

## ЖЕЛЕЗОМАРГАНЦЕВЫЕ КОРКИ ГОРЫ ПЕТРА ВЕЛИКОГО И ХРЕБТА ВАСИЛЬКОВСКОГО (ЯПОНСКОЕ МОРЕ)

© 2023 Н.В. Астахова

*Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия, 690041;  
e-mail: n\_astakhova@poi.dvo.ru*

Поступила в редакцию 19.10.2022 г.; после доработки 15.02.2023 г.; принята в печать 30.03.2023 г.

Изучено строение и химический состав железомарганцевых корок, сформированных на осадочном чехле подводных вулканов горы Петра Великого и хребта Васильковского, расположенных у материкового склона Приморья (Японское море). Корки образовались в результате цементации и осаждения на поверхности осадка гидроксидов марганца. Признаками гидротермальности этих образований являются очень высокое значение титанового и низкое алюминиевого модулей, низкие содержания цветных и редкоземельных элементов, превышение содержаний тяжелых РЗЭ над легкими. Отложение рудного вещества произошло, вероятно, в плейстоцен-голоценовое время из поствулканических гидротермальных растворов. В отличие от корок, отложившихся на базальтах в центральных частях Японского моря, эти корки не содержат включений мелких зерен средне- и высокотемпературных минеральных фаз цветных металлов.

*Ключевые слова: железомарганцевые корки, Японское море, возвышенности Петра Великого, Васильковского.*

### ВВЕДЕНИЕ

Железомарганцевые образования (ЖМО), сложенные оксидами, гидроксидами и оксигидроксидами Fe и Mn, широко распространены в отложениях Мирового океана и детально изучаются на протяжении более 40 лет (Аникеева и др., 2008; Железомарганцевые..., 1990; Мельников, 2005; Bau et. al., 2014; Bonatti et. al., 1972; Usui, Someya, 1997 и др.). По происхождению они подразделяются на гидротермальные, гидрогенные и диагенетические. Гидротермальные оксиды Fe-Mn осаждаются при смешивании низкотемпературных гидротермальных растворов при поступлении их на поверхность морского дна. Диагенетические конкреции формируются из поровых вод в окислительных условиях в мягком осадке или на границе раздела осадок-вода. Гидрогенные корки и конкреции образуются при медленном осаждении коллоидных частиц оксидов Fe и Mn из морской воды.

В Японском море ЖМО в виде корок были подняты при драгировании подводных вулканических возвышенностей, возвышающихся над выровненной аккумулятивной поверхно-

стью глубоководных котловин. Детальнее всего изучены ЖМО, сформировавшиеся на привершинных склонах вулканов, расположенных в центральных частях моря на значительном удалении от суши (Астахова, 2018; Астахова, Введенская, 2003; Батулин, 2012; Михайлик и др., 2014а; Скорнякова и др., 1987 и др.). Это объясняется незначительной мощностью осадков, покрывающих их склоны. Вследствие этого они лучше обнажены, что позволяет при их драгировании поднимать значительное количество каменного материала, в том числе рудные корки, зачастую оторванные от коренного выхода. Изучение этих корок показало, что формирование их связано с гидротермально-осадочным процессом.

Данных по рудообразованию на вулканических возвышенностях, расположенных рядом с материковым склоном Приморья, значительно меньше. Это связано с тем, что они покрыты мощным слоем осадка, поэтому при драгировании поднятие каменного материала там затруднено, так как поднятые драги были заполнены илом или слаболитифицированными осадочными породами. К таким возвышенностям относятся гора Петра Великого и хребет Васильковского,

на склонах которых обнаружены лишь маломощные корки на поверхности литифицированных отложений. Результаты изучения этих корок приведены в настоящей работе.

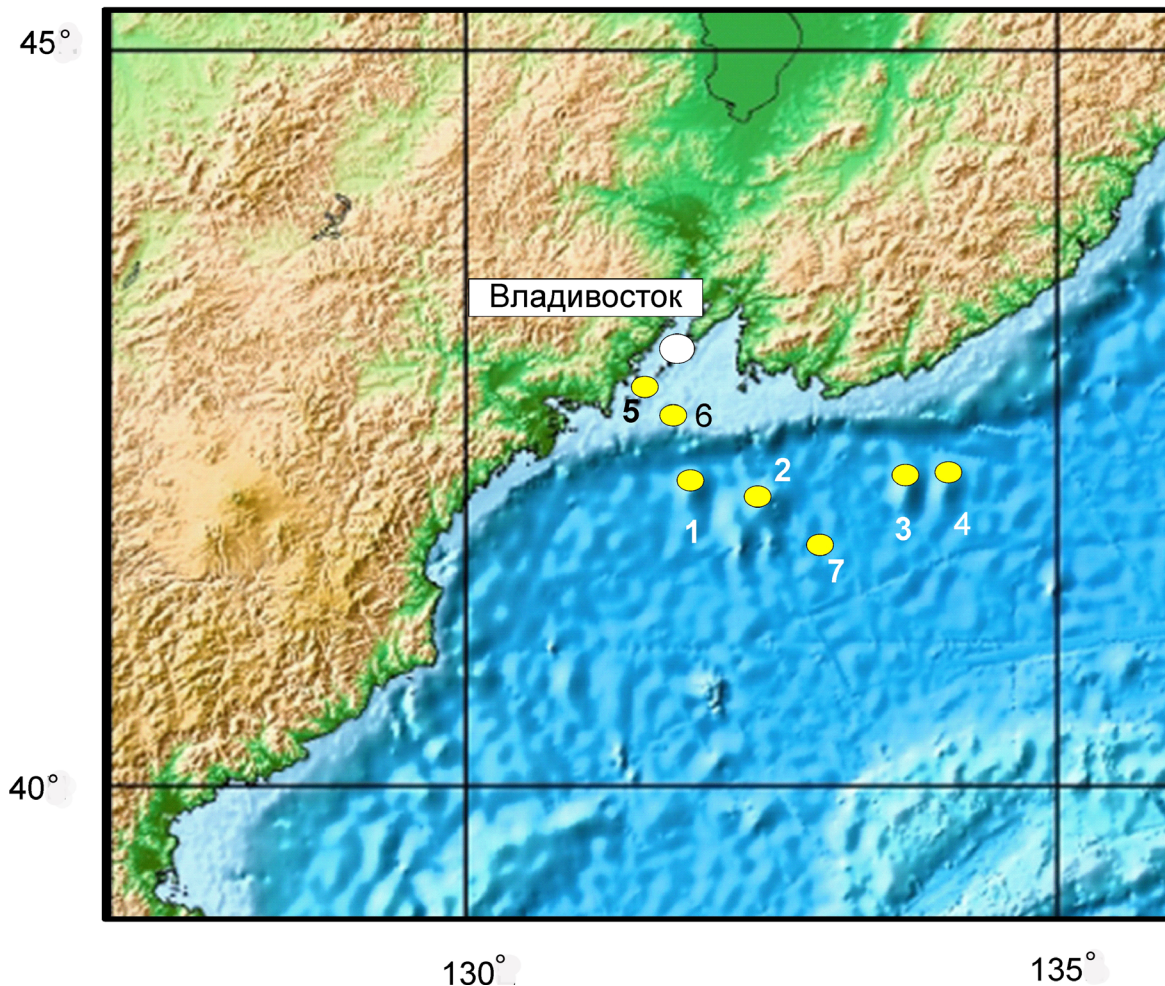
### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Материалом для исследования послужили образцы железомарганцевых корок, поднятых при драгировании горы Петра Великого и хребта Васильковского в 58 и 64 рейсах научно-исследовательского судна (НИС) «Академик М.А. Лаврентьев» Тихоокеанского океанологического института ДВО РАН. Все отобранные образцы изучались под биноклем и, частично, при помощи микрозондового анализатора JXA-8100 (JEOL, Япония) с тремя волновыми спектрометрами, доукомплектованными энергодисперсионным спектрометром INCAx-sight (OXFORD Instruments, Англия). Аншлифы изготавливались

с использованием алмазных паст на органической основе, не содержащих примесей в количествах, достигающих предела обнаружения прибора (0.01 мас. %).

Для изучения химического состава рудных корок было отобрано по одному типичному образцу с каждой возвышенности. Определение содержания  $\text{SiO}_2$  осуществлено методом гравиметрии, остальных элементов — методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой на спектрометре iCAP 6500Duo (Thermo Scientific Corporation, США). Определение содержания микроэлементов выполнено методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на спектрометре Agilent 7700x (Agilent Technologies, США). Пробоподготовка — кислотное разложение.

Изучение валового химического состава проб и микрозондовые исследования проводились в Аналитическом центре Дальневосточного геологического института ДВО РАН.



**Рис. 1.** Местоположение станций отбора проб с железомарганцевым оруденением: 1 — гора Петра Великого, 2 — возвышенность Первенца (Сибирь), 3 — хребт Васильковского, 4 — хребт Берсенева и положение станций отбора донных осадков: 5 — M65, 6 — R10, 7 — R5.

**Fig. 1.** Location of underwater seamounts with ferromanganese mineralization: 1 — Peter the Great Seamount, 2 — Pervenets Rise (Siberia), 3 — Vasilkovsky Ridge, 4 — Bersenev Ridge and the position of bottom sediment sampling stations: 5 — M65, 6 — R10, 7 — R5.

## ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ ГОРЫ ПЕТРА ВЕЛИКОГО И ХРЕБТА ВАСИЛЬКОВСКОГО

**Гора Петра Великого** (ГПВ) находится у подножия материкового склона в южной части залива Петра Великого примерно в 80-ти милях от г. Владивостока (рис. 1) и является вулканической постройкой, сложенной базальтами позднемiocенового возраста, сформированной, предположительно, на блоке коры континентального типа. Она вытянута в меридиональном направлении (длина 37 км, ширина 15 км) и возвышается над окружающей котловиной на высоту около 1700 м. Минимальная глубина над ее вершиной — 1430 м (Карнаух и др., 2013). Поверхность ее покрыта осадками, мощность которых на склонах достигает 0.5 км, в вершинной части — около 0.2 км. Формирование осадочного чехла ГПВ в позднем миоцене-плейстоцене происходило сопряженно с материковым склоном Приморья и возвышенностью Первенца (Карнаух и др., 2013). Геолого-геофизические исследования ГПВ, начиная с 1973 г., проводились в экспедициях ТОИ ДВО РАН, но железомарганцевые корки впервые были подняты в 2013 г. в 64 рейсе НИС «Академик М.А. Лаврентьев» при драгировании ее восточного склона в интервале 2230–1700 м (ст. LV 64-7). Вместе с ними среди большого количества ила были обнаружены обломки глауконит-кремнистой породы и туфодиатомитов желтовато-светло-серого цвета. Некоторые из обломков туфодиатомитов были пропитаны гидроксидами железа и марганца. Осадочные породы ГПВ, представленные преимущественно диатомовыми глинами и туфодиатомитами, содержат диатомовые комплексы почти полной последовательности зон конца верхнего миоцена-плиоцена, а также пелитовые илы позднплейстоценового возраста (Карнаух и др., 2013).

**Хребет Васильковского** расположен рядом с материковым склоном у берегов Южного Приморья. Он имеет четко выраженные линейные очертания и вытянут в меридиональном направлении примерно на 26 км. Ширина хребта — 9 км при высоте около 1400 м. Минимальная глубина над вершиной — 2165 м (Карнаух и др., 2007). Западнее его находится хребет Берсенева. Эти хребты расположены на одном плато, сложены одними и теми же среднемиоцен-плиоценовыми вулканическими породами, характерными для вулканических построек глубоководных котловин Японского моря (Леликов и др., 2018). Формирование их происходило в результате вулканических извержений по глубинным разломам, прослеживающимся с материковой части Приморья (Карнаух и др., 2007). Ранее, до начала XXI в., эта геологическая структура,

состоящая из двух хребтов называлась возвышенностью Тарасова. На этой возвышенности, в районе хребта Берсенева в 1980-х гг. с глубины 2050–2100 м были подняты железомарганцевые корки и конкреции, образованные тодорокитом. По данным исследователей, формирование их связано с гидротермально-осадочным процессом (Батулин, 2012; Скорнякова и др., 1987).

Геологическое опробование хребта Васильковского впервые проводилось в 2011 г. в 58 рейсе НИС «Академик М.А. Лаврентьев» ТОИ ДВО РАН. При драгировании привершинной части восточного склона хребта в интервале глубин 2700–2300 м были подняты слаболитифицированные осадочные породы миоцен-плейстоценового возраста, часто покрытые железомарганцевыми корочками мощностью до 1.5 см, куски глауконит-кремнистой породы и несколько обломков пористых базальтов с коркой закалывания (Съедин и др., 2013).

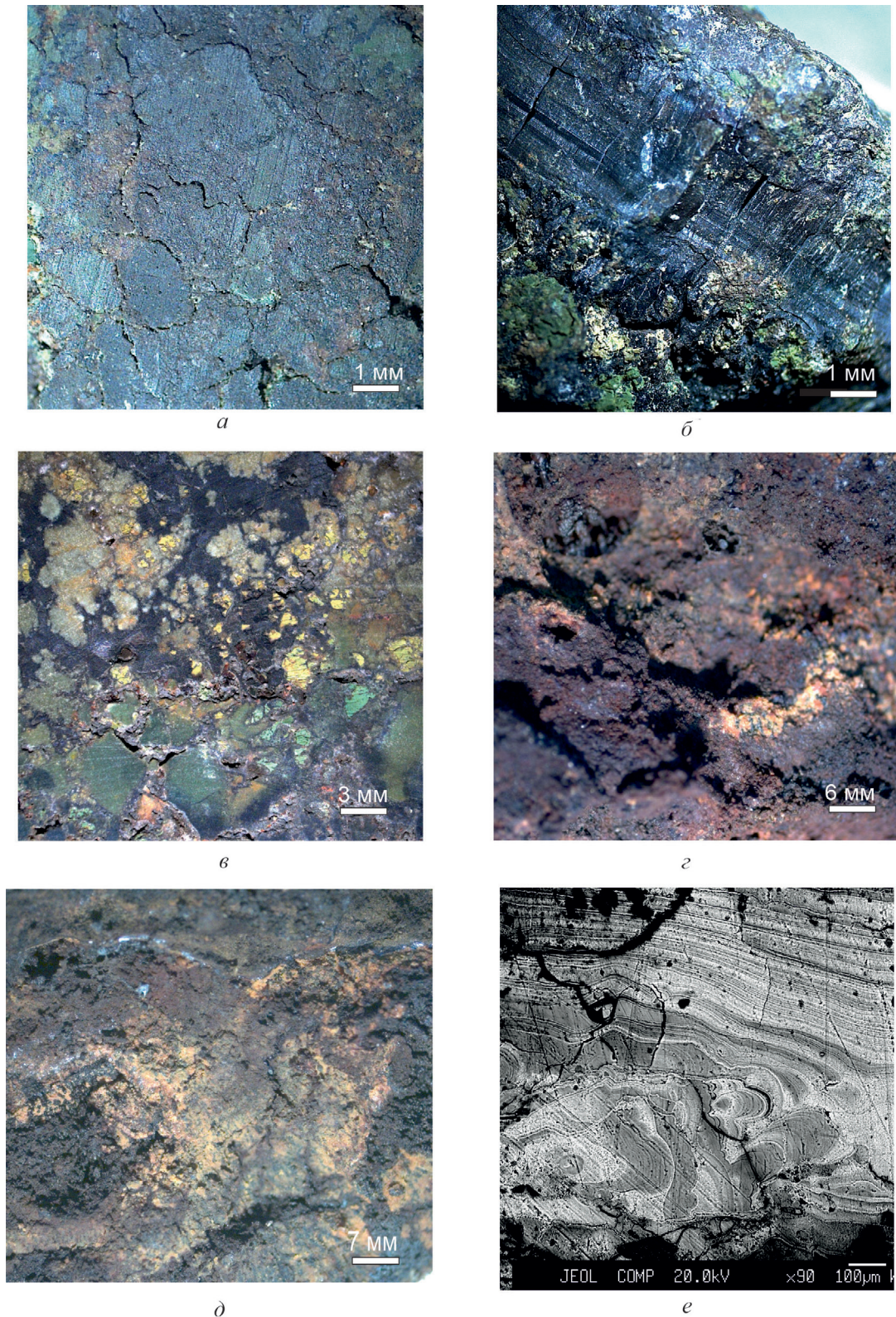
### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Изученные образцы ЖМО горы Петра Великого очень рыхлые, легко разламываются руками. Это связано с тем, что образованы они в результате цементации округлых зерен глинистых минералов зеленого или зеленовато-бурого цвета (глауконита) гидроксидами железа и марганца (рис. 2а). В некоторых образцах эти образования покрыты тонким, толщиной до 2 мм, слоем рудного вещества (рис. 2б). По внешнему виду они напоминают ЖМО возвышенности Первенец, также образованных в результате цементации зеленовато-бурых глинистых комочков гидроксидами марганца, которые по данным рентгеноструктурного анализа представляют собой смешанослойные образования типа смектит-гидрослюда, а по химическому составу соответствуют селадониту (гидротермальная разновидность глауконита) (Астахова и др., 2019).

На хребте Васильковского железомарганцевые корочки, мощностью до 1.5 см, в основном, покрывают слаболитифицированные осадочные породы. Они представлены, преимущественно, шлаковидными рыхлыми обломками, реже более плотными образованиями (рис. 2г, 2д). В рыхлых корках обнаружены отпечатки и остатки раковин, в том числе двустворчатого моллюска *Lucinomaannulata* (Reeve). Время существования моллюсков этого вида — поздний миоцен-настоящее время (Съедин и др., 2013). Помимо этого, гидроксида марганца образуют коррозионный цемент в глауконит-кремнистой породе (рис. 2в).

**Химический состав рудных корок.** Макро- и микроэлементный состав изученных корок приведен в табл. 1. Содержания Mn составляет

ЖЕЛЕЗОМАРГАНЦЕВЫЕ КОРКИ



**Рис. 2.** Железомарганцевые образования горы Петра Великого и хребта Васильковского: *a–б* — ЖМО горы Петра Великого: цементация зеленовато-бурых мелких бесформенных обломков глауконита гидроксидами марганца (*a*), тонкий железомарганцевый слой на глауконите (*б*); *в–е* — ЖМО хребта Васильковского: коррозионный марганцевый цемент в глауконит-кремнистых обломках (*в*), железомарганцевые корки (*г, д*), микротекстура марганцевой корки (*е*).

**Fig. 2.** Ferromanganese formations of the Peter the Great Seamount and the Vasilkovsky Ridge: *a–б* — FMF of Peter the Great Seamount: cementation of greenish-brown small shapeless fragments of glauconite with manganese hydroxides (*a*), a thin ferromanganese layer on glauconite (*б*); *в–е* — FMF of the Vasilkovsky Ridge: corrosive manganese cement in glauconite-siliceous fragments (*в*), ferromanganese crusts (*г, д*), manganese crust microtexture (*е*).

32.76 и 29.84 %, Fe — 7.19 и 13.72% в корках, поднятых со склонов горы Петра Великого и хребта Васильковского. Отношение Mn/Fe соответственно равно 4.56 и 2.17. Al и Ti присутствуют в незначительных количествах: Al < 0.79, Ti < 0.03. Это характерно для гидротермальных образцов, т.к. в гидrogenных образованиях эти значения значительно выше, в среднем равны для Al — 1.13%, Ti — 0.97% (Михайлик и др., 2014a) Величина титанового модуля (Mn+Fe)/Ti составляет 1536 и 2178, алюминиевого модуля Al/(Al+Fe+Mn) — 0.017 и 0.018 соответственно. Для гидrogenных ЖМО значения титанового

модуля находятся в пределах от 25 до 60, а для гидротермальных — выше 100 (Волохин и др., 1995). Алюминиевый модуль при значении менее 0.4 указывает на содержание в осадке эксгальтативной компоненты (Boström, 1973). Соотношение Si/Al составляет 15.21 и 7.82.

Для сравнения приведены (табл. 1) данные о химическом составе осадков, отобранных на шельфе в районе залива Петра Великого и в Центральной котловине Японского моря. Шельф — это зона транзита терригенного материала, поступающего в Японское море, а в глубоководных пелитовых илах развит окисленный слой,

**Таблица 1.** Химический состав (Fe-Na вес. %, Ba-U 10-4%) железомарганцевых образований горы Петра Великого и хребта Васильковского, осадков шельфа и Центральной котловины (Японское море)

**Table 1.** Chemical composition (Fe-Na wt. %, Ba-U 10-4%) of ferromanganese formations of Peter the Great Seamount and the Vasilkovsky Ridge, sediments of the shelf and the Central Basin (Sea of Japan)

Элемент, отношение	LV 64-7	LV 58-6	R-10	R-5	Элемент, отношение	LV 64-7	LV 58-6	R-10	R-5
	1	2	3	4		1	2	3	4
Fe	7.19	13.72	1.27	3.16	Sr	287	581		
Mn	32.76	29.84	0.01	0.35	V	139	44		
Si	10.28	6.21	34.33	28.82	Y	19	6		
Al	0.68	0.79	6.71	7.43	Zn	398	41	105	175
Ca	1.13	1.94	1.12	0.81	Zr	12	18		
Ti	0.03	0.02	0.23	0.31	Mo	131	432		
Mg	1.57	0.80	0.51	0.78	Li	353	410		
K	1.96	0.58	2.34	2.46	Be	0.8	0.2		
P	0.05	0.14			Sc	1.8	1.2		
Na	2.82	3.12	2.12	3.12	Ga	4.5	12.9		
Mn/Fe	4.56	2.17	0.01	0.11	As	16	78		
(Fe + Mn)Ti	1536	1746	5.5	11.3	Rb	87	14		
Al/(Al + Fe + Mn)	0.02	0.02	0.84	0.68	Nb	1.1	1.4		
Si/Al	15.21	7.82	5.11	3.88	Cd	2.9	1.4		
Ba	466	2107			Cs	3.9	0.9		
Co	11	23			Hf	0.2	0.4		
Cr	13	12			Ta	0.0	0.3		
Cu	21	7	11	31	W	6.6	25.2		
La	14	4			Tl	3.6	0.3		
Ni	169	41	26	41	Th	1.3	0.8		
Pb	37	10	20	26	U	9.0	0.3		

Примечание. 1–2 — железомарганцевые корки горы Петра Великого (ст. LV 64-7) (1) и хребта Васильковского (ст. LV 58-6) (2); 3–4 — осадки шельфа (ст. R-10) (3) и Центральной котловины (ст. R-5) (4). Химический состав осадков взят из работы Д.М. Полякова (2003).

Note. 1–2 — ferromanganese crusts of Peter the Great Seamount (st. LV 64-7) (1) and Vasilkovsky Ridge (st. LV 58-6) (2); 3–4 — sediments of the shelf (st. R-10) (3) and the Central Basin (st. R-5) (4). The chemical composition of sediments was taken from the work of D.M. Polyakova (2003).

мощностью 30–40 см, обогащенный Mn в результате раннего диагенеза до 0.49% (Грамм-Осипов, Плисс, 1973).

Шельфовые осадки (ст. R-10) содержат 0.01 Mn и 1.27% Fe, а глубоководные (ст. R-5) — 0.35% Mn и 3.16% Fe. Отношения Mn/Fe — 0.01 и 0.11, Si/Al — 5.11 и 3.88, титановый модуль — 5.48 и 11.26, алюминиевый модуль — 0.84 и 0.68 соответственно (табл. 1) (Поляков, 2003).

Содержание Ni составляет 168.5 и 41.2, Co — 11.6 и 23.0, Cu — 20.6 и 7.3 г/т, суммарно — 200 и 72 г/т в образцах горы Петра Великого и хр. Васильковского соответственно (табл. 1). Основной вклад в эту сумму вносит никель, как и во всех ЖМО Японского моря. Возможно, это связано с тем, что окраинно-морские базальтоиды, слагающие подводные вулканы, характеризуются повышенным количеством никеля (Леликов и др., 2018). Содержание Cu менее 0.02 % и отношение Cu/Co 1.8 и 0.3 характерно для низкотемпературных гидротермальных корок (Аникеева и др., 2008).

По сравнению с шельфовыми и глубоководными осадками Центральной котловины (Поляков, 2003) в рудных корках наблюдается накопление Mn ( $K_{\text{нак}}$  85.3–3276), Fe ( $K_{\text{нак}}$  2.3–10.8), Ca ( $K_{\text{нак}}$  1.0–2.4), Mg ( $K_{\text{нак}}$  1.0–3.1). У Na и Ni увеличенное содержание отмечается лишь по отношению к шельфовым осадкам, а содержание Cu и Pb повышены лишь в корке горы Петра Великого (табл. 2).

На диаграмме Е. Бонатти (Bonatti et al., 1972) классифицирующей железомарганцевые обра-

зования на водородные и гидротермальные по суммарному содержанию Ni, Co и Cu, изучаемые ЖМО располагаются у ее основания (рис. 3). Это характеризует преимущественно гидротермальный источник вещества, участвовавшего в их образовании.

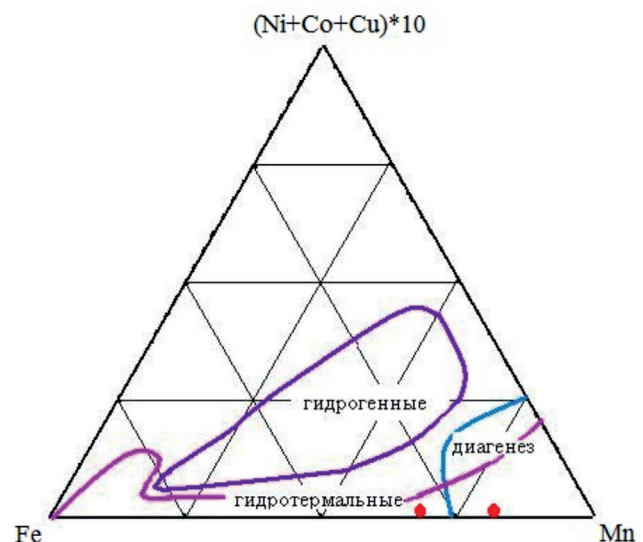
На спайдер-диаграмме (рис. 4), нормированной на Австралийский постархейский сланец (PAAS) (Taylor, McLennan, 1985) показано, что изученные ЖМО имеют близкий характер распределения большинства элементов. По сравнению со сланцем, они значительно обогащены Mn и Mo, а также имеют более высокие значения Fe, Na, Sr, Li и W. Кроме этого, у образца с ГПВ отмечается повышенные содержания Ni, Zn и U, а с хр. Васильковского — P, Ba и Co. По сравнению с ЖМО, концентрация макроэлементов в шельфовых и глубоководных осадках ниже или близка к сланцам, за исключением Mn в глубоководных отложениях.

В результате микронзондового исследования были получены данные по микростроению корок и выявлены особенности распределения рудного вещества в образце, поднятом при драгировании хребта Васильковского. На снимках отчетливо видно слоистое строение железомарганцевой корки (рис. 2e). Причем одни участки характеризуются чередованием тонких слоев, расположенных параллельно друг другу, другие имеют фестончатую структуру. Последние первичны по отношению к параллельно слоистым. На фотографии слои разного состава отличаются по цвету. Более светлые участки

**Таблица 2.** Коэффициенты концентрации элементов в железомарганцевых корках относительно шельфовых (1) и глубоководных (2) осадков

**Table 2.** Concentration factors of elements in ferromanganese crusts relative to (1) shelf and (2) deep water sediments

элемент	LV 64 -7		LV 58-6	
	1	2	1	2
Fe	5.7	2.3	10.8	4.3
Mn	3276	93.6	2984	85.3
Si	0.3	0.4	0.2	0.2
Al	0.1	0.1	0.1	0.1
Ca	1.0	1.4	1.7	2.4
Ti	0.1	0.1	0.1	0.1
Mg	3.1	2.0	1.6	1.0
K	0.8	0.8	0.2	0.2
Na	1.3	0.9	1.5	1.0
Cu	1.9	0.1	0.6	0.2
Ni	6.5	0.2	1.6	1.0
Pb	1.9	1.4	0.5	0.4

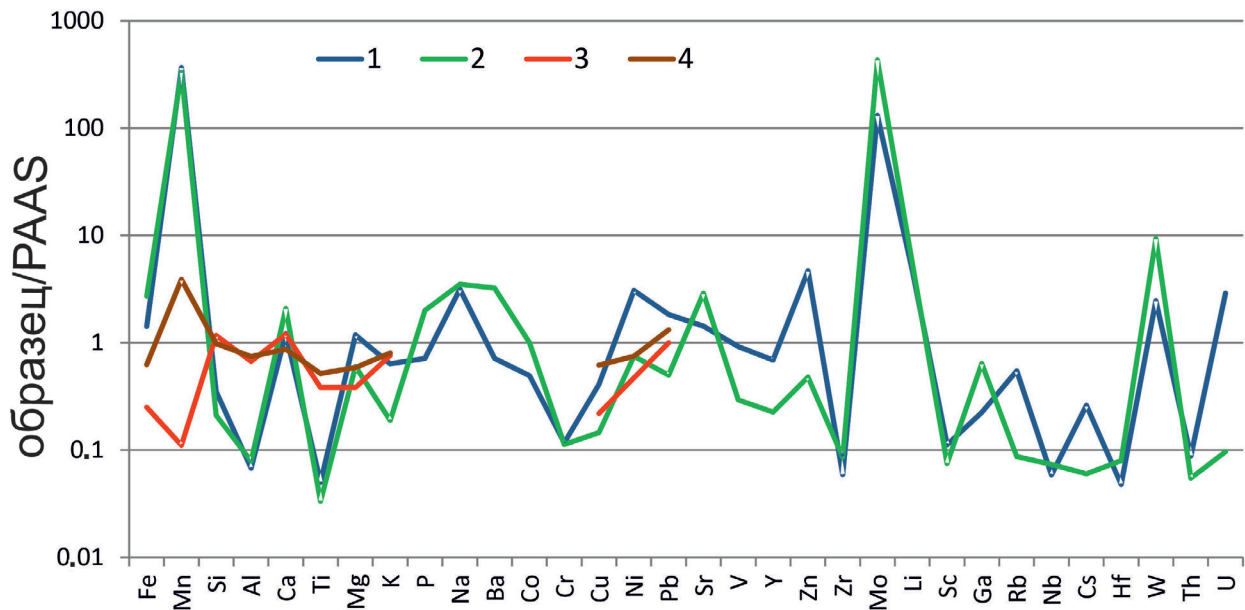


**Рис. 3.** Состав ЖМО (%) горы Петра Великого и хребта Васильковского на диаграмме Е. Бонатти (Bonatti et al., 1972).

**Fig. 3.** The composition of FMF (%) of the Peter the Great Seamount and the Vasilkovskii Ridge in the diagram by E. Bonatti (Bonatti et al., 1972).

характеризуются более высоким содержанием Mn, а серые — Mg и Cl (табл. 3). Встречаются отдельные участки, где марганцевая матрица обогащена фтором. Гидроксиды Fe выделяются в виде округлых пятен или мелких зерен. Обнаружены единичные зерна оксида Zn и вольфрамита Mn. В драгированных образцах, в отличие от ЖМО, поднятых на подводных возвышенностях в центральных частях моря (Астахова, 2013), сульфидов, интерметаллических соединений и самородных цветных металлов не обнаружено.

Сумма РЗЭ в ЖМО горы Петра Великого и хребта Васильковского составляет 75.15 и 20.27 г/т, содержание Nd — 13.25 и 3.33 г/т соответственно. Составы РЗЭ в изученных образцах, нормализованные на PAAS (McLennan, 1989), указывают на накопление тяжелых элементов относительно легких ( $LREE_{SN}/HREE_{SN}$  — 0.58 и 0.72), что характерно для гидротермальных образцов (Glasby et al., 1997). Образец LV 64-7 с ГПВ имеет незначительные отрицательные аномалии церия и европия (0.98 и 0.93 соответственно). У образца LV 58-6 — отрицательная



**Рис. 4.** Спайдер-диаграммы для ЖМО горы Петра Великого, хребта Васильковского, осадков шельфа и Центральной котловины Японского моря, нормированных на Австралийский постархейский сланец (PAAS) (Taylor, McLennan, 1985). Номера проб соответствуют табл. 1.

**Fig. 4.** Spider-diagrams for FMF of the Peter the Great Seamount, the Vasilkovsky Ridge, sediments of the shelf and the Central Basin of the Sea of Japan, normalized to the Australian Post-Archaean Shale (PAAS) (Taylor and McLennan, 1985). Sample numbers follow Tables 1.

**Таблица 3.** Результаты микрозондового анализа аншлифа железомарганцевой корки хребта Васильковского, вес. %

**Table 3.** Results of probe microanalysis of a polished section of the ferromanganese crust of the Vasilkovskii Ridge, wt. %

	O	F	Na	Mg	Si	P	S	Cl	K	Ca	Mn	Fe	Сумма	Примечание
1	24.95		2.43	1.06	0.18	0.18	0.17	0.29	3.74	1.46	49.75		84.20	матрица белая
2	31.58		2.54	1.34			0.17	0.28	3.80	1.54	49.57		90.83	матрица белая
3	31.34		2.36	2.72		0.45	0.49	2.36	2.44	1.90	42.6		86.65	матрица серая
4	31.96		3.52	0.81	2.28	0.21	0.16	1.06	0.4	2.13	44.2	5.85	92.58	матрица серая
5	35.33		4.00	1.91	0.23	0.46	0.39	2.19	2.64	1.29	45.88	0.84	95.15	белый слой
6	33.62	2.67	4.60	0.41		0.45	0.24	0.48	3.72	0.83	50.59	0.93	98.53	прожилок белый
7	26.28										2.22	68.82	97.33	пятно

**Таблица 4.** Содержание РЗЭ в железомарганцевых корках горы Петра Великого (ст. LV 64-7), хребта Васильковского (ст. LV 58-6) и в осадках шельфа (ст. М65)

**Table 4.** REE content in ferromanganese crusts of Peter the Great Seamount (st. LV 64-7), Vasilkovskiy Ridge (st. LV 58-6) and in shelf sediments (st. M65)

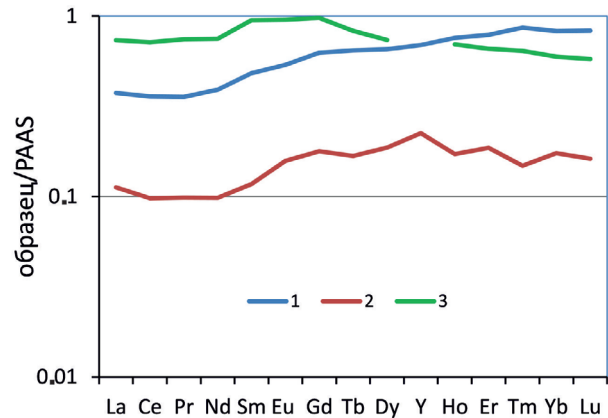
элемент, отношение	LV 64-7	LV 58-6	M65
	1	2	3
La	14.30	4.29	28.09
Ce	28.54	7.77	57.04
Pr	3.15	0.87	6.57
Nd	13.25	3.33	25.35
Sm	2.68	0.65	5.26
Eu	0.58	0.17	1.03
Gd	2.92	0.83	4.56
Tb	0.50	0.13	0.64
Dy	3.20	0.91	3.6
Ho	0.75	0.17	0.69
Er	2.24	0.53	1.88
Tm	0.35	0.06	0.26
Yb	2.33	0.49	1.68
Lu	0.36	0.07	0.25
Y	18.66	6.06	
ΣРЗЭ	75.15	20.26	136.90
LREE <sub>SN</sub>	3.13	0.86	5.82
HREE <sub>SN</sub>	5.37	1.20	4.74
LREE <sub>SN</sub> /HREE <sub>SN</sub>	0.58	0.72	1.23
Ce <sub>ан</sub>	0.98	0.93	0.97
Eu <sub>ан</sub>	0.97	1.07	0.99
Y <sub>SN</sub> /Ho <sub>SN</sub>	0.91	1.31	

Примечание: Данные по среднему содержанию РЗЭ в осадочной колонке М65 взяты из работы (Аксентов, Саттарова, 2016).  $Ce_{ан} = 2 * Ce / Ce_{SN} / (La / La_{SN} + Pr / Pr_{SN})$ ,  $Eu_{ан} = 2 * Eu / Eu_{SN} / (Sm / Sm_{SN} + Gd / Gd_{SN})$ , LREEN — сумма легких ( $La_{SN} - Gd_{SN}$ ). HREEN — сумма тяжелых ( $Tb_{SN} - Lu_{SN}$ ) лантаноидов.

Note: The data on the average REE content in sedimentary core M65 were taken from (Aksentov and Sattarova, 2016).  $Ce_{ан} = 2 * Ce / Ce_{SN} / (La / La_{SN} + Pr / Pr_{SN})$ ,  $Eu_{ан} = 2 * Eu / Eu_{SN} / (Sm / Sm_{SN} + Gd / Gd_{SN})$ , LREEN is the sum of light ( $La_{SN} - Gd_{SN}$ ). HREEN is the sum of heavy ( $Tb_{SN} - Lu_{SN}$ ) lanthanides.

аномалия церия (0.97) и положительная европия (1.07) (табл. 4, рис. 5).

Для сравнения приведены (табл. 4) средние данные по содержанию РЗЭ в осадочной колонке М65, отобранной в южной части Амурского залива (Аксентов, Саттарова, 2016). Осадки этого района по микроэлементному составу относятся к фоновым (Аникиев и др., 2000). Сумма РЗЭ в осадках составляет 136.90 г/т. содержание Nd — 25.35 г/т. Спектры имеют незначительные отрицательные



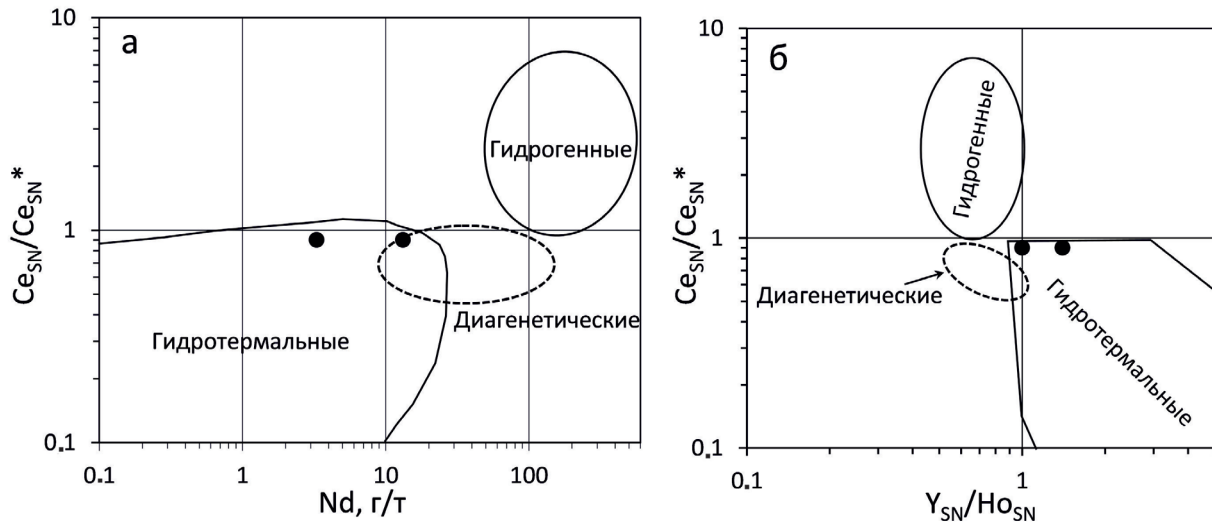
**Рис. 5.** Составы РЗЭ железомарганцевых корок и осадков шельфа, нормализованные на состав РЗЭ в сланце (ПААС). Номера образцов соответствуют табл. 4.

**Fig. 5.** REE compositions of ferromanganese crusts and shelf sediments normalized to REE composition in shale (PAAS). Sample numbers follow Tables 4.

аномалии церия и европия — 0.97 и 0.99 соответственно. Отношение средней суммы легких лантаноидов к сумме тяжелых — 1.23 (табл. 4, рис. 5).

На генетических классификационных диаграммах зависимости величины Ce аномалии от содержания Nd и от величины отношения Y к Ho (Bau et al., 2014), изученные образцы с горы Петра Великого и с хребта Васильковского попадают в поле распространения гидротермальных образований (рис. 6).

Отсутствие положительной аномалии европия встречается у рудных корок из некоторых районов Японского моря, по всем критериям относящимся к гидротермальным (Батурин, 2012; Михайлик и др., 2014б). Было сделано предположение (Батурин, 2012, стр. 183), что «это связано со значительной продолжительностью вулканогенно-гидротермального процесса в этом регионе, что привело к вымыванию восстановленного европия из коренных пород, дренируемых гидротермальными растворами. По-видимому, некоторые более поздние порции этих растворов, оказались обеднены Eu по сравнению с первоначальными растворами, следы которых либо погребены в более древних вулканогенно-гидротермальных осадках, либо рассеялись в океанской воде». Другие исследователи считают, что наличие отрицательной Eu аномалии, вероятно, связано со скоростью роста гидротермально-осадочных Fe-Mn-корок Японского моря (Михайлик и др., 2014б). В этих корках 90% всех РЗЭ и иттрия содержится в железистой и алюмосиликатной фазах, а не в преобладающей марганцевой. Поэтому реальный график распределения редкоземельных элементов отражает их суммарное распределение в этих фазах, имеющих эндогенную и экзогенную составляющие.



**Рис. 6.** Классификационные диаграммы зависимости величины Ce аномалии от содержания Nd (а) и от величины отношения Y к Ho (б) в железомарганцевых корках горы Петра Великого и хребта Васильковского.

**Fig. 6.** Ferromanganese crusts from the Peter the Great Seamount and the Vasilkovskii Ridge in graphs of (a)  $Ce_{SN}/Ce_{SN}^*$  ratio vs. Nd concentration and (b)  $Ce_{SN}/Ce_{SN}^*$  ratio vs.  $Y_{SN}/Ho_{SN}$  ratio.

## ВЫВОДЫ

1. Результаты детального изучения ЖМО горы Петра Великого и хребта Васильковского позволяют с большой долей уверенности говорить о том, что образование их связано с гидротермально-осадочным процессом. Об этом свидетельствуют:

- высокие от 1536 до 1746 значения титанового модуля  $(Mn+Fe)/Ti$ . Для гидрогенных ЖМО значения этого модуля находятся в пределах от 25 до 75, а в гидротермальных — выше 100. В шельфовых и глубоководных осадках Центральной котловины Японского моря значения этого модуля — 5.5 и 11.3 соответственно;

- очень низкое значение алюминиевого модуля  $Al/(Al+Fe+Mn)$  — 0.02, что указывает на значительное содержание в рудных отложениях эксгалитивной компоненты. Пограничное значение этого модуля — 0.4. В осадках значение этого модуля составляет 0.84 и 0.68;

- низкое содержание цветных металлов: сумма Ni, Co, Cu составляет 0.02 и 0.007%;

- низкое содержание и особенности распределения РЗЭ: сумма 75.15 и 20.27 г/т, Nd — 13.25 и 3.33 г/т,  $Y_{SN}/Ho_{SN}$  — 1.0 и 1.4,  $LREE_{SN}/HREE_{SN} < 1$ , что характерно для гидротермальных образований. В осадках шельфа значения этих показателей составляют 136.90 г/т, 25.35 г/т и  $> 1$  соответственно.

2. По строению изученные образцы разделяются между собой. На горе Петра Великого рудные корки образовались в результате цементации гидроксидами марганца округлых агрегатов глауконита (селадонита?), а на хребте

Васильковского, в основном, — в результате пропитки (?) осадка или при осаждении на его поверхность. Этим можно объяснить разницу в содержании ряда элементов, в основном Fe, Si, K, в этих корках.

3. Учитывая, что корки на этих возвышенностях залегают на осадках позднего миоцена-плейстоценового возраста, а с конца среднего миоцена и до начала плейстоцена этот район являлся областью активного вулканизма, можно предположить, что формирование их произошло в плейстоцен-голоценовое время.

4. В отличие от ЖМО, отложившихся на базальтах подводных вулканических возвышенностях в центральных частях Японского моря, корки, сформировавшиеся на осадочном чехле, не содержат включений мелких зерен средне- и высокотемпературных минеральных фаз цветных металлов.

Работа выполнена в рамках государственного задания ТОИ ДВО РАН (проект 121021700342-9).

## Список литературы [References]

- Аксентов К.И., Саттарова В.В. Геохимия редкоземельных элементов в современных донных отложениях Амурского залива (Японское море) // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. № 7. С. 1323–1331 [Aksevtov K.I., Sattarova V.V. Geochemistry of rare earth elements in the modern sediments of Amur bay (Sea of Japan) // Russian Geology and Geophysics. 2016. V. 57. № 7. P. 1040–1047].
- Аникиев В.В., Косенкова С.Т., Савельева Н.И. и др. Статистическое районирование пространственного распределения микроэлементов в донных осадках залива Петра Великого (Японское море) // Геохимия. 2000. № 6. С. 664–674 [Anikiev V.V.,

- Kosenkova S.T., Savel'eva N.I. et al.* Statistical zoning of the spatial distribution of trace elements in the bottom sediments of the Peter the Great gulf, the Sea of Japan // *Geochemistry International*. 2000. V. 38. № 6. P. 603–614].
- Аникеева Л.И., Казакова В.Е., Гавриленко Г.М., Рашидов В.А.* Железомарганцевые корковые образования западно-тихоокеанской переходной зоны // *Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле*. 2008. №1. Вып. 11. С. 10–31. [http://www.kscnet.ru/kraesc/2008/2008\\_11/2008\\_11.html](http://www.kscnet.ru/kraesc/2008/2008_11/2008_11.html) [*Anikeeva L.I., Kazakova V.E., Gavrilenko G.M., Rashidov V.A.* Ferromanganese crusts in the western Pacific transition zone // *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle*. 2008. № 1 (11). P. 10–31(in Russian)].
- Астахова Н.В.* Железомарганцевые образования Центральной котловины Японского моря // *Литология и полезные ископаемые*. 2018. № 5. С. 384–396. <https://doi.org/10.1134/S0024497X18050026> [*Astakhova N. V.* Ferromanganese Crusts in the Central Basin, Sea of Japan // *Lithology and Mineral Resources*. 2018. V. 53. № 5. P. 349–360. <https://doi.org/10.1134/S0024490218050024>]
- Астахова Н.В.* Формы нахождения и особенности распределения благородных и цветных металлов в железомарганцевых корках Японского моря // *Океанология*. 2013. Т. 53. № 6. С. 769–785 [*Astakhova N.V.* Occurrence Forms and Distribution of Precious and Base Metals in Ferromanganese Crusts from the Sea of Japan // *Oceanology*. 2013. V. 53. № 6. P. 686–701].
- Астахова Н.В., Введенская И.А.* Химический состав и генезис железомарганцевых образований подводных вулканов и возвышенностей Японского моря // *Вулканология и сейсмология*. 2003. № 6. С. 36–43. [*Astakhova N.V., Vvedenskaya I.A.* The chemical composition and genesis of ferromanganese formations on submarine volcanoes and rises in the Sea of Japan // *Journal of Volcanology and Seismology*. 2003. № 6. P. 36–43].
- Астахова Н.В., Лопатников Е.А., Можеровский А.В., Ярошук Е.И.* Гидротермальные образования возвышенности Первенца (Японское море) // *Вулканология и сейсмология*. 2019. № 4. С. 29–39. <https://doi.org/10.31857/S0203-03062019429-39> [*Astakhova N.V., Lopatnikov E.A., Mazherovskiy V.A., Yaroshchuk E.I.* Hydrothermal Formations on the Pervenets Rise, Japan Sea // *Journal of Volcanology and Seismology*. 2019. V. 13. № 4. P. 226–234. <https://doi.org/10.1134/S074204631904002X>].
- Батурин Г.Н.* Геохимия гидротермальных железомарганцевых корок Японского моря. // *ДАН*. 2012. Т. 445. № 2. С. 179–184 [*Baturin G.N.* Geochemistry of hydrothermal ferromanganese crusts of the Sea of Japan // *Doklady Earth Sciences*. 2012. V. 445. № 1. P. 862–867].
- Волохин Ю.Г., Мельников М.Е., Школьник Э.Л. и др.* Гайоты Западной Пацифики и их рудоносность. М.: Наука, 1995. 368 с. [*Volokhin Y.G., Mel'nikov M.E., Shkolnik E.L. et al.* Guyots of the Western Pacific and their mineralisation. Moscow: Nauka. 368 p. (in Russian)].
- Грамм-Осипов Л.М., Плисс С.Г.* Некоторые химические элементы в современных осадках Японского моря // *ДАН*. 1973. Т. 213. № 6. С. 1413–1416 [*Gramm-Osipov L.M., Pliss S.G.* Some chemical elements in recent deposits of the Sea of Japan // *Doklady Earth Sciences*. 1973. V. 213. № 6. P. 1413–1416 (in Russian)].
- Железомарганцевые корки и конкреции подводных гор Тихого океана / Богданов Ю.А., Сорохтин О.Г., Зоненшайн Л.Б. М.: Наука, 1990. 229 с. [*Ferromanganese Crusts and Nodules of Pacific Seamounts*, Ed. by Yu.A. Bogdanov, O.G. Sorokhtin, L.B. Zonenshain, Moscow: Nauka, 1990. 229 p. (in Russian)].
- Карнаух В.Н., Карп Б.Я., Цой И.Б.* Структура фундамента и сейсмостратиграфия осадочного чехла северной части Японской котловины в районе возвышенности Тарасова (Японское море) // *Океанология*. 2007. Т. 47. № 5. С. 742–755 [*Karnauch V.N., Karp B.Ya., Tsoy I.B.* Basement structure and sedimentary cover seismostratigraphy in the northern part of the Japan basin in the region of the Tarasov rise (Sea of Japan) // *Oceanology*. 2007. V. 47. № 5. P. 691–704].
- Карнаух В.Н., Цой И.Б., Леликов Е.П. и др.* Геологическое строение подводной горы Петра Великого (Японское море) // *Вестник ДВО РАН*. 2013. № 6 (172). С. 189–198 [*Karnauch V.N., Tsoy I.B., Lelikov E.P. et al.* Geology of the Peter the Great Seamount (Sea of Japan) // *Vestnik DVO RAN*. 2013. № 6 (172). P. 189–198 (in Russian)].
- Леликов Е.П., Емельянова Т.А., Пугачев А.А.* Вулканизм и тектоника Центральной глубоководной котловины Японского моря // *Океанология*. 2018. Т. 58. № 1. С. 129–144. <https://doi.org/10.7868/S0030157418010124> [*Lelikov E.P., Emelyanova T.A., Pugachev A.A.* Volcanism and Tectonics of the Central Deep-Sea Basin of the Japan Sea // *Oceanology*. 2018. V. 58. № 1. P. 116–132. <https://doi.org/10.1134/S000143701706008X>].
- Мельников М.Е.* Месторождения кобальтоносных марганцевых корок. Геленджик: ГНЦ «Южмор-геология», 2005. 230 с. [*Melnikov M.E.* Deposits of cobalt-rich manganese crusts / Gelendzhik: SSC «Yuzhmorgeologiya», 2005. 230 p. (in Russian)].
- Михайлик П.Е., Михайлик Е.В., Зарубина Н.В. и др.* Вещественный состав и распределение РЗЭ в железомарганцевых корках подводных возвышенностей Беляевского и Медведова (Японское море) // *Тихоокеанская геология*. 2014. № 3. С. 3–6 [*Mikhailik P.E., Mikhailik E.V., Zarubina N.V. et al.* Matter composition and REE distribution in ferromanganese crusts of submarine Belyaev and Medvedev mounds from the Sea of Japan // *Russian Journal of Pacific Geology*. 2014a. V. 8. № 5. P. 315–329. <https://doi.org/10.1134/S1819714014050029>]
- Михайлик П.Е., Ханчук А.И., Михайлик Е.В. и др.* Новые данные о распределении редкоземельных элементов и иттрия в гидротермально-осадочных Fe-Mn-корках Японского моря по результатам фазового анализа // *ДАН*. 2014б. Т. 454. № 3. С. 322–327. <https://doi.org/10.7868/S0869565214030219> [*Mikhailik P.E., Khanchuk A.I., Mikhailik E.V. et al.* New Data on Rare Earth Elements and Yttrium Distribution in Hydrothermal Fe-Mn Crusts from the Sea of Japan: Evidence from Phase Analysis // *Doklady Earth Sciences*.

- 2014b. V. 454. № 1. P. 79–83. <https://doi.org/10.1134/S1028334X14010218>].
- Поляков Д.М.* Накопление химических элементов донными осадками Японского моря (на примере разреза Владивосток-Ниигата) // Геохимия. 2003. № 4. С. 459–464 [*Polyakov D.M.* Distribution of chemical elements in the bottom sediments in the Sea of Japan: a case study of the Vladivostok-Niigata profile // *Geochemistry International*. 2003. V. 41. № 4. P. 410–415].
- Скорнякова Н.С., Батурич Г.Н., Гурвич Е.Г. и др.* Железомарганцевые корки и конкреции Японского моря // ДАН СССР. 1987. Т. 293. № 2. С. 430–434 [*Skorniyakova N.S., Baturin G.N., Gurevich E.G. et al.* Ferromanganese crusts and concretions of the Sea of Japan // *Doklady Earth Sciences*. 1987. V. 293. P. 430–434 (in Russian)].
- Съедин В.Т., Лобанов В.Б., Коптев А.А. и др.* Результаты геологических исследований в 58-ом рейсе НИС «Академик М.А. Лаврентьев» (Центральная котловина, Японское море) // Тихоокеанская геология. 2014. Т. 33. № 3. С. 99–104 [*S'edin V.T., Lobanov V.B., Koptev A.A. et al.* Results of the geological research during the 58th cruise of the Academician M.A. Lavrentiev r/v (Central Basin, Sea of Japan) // *Russian Journal of Pacific Geology*. 2014. V. 33. № 3. P. 99–104 (in Russian)].
- Bau M., Schmidt K., Koschinsky A. et al.* Discriminating between different genetic types of marine ferromanganese crusts and nodules based on rare earth elements and yttrium // *Chemical Geology*. 2014. № 381. P. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2014.05.004>
- Bonatti E., Honnorez J., Joensuu O., Rydell H.* Classification and genesis of submarine iron manganese deposits, in: Horn, D.R. (Ed.), *Ferromanganese Deposits on the Ocean Floor*. National Science Foundation, Washington, D.C. 1972. P. 149–166.
- Boström K.* The origin and fate of ferromanganese active ridge sediments // *Stockholm Contributions in Geology*. 1973. V. 27 (2). P. 149–243.
- Glasby G.P., Ståben D., Jeschke G. et al.* A model for the formation of hydrothermal manganese crusts from the Pitcairn Island hotspot // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1997. V. 61. Iss. 21. P. 4583–4597. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(97\)00262-7](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(97)00262-7)
- McLennan S.M.* Rare Earth Elements in Sedimentary Rocks: Influence of Provenance and Sedimentary Process // *Review of Mineralogy*. 1989. V. 21. P. 169–200.
- Taylor S.R., McLennan S.M.* The continental crust: Its composition and evolution. Oxford: Blackwell Sci. Publ., 1985. 330 p.
- Usui A., Someya M.* Distribution and composition of marine hydrothermal and hydrothermal manganese deposits in the northwest Pacific // *Manganese Mineralization Geochemistry and MINERALOGY OF Terrestrial and Marine Deposits* / K. Nicholson, Hein J.R., B. Buhn, S. Dasgupta (eds.). Geol. Soc. Publ. 1997. № 119. P. 177–198.

## FERROMANGANESE CRUSTS OF PETER THE GREAT SEAMOUNT AND THE VASYLKOVSKY RIDGE (SEA OF JAPAN)

N.V. Astakhova

*V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far East Branch, Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia, 690041*

Received October 19, 2022; revised February 15, 2022; accepted March 30, 2023

The structure and chemical composition of ferromanganese crusts formed on the sedimentary cover of the underwater volcanoes of Peter the Great Seamount and the Vasilkovsky Ridge, located near the continental slope of Primorye (Sea of Japan), have been studied. The crusts were formed as a result of cementation and precipitation of manganese hydroxides on the surface of the sediment. Signs of the hydrothermal nature of these formations are a very high value of titanium and low aluminum modules, low concentrations of non-ferrous and rare earth elements, and an excess of heavy REE contents over light ones. Ore matter was probably deposited in the Pleistocene-Holocene from post-volcanic hydrothermal solutions. Unlike the crusts deposited on basalts in the central parts of the Sea of Japan, these crusts do not contain inclusions of small grains of medium- and high-temperature mineral phases of non-ferrous metals.

*Keywords: ferromanganese crusts, Sea of Japan, Peter the Great Seamount, Vasilkovsky Ridge.*