым анализом во всех морфотипах ЖМК Чукотского моря (главным образом лепешковидном и плитчатом) отмечено чередование железо-марганцевых слоек, а также частое присутствие согласно залегающих тонких прослоев железо-фосфатного состава. Подобные текстурно-структурные особенности обычно наблюдаются при фракционировании марганца и железа в поверхностном полужидком слое осадков, что возможно при понижении окислительно-восстановительного потенциала Eh в ходе разложения детритного ОВ [Успенская, Скорнякова, 1991].

Учитывая приведенные аргументы, можно утверждать, что формирование изученных ЖМК проходило при активном участии диагенетических процессов, мобилизующих из подстилающей толщи осадков железо, марганец, фосфор и, возможно, некоторые другие элементы. Такой вывод согласуется с мнением других исследователей [Калиненко, Павлидис, 1982].

По нашим данным, содержания металлов (за исключением железа и марганца) в ЖМК Чукотского моря невысоки и часто не достигают даже сотых долей процента, что на несколько порядков меньше, чем в океанских ЖМО, концентрации полезных рудных микрокомпонентов (Cu, Ni, Co) в которых могут достигать первых процентов [Андреев, 1994]. Впрочем, такая особенность присуща всем морским конкрециям и коркам [Волков, 1979].

В ходе электронно-микрозондового анализа впервые для Чукотского моря установлено, что цветные, благородные, редкие и редкоземельные металлы (Cu, Zn, Sn, Ni, Pb, W, Bi, Cr, Ti, Ag, Au, Y, Zr,

La-Nd) образуют в ЖМК самостоятельные минеральные фазы: самородные элементы, интерметаллоиды, оксиды, значительно реже вольфраматы, фосфаты, силикаты. Примечательно полное отсутствие минералов кобальта. При этом некоторое его количество все же содержится в изученных ЖМК. Последнее, скорее всего, говорит о сорбции кобальта минералами железа и марганца. Бросается в глаза и отсутствие сульфидно-сульфатных фаз (за исключением барита). Необходимо отметить, что вопрос об источнике акцессорной рудной минерализации в железомарганцевых конкрециях и корках Мирового океана до сих пор считается дискуссионным и трактуется с различных позиций. Рассматриваются варианты осаждения металлов из морской воды и вхождения их в кристаллическую решетку основных рудных минералов железа и марганца, поступление в результате гальмиролиза пород океанического дна, привнос «снизу» (из магматического источника и с газогидротермальными флюидами). Существует и гипотеза «космогенных шариков». Что касается ЖМК Чукотского моря, то, на наш взгляд, наиболее вероятным источником акцессорной рудной минерализации в них являются подвергшиеся высокотемпературному флюидному воздействию осадки, захваченные в ходе роста стяжений. Попытаемся аргументировать свою позицию. Начнем с того, что значительная часть рудных микрозерен, подобных выявленным нами в железо-марганцевых стяжениях Чукотского моря, была обнаружена в ЖМО, базальтоидах, осадках и взвесьях различных сегментов Мирового океана (включая гидротермально активные), а также в продуктах извержений вулканов суши [Toutain et al., 1995; Давыдов и др., 1998; Карпов, Мохов, 2004; Торохов, Мельников, 2005; Астахова и др., 2010; Астахова, Саттарова, 2012]. По мнению М.П. Давыдова с соавторами [1998], образование, например, самородных металлов и интерметаллидов лучше всего объясняется с позиций гипотезы существования трансмагматических мантийных металлоносных флюидов, в основном состоящих из CH_4 , H_2 , CO [Новгородова, 1983]. «Под воздействием этих флюидов, проникающих к поверхности Земли по зонам повышенной проницаемости, <...> происходит металлизация как базальтовых тел (расплавов?), так и постмагматических эманаций. Признаки металлизации <...> установлены при изучении эдафогенной составляющей металлоносных осадков, отложившихся на флангах гидротермально-активных сегментов ВТП (Восточно-Тихоокеанского поднятия)» [Давыдов и др., 1998, с. 27]. При этом отмечается, что поступление металлоносных флюидов возможно не только в рифтовых зонах океана.

Несмотря на то что Чукотское море относится к пассивной континентальной окраине, на его дне выделены участки со специфическими условиями осадконакопления, что обусловлено влиянием эндогенных водных или газовых источников [Астахов и др., 2008]. По результатам геолого-геофизических исследований эти участки объединяются в субмеридионально вытянутую зону — зону современной рифтогенной деструкции земной коры, частично выраженную в рельефе дна (Чукотская котловина — Чукотский грабен (каньон Геральд) — Берингов пролив) и имеющую продолжение на континентальном блоке. Кроме всего прочего [Аветисов, 1996; Поляк и др., 2008], в пределах зоны отмечаются повышенные и аномально высокие содержания в осадках некоторых металлов (Fe, Mn, BM, Co, Zn, V, Hg) [Астахов и др., 2008, 2010б, в]. По мнению А.С. Астахова с соавторами [2010б, с. 215], условия формирования ЖМК каньона Геральд (конкреции отличаются высоким (1.46 г/т) содержанием платины) определены «влиянием флюидодинамических процессов, характерных для современной стадии развития грабен-рифтовой системы. При последующих постседиментационных преобразованиях эти конкреции, скорее всего, не сохраняются, но накопленные в них металлы могут остаться в осадочной толще». Наше предположение о высокотемпературном флюидном источнике акцессорной рудной минерализации в ЖМК Чукотского моря подтверждается и данными об обогащении конкреций такими элементами-индикаторами гидротермального процесса, как ртуть, молибден и литий [Батурин, Дубинчук, 2011].

ВЫВОДЫ

1. Среди ЖМК Чукотского моря выделено три морфотипа: дискоидальный, лепешковидный, плитчатый. Каждому из них (вероятно, сформировавшемуся при особых физико-химических и гидрогеодинамических условиях среды) присущи определенные структурные особенности, химический и минеральный состав, акцессорная рудная минерализация.

2. Все ЖМК Чукотского моря (вне зависимости от морфотипа) железистые. В образовании их рудного вещества участвуют также марганец и фосфор. Велика доля терригенной примеси. Соотношение рудной (Fe, Mn, P) и нерудной (Si, Al, Ti, Ca, Mg, K, Na) частей составляет: для дискоидального и лепешковидного морфотипов — 1:1, плитчатого — 1:2.

3. Концентрации микроэлементов в ЖМК Чукотского моря низкие и не превышают (за исключением Ba и Sr) сотых долей процента.

4. По степени подвижности в процессе образования чукотоморских ЖМК химические элементы делятся на: в той или иной мере накапливающиеся в конкрециях (Mn, Ag, Co, Pb и Sr, Fe, P, Y, Ca и Ni, La, Zn, Cu), не накапливающиеся (Ba, Cr, Mg, K), испытывающие разбавление (Si, Al, Na и Ti).

5. Основу рудной части ЖМК (вне зависимости от морфотипа) составляют дигидрофосфат железа (штрентит) и аморфные гидроксиды марганца. Терригенная компонента представлена кварцем и плагиоклазами, а также глинистыми минералами. Несколько повышенное содержание последних — отличительная черта плитчатых ЖМК.

6. Для всех ЖМК, в особенности лепешковидных и плитчатых, характерно чередование слоев, сложенных рудным веществом различного химического состава (железо-марганцевого, марганцевого гидроксидного, железо-фосфатного) и нерудным мелкообломочным и глинистым материалом.

7. Впервые изученная в ЖМК Чукотского моря акцессорная рудная минерализация представлена пылевой вкрапленностью преимущественно изометричных округлых зерен металлов: Cu, Zn, Sn, Ni, Pb, W, Bi, Cr, Ti, Ag, Au, Y, Zr, La-Nd. Преобладающие минеральные формы выделения последних — самородная, интерметаллоидная, оксидная; второстепенные — вольфраматы, фосфаты, силикаты. Наиболее ярко и разнообразно акцессорная рудная минерализация проявлена в плитчатых стяжениях, наименее — дискоидальных.

8. ЖМК Чукотского моря имеют диагенетическую природу. При этом источником микроскопических вкраплений в них различных рудных минералов, вероятнее всего, являются подвергшиеся воздействию высокотемпературных флюидов осадки, захваченные в ходе роста ЖМК.

Работа выполнена при поддержке грантов ДВО РАН (№ 11-III-B-07-144, 11-III-B-07-145, 12-III-B-07-125, 12-III-B-07-126).

ЛИТЕРАТУРА

Аветисов Г.П. Сейсмоактивные зоны Арктики. СПб., ВНИИОкеангеология, 1996, 183 с.

Андреев С.И. Металлогения железомарганцевых образований Тихого океана. СПб., Недра, 1994, 191 с.

Астахов А.С., Ван Р., Гао А., Иванов М.В. Литохимические признаки современной геологической активности Чукотского моря // ДАН, 2008, т. 422, № 5, с. 683—687.

Астахов А.С., Босин А.А., Колесник А.Н., Коршунов Д.А., Крэйн К., Логвина Е.А. Геологическое исследование в Чукотском море и примыкающих районах Северного Ледовитого океана в экспедиции RUSALCA-2009 // Тихоокеанская геология, 2010а, т. 29, № 6, с. 110—116.

Астахов А.С., Горячев Н.А., Михалицына Т.И. Об условиях формирования обогащенных золотом горизонтов рудовмещающих черносланцевых толщ (на примере пермских и современных морских отложений Северо-Востока Азии) // ДАН, 2010б, т. 430, № 2, с. 212—217.

Астахов А.С., Колесов Г.М., Дударев О.В., Иванов М.В., Колесник А.Н. Благородные металлы в донных осадках Чукотского моря // Геохимия, 2010в, № 12, с. 1289—1301.

Астахова Н.В., Саттарова В.В. Формы выделения и особенности распространения редкоземельных элементов в железомарганцевых корках Японского моря // Геология и геофизика, 2012, т. 53 (7), с. 851—860.

Астахова Н.В., Колесник О.Н., Съедин В.Т. Цветные, благородные и редкоземельные металлы в железомарганцевых корках и базальтах возвышенности Беляевского (Японское море) // Вест. КРАУНЦ. Серия «Науки о Земле», 2010, № 2, вып. 16, с. 231—245.

Батурич Г.Н. Цикл фосфора в океане // Литология и полезные ископаемые, 2003, № 2, с. 126—146.

Батурич Г.Н. К вопросу о соотношении между первичной продукцией органического углерода в океане и фосфатонакоплением (голоцен—поздняя юра) // Литология и полезные ископаемые, 2007, № 4, с. 356—389.

Батурич Г.Н., Дубинчук В.Т. О составе железомарганцевых конкреций Чукотского и Восточно-Сибирского морей // ДАН, 2011, т. 440, № 1, с. 93—99.

Волков И.И. Железомарганцевые конкреции // Океанология. Химия океана / Ред. И.И. Волков. М., Наука, 1979, т. 2, с. 414—467.

Волков И.И., Ягодинская Т.А. Переходная группа элементов. Фосфор, редкоземельные элементы и иттрий // Литология и геохимия осадков Тихого океана / Ред. В.Н. Холодова. М., Наука, 1979, с. 203—224.

Голева Р.В. К проблеме изучения и освоения минерально-сырьевых ресурсов Мирового океана // Рациональное освоение недр, 2010, № 1, с. 53—61.

Гуревич В.И., Яковлев А.В. Железисто-марганцовистые корки и конкреции Карского моря // Кобальтоносные железомарганцевые корки Тихого океана (труды ВНИИОкеангеология). СПб., ВНИИОкеангеология, 1993, с. 97—111.

Давыдов М.П., Судариков С.М., Колосов О.В. Самородные металлы и интерметаллические соединения в осадках и взвешях гидротермально-активных сегментов Восточно-Тихоокеанского поднятия // Литология и полезные ископаемые, 1998, № 1, с. 17—29.

Дубинин А.В. Геохимия редкоземельных элементов в океане. М., Наука, 2006, 360 с.

Калиненко В.В., Павлидис Ю.А. Железистые конкреции Чукотского моря // Проблемы геоморфологии, литологии и литодинамики шельфа. М., Наука, 1982, с. 115—129.

Калягин А.Н., Тищенко П.Я., Гуков А.Ю., Волкова Т.И., Куриленко Л.Н., Чичкин Р.В., Семилетов И.П. Новые типы железомарганцевой минерализации на шельфе моря Лаптевых // Гидрометеорологические и биогеохимические исследования в Арктике (труды Арктического регионального центра). Владивосток, Дальнаука, 2000, т. 2, ч. 1, с. 81—89.

Карпов Г.А., Мохов А.В. Акцессорные самородные рудные минералы эруптивных пеплов андезитовых вулканов Камчатки // Вулканология и сейсмология, 2004, № 4, с. 41—49.

Колесник А.Н., Босин А.А., Марьяш А.А. Условия накопления органического вещества в донных осадках шельфа Чукотского моря // Геология и геоэкология континентальных окраин Евразии. М., GEOS, 2010, вып. 2, с. 138—146.

Кошелева В.А., Яшин Д.С. Донные осадки Арктических морей России. СПб., ВНИИОкеангеология, 1999, 286 с.

Леин А.Ю., Саввичев А.С., Русанов И.И., Павлова Г.А., Беляев Н.А., Крейн К., Пименов Н.В., Иванов М.В. Биогеохимические процессы в Чукотском море // Литология и полезные ископаемые, 2007, № 3, с. 247—266.

Логвиненко Н.В., Огородников В.И. Современные донные осадки шельфа Чукотского моря // Океанология, 1980, т. 20, вып. 4, с. 681—687.

Новгородова М.И. Самородные металлы в гидротермальных рудах. М., Наука, 1983, 286 с.

Павлидис Ю.А. Обстановка осадконакопления в Чукотском море и фациально-седиментологические зоны его шельфа // Проблемы геоморфологии, литологии и литодинамики шельфа. М., Наука, 1982, с. 47—76.

Поляк Б.Г., Дубинина Е.О., Лаврушин В.Ю., Чешко А.Л. Изотопный состав воды гидротерм Чукотки // Литология и полезные ископаемые, 2008, № 5, с. 480—504.

Саввичев А.С., Русанов И.И., Пименов Н.В., Захарова Е.Е., Веслополова Е.Ф., Леин А.Ю., Крейн К., Иванов М.В. Микробные процессы циклов углерода и серы в Чукотском море // Микробиология, 2007, т. 76, № 5, с. 682—693.

Савенко А.В. О физико-химическом механизме диагенетического формирования современных океанских фосфоритов // Геохимия, 2010, № 2, с. 208—215.

Скорнякова Н.С. Химический состав железомарганцевых конкреций Тихого океана // Железомарганцевые конкреции Тихого океана (труды ИО АН СССР) / Ред. П.Л. Безруков. М., Наука, 1976, т. 109, с. 190—240.

Торохов М.П., Мельников М.Е. Акцессорные минералы в водородных железомарганцевых корках Тихого океана — россыпной механизм накопления // ДАН, 2005, т. 405, № 4, с. 511—513.

Успенская Т.Ю., Скорнякова Н.С. Текстуры и структуры океанских железомарганцевых конкреций и корок. М., Наука, 1991, 240 с.

Шнюков Е.Ф., Огородников В.И., Красовский К.С. Железомарганцевые конкреции морей СССР // Геологический журнал, 1987, т. 47, № 1, с. 32—43.

Brooks R.R., Presley B.J., Kaplan I.R. Trace elements in the interstitial waters of marine sediments // Geochim. Cosmochim. Acta, 1968, v. 32, № 4, p. 397—414.

Froelich P.N., Bender M.L., Luedtke N.A., Heath G.R., DeVries T. The marine phosphorus cycle // Amer. J. Sci., 1982, v. 282, № 4, p. 474—511.

Grebmeier J.M., Cooper L.W., Feder H.M., Sirenko B.I. Ecosystem dynamics of the Pacific-influenced Northern Bering and Chukchi Seas in the Amerasian Arctic // Progress in Oceanography, 2006, v. 71, p. 331—361.

Ingri J., Pontér C. Rare earth abundance patterns in ferromanganese concretions from the Gulf of Bothnia and the Barents Sea // Geochim. Cosmochim. Acta, 1987, v. 51, № 1, p. 155—161.

Naidu A.S. Sedimentation in the Beaufort Sea: a synthesis // Marine Geology and Oceanography of the Arctic Seas / Ed. Y. Herman. Berlin, Heidelberg, New York, Springer-Verlag, 1974, p. 173—190.

Reimers C.E., Ruttenberg K.C., Canfield D.E., Christiansen M.B., Martin J.B. Porewater pH and authigenic phases formed in the uppermost sediments of the Santa Barbara Basin // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1996, v. 60, № 21, p. 4037—4057.

Toutain J.-P., Quisefit J.-P., Briole P., Aloupogiannis P., Blanc P., Robaye G. Mineralogy and chemistry of solid aerosols emitted from Mount Etna // *Geochem. J.*, 1995, v. 29, p. 163—173.

*Рекомендована к печати 18 октября 2012 г.
А.С. Борисенко*

*Поступила в редакцию
23 мая 2012 г.*