

МАРГАНЦЕВОЕ РУДООБРАЗОВАНИЕ НА ПОДВОДНОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ БЕЛЯЕВСКОГО В ЯПОНСКОМ МОРЕ (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ И НОВЫЕ ДАННЫЕ)

© 2019 О.Н. Колесник, Е.И. Ярошук

*Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,
Владивосток, Россия, 690041; kolesnik_o@poi.dvo.ru*

Систематизирована и обобщена информация о марганцевых образованиях северной и южной вершин возвышенности Беляевского в Японском море. Показано, что на возвышенности широкое развитие получили низкотемпературные гидротермальные быстрорастущие корки. Текстура слоистая. Структура колломорфная, волокнистая. Главные рудные минералы — бернессит, тодорокит, второстепенные — вернадит, манганит, пиролюзит. Встречаются образцы, где рудные минералы образуют прожилки в базальтах и цементируют агрегаты глинистых минералов типа смектит-гидрофлюда. На заключительной стадии рудообразования кристаллизовались минералы кремнезема и барит. Содержащиеся в корках микроразмерные минеральные фазы меди, цинка, олова, никеля, вольфрама, хрома, серебра, церия, лантана, неодима, по химическому составу классифицированные как самородные, сульфидно-сульфатные, оксидные, интерметаллидные, являются, очевидно, наложенными и отвечают высоко- и среднетемпературным условиям минералообразования. В валовом химическом составе корок наблюдается обогащение марганцем, барием, стронцием, литием, обеднение железом, алюминием, титаном и многими микроэлементами. Положительные аномалии церия, вероятно, фиксируют слои, сформировавшиеся в корках за счет гидрогенной поставки вещества в периоды затухания процессов гидротермального рудообразования.

Ключевые слова: Японское море, вулканическая постройка, гидротермальные марганцевые корки, металлы.

ВВЕДЕНИЕ

Железомарганцевые образования (конкреции и корки) являются одним из основных видов рудных полезных ископаемых океана (Авдонин и др., 2000; Дальневосточные ..., 2007; Кобальтбогатые ..., 2002). Среди морей, омывающих берега России, в этом отношении особенно выделяется Японское море. Рудная минерализация здесь преимущественно марганцевая, и приурочена она к привершинным частям подводных возвышенностей — вулканических построек. Возвышенность Беляевского, или Безымянная, относится к числу перспективных объектов, рекомендованных для детального изучения (Астахова и др., 2010; Астахова, Лопатников, 2017).

Возвышенность Беляевского расположена в глубоководной Центральной, или Японской, котловине Японского моря и относится к

пострифтовым структурам, которые формировались после образования основного ложа котловины (рис. 1). Это меридионально ориентированный хребет протяженностью около 35 км и высотой 1400–1500 м с подножием на глубине 3500 м и двумя вершинами — северной и южной. Возвышенность Беляевского сложена высокопористыми, реже плотными стекловатыми среднемиоцен-плиоценовыми базальтами оливин-плаггиоклазового состава (Астахова и др., 2010, 2014; Леликов и др., 2018). Наличие у базальтов шаровой отдельности и корки закалывания говорит о вероятном формировании этих пород в подводных близповерхностных условиях.

С 1980 г. на склонах возвышенности Беляевского проводятся драгировочные работы. Кроме базальтов, почти во всех точках опробования, за исключением самых глубоководных с отметками более 3100 м, обнаружены марганцевые

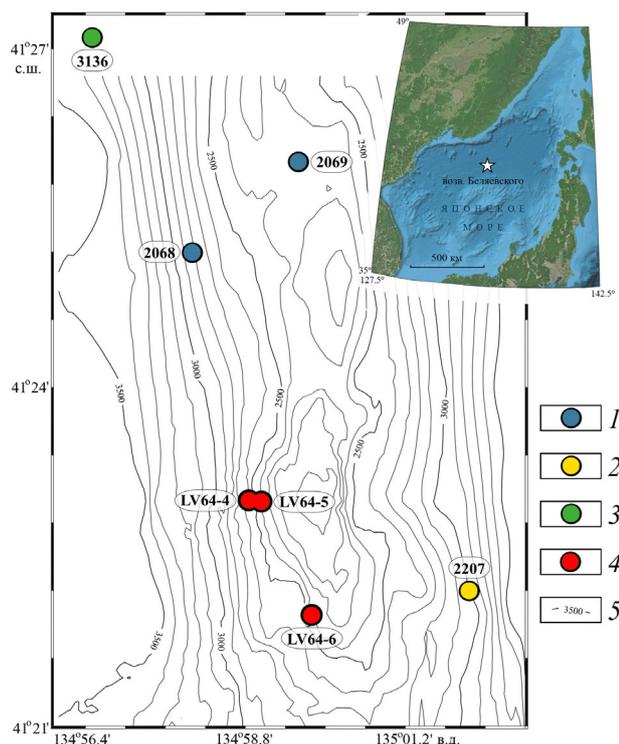


Рис. 1. Батиметрическая карта района исследования с указанием станций драгирования марганцевых образований: 1 — 36-й рейс НИС «Первенец», 1980 г.; 2 — 37-й рейс НИС «Первенец», 1981 г.; 3 — 35-й рейс НИС «Дмитрий Менделеев», 1985 г.; 4 — 64-й рейс НИС «Академик М.А. Лаврентьев», 2013 г.; 5 — изобаты, м.

Fig. 1. Bathymetric map of the study area showing stations where manganese formations were dredged. 1 — cruise 36 of the R/V Pervenets in 1980, 2 — cruise 37 of the R/V Pervenets in 1981, 3 — cruise 35 of the R/V Dmitry Mendeleev in 1985, 4 — cruise 64 of the R/V Akademik M.A. Lavrentyev in 2013, 5 — isobath, m.

образования^{1, 2, 3} (рис. 1). Подробнее всего изучен рудный материал с северных станций 2069 и 3136 (Астахова, 2008, 2013; Астахова, Введенская, 2003; Астахова и др., 2010; Астахова, Лопатников, 2017; Астахова, Саттарова, 2012; Батулин, 2012; Горшков и др., 1992; Михайлик, 2009; Михайлик и др., 2015, 2014а; Михайлик, Ханчук, 2011; Михайлик и др., 2014б; Скорнякова и др., 1987; Штеренберг

¹ Отчет о геологических исследованиях в 36 рейсе НИС «Первенец» (Японское море, сентябрь-ноябрь 1980 г.). Владивосток: Фонды ТОИ ДВО РАН, 1981. 72 с.

² Отчет о геологических исследованиях в 37 рейсе НИС «Первенец» (Японское и Охотское моря). Проблема 0.74.01, темы 02.06.Н2, 12.01.Н4а. «Вестпак», проблема 0.50.01, темы Н8, Н16. Владивосток: Фонды ТОИ ДВО РАН, 1982. 150 с.

³ Отчет о работе геолого-геофизической экспедиции 35 рейса НИС «Дмитрий Менделеев» в Японском море (июль 1985 г., 30 суток). М.: Фонды ИО РАН, 1985. 227 с. (т. 1), 143 с. (т. 2, научные статьи).

и др., 1986). К сожалению, образцы с южной вершины (станция 2207, юго-восточный склон) к настоящему времени не сохранились.

Цель нашей работы — представить в систематизированном и обобщенном виде фактический и аналитический материал, накопленный за все время изучения марганцевых образований возвышенности Беляевского, дополнить его новыми данными.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Материалом для изучения послужила серия образцов марганцевых образований, впервые драгированных на южной вершине возвышенности Беляевского со стороны западного и южного склонов (рис. 1, 2а–г). Драгирование проведено на трех станциях с глубин 2150–2800 м в 64-м рейсе НИС «Академик М.А. Лаврентьев», 2013 г.⁴ На станции LV64-6 вместе с базальтами, туфодиазомитами и рыхлыми глинистыми отложениями поднято ~40 кг обломков марганцевых образований, на станциях LV64-4 и LV64-5 — по 6–7 кг.

Анализы выполнены в лаборатории геохимии осадочных процессов Тихоокеанского океанологического института (ТОИ) ДВО РАН и Аналитическом центре Дальневосточного геологического института ДВО РАН по стандартным методикам (Михайлик и др., 2014а; Саттарова, Волохин, 2018). Двадцать шесть наиболее представительных образцов марганцевых образований (рис. 2) изучались нами с помощью бинокля Zeiss Stemi 2000-C, оснащенного цифровой камерой AxioCam MRc. Минералы диагностировались методом порошковой рентгеновской дифракции на минидифрактометре Rigaku MiniFlex II (14 определений) (рис. 3). Аналитик — к.г.-м.н. А.А. Карабцов. Химический состав изучен в трех пробах (табл. 1–3). Содержание кремния измерено гравиметрическим (весовым) методом, остальных элементов — методами атомно-эмиссионной спектроскопии и масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на спектрометрах iCAP 6500Duo (Thermo Scientific Corporation) и Agilent 7700c (Agilent Technologies). Подготовка проб к инструментальному анализу выполнена Ю.М. Ивановой. Аналитики — Ж.А. Щека, Г.А. Горбач, Е.А. Ткалина, Н.В. Хуркало, Д.С. Остапенко. В процессе обработки данных применялся статистический и графический анализ (рис. 4–6).

⁴ Отчет о результатах экспедиционных исследований в рейсе № 64 НИС «Академик М.А. Лаврентьев», Японское море (19 октября – 01 ноября 2013 г.). Владивосток: Фонды ТОИ ДВО РАН, 2014. 151 с.

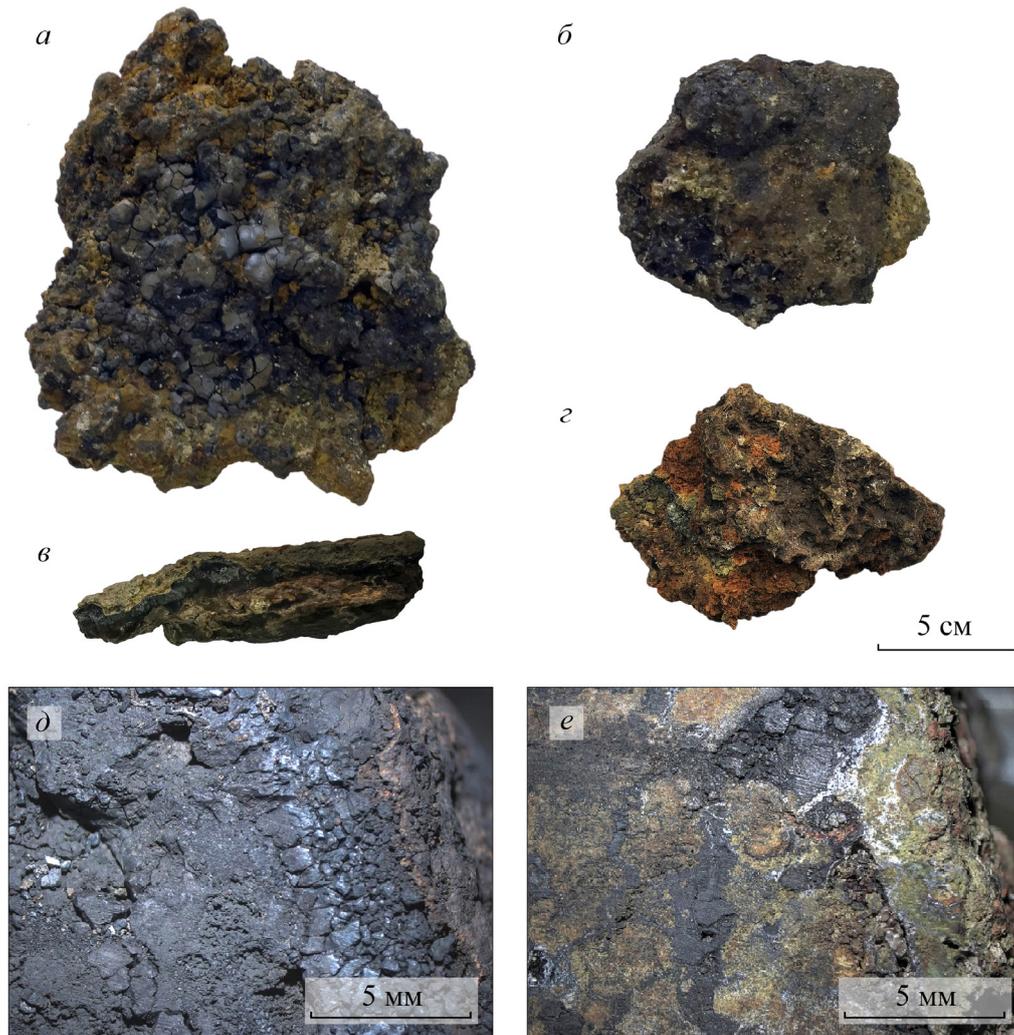


Рис. 2. Внешнее и внутреннее строение марганцевых образований возвышенности Беляевского: *a* — массивное марганцевое образование; *b* — шлаковидное марганцевое образование; *в* — плитчатое марганцевое образование; *г* — обломок породы марганцево-железосиликатного состава; *д* — сплошные скопления гидроксидов марганца; *е* — пятнистые скопления глинистых минералов (оттенки зеленого), пропитанные гидроксидами марганца (темно-серые, черные) и веществом кремнистого состава (светло-серое). Изображения получены с помощью фотоаппарата (*a–г*) и бинокля (*д, е*).

Fig. 2. External and internal structures of manganese formations from Belyaevsky Seamount. *a* — massive manganese formation, *b* — slaggy manganese formation, *в* — platy manganese formation, *г* — rock fragment of manganese-iron-silicon composition, *д* — massive accumulations of manganese hydroxides, *е* — mottled accumulations of clay minerals (shades of green) impregnated with manganese hydroxides (dark grey and black in colour) and siliceous substance (light grey in colour). The images were obtained using a photographic camera (*a–г*) and a binocular microscope (*д, е*).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ литературных источников (Астахова, 2008, 2013; Астахова, Введенская, 2003; Астахова и др., 2010; Астахова, Лопатников, 2017; Астахова, Саттарова, 2012; Батулин, 2012; Горшков и др., 1992; Михайлик, 2009; Михайлик и др., 2015, 2014а, Михайлик, Ханчук, 2011; Михайлик и др., 2014б; Скорнякова и др., 1987; Штеренберг и др., 1986) и новые данные (рис. 1–6; табл. 1–3) позволили обобщить и уточнить представления о марганцевом рудообразовании на возвышенности Беляевского в Японском море.

Пространственная локализация. Марганцевое оруденение имеет значительное площадное распространение — на северной и южной вершинах (рис. 1). В вертикальном профиле процесс ограничен интервалом 2150–2800 м, при этом основная масса рудного вещества сосредоточена на отметках выше 2500 м. Глубже 3100 м марганцевые образования уже не встречаются.

Внешнее и внутреннее строение. В морфологическом ряду преобладают черные, темно-серые, темно-коричневые корки (плитки) мощностью 2–7 см (рис. 2*в*). Верхняя часть корок имеет крупнослоистую текстуру. В нижней части

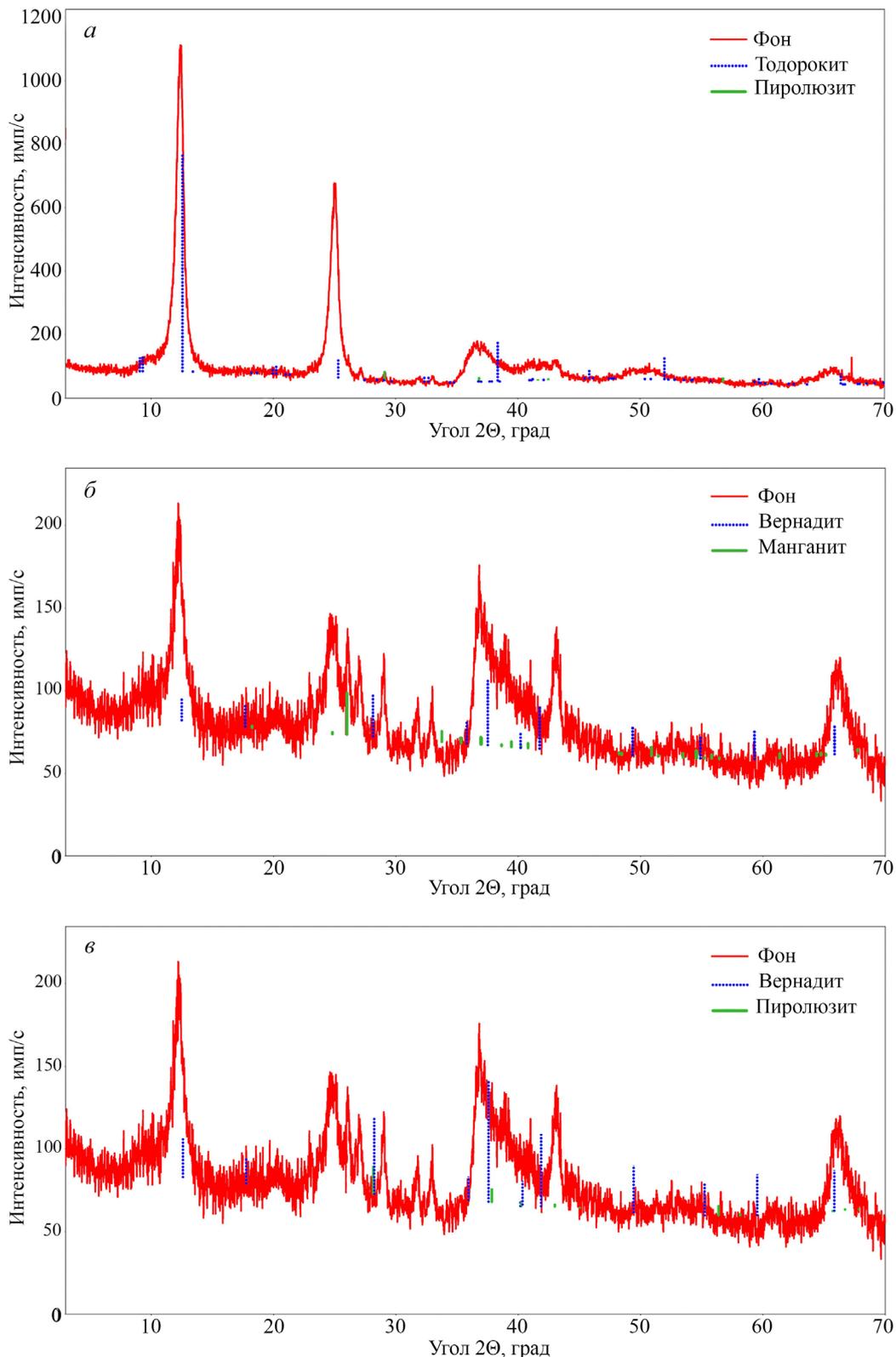


Рис. 3. Дифрактограммы рудного вещества марганцевых образований возвышенности Беляевского со станции LV64-5: *а* — тодорокит и пирролюзит (существенное преобладание тодорокита); *б* — вернадит и манганит (близкое количественное отношение минералов); *в* — вернадит и пирролюзит (сопоставимое количество). Местоположение станции представлено на рис. 1.

Fig. 3. X-ray diffraction patterns of an ore substance in manganese formations from Belyaevsky Seamount, station LV64-5. *a* — todorokite and pyrolusite (considerable predominance of todorokite), *б* — vernadite and manganite (relatively equal proportion of the minerals), *в* — vernadite and pyrolusite (comparable quantities of the minerals). The location of the station is shown in Fig. 1.

Таблица 1. Содержание макрокомпонентов в марганцевых образованиях возвышенности Беляевского, %.
Table 1. Content of macrocomponents in manganese formations from Belyaevsky Seamount (%).

№ станции/ образца	Глубина моря, м	Северный участок														Источник данных	
		Al	Ca	CO ₂	C _{орг}	Fe	K	Mg	Mn	Na	P	Si	S _{общ}	Ti	ппп		
2068/2а (1)	2500-2800	0.312	0.718	-	-	0.656	0.204	1.502	50.555	0.481	0.069	2.437	-	0.045	-	(Михайлик, 2009)	
2068/2а (2)		0.209	0.621	-	-	0.264	0.138	0.687	58.67	0.237	0.93	4.468	-	0.029	-		
2069 (М-12), верх	2200-2500	0.34	2.10	нет	0.30	0.27	0.75	1.45	47.29	2.30	0.00	0.91	-	0.01	-	(Шперенберг и др., 1986)	
2069 (М-12), низ		0.35	1.99	нет	нет	0.03	0.03	0.24	50.02	4.29	0.00	0.34	-	0.01	-		
2069		-	1.55	-	-	0.04	-	-	-	22.84	-	-	-	-	0.01		-
2069/2-А1		0.800	0.685	-	-	0.036	0.152	1.472	51.700	1.451	0.447	2.643	-	-	-		-
2069/2-5	2200-2500	0.247	0.514	-	-	0.253	0.152	0.685	54.7	0.295	0.123	5.992	-	0.012	-	(Михайлик, 2009)	
2069/2-6		0.912	0.743	-	-	0.834	0.19	0.765	55.53	0.898	0.067	2.792	-	0.028	-		
2069/2		0.479	1.793	-	-	0.795	0.593	1.890	47.370	1.280	0.279	2.240	-	0.028	-		
2069/2-П7		0.48	0.57	-	-	6.3	1.07	1.1	49.5	1.12	0.06	1.6	-	0.02	14.8		
2069/2-15-2		0.36	0.85	-	-	1.14	0.81	1	53.2	1.18	0.06	0.79	-	0.01	14.9		
2069/2-П6-2		0.65	1.26	-	-	0.37	1.13	1.6	51.8	1.58	0.06	0.94	-	0.01	15.1		
2069-2-2	2500	1.26	2.13	-	-	2.4	1.19	2	42.5	3.06	0.04	4.78	-	0.03	10.8	(Скорнякова и др., 1987)	
2069/2-15-1		0.34	1.51	-	-	4	0.93	1.29	52.9	2.48	0.02	0.68	-	0.06	14.1		
3136-6А		0.65	-	-	-	0.96	-	-	44.29	-	-	4.0	-	0.03	-		
3136-6Б		0.37	-	-	-	0.59	-	-	50.73	-	-	2.26	-	0.012	-		
3136-7	2500	1.12	-	-	-	0.7	-	-	44.29	-	-	4.72	-	0.042	-	(Скорнякова и др., 1987)	
3136-8Б		0.23	-	-	-	11.51	-	-	23.8	-	-	14.53	-	<0.006	-		
3136-8В		<0.027	-	-	-	4.97	-	-	48.83	-	-	6.35	-	<0.006	-		
3136		0.70	2.84	-	-	0.72	0.58	-	50.65	0.41	0.01	2.96	-	-	-		
3136		2.03	3.2	4.67	0.31	0.72	0.72	1.2	32.0	3.8	0.033	3.7	0.18	0.027	-	(Батулин, 2012)	

Таблица 1. Окончание
Table 1. Continued

Южный участок															
											Наши данные				
LV64-4-8-1	2500-2800	0.45	0.86	-	-	0.69	1.05	1.37	53.06	2.04	0.10	1.31	-	0.018	15.64
LV64-5-10-1	2150-2450	0.38	1.78	-	-	1.89	1.07	1.63	46.01	2.29	0.10	1.88	-	0.014	17.59
LV64-6-3-1-2	2170-2450	0.22	0.61	-	-	0.11	0.60	0.92	58.94	0.90	0.18	0.79	-	0.007	16.59

Примечание к табл. 1–4. В табл. 1, 2, 4 компоненты химического состава перечислены в алфавитном порядке. ппп — потери при прокаливании. ср. — среднее арифметическое значение. Звездочкой отмечены данные, которые вызывают сомнения: резко повышенное или пониженное содержание элемента может быть связано с несовершенством методики анализа. В частности, при измерении галлия и европия могли быть не учтены наложения, которые формируются барием, марганцем, церием, неодимом — элементами ниже предела обнаружения. Прочерк — отсутствие данных. Форма представления данных в разных литературных источниках варьируется и к общему виду в рамках настоящего исследования не приводится, за исключением пересчета оксидного содержания в элементное.

Note to Tables 1–4. In the tables 1, 2, and 4 components of the chemical composition are listed in alphabetical order. Ppp and ср. denote lost on ignition and arithmetic mean value, respectively. An asterisk indicates data that are in doubt: a sharply increased or decreased content of an element may be due to shortcomings of the analytical procedure. In particular, when measuring gallium and europium, overlappings formed by barium, manganese, cerium, and neodymium — elements containing in manganese formations from the Sea of Japan in a sufficiently large amount — could not have been taken into account (Blokhin et al., 2014). Н.п.о. denotes that the element content is below the detection limit. A dash implies no data are available. The data reporting form varies in different literature sources and is not unified in this study, except in cases of converting oxides to elements.

наблюдаются выделения рыхлого глинистого вещества коричневатого-зеленого и желтовато-зеленого цвета. Описаны образцы с обломочной текстурой нижней части; в сущности, это брекчия, обломки и цемент которой представлены рудным веществом (Михайлик и др., 2014а).

По данным электронно-микроскопического и микронзондового исследования (Астахова и др., 2010; Михайлик и др., 2014а), корки имеют сложное внутреннее строение. Основными структурами являются колломорфная и волокнистая. Первая выражается в чередовании сложно изогнутых, концентрических полосок рудных минералов и обусловлена выпадением вещества из коллоидных растворов с ритмической кристаллизацией; вторая характерна для мономинеральных скоплений тодорокита. При больших увеличениях на некоторых участках видно ячеистое, сетчатое, глобулярное строение.

Минеральный состав. Главные рудные минералы — бернессит и тодорокит с небольшим количеством вернадита. Отдельные образцы повышенной плотности, изученные нами (обычная плотность рудных корок региона — не более 2 г/см³ (Астахова и др., 2015)), сложены тодорокитом, вернадитом, манганитом и пиролюзитом в разных сочетаниях (рис. 3). Бернессит обогащен натрием, калием, фосфором, обеднен железом, кремнием, алюминием и микроэлементами; тодорокиту присуще повышенное содержание марганца, кальция и молибдена при низком содержании железа, кремния, алюминия, стронция, фосфора, а также рассеянных элементов; отличительной особенностью вернадита является отсутствие железа (Горшков и др., 1992).

На примере одной из корок Л.Е. Штеренбергом с соавторами (1986) показано, что в нижних слоях преобладает бернессит, выше по разрезу увеличивается количество тодорокита. Однако переход бернессита в тодорокит наблюдается не по всему фронту корок, а лишь на отдельных участках (пятна, линзы). Такая пятнистость объясняется более поздним окислением этих минералов и переходом их в вернадит, который особенно широко развивается вблизи многочисленных трещин.

Минералы марганца встречаются не только в виде массивных скоплений (рис. 2а, 2д), но и выступают в роли цемента, скрепляющего обломки измененных базальтов (шлаковидные брекчии) и агрегаты высокожелезистых глинистых минералов типа смектит-гидролюда (рис. 2б). Последние бывают пропитаны веществом чисто кремнистого состава и в таком случае представляют собой фрагменты прочной марганцево-железосиликатной породы (рис. 2г, 2е).

Локальный химический состав. На примере одного из образцов, изученного с помощью

МАРГАНЦЕВОЕ РУДООБРАЗОВАНИЕ

Таблица 2. Содержание микроэлементов в марганцевых образованиях возвышенности Беляевского, мг/т (Au, Ir) и г/т (остальные элементы).
Table 2. Content of microelements in manganese formations from Belyaevsky Seamount (Au and Ir are in ppb, the other elements are in ppm).

№ станции/ образца	Ag	As	Au	Ba	Be	Bi	Br	Cd	Co	Cr	Cs	Cu	Ga	Ge	Hf	Hg	In	Ir	Источник данных
2068/2a (1)	0.14	56.88	-	12350.00	1.74	0.16	194.20	1.83	167.00	62.64	0.95	66.13	664.60*	29.61	-	1.29	0.03	-	(Михайлик, 2009)
2068/2a (2)	0.06	41.13	-	11740.00	1.23	0.16	182.00	0.92	288.10	65.45	0.80	58.83	726.40*	30.61	-	2.92	0.03	-	(Штеренберг и др., 1986)
2069 (M-12), верх	-	-	-	-	-	-	-	-	385	47	-	115	-	-	-	-	-	-	(Астахова, Введенская, 2003)
2069 (M-12), низ	-	-	-	-	-	-	-	-	280	25	-	70	-	-	-	-	-	-	(Михайлик, 2009)
2069	1*	-	-	1130	-	-	-	-	90	-	-	150	-	-	-	-	-	-	(Михайлик, 2009)
2069/2-A1	0.17	55.71	-	1490.00	1.01	0.15	196.30	1.97	345.80	36.17	0.69	158.50	1.08	29.62	-	1.90	0.03	-	(Михайлик и др., 2015, 2014a)
2069/2-5	0.28	40.54	-	11080.00	0.42	0.07	211.70	0.54	209.30	42.89	0.35	70.66	592.40*	29.89	-	0.98	0.03	-	(Михайлик, 2009)
2069/2-6	0.13	41.66	-	15010.00	0.98	0.09	224.00	2.92	495.80	45.69	0.95	186.70	1.08	26.51	-	1.40	0.04	-	(Михайлик и др., 2015, 2014a)
2069/2	0.16	25.17	-	14068.04	0.51	0.16	-	3.38	241.62	18.93	0.63	97.28	777.24*	-	-	0.33	н.п.о.	-	(Михайлик и др., 2015, 2014a)
2069/2-П7	-	47	-	11942	0.21	-	-	1.05	247	11.09	0.54	98	19.5	-	0.11	0.28	-	-	(Михайлик и др., 2015, 2014a)
2069/2-15-2	-	59	-	12485	0.21	-	-	1.4	296	6.6	0.18	111	-	-	0.09	0.71	-	-	(Михайлик и др., 2015, 2014a)
2069/2-П6-2	-	67	-	28800	0.39	-	-	4.3	768	1.8	0.36	222	-	-	0.13	0.29	-	-	(Михайлик и др., 2015, 2014a)
2069-2-2	-	37	-	8158	0.60	-	-	2	309	17.2	1.6	78	18.8	-	1.01	0.50	-	-	(Михайлик и др., 2015, 2014a)
2069/2-15-1	-	47	-	5493	0.23	-	-	7.5	187	8.2	0.28	93	19	-	0.05	1.00	-	-	(Михайлик и др., 2015, 2014a)
3136-6A	-	-	-	-	-	-	-	-	58	62	-	34	-	-	-	-	-	-	(Скорнякова и др., 1987)
3136-6B	-	-	-	-	-	-	-	-	50	64	-	18	-	-	-	-	-	-	(Скорнякова и др., 1987)
3136-7	-	-	-	-	-	-	-	-	62	82	-	26	-	-	-	-	-	-	(Скорнякова и др., 1987)
3136-8B	-	-	-	-	-	-	-	-	79	130	-	190	-	-	-	-	-	-	(Скорнякова и др., 1987)
3136-8B	-	-	-	-	-	-	-	-	54	50	-	100	-	-	-	-	-	-	(Скорнякова и др., 1987)
3136	-	-	-	400	-	-	-	-	42	8	-	-	-	-	-	-	-	-	(Горшков и др., 1992)
3136	-	18	3.15	1400	0.47	0.13	-	4.2	50	12	1.6	30	307*	-	0.7	0.17	-	7.34	(Горшков и др., 1992)
Южный участок																			
LV64-4-8-1	-	50.88	-	18900	0.72	-	-	12.36	64	6.89	0.58	431.5	5.00	-	0.39	-	-	-	Наши данные
LV64-5-10-1	-	69.50	-	29667	0.42	-	-	16.14	84	7.37	0.84	77.4	3.70	-	0.24	-	-	-	Наши данные
LV64-6-3-1-2	-	52.05	-	9732	0.19	-	-	0.79	123	2.85	0.27	48.1	5.39	-	0.07	-	-	-	Наши данные

Таблица 2. Окончание
Table 2. Continued

№ станции/ образца	Li	Mo	Nb	Ni	Pb	Rb	Sb	Se	Sn	Sr	Ta	Th	Tl	U	V	W	Zn	Zr	Источник данных
2068/2a (1)	792.00	555.00	-	617.10	13.86	16.80	17.79	2.55	-	1.53*	-	1.32	3.63	7.18	483.10	-	149.40	-	(Михайлик, 2009)
2068/2a (2)	813.00	270.00	-	367.50	18.15	13.19	8.69	1.89	-	1.85*	-	1.78	1.37	12.99	347.00	-	102.90	-	(Михайлик, 2009)
2069 (M-12), верх	-	-	-	620	нет	-	-	-	-	-	-	-	-	-	350	-	-	-	(Штеренберг и др., 1986)
2069 (M-12), низ	-	-	-	610	нет	-	-	-	-	-	-	-	-	-	172	-	-	-	(Штеренберг и др., 1986)
2069	-	240	-	800	30	-	-	-	-	1270	-	-	-	-	-	-	570	-	(Астахова, Вве- денская, 2003)
2069/2-A1	453.60	1020.00	-	866.50	22.12	10.96	23.78	2.36	-	2.15*	-	1.81	2.87	11.49	750.80	-	164.10	-	(Михайлик, 2009)
2069/2-5	303.50	170.00	-	678.60	11.03	7.60	10.24	1.85	-	1.80*	-	0.61	1.50	25.63	523.70	-	123.70	-	(Михайлик, 2009)
2069/2-6	856.00	1150.00	-	812.40	8.50	15.79	23.95	2.58	-	2.25*	-	1.14	6.22	10.74	821.70	-	143.90	-	(Михайлик, 2009)
2069/2	761.28	890.00	-	703.62	17.26	7.80	-	0.17	-	1535.38	-	0.84	5.22	2.76	637.21	-	141.42	-	(Михайлик, 2009)
2069/2-П7	6.9	186	1.2	1053	21.1	12.5	-	-	-	2177	0.07	1.4	3.5	18	369	78	247	9.4	(Михайлик и др., 2014а)
2069/2-15-2	136	231	0.68	1176	6	7.2	-	-	-	2198	0.04	0.3	2.9	15.6	361	103	298	10.5	(Михайлик и др., 2014а)
2069/2-П6-2	312	398	1	852	4.3	10.3	-	-	-	2898	0.05	0.46	8	7	1624	265	206	14.4	(Михайлик и др., 2014а)
2069-2-2	417	158	1.9	545	20.1	32	-	-	-	1239	0.14	1.35	3.2	9.2	427	9.1	160	37	(Михайлик и др., 2014а)
2069/2-15-1	843	285	1.09	729	15.9	10	-	-	-	989	0.06	0.41	3.4	6.4	266	21	243	7.7	(Михайлик и др., 2014а)
3136-6A	790	230	-	88	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	80	-	(Скорнякова и др., 1987)
3136-6Б	520	220	-	80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	46	-	(Скорнякова и др., 1987)
3136-7	180	220	-	63	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	58	-	(Скорнякова и др., 1987)
3136-8Б	400	230	-	374	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	80	-	(Скорнякова и др., 1987)
3136-8В	24	120	-	101	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	24	-	(Скорнякова и др., 1987)
3136	-	220	-	65	-	-	-	-	-	410	-	2.0	-	-	-	-	33	-	(Горшков и др., 1992)
3136	600	300	2.9	68	20	23	12	1.06	0.5	445	0.24	2.5	1.3	1.1	52	88	52	30	(Багурин, 2012)
Южный участок																			
LV64-4-8-1	271.51	124.5	2.18	1561	14.02	12.66	-	-	-	1652	0.04	1.08	29.71	7.44	426.4	426.8	413.9	33.12	Наши данные
LV64-5-10-1	902.34	416.8	0.84	439.3	7.78	14.80	-	-	-	2655	0.03	0.82	26.67	5.12	627.6	122.5	316.0	15.87	Наши данные
LV64-6-3-1-2	92.24	122.8	0.41	624.5	2.86	6.02	-	-	-	1551	0.01	0.33	0.75	13.40	403.8	108.3	297.3	5.04	Наши данные

См. примечание к табл. 1.
See the note to Table 1.

Таблица 3. Содержание редкоземельных элементов в марганцевых образованиях возвышенности Беляевского, г/т.
Table 3. Content of rare earth elements in manganese formations from Belyaevsky Seamount (ppm).

№ станции/ образца	Sc	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣPЗЭ	Ce _{ан}	Eu _{ан}	Источник данных
2068/2а (1)	4.04	20.42	20.76	43.36	4.25	17.25	3.67	3.24*	4.00	0.58	3.10	0.70	1.94	0.32	1.74	0.32	125.65	1.00	3.70	(Михайлик, 2009)
2068/2а (2)	3.93	24.23	18.42	39.55	3.34	14.28	3.09	3.21*	3.57	0.54	3.11	0.72	2.09	0.35	1.89	0.36	118.75	1.09	4.21	
2069/2-А1	3.54	19.49	28.03	106.40	6.55	25.42	6.04	4.89*	5.90	0.85	4.35	0.88	2.41	0.39	2.11	0.35	214.06	1.71	3.59	
2069/2-5	1.95	7.37	6.89	17.62	1.78	7.70	1.92	2.94*	2.18	0.34	1.70	0.39	1.00	0.19	0.91	0.18	53.11	1.10	6.27	
2069/2-6	2.66	28.92	18.49	14.52	3.06	13.38	2.84	4.53*	3.91	0.59	3.61	0.85	2.42	0.37	2.02	0.36	99.87	0.41	5.84	
2069/2	1.80	21.50	24.70	71.29	4.98	21.94	4.85	3.04*	6.23	0.81	4.86	1.02	3.08	0.41	2.57	0.35	171.63	1.39	2.39	
2069/2-П7	1.37	8.8	9.9	48.3	2.6	10.5	2.2	0.58	2.3	0.42	2.4	0.45	1.2	0.19	1.3	0.17	91	2.21	1.13	
2069/2-15-2	0.94	11.8	11.9	29.9	2.9	13.1	2.9	0.71	3.1	0.51	3	0.60	1.7	0.23	1.6	0.21	84	1.16	1.04	
2069/2-П6-2	1.25	21.9	11.2	18.4	1.9	8.5	1.7	0.50	2.3	0.36	2.4	0.54	1.7	0.25	1.8	0.27	74	0.90	1.09	
2069-2-2	2.96	11.1	8.5	18.6	1.7	7	1.4	0.33	1.5	0.24	1.4	0.30	0.96	0.12	0.87	0.13	54	1.11	1.00	
2069/2-15-1	1.03	14.8	14.1	20.3	2.7	11.7	2.3	0.61	2.9	0.43	2.8	0.54	1.7	0.21	1.5	0.21	77	0.76	1.02	
3136	1.5	-	9.3	23	-	-	1.9	0.30	-	-	-	-	-	-	0.6	0.08	-	-	-	(Горшков и др., 1992)
3136-А1			11	21	2.5	10	2.2	0.32	2.7	0.42	2.3	0.50	1.4	0.20	1.4	0.21	55.68	0.89	0.58	(Батурин, 2012)
3136-А2	2.3	8.7	10.5	19.4	2.4	10.0	1.9	0.39	2.2	0.32	1.9	0.43	1.3	0.19	1.3	0.19	51.9	0.84	0.83	
3136-Б	(ср.)	(ср.)	8	20	1.8	7.4	1.6	0.28	1.8	0.29	1.5	0.31	0.92	0.15	0.93	0.14	45.12	1.12	0.73	
3136-7			8.6	23.6	2.1	7.9	1.8	0.46	1.7	0.28	1.4	0.31	0.80	0.11	0.85	0.12	50.25	1.21	1.15	
Южный участок																				
LV64-4-8-1	2.12	107	54.13	51.86	8.93	38.54	8.05	2.08	10.59	1.75	11.94	3.03	9.82	1.43	9.31	1.59	213.04	0.50	0.97	Наши данные
LV64-5-10-1	1.02	116	30.05	31.27	4.39	20.07	4.29	1.27	6.21	1.15	9.19	2.65	9.46	1.41	9.05	1.63	132.10	0.57	1.05	
LV64-6-3-1-2	0.73	20	4.80	5.69	1.01	4.36	0.95	0.29	1.26	0.20	1.30	0.35	1.17	0.17	1.15	0.19	22.90	0.56	1.16	

Примечание. ΣPЗЭ — общее содержание иттрия и лантаноидов, без скандия. Ce_{ан}, Eu_{ан} — цериевая и европиевая аномалии соответственно. Значения аномалий взяты из литературных источников либо, при необходимости и наличии соответствующих данных, рассчитаны самостоятельно по формулам: Ce_{ан} = Ce/Ce^{NASC} / (0.5La/La^{NASC} + 0.5Pr/Pr^{NASC}); Eu_{ан} = Eu/Eu^{NASC} / (0.5Sm/Sm^{NASC} + 0.5Gd/Gd^{NASC}), где NASC — североамериканский сланец (Gromet et al., 1984). См. также примечание к табл. 1.

Note. ΣPЗЭ denotes the total content of yttrium and lanthanides, without scandium. Ce_{ан} and Eu_{ан} are the cerium and europium anomalies, respectively. Anomalies' values were taken from literary sources or, when required and within available data, calculated independently using the following formulae: Ce_{ан} = Ce/Ce^{NASC} / (0.5La/La^{NASC} + 0.5Pr/Pr^{NASC}) and Eu_{ан} = Eu/Eu^{NASC} / (0.5Sm/Sm^{NASC} + 0.5Gd/Gd^{NASC}). NASC is the «North American Shale Composite» after Gromet et al. (1984). See also the note to Table 1.

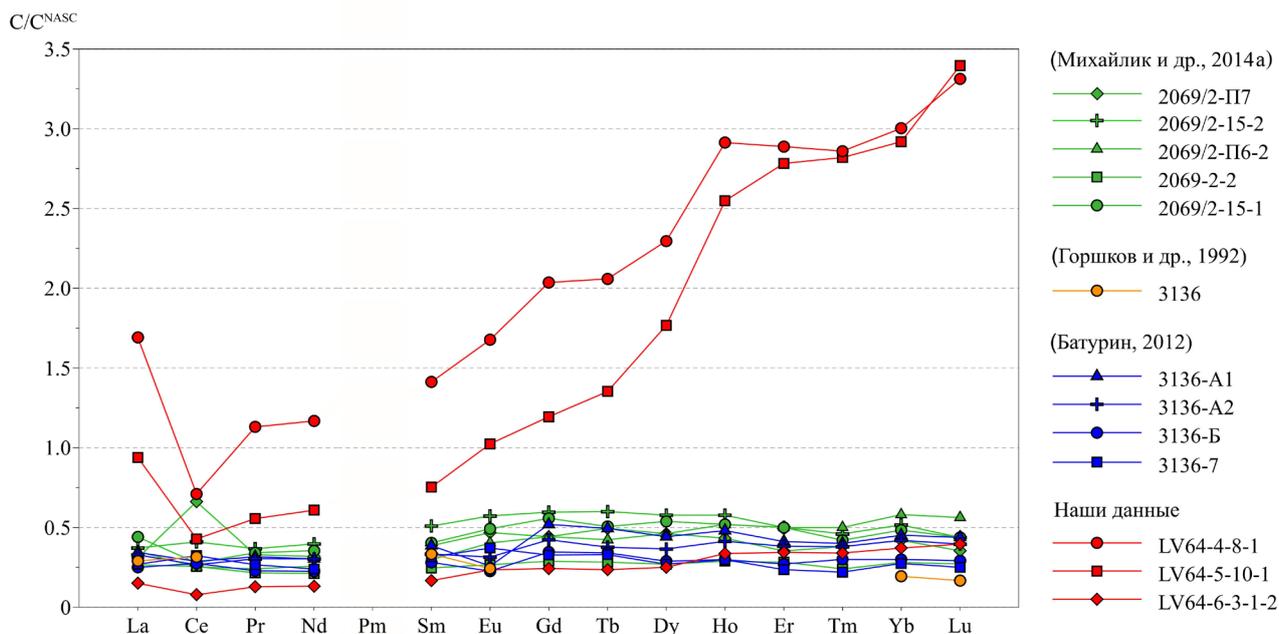


Рис. 4. Составы лантаноидов в марганцевых образованиях возвышенности Беляевского, нормализованные на состав лантаноидов в североамериканском сланце NASC (Gromet et al., 1984).

Fig. 4. NASC-normalized lanthanide patterns for manganese formations from Belyaevsky Seamount. NASC means the «North American shale composite» after (Gromet et al., 1984).

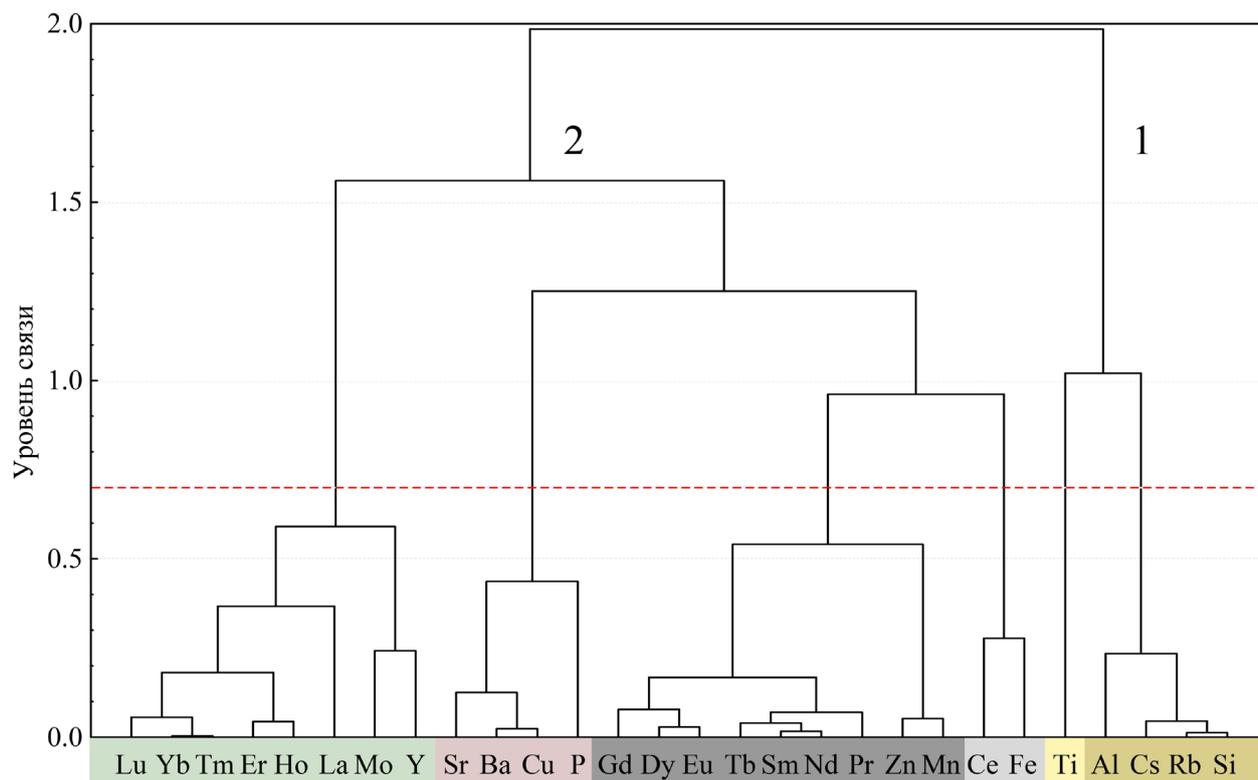


Рис. 5. Кластерная дендрограмма, отражающая основные корреляционные связи химических элементов в марганцевых образованиях возвышенности Беляевского. Пунктирной линией отмечен уровень связи, при котором проводилось разделение элементов на группы. Наиболее крупные группы: 1 — алюмосиликатная, 2 — рудная.

Fig. 5. Dendrogram showing correlation clustering of chemical elements in manganese formations from Belyaevsky Seamount. The dashed line marks the constraint level at which the elements were divided into groups. The largest two groups are aluminosilicate (1) and ore (2).

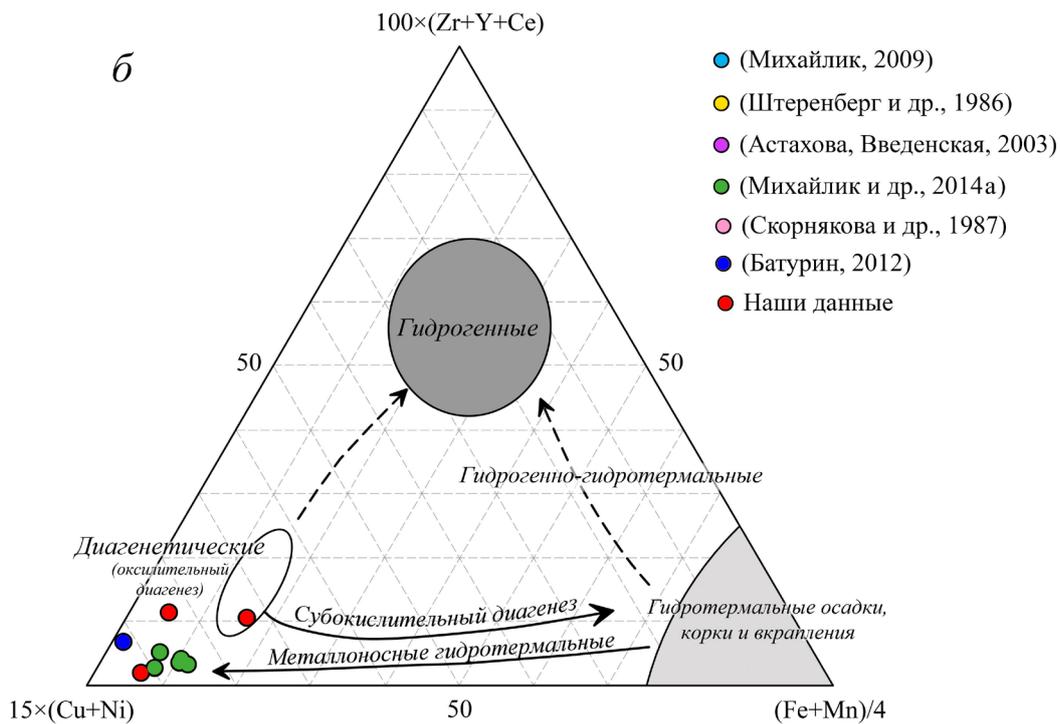
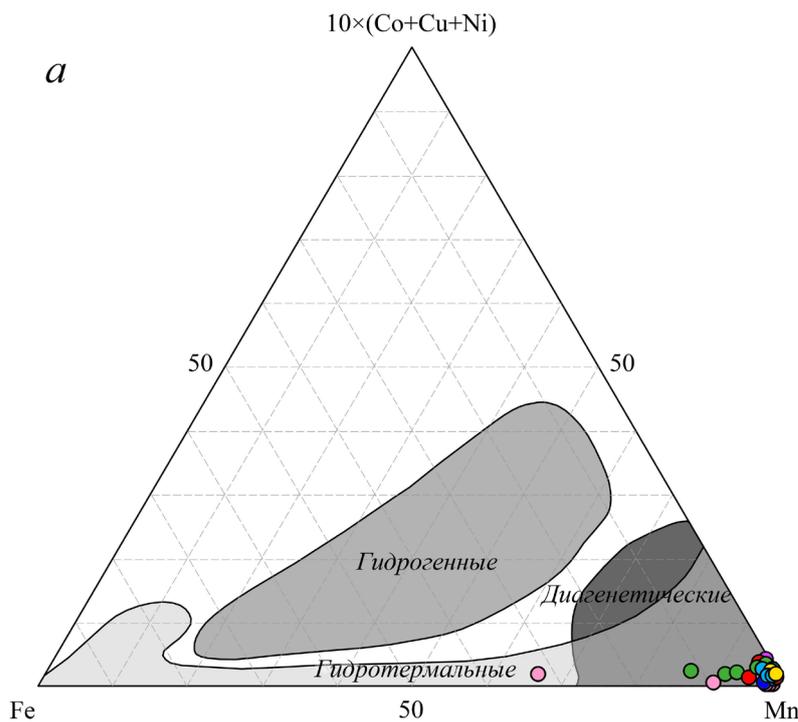


Рис. 6. Положение марганцевых образований возвышенности Беляевского на треугольных диаграммах Э. Бонатти (Bonatti et al., 1972) (а) и П. Жоссо (Josso et al., 2017) (б) относительно полей разных генетических типов железомарганцевых образований океана.

Fig. 6. Position of manganese formations from Belyaevsky Seamount regarding the fields of different genetic types of oceanic ferromanganese formations in the triangular diagrams after Bonatti et al. (1972) and Josso et al. (2017), see a and b respectively.

микронзда, показана химическая неоднородность рудных корок возвышенности Беляевского (Астахова и др., 2010). В виде полос и пятен различной формы выделяются участки марганцевого и железокремнистого состава. Отложения марганца более поздние по отношению к железокремнистым. В марганцевой матрице иногда отмечается примесь фтора и практически повсеместно — хлора. В некоторых случаях отложения марганца содержат кремний, железо, барий и

хром до 2.9%, 2.5%, 6.4% и 4.3% соответственно. В железокремнистой матрице обнаруживаются выделения барита, в том числе с высоким (3.27%) содержанием стронция. Барит кристаллизовался на самом позднем этапе формирования рудных корок. Все перечисленные минеральные фазы характеризуют низкотемпературные условия минералообразования.

Кроме марганца, железа, кремния и бария, собственные минеральные фазы (зерна),

образуют также медь, цинк, олово, никель, вольфрам, хром, серебро, церий, лантан и неодим (Астахова и др., 2010). Это самородные элементы, сульфиды, сульфаты, оксиды, интерметаллиды, которые отвечают высоко-, среднетемпературным условиям минералообразования. Размер зерен, как правило, не превышает первых микрометров. Они приурочены к матрицам разного состава, к их границам, трещинам, фиксируются между слоями в почках гидроксидов марганца.

Валовой химический состав. Согласно данным общего химического анализа, на возвышенности Беляевского развиты существенно марганцевые образования (до 58.94% Mn) с примесью кремния, переменным, но в целом низким содержанием железа (не более 11.51%, без учета локальных охристых выделений), алюминия и титана и повышенным — кальция, натрия и некоторых других макрокомпонентов (табл. 1). Убыль в весе при испарении конституционной воды, сгорании органических веществ и разложении карбонатов (потери при прокаливании) составляет 10.8–17.59% и оценивается как значительная. Имеет место обогащение корок барием до 29667 г/т и стронцием до 2898 г/т при существенно более низком содержании цветных, редких, благородных металлов (в основном сотые и тысячные доли процента с преобладанием никеля, ванадия, лития, молибдена, кобальта) (табл. 2). Суммарное содержание редкоземельных элементов также низкое и только в единичных пробах превышает 200 г/т (табл. 3). Основной вклад вносят иттрий и легкие лантаноиды, прежде всего церий, лантан, неодим. Аномалии церия и европия демонстрируют как положительные, так и отрицательные значения (0.41–2.21, 0.58–1.16 соответственно; для европиевой аномалии не учитываются пробы (Михайлик, 2009), сомнительные с точки зрения повышенного содержания в них европия). При нормализации на состав североамериканского сланца NASC видно, что при общем обеднении рудного вещества редкоземельными элементами в двух образцах с южного участка имеет место достаточно интенсивное концентрирование тяжелых лантаноидов с выраженной отрицательной аномалией церия (рис. 4). По данным фазового анализа, главную роль в накоплении лантаноидов и иттрия в рудных корках возвышенности Беляевского играют железистая и алюмосиликатная фазы; гидроксиды марганца в данном случае имеют подчиненное значение (Михайлик и др., 2014б).

Своеобразие химического состава марганцевых образований возвышенности Беляевского нагляднее проявляется при сопоставлении с другими марганцевыми и железомарганцевыми образованиями океана (табл. 4) и при кластеризации данных (рис. 5). В результате кластерного

анализа обособлены группы элементов, которые в марганцевом рудогенезе ведут себя сходным образом. Наиболее крупные группы — алюмосиликатная и рудная (рис. 5). При уровне связи 0.7 в составе первой группы выделяется с одной стороны кремний и алюминий с сопутствующими рубидием и цезием, с другой — титан. Такая ассоциация представляется вполне закономерной (Бетехтин, 2007; Григорьев, 2009). Минералогически алюмосиликатная группа соответствует глинистому веществу и обломочному материалу, поступающему из базальтов при их разрушении и обогащающему нижние части марганцевых образований (Астахова и др., 2014). Рудная группа значительно более обширная. В нее входит подгруппа железа-церия, подгруппа марганца, где выделяется блок собственно марганца-цинка и блок редкоземельных элементов с преобладанием легких лантаноидов, а также подгруппа бария с медью, стронцием и фосфором и подгруппа микроэлементов на базе тяжелых лантаноидов с блоком иттрия-молибдена и блоком собственно тяжелых лантаноидов с лантаном. Сильная связь церия с железом при отсутствии таковой с марганцем подтверждается данными фазового анализа (Михайлик и др., 2014б). Связь марганец-цинк расшифровывается, вероятно, вхождением цинка в состав тодорокита. Цинк встречается и в виде собственных минералов, но рассеянная форма, видимо, все-таки преобладает. Связь бария с медью осуществляется предположительно через серу. Медь как халькофильный элемент присутствует в марганцевых образованиях возвышенности Беляевского в том числе в виде зерен халькопирита. Барий, кроме как в тодороките, обнаружен в форме барита, в том числе с изоморфной примесью стронция, что также находит отражение на дендрограмме и соответствует общетеоретическим представлениям (Бетехтин, 2007; Григорьев, 2009). Фосфор на дендрограмме идет в виде отдельной ветки с примыканием к элементам, характеризующим процесс баритонакопления. В ходе микрозондового анализа собственные минералы фосфора, равно как его примесь в других минералах не диагностированы. Согласно А.И. Горшкову с соавторами (1992), фосфор накапливается в бернессите, однако сильной корреляционной связи с марганцем не зафиксировано. Все это говорит о рассеянности в веществе и отсутствии явно выраженной фазы-носителя. Неоднозначной с точки зрения расшифровки является взаимосвязь иттрия и молибдена. Разделение на дендрограмме лантаноидов на легкие и тяжелые отражает характер их фракционирования в марганцеворудном процессе.

Генезис, возраст, этапность рудообразования и источники металлов. По совокупности внешних и внутренних признаков (характер

Таблица 4. Средний химический состав марганцевых образований возвышенности Беляевского относительно других марганцевых и железомарганцевых образований океана (Кобальтбогатые ..., 2002; Usui et al., 1997).

Table 4. Bulk composition of manganese formations from Belyaevsky Seamount relative to other manganese and ferromanganese formations of oceans (Cobalt-Rich ..., 2002; Usui et al., 1997).

№ п/п	Краткая характеристика рудного материала	Al	Fe	Mn	P	Ti
		%				
1	Гидротермальные образования возвышенности Беляевского, Японское море	0.59	1.68	47.55	0.16	0.02
2	Гидротермальные образования Центральной Пацифики	0.91	0.56	45.6	0.17	0.04
3	Гидротермальные образования «горячей точки» о. Питкэрн, Южная Пацифика	0.21	0.07	44.0	0.03	0.02
4	Гидротермальные образования Марианской островной дуги, Западная Пацифика	1.13	1.51	40.4	0.04	0.07
5	Гидротермальные образования задугового рифта Гавр, Южная Пацифика	0.34	0.42	46.1	-	0.01
6	Гидротермальные образования Галапагосской рифтовой зоны, Пацифика	0.24	0.66	47.0	0.12	<0.01
7	Гидротермальные образования Идзу-Бонинской островной дуги, Западная Пацифика	0.46	0.36	44.8	0.49	<0.02
8	Гидрогенные образования Центральной Пацифики	1.11	13.7	13.8	0.37	0.55
9	Гидрогенные образования подводных гор и поднятий Мирового океана	1.13	15.08	19.01	1.23	0.98
10	Диатенетические образования Северо-Западной Пацифики	2.06	5.9	23.8	0.18	0.23

Таблица 4. Окончание

Table 4. Continued

№ п/п	г/г															
	As	Ba	Ce	Co	Cu	Li	Mo	Ni	Pb	Rb	Sr	Th	V	Y	Zr	
1	47.23	11402.65	35.07	207.32	110.00	473.72	352.60	578.94	14.56	13.37	1584.94	1.13	508.37	29.47	18.11	
2	15	7000	16.00	35	3100	90	830	3200	60	-	460	0.81	1190	28	21	
3	1.2	933	-	30	30	16	146	120	15	-	544	-	35	-	-	
4	69	1733	-	60	100	-	624	220	30	-	582	-	214	21	-	
5	-	-	-	20	80	769	1164	270	-	-	374	-	114	-	-	
6	-	2400	-	10	80	100	540	120	74	-	660	-	107	-	-	
7	34	4610	-	70	350	249	438	990	96	-	813	-	373	36	-	
8	-	946	-	3280	390	-	375	2700	1338	-	1109	-	490	-	-	
9	200	1400	983.20	5400	1100	100	400	4100	1300	24.61	1300	20.03	700	176.45	500	
10	21	2151	-	730	4800	-	213	5400	434	-	516	-	309	50	193	

Примечание. Приводятся элементы с контрастным содержанием в марганцевых и железомарганцевых образованиях разного генезиса. См. также примечание к табл. 1.

Note. Elements demonstrating contrast content in different genetic types of manganese and ferromanganese formations are provided. See also the note to Table 1.

распространения, строение, вещественный состав) марганцевые корки возвышенности Беляевского, как и всего Японского моря (рис. 6), относятся к гидротермальным, гидротермально-осадочным (Астахова, 2008, 2013; Астахова, Введенская, 2003; Астахова и др., 2010; Астахова, Лопатников, 2017; Астахова, Саттарова, 2012; Батулин, 2012; Горшков и др., 1992; Михайлик, 2009; Михайлик и др., 2015, 2014а; Михайлик, Ханчук, 2011; Михайлик и др., 2014б; Скорнякова и др., 1987; Штеренберг и др., 1986). Геологическими и геофизическими данными подтверждено, что вулканизм на подводных возвышенностях Японского моря имел длительный (со среднего миоцена) и пульсирующий характер (Дальневосточные ..., 2007; Леликов и др., 2018). Это определило широкое развитие и долговременность поствулканических гидротермальных процессов. Вполне вероятно, что слабые поствулканические процессы протекают на некоторых вулканах в настоящее время. По микропалеонтологическим данным возраст марганцевых корок возвышенности Беляевского оценивается как позднеплейстоценовый (Скорнякова и др., 1987). Таким образом, это достаточно молодые быстрорастущие образования. Скорость их роста достигает нескольких миллиметров в тысячу лет. Судя по внутреннему строению, хорошо отражающему этапность рудообразования, существенно марганцевые образования (более 42% Mn) формировались при непосредственном излиянии гидротермальных растворов на поверхность морского дна, тогда как марганцево-железосиликатные — в ходе диффузного просачивания растворов по зонам ослабления вулканических пород и цементации гидроксидами марганца вулканокластического материала и осадочных отложений (Астахова, 2018; Астахова и др., 2010). В вещественном составе в пользу гидротермального происхождения изученного материала говорит, в частности, бернессит-тодорокитовая ассоциация рудообразующих минералов, высокие значения модулей Mn/Fe , $(Mn+Fe)/Ti$, Ba/Ti , низкие значения модуля $Al/(Al+Mn+Fe)$ (236.49, 3116.46, 83.03 и 0.01 соответственно; здесь и далее приводятся средние значения), крайне низкая сумма $Co+Cu+Ni$ (925.79 г/т), при этом обогащение барием (12417.34 г/т), литием (473.72 г/т), обеднение торием (1.13 г/т), низкое суммарное содержание редкоземельных элементов (96.33 г/т), положительная иттриевая аномалия Y/No (30.82). Очевидно, в периоды затухания поствулканической деятельности рост корок происходил гораздо медленнее за счет водородной поставки вещества, чему есть косвенное геохимическое подтверждение (табл. 3, рис. 4). Положительная аномалия церия как специфическая черта водородных железо-

марганцевых образований (Дубинин, 2006; Bau, Koschinsky, 2009; Bau et al., 2014; McLennan, 1989), скорее всего, маркирует в корках возвышенности Беляевского слои, которые формировались при водородном процессе (Михайлик и др., 2014а). Минимальное влияние водородного источника, судя по всему, испытали марганцевые образования южного участка возвышенности.

Для выяснения источника цветных, редких и благородных металлов проведено сопоставление результатов микрозондового анализа марганцевых корок и базальтов возвышенности Беляевского (Астахова и др., 2010). Показано, что в базальтах содержится почти тот же комплекс металлов с аналогичными минеральными формами выделения, что и в корках, а часть пор базальтов заполнена гидроксидами марганца. Подобное сходство наблюдается и на других возвышенностях Японского моря — Галагана, Медведева, безымянной постройке на северо-восточном окончании хребта Южное Ямато (Колесник, Астахова, 2018). Это может указывать на наложенный характер данного типа рудной минерализации и единый поствулканический источник металлов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По итогам проведенной работы составлена целостная современная картина марганцевого рудообразования на возвышенности Беляевского — одном из наиболее интересных объектов в системе вулканических построек Японского моря с развитой марганцевой минерализацией. В основе работы лежит обзор литературы по северной вершине, дополненный новыми данными по южному участку.

Показано, что на возвышенности Беляевского распространены марганцевые образования гидротермальной природы — молодые, быстрорастущие, низкотемпературные. Они приурочены к привершинным, склоновым частям постройки с глубинами моря 2150–2800 м (прижерловая, склоновая фации). Особенно широкое развитие на возвышенности получили слоистые корки с колломорфной и волокнистой структурой, сложенные бернесситом и тодорокитом. Второстепенными рудными минералами являются пирролюзит, вернадит и манганит. В отдельных образцах южного участка последние три минерала могут присутствовать в существенном количестве. Кроме массивных скоплений в форме корок, рудные минералы образуют прожилки в базальтах и цементируют агрегаты высокожелезистых глинистых минералов смектит-гидролюдистого ряда. Глинистые отложения первичны по отношению к марганцевым; локально встречающиеся минералы кремнезема

и барит (прожилковые выделения, пятна) кристаллизовались в последнюю очередь. Микро-размерные минеральные фазы меди, цинка, олова, никеля, вольфрама, хрома, серебра, церия, лантана и неодима, которые заключены в марганцевых образованиях и исходя из химического состава относятся к самородным элементам, сульфидам, сульфатам, оксидам и интерметаллидам, являются, видимо, наложенными (вторичными) и соответствуют высоко- и среднетемпературным условиям минералообразования. В валовом химическом составе рудных корок отмечается прежде всего обогащение марганцем, барием, стронцием, литием, молибденом, обеднение железом, алюминием, титаном и многими микроэлементами, включая кобальт, медь, никель, торий, редкие земли. Положительная цериевая аномалия, судя по всему, маркирует в корках те слои, которые формировались при гидрогенном процессе в периоды ослабления на возвышенности гидротермальной активности. Статистически все содержащиеся в марганцевых образованиях химические элементы делятся на две крупные группы — алюмосиликатную и рудную с подгруппами. В целом разделение отвечает общетеоретическим представлениям о гидротермальном марганцеворудном процессе и объясняется особенностями минерального состава изученного материала.

Авторы выражают искреннюю признательность Е.А. Лопатникову за предоставление фактического материала, к.г.-м.н. А.Н. Колеснику за помощь в статистической обработке данных и оформлении графического материала, к.г.-м.н. Н.В. Астаховой, к.г.-м.н. В.Т. Съедину и рецензентам за обсуждение рукописи и рекомендации по ее улучшению.

Работа выполнена в рамках госзадания ТОИ ДВО РАН (№ гос. рег. АААА-А17-117030110033-0) при дополнительной финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований ДВО РАН «Дальний Восток» (проект № 18-1-008).

Список литературы

Авдонин В.В., Кругляков В.В., Пономарева И.Н., Титов Е.В. Полезные ископаемые Мирового океана (основные типы твердых полезных ископаемых): Учебник. М.: Изд-во МГУ, 2000. 160 с. [*Avdonin V.V., Kruglyakov V.V., Ponomareva I.N., Titov E.V.* Minerals of the World Ocean (main types of solid minerals): Textbook. Moscow: Publishing House of Moscow State University, 2000. 160 p. (in Russian)].

Астахова Н.В. благородные, редкоземельные и цветные металлы в железо-марганцевых корках Японского моря // ДАН. 2008. Т. 422. № 4. С. 522–527 [*Astakhova N.V.* Noble, Rare-Earth, and Nonferrous Metals in Ferromanganese Crusts from Submarine Volcanoes of the Sea of Japan // *Doklady Earth Sciences*. 2008. V. 422. Iss. 7. P. 1161–1166. <https://doi.org/10.1134/S1028334X08070374>].

Астахова Н.В. Железомарганцевые корки 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. Iss. 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. <https://doi.org/10.7868/S0030157413050018> [*Astakhova N.V.* Occurrence Forms and Distribution of Precious and Base Metals in Ferromanganese Crusts from the Sea of Japan // *Oceanology*. 2013. V. 53. Iss. 6. P. 686–701. <https://doi.org/10.1134/S0001437013050019>].

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.* Chemical Composition and Origin of Ferromanganese Formations on Submarine Volcanoes and Rises in the Sea of Japan // *Volcanology and Seismology*. 2003. Iss. 6. P. 1–8].

Астахова Н.В., Колесник О.Н., Съедин В.Т. Рудная минерализация в вулканических породах подводных возвышенностей Японского моря // *Геохимия*. 2014. № 2. С. 158–177. <https://doi.org/10.7868/S0016752514020034> [*Astakhova N.V., Kolesnik O.N., S'edin V.T.* Ore Mineralization in Volcanic Rocks from the Submarine Rises of the Sea of Japan // *Geochemistry International*. 2014. V. 52. Iss. 2. P. 144–161. <https://doi.org/10.7868/S0016752514020034>].

Астахова Н.В., Колесник О.Н., Съедин В.Т. Цветные, благородные и редкоземельные металлы в железо-марганцевых корках и базальтах возвышенности Беляевского (Японское море) // *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*. 2010. № 2. Вып. № 16. С. 231–245 [*Astakhova N.V., Kolesnik O.N., S'edin V.T.* Nonferrous, Noble and Rare-Earth Metals in Ferromanganese Crusts and Basalts from the Belyaevsky Seamount (Sea of Japan) // *Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle*. 2010. № 2 (16). P. 231–245 (in Russian)].

Астахова Н.В., Лопатников Е.А. Марганцевые руды Японского моря (экономическая зона России) // *Природа*. 2017. № 12. С. 45–51 [*Astakhova N.V., Lopatnikov E.A.* Manganese Ores of the Sea of Japan (the Russian Economic Zone) // *Priroda*. 2017. № 12. P. 45–51 (in Russian)].

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 [*Astakhova N.V., Sattarova V.V.* The REE Species and Their Distribution in Ferromanganese Crusts in the Sea of Japan // *Russian Geology and Geophysics*. 2012. V. 53. Iss. 7. P. 649–656. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2012.05.003>].

Астахова Н.В., Съедин В.Т., Можеровский А.В., Лопатников Е.А. Первая находка массивного пиролюзита в глубоководной котловине Японского моря // *ДАН*. 2015. Т. 462. № 1. С. 68–72.

- <https://doi.org/10.7868/S0869565215130150> [Astakhova N.V., S'edin V.T., Mozherovskiy A.V., Lopatnikov E.A. The First Find of Massive Pyrolusite in a Deep-Water Basin of the Sea of Japan // *Doklady Earth Sciences*. 2015. V. 462. Iss. 1. P. 453–457. <https://doi.org/10.1134/S1028334X15050013>].
- Батури́н 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. Iss. 1. P. 862–867. <https://doi.org/10.1134/S1028334X12070112>].
- Бетехтин А.Г. Курс минералогии: Учебное пособие. М.: Изд-во КДУ, 2007. 721 с. [Betekhtin A.G. Course of Mineralogy: a Training Manual. Moscow: Izdatel'stvo KDU, 721 p. (in Russian)].
- Блохин М.Г., Зарубина Н.В., Михайлик П.Е. Определение галлия методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой на примере анализа железомарганцевых корок Японского моря // *Масс-спектрометрия*. 2013. Т. 10. № 3. С. 191–198 [Blokhin M.G., Zarubina N.V., Mikhailik P.E. Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometric Measurement of Gallium in Ferromanganese Crusts from the Sea of Japan // *Journal of Analytical Chemistry*. 2014. V. 69. Iss. 13. P. 1237–1244. <https://doi.org/10.1134/S1061934814130036>].
- Горшков А.И., Березовская В.В., Батури́н Г.Н., Сивцов А.В. Природа железомарганцевых корок с подводных гор Японского моря // *Океанология*. 1992. Т. 32. № 3. С. 542–549 [Gorshkov A.I., Berezovskaya V.V., Baturin G.N., Sivtsov A.V. The Nature of Manganese Crusts from Subsea Mountains of the Sea of Japan // *Okeanologiya*. 1992. V. 32. № 3. P. 542–549 (in Russian)].
- Григорьев Н.А. Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры. Екатеринбург: УрО РАН, 2009. 383 с. [Grigoriev N.A. Chemical Element Distribution in the Upper Continental Crust. Ekaterinburg: UB RAS, 2009. 383 p. (in Russian)].
- Дальневосточные моря России: в 4 кн. Кн. 3: Геологические и геофизические исследования / Гл. ред. В.А. Акуличев; отв. ред. Р.Г. Кулинич; Тихоокеан. океанол. ин-т им. В.И. Ильичева ДВО РАН. М.: Наука, 2007. 503 с. [Far Eastern Seas of Russia; In four books. Book 3. Geological and Geophysical Research (Alulichev V.A., Principal Editor; Kulich R.G., Responsible Editor; V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS). Moscow: Nauka, 2007. 503 p. (in Russian)].
- Дубинин А.В. Геохимия редкоземельных элементов в океане / Отв. ред. И.И. Волков; Ин-т океанологии им. П.П. Ширшова РАН. М.: Наука, 2006. 360 с. [Dubinin A.V. Rare Earth Element Geochemistry in the Ocean / Ed. by I.I. Volkov; Shirshov Institute of Oceanology RAS. Moscow: Nauka, 2006. 360 p. (in Russian)].
- Кобальтбогатые руды Мирового океана / Отв. ред. С.И. Андреев; науч. рук-ль И.С. Грамберг; Министерство природных ресурсов Российской Федерации, Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового океана. СПб.: ВНИИОкеангеология, 2002. 167 с. [Cobalt-Rich Ores of the World Ocean / S.I. Andreev, Editor in Charge; I.S. Gramberg, Scientific Leader; Ministry of Natural Resources of the Russian Federation, All-Russian Research Institute of Geology and Mineral Resources of the Ocean. St. Petersburg: VNIIOkeangeologia, 2002. 167 p.]
- Колесник О.Н., Астахова Н.В. Зерна цветных и благородных металлов в железомарганцевых образованиях и магматических породах подводных возвышенностей Японского моря // *Океанология*. 2018. Т. 58. № 1. С. 80–88. <https://doi.org/10.7868/S0030157418010082> [Kolesnik O.N., Astakhova N.V. Grains of Nonferrous and Noble Metals in Iron-Manganese Formations and Igneous Rocks from Submarine Elevations of the Sea of Japan // *Oceanology*. 2018. V. 58. № 1. P. 71–78. <https://doi.org/10.1134/S0001437018010071>].
- 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 Basin, Sea of Japan // *Oceanology*. 2018. V. 58. Iss. 1. P. 116–132. <https://doi.org/10.1134/S000143701706008X>].
- Михайлик П.Е. Состав, строение и условия формирования железомарганцевых корок Японского и Охотского морей: Дисс. канд. геол.-мин. наук. Владивосток: ДВГИ ДВО РАН, 2009. 114 с. [Mikhailik P.E. Composition, Structure, and Formation Conditions of Ferromanganese Crusts of the Sea of Japan and the Sea of Okhotsk: PhD Thesis. Vladivostok: DVGI DVO RAN, 2009. 114 p. (in Russian)].
- Михайлик П.Е., Михайлик Е.В., Блохин М.Г., Зарубина Н.В. Источники галлия в железомарганцевых корках Японского моря // *Геология и геофизика*. 2015. Т. 56. № 8. С. 1465–1472. <https://doi.org/10.15372/GiG20150805> [Mikhailik P.E., Mikhailik E.V., Blokhin M.G., Zarubina N.V. Sources of Gallium in Ferromanganese Crusts from the Sea of Japan // *Russian Geology and Geophysics*. 2015. V. 56. Iss. 8. P. 1148–1153. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2015.07.005>].
- Михайлик П.Е., Михайлик Е.В., Зарубина Н.В. и др. Вещественный состав и распределение РЗЭ в железомарганцевых корках подводных возвышенностей Беляевского и Медведева (Японское море) // *Тихоокеанская геология*. 2014а. Т. 33. № 5. С. 3–16 [Mikhailik P.E., Mikhailik E.V., Zarubina N.V. et al. Composition and Distribution of REE in Ferromanganese Crusts of the Belyaevsky and Medvedev Seamounts in the Sea of Japan // *Russian Journal of Pacific Geology*. 2014. V. 8. Iss. 5. P. 315–329. <https://doi.org/10.1134/S1819714014050029>].
- Михайлик П.Е., Ханчук А.И. Железомарганцевые корки с подводных вулканов задуговых бассейнов – новый генетический тип месторождений галлия // *ДАН*. 2011. Т. 439. № 4. С. 520–522 [Mikhailik P.E., Khanchuk A.I. Ferromanganese Crusts from Submarine Volcanoes of Backarc Basins as a New Genetic Type of Gallium Deposits // *Doklady Earth Sciences*. 2011. V. 439. Iss. 2. P. 1060–1062. <https://doi.org/10.1134/S1028334X11080058>].
- Михайлик П.Е., Ханчук А.И., Михайлик Е.В. и др. Новые данные о распределении редкоземельных элемен-

- тов 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. 2014. V. 454. Iss. 1. P. 79–83. <https://doi.org/10.1134/S1028334X14010218>].
- Саттарова В.В., Волохин Ю.Г. Геохимия редкоземельных элементов железомарганцевых корок подводного плато Огасавара (северо-запад Тихого океана) // Вестник ДВО РАН. 2018. № 4. С. 154–162 [Sattarova V.V., Volokhin Yu.G. REEs Geochemistry of the Ferromanganese Crusts of the Ogasawara Submarine Plateau (Northwestern Pacific) // Vestnik FEB RAS. 2018. № 4. P. 154–162 (in Russian)].
- Скорнякова Н.С., Батулин Г.Н., Гурвич Е.Г. и др. Железо-марганцевые корки и конкреции Японского моря // Доклады АН СССР. 1987. Т. 293. № 2. С. 430–434 [Skornyakova N.S., Baturin G.N., Gurvich E.G. et al. Ferromanganese Crusts and Concretions in the Sea of Japan // Doklady Akademii Nauk SSSR. 1987. V. 293. № 2. P. 430–434 (in Russian)].
- Штеренберг Л.Е., Александрова В.А., Габлина И.Ф. и др. Состав и строение марганцевых корок Японского моря // Тихоокеанская геология. 1986. № 1. С. 125–128 [Shterenberg L.E., Aleksandrova V.A., Gablina I.F. et al. Composition and Structure of Manganese Crusts in the Sea of Japan // Tikhookeanskaya Geologiya. 1986. № 1. P. 125–128 (in Russian)].
- Bau M., Koschinsky A. Oxidative Scavenging of Cerium on Hydrous Fe Oxide: Evidence from the Distribution of Rare Earth Elements and Yttrium between Fe Oxides and Mn Oxides in Hydrogenetic Ferromanganese Crusts // Geochemical Journal. 2009. V. 43. Iss. 1. P. 37–47. <https://doi.org/10.2343/geochemj.1.0005>.
- 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. V. 381. P. 1–9. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemgeo.2014.05.004>.
- Bonatti E., Kraemer T., Rydell H. Classification and Genesis of Submarine Iron-Manganese Deposits // Ferromanganese Deposits on the Ocean Floor (Horn D., Ed.). Washington, D.C.: National Science Foundation, 1972. P. 149–165.
- Gromet L.P., Haskin L.A., Korotev R.L., Dymek R.F. The «North American Shale Composite»: Its Compilation, Major and Trace Element Characteristics // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1984. V. 48. Iss. 12. P. 2469–2482. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(84\)90298-9](https://doi.org/10.1016/0016-7037(84)90298-9).
- Josso P., Pelletier E., Pourret O. et al. A New Discrimination Scheme for Oceanic Ferromanganese Deposits Using High Field Strength and Rare Earth Elements // Ore Geology Reviews. 2017. V. 87. P. 3–15. <http://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.09.003>.
- McLennan S.M. Rare Earth Elements in Sedimentary Rocks: Influence of Provenance and Sedimentary Processes. Geochemistry and Mineralogy of Rare Earth Elements // Reviews in Mineralogy. 1989. V. 21. Iss. 1. P. 169–200.
- Usui A., Bau M., Yamazaki T. Manganese Microchimneys Buried in the Central Pacific Pelagic Sediments: Evidence of Intraplate Water Circulation? // Marine Geology. 1997. V. 141. Iss. 1–4. P. 269–285.

MANGANESE MINERALIZATION ON BELYAEVSKY SEAMOUNT, THE SEA OF JAPAN: LITERATURE REVIEW AND NEW DATA

O.N. Kolesnik, E.I. Yaroshchuk

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Vladivostok, Russia, 690041

The paper gives systematized and generalized information on manganese formations from the northern and southern summits of Belyaevsky Seamount in the Sea of Japan. This information shows that low-temperature hydrothermal fast-growing crusts are spread on the seamount widely. The crusts have bedded structure. Their textures are collomorphic and fibrous. The main ore minerals are birnessite and todorokite while the accessory minerals include vernadite, manganite, and pyrolusite. There are samples where ore minerals form veinlets in basalts and cement aggregates of clay minerals like smectite-hydromica. Silica minerals and barite crystallized at final mineralization stages. Micro-sized mineral phases of Cu, Zn, Sn, Ni, W, Cr, Ag, Ce, La, and Nd containing in the crusts and classifying by chemical composition as native, sulfide, sulfate, oxide, and intermetallic are obviously superimposed and meet high- and medium-temperature conditions of mineral formation. Crusts' bulk chemical composition demonstrates abundances of Mn, Ba, Sr, and Li, as well as depletion of Fe, Al, Ti, and many trace elements. Positive Ce anomalies are likely to record the layers formed in the crusts due to the hydrogenic substance supply with hydrothermal ore formation processes being under attenuation.

Keywords: Sea of Japan, volcanic edifice, hydrothermal manganese crusts, metals.