

## Кремний в железомарганцевых образованиях Японского моря: особенности выделения и взаимоотношение с главными рудными фазами

Н. В. Астахова

Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия

*n\_astakhova@poi.dvo.ru*

В статье рассматриваются особенности распространения кремниевой минерализации в железомарганцевых корках Японского моря. Формирование корок приурочено к привершинным частям подводных вулканов. На некоторых из них среди материала драгирования обнаружены марганцевые и железокремнистые корки с примесью марганца. Главными породообразующими элементами в составе корок являются Mn (0.2–63.1 %), Fe (0.01–42.5 %) и Si (0.4–37.9 %). Значение Fe/Si изменяется от 0.01 до 5.5, Mn/Si – от 0.01 до 177.5. Содержание кремния существенно различается не только в образцах, отобранных на разных возвышенностях, но и в образцах, поднятых на одной и той же станции. Кроме железокремнистых корок, образованных зернами предположительно глауконита (селадонита), сцементированного кварцем, высокое содержание кремния имеют корки, где этот же глауконит сцементирован гидроксидами марганца. Повышенное содержание Si имеют образцы, в которых наряду с марганцевой матрицей встречаются участки аморфного кремнезема или происходит пропитка осадка гидроксидами марганца. Общая схема рудоотложения на подводных вулканах Японского моря следующая: Fe-Si → Si → Mn → Ba. В некоторых случаях наблюдается искажение этой закономерности, что связано, скорее всего, с пульсирующим поступлением гидротермального раствора из-за повторной вулканической деятельности.

**Ключевые слова:** железомарганцевые корки, кремний, Fe-слюды, Японское море

## Silicon in ferromanganese crusts from the Sea of Japan: peculiarities of allocation and interrelation with main ore phases

N. V. Astakhova

V. I. Ilichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch RAS, Vladivostok, Russia

The article considers the distribution features of siliceous mineralization in ferromanganese crusts of the Sea of Japan. The crusts are formed near the top parts of submarine volcanos. Both manganese crusts and ferrosiliceous crusts with manganese admixture were found on some of them, among the dredging material. The main rock-forming elements in the crusts are Mn (0.2–63.1 %), Fe (0.01–42.5 %) and Si (0.4–37.9 %). The Fe/Si value varies from 0.01 to 5.5, Mn/Si – from 0.01 to 177.5. The silicon content varies significantly not only in samples collected at different rises, but also in samples raised at the same station. In addition to ferrosiliceous crusts, formed as a result of quartz cementation of grains of presumably glauconite (celadonite), crusts where the same glauconite is cemented by manganese hydroxides have a high silicon content. The samples with amorphous silica areas along with the manganese matrix, or where the sediment is impregnated with manganese hydroxides, have an increased Si content. The general pattern of ore deposition on underwater volcanoes in the Sea of Japan is as follows: Fe-Si → Si → Mn → Ba. This pattern is distorted in some cases, which is most likely conditioned by the pulsating flow of hydrothermal fluids during subsequent volcanic activity.

**Keywords:** ferromanganese crusts, silicon, Fe-slides, Sea of Japan

### Введение

Японское море входит в систему окраинных морей северо-западной части Тихого океана и располагается в зоне перехода океанической коры Тихого океана к континентальной коре Азиатского континента. Это море представляет собой рифтогенную систему, образовавшуюся вследствие растяжения, вызванного перемещением Тихоокеанской и Евразийской литосферных плит и внедрением мантийного плюма. Наиболее активное рифтообразование происходило в кайнозойское время и привело к формированию глубоководных котловин (Леликов и др., 2006).

Особый интерес представляют вулканические возвышенности, расположенные в глубоководных котловинах Японского моря. Высота этих возвышенностей

порядка 2 км, а минимальные глубины от вершин до поверхности моря превышают 1 км. Образование их произошло в основном в среднемиоцен-плиоценовое время (Берсенева и др., 1987; Леликов и др., 2001). Все возвышенности сложены различными по уровню кремнезема (от базальтов до трахириолитов) вулканическими породами, которые являются производными одной базальтовой магмы. Плагииоклазовые базальты резко преобладают среди вулканитов и составляют 80–90 % объема поднятого материала. Содержание SiO<sub>2</sub> в них составляет 46–49 % (Съедин, 1987). Образцы базальтов часто представляют собой фрагменты шаровой отдельности секториальной (клиновидной) формы со стекловатой коркой закалывания, что указывает на подводные условия формирования (Берсенева и

**Для цитирования:** Астахова Н. В. Кремний в железомарганцевых образованиях Японского моря: особенности выделения и взаимоотношение с главными рудными фазами // Вестник геонаук. 2025. 6(366). С. 14–23. DOI: 10.19110/geov.2025.6.2

**For citation:** Astakhova N. V. Silicon in ferromanganese crusts from the Sea of Japan: peculiarities of allocation and interrelation with main ore phases. Vestnik of Geosciences, 2025, 6(366), pp. 14–23, doi: 10.19110/geov.2025.6.2

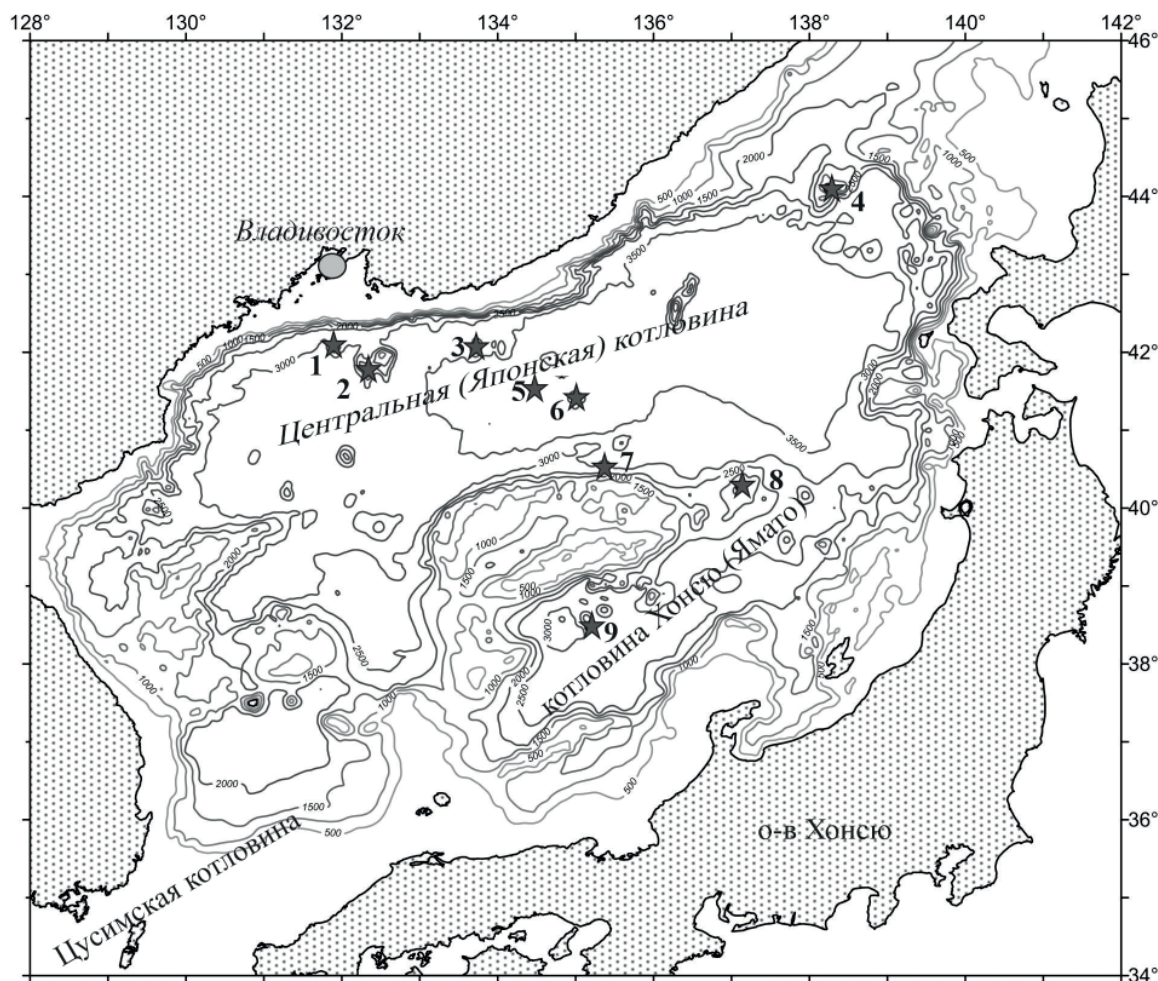


др., 1987). Характерной особенностью пород является их высокая (до 40 %) пористость (Свининников, Съедин, 1984). При драгировании привершинных частей большинства этих структур совместно с вулканитами часто поднимали железомарганцевые корки (ЖМК) (Астахова, Введенская, 2003). Проведенные исследования показали, что в формировании ЖМК Японского моря участвуют две основные рудные фазы: марганцевая и железокремнистая. Железомарганцевая встречается редко и в некоторых случаях может формироваться в результате «пропитки» гидроксидами марганца глинистых минералов (Астахова, 2018). Марганцевая минерализация в Японском море довольно хорошо изучена, в отличие от железокремнистой. Поэтому в данной работе будут рассмотрены особенности выделения кремния, повышенные содержания которого выявлены в железомарганцевых корках на 9 возвышенностях Японского моря (рис. 1), и его взаимоотношение с основными рудными фазами.

### Материалы и методы исследований

Материалом для исследования послужили образцы железомарганцевых корок, отобранные в морских экспедициях ТОИ ДВО РАН с 1976 по 2015 год. Все об-

разцы изучались при помощи стереоскопического микроскопа Stemi 2000-C (Zeiss, Германия). Для определения содержания макро-(Fe, Mn, Si, Al, Ca, Mg, Ti) и микроэлементов в ЖМК использовался атомно-эмиссионный (с индуктивно связанной плазмой) метод анализа на спектрометре Agilent 7500c (Agilent Technologies, США) в центре коллективного пользования ДВГИ ДВО РАН. Определение содержания п.п.п. и Si выполнено методом гравиметрии. Все определения элементов выполнялись на навеску, высушенную при 105 °С. Для более детального изучения были изготовлены аншлифы рудных корок, которые изучались в этом же центре при помощи микронзондового анализатора JXA-8100 (JEOL Ltd., Япония) с тремя волновыми спектрометрами, доукомплектованного энергодисперсионным спектрометром INCAx — sight (Oxford Instruments Analytical Ltd., Англия). Анализ осуществлялся при ускоряющем напряжении 20 кВ, угол отбора излучения составлял 45°. В ходе анализа использовалась библиотека эталонов пользователя. Количественный и полуколичественный анализ производился по процедуре PhyRoZ, являющейся стандартной программой энергодисперсионного анализатора Link ISIS. Для исследования образец напылялся тонким слоем углерода. Объем области, в которой производилось опреде-



**Рис. 1.** Карта-схема фактического материала. Значками показано местоположение подводных возвышенностей с железокремнисто-марганцевой минерализацией: 1 — гора Петра Великого, 2 — Первенец, 3 — хребет Васильковского, 4 — Витязя, 5 — безымянная, 6 — Беляевского, 7 — Шевалдина, 8 — наложенная постройка на возв. Южное Ямато, 9 — Медведева

**Fig. 1.** Sketch map of the factual material. Location of seamounts with the ferro-siliceous-manganese mineralization: 1 — Peter the Great; 2 — Pervenets; 3 — Vasil'kovsky Ridge; 4 — Vityaz; 5 — unnamed; 6 — Belyaevsky; 7 — Shevaldin; 8 — superimposed edifice on South Yamato Rise; 9 — Medvedev



ление химического состава, принимался объем с максимальным размером 3–4 микрона. Рентгеновский спектр этой области анализировался ЭДС и отображался на экране компьютера, который с помощью программного обеспечения производил анализ данного спектра и указывал положения линий тех элементов, которые были программно обнаружены.

### Результаты исследования и их обсуждение

Железомарганцевые отложения Японского моря представлены в основном корками толщиной от нескольких миллиметров до 25 см, реже — конгломератами. Корки подразделяются на однослойные марганцевые и двуслойные марганцевые и железо-марганцевые. В марганцевых двуслойных корках различаются монолитные и рыхлые слои, иногда — монолитные и почковидные слои, последние образованы сросшимися оолитами. В классических железомарганцевых корках выделяются нижний ожелезненный и верхний марганцевый слои, граница между ними, как правило, нечеткая, размытая. Количество железомарганцевых корок, по сравнению с марганцевыми, незначительное.

Основными рудообразующими минералами марганца в ЖМК являются тодорокит и бернессит, редко пиролюзит (Можеровский и др., 1989; Астахова и др., 2015).

Образование железомарганцевых корок на дне Японского моря связано с гидротермально-осадочными процессами. Об этом свидетельствуют: приуроченность корок к привершинным частям подводных вулканических построек, особенности химического состава корок и заполнение гидроксидами марганца пор в подстилающих базальтах (Скорнякова и др., 1987; Астахова, Введенская, 2003; Астахова и др., 2014; Батурин, 2012; Михайлик и др., 2014 и др.).

#### Химический состав железомарганцевых корок

Главными породообразующими химическими элементами в составе ЖМК Японского моря являются Mn, Fe и Si (табл. 1). Содержание этих элементов варьирует в широких пределах: Mn — от 0.2 до 63.1 % (среднее — 34.1 %); Fe — от 0.01 до 42.5 % (среднее — 6.6 %); Si — от 0.4 до 37.9 % (среднее — 10.2 %). Соответственно значение Mn/Fe изменяется от 0.01 до 9016 и в среднем составляет 463.5; Fe/Si — от 0.01 до 5.5 (среднее — 0.7); Mn/Si — от 0.01 до 177.5 (среднее — 24.0) (табл. 1). Значения этого отношения существенно различаются не только в образцах, отобранных на разных участках развития железомарганцевой минерализации, но и в образцах, поднятых на одной и той же станции. Часто это связано с примесью терригенного (эдафогенного) осадка.

Все остальные макроэлементы присутствуют в ЖМК в подчиненных количествах. Так, содержания Al, Ca, Mg, K, Na не превышают первых процентов, а Ti и P — десятых долей процента (табл. 1).

Концентрации микроэлементов в составе ЖМК незначительны — десятые или сотые доли процента (табл. 2). Исключением является барий, содержание которого может достигать 3 %. Суммарная концентрация Ni, Co, Cu варьируется от 71 до 3323 ppm, состав-

**Таблица 1.** Средний химический состав (вес. %) и соотношение элементов в ЖМК Японского моря

**Table 1.** Average chemical composition (wt. %) and the ratio of elements in FMCs from the Sea of Japan

Элементы, соотношения Elements, ratios	n	Средн. Aver.	Мин. Min	Макс. Max
Fe	51	6.6	0.01	42.5
Mn	51	34.1	0.18	63.1
Si	51	10.2	0.36	37.9
Al	51	1.1	0.01	7.6
Ca	51	0.8	0.07	3.5
Ti	51	0.1	0.00	0.9
Mg	51	1.4	0.07	2.9
K	44	1.3	0.07	4.9
P	44	0.1	0.00	0.3
Na	41	1.1	0.00	3.8
п.п.п.	31	12.5	3.82	18.1
Mn/Fe	51	464	0.01	9016
Fe/Si	51	1	0.01	6
Mn/Si	51	24	0.01	178
(Mn+Fe)/Ti	51	3693	14	22479
Ni+Co+Cu	51	980	71	3323

Примечание: n — количество проб

Note: n — number of samples

**Таблица 2.** Содержание микроэлементов ( $10^{-4}$  %) в ЖМК Японского моря

**Table 2.** Microelement content (in ppm) in FMCs from the Sea of Japan

Элементы, Elements	n	Сред. Aver.	Мин. Min	Макс. Max
Ba	51	5034	0	29667
Co	51	264	2	2033
Cr	51	18	2	192
Cu	51	165	2	652
La	38	17	1	86
Ni	51	550	41	2432
Pb	51	58	1	508
Sr	51	945	22	2655
V	51	280	6	1245
Zn	51	237	10	610
Zr	38	45	1	312
Mo	44	218	3	640
Li	43	384	4	5070
Be	31	2	0,1	41
As	31	54	6	251
Rb	31	37	0,4	156
Nb	31	2	0,1	7
Cd	31	3	0,1	16
Cs	31	2	0,1	7
W	31	91	2	427

Примечание: n — количество проб

Note: n — number of samples



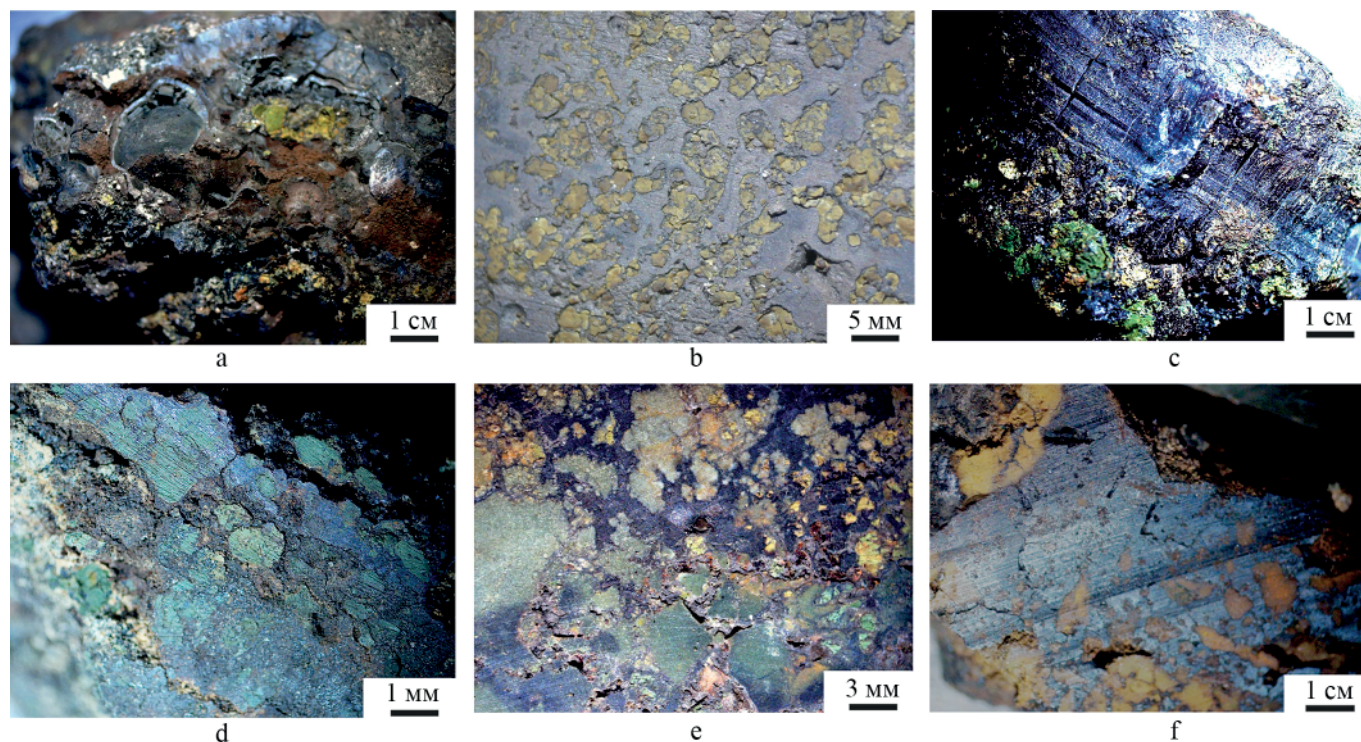
ляя в среднем 979.5 ppm. Основной вклад принадлежит Ni и Co, наиболее высокие концентрации этих элементов — 0.24 и 0.20 %, соответственно. Распределение Ni, Co и Si неравномерное как в образцах, отобранных на разных возвышенностях, так и в образцах одной и той же станции. Например, в образцах ЖМК, поднятых на возвышенности Первенец, содержание Ni меняется от 649 до 2432 ppm (Астахова и др., 2019), а в корках возвышенности Витязя Co составляет от 74 до 2033 ppm. Относительно высокие концентрации определены для стронция и ванадия, для всех остальных микроэлементов — до нескольких сотен ppm (табл. 2).

### Формы выделения кремния в железомарганцевых корках

Детальное изучение образцов под стереоскопическим и электронным микроскопами с микрозондовой приставкой показало несколько разновидностей соединений кремния в ЖМК Японского моря. Наиболее широко распространены и дают более высокое содержание Si включения зеленых или бурых зерен железокремнистого состава (предположительно глауконита) в составе рудных корок (рис. 2, 3), реже участки с кремнистым цементом или пропитка терригенного (эда-

фогенного) осадка гидроксидами марганца. Следует отметить, что на одних и тех же возвышенностях часто встречаются корки как с высоким, так и с низким содержанием Si. Это можно объяснить длительностью интервала драгирования в сотни метров вверх по склону и длиной возвышенностей в десятки километров. При детальном опробовании некоторых из них (например, на возвышенности Беляевского длиной 35 км) выявлено 3 района марганцевого рудообразования в южной, центральной и северной частях восточного склона этой постройки (Скорнякова и др., 1987; Астахова и др., 2010; Колесник, Ярошук, 2019).

Корки, содержащие включения зерен железокремнистого состава, были обнаружены на горе Петра Великого, возвышенностях Первенец, Васильковского, Шевалдина, Южное Ямато, Беляевского, Медведева. На первых пяти возвышенностях корки содержат значительное количество этих зерен (рис. 2). На северном окончании возвышенности Беляевского среди рудных корок также была обнаружена кремнисто-глауконитовая глыба с содержанием Mn 33 % (Скорнякова и др., 1987; Батурин, 2012). В ЖМК на других участках этой возвышенности, а также на возвышенности Южное Ямато и южном склоне возвышенности Медведева (ст. 1344) были определены лишь единич-



**Рис. 2.** Железосилико-марганцевые корки Японского моря:

а–b — возвышенности Первенец: а — граница между верхней почковидной и нижней частями корки, b — цементация зерен Fe-Si-состава гидроксидами марганца в нижней части корки; c–d — горы Петра Великого: c — граница между верхней марганцевой и нижней частями корки, d — цементация зерен Fe-Si-состава гидроксидами марганца в нижней части корки; e — коррозионный марганцевый цемент в глауконит (?)—кремнистых обломках железомарганцевых корок (возвышенность Васильковского); f — возвышенности Шевалдина: цементация бесформенных обломков Fe-Si-состава гидроксидами марганца

**Fig. 2.** The ferrosiliceous-manganese crusts of the Sea of Japan:

a–b — the Pervenets seamounts: a — boundary between the upper kidney-shaped part and the lower part of the crust, b — cementation of Fe-Si grains with manganese hydroxides in the lower part of the crust; c–d — the Peter the Great Mts.: c — boundary between the upper manganese and the lower part of the crust, d — cementation of Fe-Si grains with manganese hydroxides in the lower part of the crust; e — the Vasilkovsky Seamount: corrosive manganese cement in glauconite(?)—siliceous fragments ferromanganese crusts; f — the Shevaldin Seamounts: cementation of shapeless fragments of Fe-Si-composition with manganese hydroxides



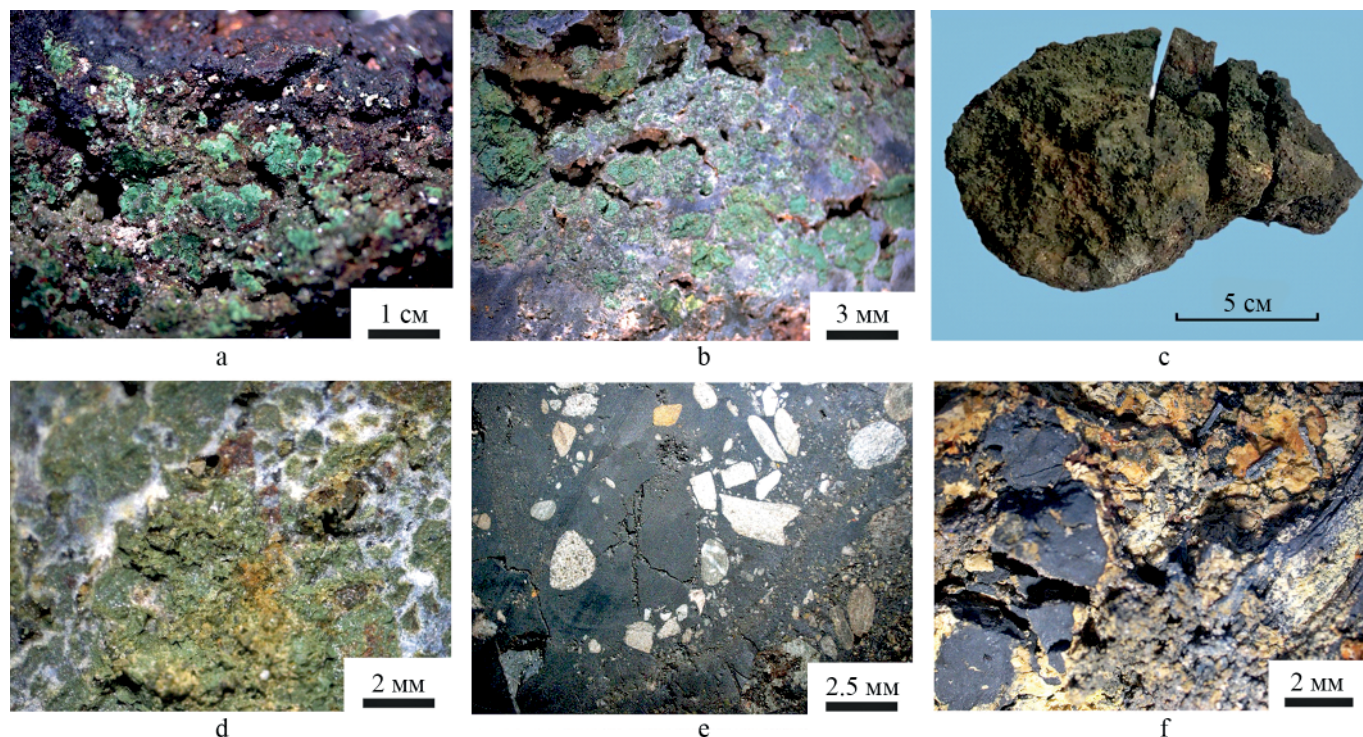
ные мелкие зерна Fe-силикатов (рис. 4, с–е). Участки развития кремнистых отложений были обнаружены в корках возвышенности Первенец и Медведева (рис. 4, b, e, f), а также наложенной постройки на возвышенности Южное Ямато (рис. 3, d). Цементация пелитового и песчанистого осадков гидроксидами марганца наблюдается на возвышенностях безымянной и Витязя (рис. 3, e, f).

Наиболее подробно изучены корки возвышенности Первенец (Астахова и др., 2019), представляющие собой рыхлые образования, легко разламывающиеся руками. Под стереоскопическим микроскопом видно, что они содержат большое количество включений комочков глинистого вещества зеленовато-бурого цвета (рис. 2, a, b). В нижних частях корок величина и количество этих обломков увеличивается. В некоторых случаях эти корки покрыты марганцевым слоем с почковидной структурой. Граница между слоями отчетливая. С помощью микрозондового анализа удалось выявить особенности внутреннего строения этих корок и на этом основании определить этапность рудоотложения в них. В результате проведенного анализа выявлены участки преимущественно железокремнистого, марганцево-железосиликатного и марганцевого состава (рис. 4, a; табл. 3). Во всех матрицах также присутствует примесь K, Na, Ca и Mg, сумма которых не превышает 7 %. Первичными были отложения железосиликатного состава, иногда с примесью Co до 0.22 %. Позже они были раздроблены и сцементированы

гидроксидами марганца. Прослеживается следующая этапность рудоотложения: Fe-Si → Mn-Fe-Si → Mn. Не исключено, что формирование участков марганцево-железосиликатного состава связано с пропиткой марганцем железосиликатных отложений. На это указывает частое выделение их на границе между участками Fe-Si- и Mn-состава (рис. 4, a). В таком случае этапность рудоотложения будет следующая: Fe-Si → Mn.

Помимо ЖМК на этой возвышенности встречаются пористые кремнистые корки с кавернозной поверхностью, часто покрытой тонкой пленкой гидроксилов марганца (рис. 3 a, b). Они образовались в результате цементации аморфным кремнеземом комочков зеленого цвета. Стенки пустот выстланы щетками мельчайших кристаллов кварца. Изредка поры в них заполнены гидроксидами марганца, иногда с примесью бария до 5 % (рис. 4, b; табл. 3). Здесь также первичны были отложения железосиликатного состава, сцементированные аморфным кремнеземом. Таким образом, изменение химического состава рудообразующего раствора происходило следующим образом: Fe-Si → Si → Mn.

Похожую картину мы наблюдаем в рудных отложениях горы Петра Великого и возвышенностей Васильковского и Шевалдина (рис. 2, с–f). Там также присутствует значительное количество зеленых зерен железосиликатного состава, сцементированных гидроксидами железа и марганца, марганцем или аморф-



**Рис. 3.** Кремнисто-марганцевые корки Японского моря:

a–b — возвышенности Первенец: a — общий вид кремнистой корки, b — цементация аморфным кремнеземом бесформенных комочков Fe-Si-состава; c, d — наложенная постройка на возв. Южное Ямато: c — общий вид кремнистой корки, d — цементация кремнеземом зерен Fe-Si-состава; e — цементация терригенных зерен гидроксидами марганца (возвышенность Витязя); f — тонкие слои тодорокита в глинистом осадке (безымянная возвышенность)

**Fig. 3.** The silicon-manganese crusts of the Sea of Japan:

a–b — the Pervenets seamounts: a — general view of the siliceous crust, b — cementation of Fe-Si grains with amorphous silica; c, d — the Peter the Great Seamount: c–d — superimposed edifice on South Yamato Rise: c — general view of the siliceous crust, d — cementation of Fe-Si grains with silica; e — the Vityaz Seamount: cementation of terrigenous grains by hydroxides of manganese; f — the unnamed Seamount: thin layers of todorokite in clay sediment



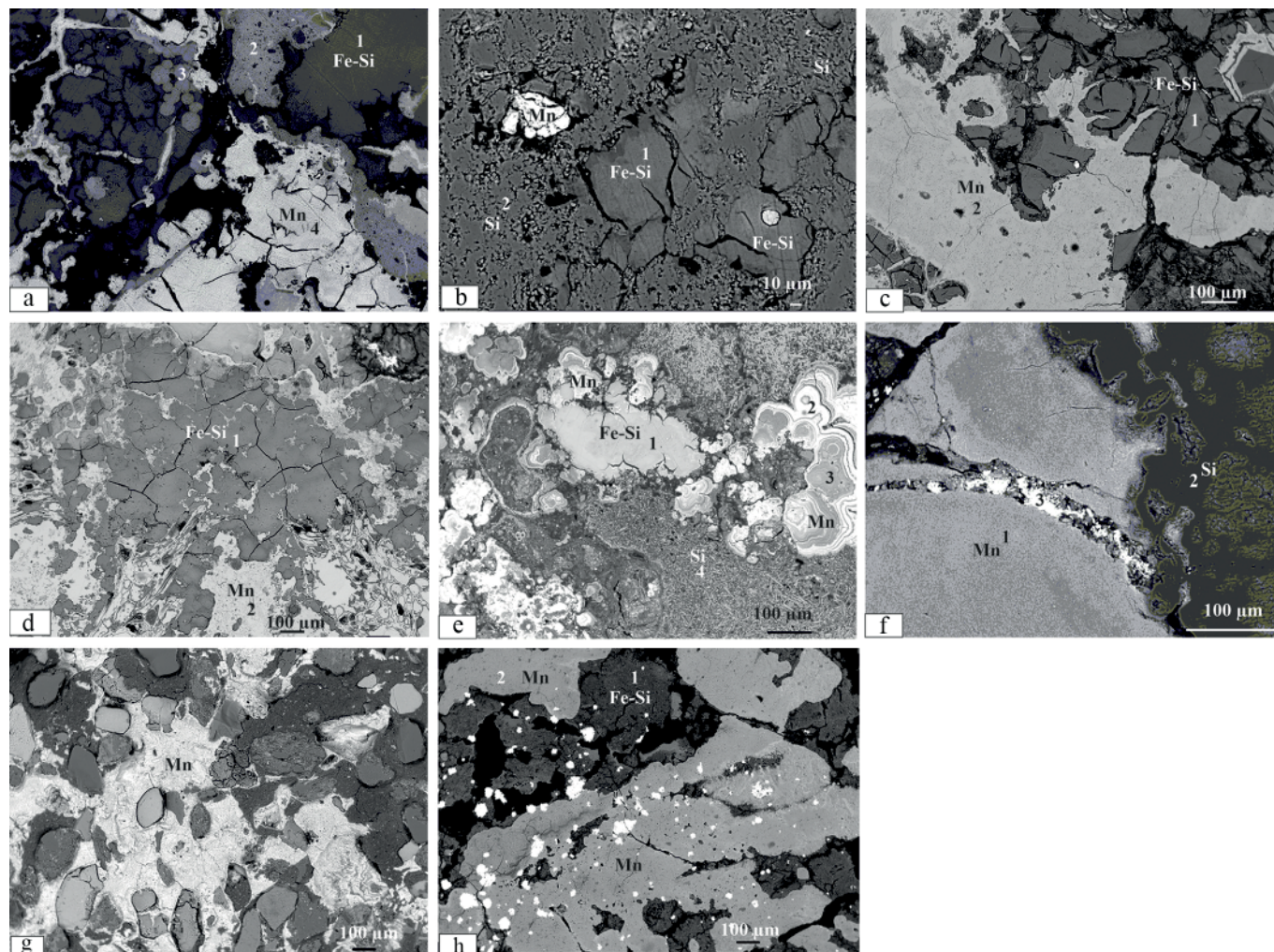


ным кремнеземом. Зеленовато-бурая окраска этих зерен чаще отмечается в марганцевых корках.

В ЖМК центральной части возвышенности Беляевского (ст. 2069) выделяются участки железокремнистого и марганцевого состава, иногда с примесью железа, кремния или бария, (табл. 3; рис. 4, с). Отложения марганца более поздние по отношению к железокремнистым. Также встречаются участки, где на матрице железокремнистого состава обнаружены пятнистые вы-

деления барита. В то же время выявлены полосчатые участки марганца, содержащие до 6.5 % бария (Астахова и др, 2010). Вероятная этапность рудоотложения следующая: Fe-Si → BaSO<sub>4</sub> (?) → Mn, Mn-Ba.

При драгировании вулканической возвышенности (наложенной постройки), расположенной на северном окончании хребта возвышенности Южное Ямато, были подняты марганцевые и железокремнистые образования. В марганцевых корках этого райо-



**Рис. 4.** Микротекстуры железокремнисто-марганцевых корок Японского моря:

a, b — возвышенности Первенец: a — цементация зерен Fe-Si-состава железомарганцево-кремнистыми отложениями и гидроксидами марганца; b — зерна Fe-Si-состава в кремнистом цементе, в порах — более поздние выделения гидроксидов марганца; c, d — цементация гидроксидом марганца железокремнистых отложений: c — возвышенности Беляевского, d — наложенная постройка на возв. Южное Ямато; e — цементация кристаллическим кремнеземом железокремнистых отложений, на поверхности кремния выделяются наложенные почковидные выделения гидроксидов марганца (возвышенность Медведева, ст. 1344); f — взаимоотношение марганцевой и кремнистой матриц, в марганцевой — трещина, залеченная кристаллическим баритом (возвышенность Медведева, ст. 1471); g — цементация терригенных зерен гидроксидами марганца (возвышенность Витязя); h — железокремнистые отложения (осадок) перекрыты железокремнисто-марганцевыми, многочисленные белые пятна — барит (безымянная возвышенность). Цифрами обозначены участки микрозондового анализа (табл. 3)

**Fig. 4.** Microstructures the ferrosiliceous-manganese crusts of the Sea of Japan:

a, b — the Pervenets seamounts: a — cementation of Fe-Si grains with iron-manganese-silicon deposits and manganese hydroxides, b — Fe-Si-grains in silica cement, in the pores — later discharge of manganese hydroxides; c, d — manganese hydroxide cement in the ferrosiliceous sediments: c — the Belyaevsky Seamounts, d — superimposed edifice on South Yamato Rise; e — cemented with crystal silica of iron-silicate deposits. On the surface of the flint are superimposed kidney-shaped deposits of manganese hydroxide (the Medvedev Seamount, st. 1344); f — the ratio of the silicon and the manganese matrix. In the manganese one, a crack cured by crystal barite (the Medvedev Seamount, st. 1471); g — cementation of terrigenous grains by hydroxides of manganese (the Vityaz Seamount); h — ferrosiliceous deposits (sediment) overlain by ferrosiliceous-manganese ones, barite is observed as numerous white spots of different sizes (the unnamed Seamount). Numbers indicate the areas of point analysis (Table 3)



на обнаружены единичные раздробленные участки железокремнистого состава в марганцевой матрице (рис. 4, d; табл. 3). На поверхности образца много призматических и таблитчатых кристаллов барита размером 1–2 мм. Мелкие зерна барита присутствуют также в марганцевой матрице. Часто в гидроксидах марганца присутствует примесь бария (до 1.8 %). Железосиликатные образования представляют собой округлые удлиненные стяжения серо-зеленого цвета, длиной до 10 см (рис. 3, c). Они сформировались в результате цементации кремнеземом бесформенных кусочков зеленой глины железокремнистого состава (рис. 3, d) с незначительной примесью K, Mg, Cl, Na, реже Al и Ca (Ярошук, Астахова, 2017). Среди этой массы изредка отмечаются мелкие выделения гидроксидов марганца вдоль тонких трещин. По-видимому, эти образцы формировались на разном удалении от устья гидро-

термального выхода. Вероятно, изменение химического состава рудообразующего раствора происходило следующим образом:  $\text{Fe-Si} \rightarrow \text{Si} \rightarrow \text{Mn} \rightarrow \text{Ba}$ .

Детально изучались два образца ЖМК, поднятые при драгировании южного (ст. 1344) и восточного (ст. 1471) склонов возвышенности Медведева. Несмотря на то, что на других станциях драгирования поднимались кварц-глауконитовые породы, а в песчаных осадках присутствовало значительное количество глауконита (Липкина и др., 1987), единичные зерна Fe-Si-состава были обнаружены в образце 1344 (рис. 4, e; табл. 3). Эти зерна сцементированы кристаллическим кремнеземом, на поверхности которого выделяются наложенные почковидные выделения гидроксидов марганца.

Другое строение имеет образец 1471 (рис. 4, f; табл. 3). Здесь первичны были отложения гидроксидов марганца, трещины в котором заполнены более позд-

**Таблица 3.** Результаты микрозондового анализа (вес. %) аншлифов рудных корок Японского моря

**Table 3.** The results of microprobe analysis (wt. %) of polished sections of ore crust of the Sea of Japan

№	Mn	Fe	Si	O	K	Mg	Na	Ca	Al	Cl	F	P	S	Ba	Sr	Ti	Ni	Σ
Рис. 4, a / Fig. 4, a																		
1	–	16.2	23.5	40.6	4.8	3.2	0.7	–	–	0.3	–	0.3	–	–	–	–	–	89.7
2	8.1	16.5	21.4	38.1	4.6	3.0	1.1	0.4	0.5	0.3	–	0.3	–	–	–	–	–	94.3
3	20.6	12.6	14.6	33.6	3.5	2.4	1.2	0.6	0.6	0.4	–	–	–	–	–	–	–	89.9
4	50.3	0.5	–	31.3	3.2	0.6	2.9	1.3	0.2	0.2	–	0.2	–	–	–	–	–	90.6
5	50.1	–	–	32.9	4.4	1.5	2.4	1.5	–	0.2	–	0.3	–	–	–	–	–	93.2
Рис. 4, b / Fig. 4, b																		
1	–	14.4	18.9	28.1	5.5	2.6	–	–	–	0.3	–	–	–	–	–	–	–	69.7
2	–	0.8	45.6	53.9	0.2	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	100.5
3	49.6	2.3	1.1	33.0	1.3	1.6	1.3	0.7	–	–	–	–	–	1.8	–	–	–	92.7
Рис. 4, c / Fig. 4, c																		
1	0.6	19.7	22.1	29.5	2.4	1.7	1.3	–	0.9	–	–	–	–	–	–	–	–	78.2
2	42.4	1.9	2.6	32.1	1.2	2.0	1.8	0.5	0.6	0.5	–	–	–	–	–	0.4	–	86.0
Рис. 4, d / Fig. 4, d																		
1	0.3	12.0	19.6	40.5	3.4	1.6	2.7	–	3.4	1.8	–	–	–	–	–	–	–	85.3
2	48.3	0.9	–	28.3	1.0	1.7	1.5	0.6	–	0.7	–	–	–	1.7	–	–	–	84.5
Рис. 4, e / Fig. 4, e																		
1	–	24.4	22.6	37.1	2.3	1.8	0.6	0.4	1.2	–	–	–	–	–	–	–	–	90.4
2	42.7	0.8	–	31.2	0.9	2.8	2.1	1.2	0.4	0.4	–	–	–	–	–	–	–	82.4
3	29.6	1.6	–	16.0	0.7	2.8	1.4	1.1	0.9	0.3	–	–	0.2	0.6	–	–	0.5	55.8
4	–	–	46.5	51.6	–	–	–	0.4	–	–	–	–	–	–	–	–	–	98.4
Рис. 4, f / Fig. 4, f																		
1	39.0	–	–	20.2	1.1	1.8	1.7	0.5	0.4	0.5	1.1	–	–	–	–	0.2	–	66.6
2	–	–	44.9	46.7	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	91.6
3	0.4	0.5	–	21.8	–	–	–	0.2	–	–	–	–	13.2	50.3	5.3	–	–	91.8
Рис. 4, g / Fig. 4, g																		
1	51.6			33.2	1.6	2.6	2.8	0.7		0.7	8.0		0.3	1.4				102.5
Рис. 4, h / Fig. 4, h																		
1	0.7	8.4	23.5	35.2	2.7	3.2	0.6	–	–	0.2	–	–	0.5	–	–	–	–	75.0
2	38.3	2.9	4.7	28.2	1.0	1.9	2.1	–	–	0.5	–	–	0.3	–	–	–	–	79.8

*Примечание:* так как основная масса рудных корок рыхлая, то при микрозондовом анализе сумма элементов часто получается менее 100 %. Цифрами обозначены участки микрозондового анализа (рис. 4)

*Note:* Since most of the ore crusts are loose, the total content of elements determined on microprobing is often less than 100 %. Numbers indicate the areas of the microprobe analysis (Fig. 4)





ним баритом. Затем это все было перекрыто аморфным кремнеземом. Этапность рудообразования в этом случае следующая:  $Mn \rightarrow Ba \rightarrow Si$ . Перекрытие гидроксидов марганца более высокотемпературными отложениями диоксида кремния можно объяснить возобновлением гидротермальной деятельности в этом районе. Так как вулканизм на подводных возвышенностях Японского моря периодически возобновлялся в течение продолжительного времени начиная со среднего миоцена (Берснев и др., 1987; Леликов и др., 2001), то и приуроченная к нему поствулканическая гидротермальная деятельность носила пульсирующий характер.

Повышение содержания кремнезема в ЖМК также может быть связано с включением терригенного материала. Так, в корке возвышенности Витязя содержание Si достигает 13 % за счет цементации зерен песчаной размерности, в том числе кварца, гидроксидами марганца, практически не содержащими примеси Si и Fe (рис. 3, е; 4, g; табл. 3).

В ЖМК, поднятых при драгировании безымянной возвышенности, содержание Si варьирует от 0.36 до 13.23 %. Максимальное содержание кремния отмечено в образце, образованном в результате переслаивания рыжих глинистых слоев и черных прослоев тодорита мощностью 1–5 мм (рис. 3, f) (Астахова и др. 2015). Вероятнее всего, это произошло вследствие пульсирующего поступления гидротермальных растворов в глинистые отложения на склоне вулканической возвышенности. В результате этого, по данным микронзондового анализа, в глинистом железокремнистом осадке образовались пятна железокремнисто-марганцевого состава и многочисленные выделения кристаллического барита (рис. 4, h; табл. 3).

#### Особенности формирования кремнистой минерализации в железомарганцевых корках на подводных вулканах Японского моря

Начиная с 70-х годов прошлого столетия в экспедициях ТОИ ДВО РАН при драгировании привершинных участков подводных вулканических возвышенностей глубоководных котловин Японского моря более чем на 40 станциях поднимались предположительно гидротермальные породы, которые описывались как кремнисто-глауконитовые образования. Для уточнения их генезиса предыдущими исследователями были отобраны 47 мономинеральных проб из 10 районов, и кроме определения химического состава и аморфного железа они были изучены методами рентгеновского и электронографического анализов, ИК-спектроскопии и изотопно-кислородным методом (Липкина и др., 1987). Среди отобранных проб были также образцы с возвышенностей Первенец и Медведева. По данным кристаллохимических исследований выявлено, что образцы с этих возвышенностей относятся к 4 группам слоистых силикатов: 1 — гидрослюдастые минералы глауконит-селадонитового типа, 2 — смешанослойные минералы глауконит-селадонитового типа, 3 — смешанослойные минералы слюдopodobные, 4 — смешанослойные минералы смектит — слюда (Липкина и др., 1987). На возвышенности Первенец преоб-

ладают минералы 1 и 2 групп, на возв. Медведева — 3. В результате проведенных исследований был сделан вывод: «комплексное изучение слюдастых минералов из вулканических областей Японского моря позволило установить, что особенности гидротермального генезиса материнских пород нашли свое отражение в кристаллохимической специфике этих минералов, которые в основном представлены селадонитами, а глаукониты имеют тетраэдрический заряд (на формульную единицу), близкий к верхней границе этого заряда у селадонитов» (Липкина и др., 1987). Температура образования кварц-глауконитовых стяжений, определенная изотопно-кислородным методом, находится в пределах 42–58° (Липкина и др., 1987).

Следовательно, образование железистых слоистых силикатов на подводных возвышенностях Японского моря связано с гидротермально-осадочным процессом. Кремнезем поступает в гидротермальный раствор в виде отдельных молекул кремниевых кислот в результате химического взаимодействия воды с алюмосиликатными минералами вулканических пород в зонах тепловых аномалий при повышенной температуре (до 250–350 °C) и давлении. Гидротермальные растворы, содержащие значительное количество кремнекислоты, обладают высокой адсорбционной емкостью по отношению к катионам различных металлов. После соединения с катионами металлов они не коагулируют, а образуют гель по мере понижения температуры гидротерм во время рассеяния тепла в окружающие породы, при парообразовании и смешении растворов с холодными водами (Рычагов и др., 2005). Вероятно, образование Fe-слюд происходит при отложении этого железокремнистого геля на склонах подводных вулканов в районах выхода гидротермальных растворов. Эффективное отложение кремнезема в виде скрытокристаллического кварца и халцедона происходит при смешивании гидротерм, насыщенных кремнекислотой, с морской водой (Рычагов и др., 2005). Дальнейшая тектоническая активность, сопровождающая повторную вулканическую деятельность на подводных возвышенностях Японского моря, привела к разрушению железокремнистых отложений и переносу их вниз по склону. На это указывает наличие обломков кремнисто-глауконитовых пород и зерен глауконита в песчаных осадках (Липкина и др., 1987). Отложения марганца более поздние по отношению к железистым слюдам и аморфному кремнезему и, вероятно, происходят на некотором удалении от устья гидротермального источника. В гидроксидах марганца часто в виде примеси присутствует барий, а в марганцевой матрице почти всех изученных образцов обнаружены мелкие зерна барита. В некоторых случаях он полностью или частично заполняет трещины в отложениях гидроксидов марганца. Особенности выделения барита позволяют говорить, что процесс баритообразования является наложенным и происходит в последнюю стадию формирования ЖМК. Перекрытие аморфным кремнеземом отложений гидроксидов марганца с трещинами, заполненными баритом (возв. Медведева, ст. 1471, рис. 4, f), вероятно, связано с пульсирующим характером вулканизма и возобновлением гидротермальной деятельности в этом районе.





## Выводы

1. Детальное изучение гидротермальных железомарганцевых образований, сформировавшихся на привершинных склонах подводных вулканических возвышенностей Японского моря, показало, что они имеют неоднородный химический состав. Главными породообразующими химическими элементами в их составе являются Mn (0.2–63.1 %, среднее — 34.1 %), Fe (0.01–42.5 %, среднее — 6.6 %) и Si (0.4–37.9 %, среднее — 10.2 %). Значение Fe/Si изменяется от 0.01 до 5.5 (среднее — 0.7); Mn/Si — от 0.01 до 177.5 (среднее — 24.0).

2. Содержание кремния существенно различается не только в образцах, отобранных на разных участках развития железомарганцевой минерализации, но и в образцах, поднятых на одних и тех же возвышенностях. Причем среди материала драгирования на одной и той же станции могут находиться как марганцевые корки, так и железокремнистые с примесью гидроксидов марганца. Это можно объяснить длительностью интервала драгирования в сотни метров вверх по склону и протяженностью возвышенностей в десятки километров.

3. Кроме железокремнистых корок, образованных зернами предположительно глауконита, сцементированного кварцем, высокое содержание кремния имеют корки, где этот же глауконит сцементирован гидроксидами марганца. Повышенное содержание Si имеют образцы, в которых наряду с марганцевой матрицей встречаются участки железокремнистого состава, аморфного кремнезема или происходит пропитка осадка гидроксидами марганца.

4. Образование Fe-слюдов происходит при отложении железокремнистого геля из гидротермальных растворов на склонах подводных вулканов в местах их выхода. Эти отложения первичны по отношению к марганцевым. При дальнейшем поступлении более низкотемпературных растворов эти отложения могут размываться и переноситься вниз по склону.

5. Вероятно, изменение химического состава рудообразующего раствора на подводных возвышенностях Японского моря происходило следующим образом: Fe-Si → Si → Mn → Ba. В некоторых случаях наблюдается искажение этой закономерности, что связано, скорее всего, с пульсирующим поступлением гидротермального раствора из-за повторной вулканической деятельности.

Автор выражает благодарность сотрудникам лаборатории рентгеновских методов ДВГИ ДВО РАН А. А. Карабцову и Г. Б. Молчановой за помощь в проведении микронзондовых анализов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования (тема 124022100084-8).

## Литература / References

Астахова Н. В. Железомарганцевые корки центральной котловины Японского моря // Литология и полезные ископаемые. 2018. № 5. С. 384–396. DOI: 10.1134/S0024497X18050026

Astakhova N. V. Ferromanganese crusts in the Central Basin, Sea of Japan. Lithology and Mineral Resources, 2018, V. 53, No. 5, pp. 349–360. DOI: 10.1134/S0024490218050024

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 genesis of ferromanganese deposits of underwater volcanoes and seamounts of the Sea of Japan. Volcanology and Seismology, 2003, No. 6, pp. 36–43 (in Russian).

Астахова Н. В., Колесник О. Н., Съедин В. Т. Цветные, благородные и редкоземельные металлы в железомарганцевых 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, Earth Sciences, 2010, No. 2 (16), pp. 231–245 (in Russian).

Астахова Н. В., Колесник О. Н., Съедин В. Т. Рудная минерализация в вулканических породах подводных возвышенностей Японского моря // Геохимия. 2014. № 2. С. 158–177. DOI: 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, No. 2, pp. 144–161. DOI: 10.1134/S0016702914020037

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. DOI: 10.31857/S0203-03062019429-39.

Astakhova N. V., Lopatnikov E. A., Mazherovsky A. V., Yaroshchuk E. I. Hydrothermal formations on the Pervnets Rise, Japan Sea. Journal of Volcanology and Seismology, 2019, V. 13, No. 4, pp. 226–234. DOI: 10.1134/S074204631904002X

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

Astakhova N. V., S'edin V. T., Mozherovsky A. V., Lopatnikova E. A. The first find of massive pyrolusite in a deep-water basin of the Sea of Japan. Doklady Earth Sciences, 2015, V. 462, No. 1, pp. 453–457.

Батулин Г. Н. Геохимия гидротермальных железомарганцевых корок Японского моря // ДАН. 2012. Т. 445. № 2. С. 179–184.

Baturin G. N. Geochemistry of hydrothermal manganese crusts of the Sea of Japan. Doklady Earth Sciences, 2012, V. 445, No. 2, pp. 179–184 (in Russian).

Берсенов И. И., Леликов Е. П., Безверхний В. Л. и др. Геология дна Японского моря. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1987. 140 с.

Bersenev I. I., Lelikov E. P., Bezverkhniy V. L. et al. Geology of the Sea of Japan Floor. FESC USSR AS, Vladivostok, 1987, 140 p. (in Russian).

Колесник О. Н., Ярошук Е. И. Марганцевое рудообразование на подводной возвышенности Беляевского в Японском море (обзор литературы и новые данные) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2019. № 4. Вып. № 44 С. 93–109. DOI: 10.31431/1816-5524-2019-4-44-93-109.



- Kolesnik O. N., Yaroshchuk E. I. Manganese mineralization on Belyaevsky Seamount, the Sea of Japan: Literature review and new data. Vestnik KRAUNTs, Earth Sciences, 2019, No. 4 (44), pp. 93–109 (in Russian).
- Леликов Е. П., Емельянова Т. А., Съедин В. Т., Аракелянц М. М., Лебедев В. А. Новые данные по радиоизотопному датированию вулканитов Японского и Охотского морей // Тихоокеанская геология. 2001. № 5. С. 118–122.
- Lelikov E. P., Emelyanova T. A., S'edin V. T., Arakelyants M. M., Lebedev V. A. New data on geochronological dating of the volcanics of the Japan and Okhotsk seas. Pacific Geol., 2001, No. 5, pp. 118–122 (in Russian).
- Леликов Е. П., Цой И. Б., Ващенко Н. Г. и др. Геология и основные типы горных пород дна Японского моря. Владивосток: Дальнаука, 2006. 93 с.
- Lelikov E. P., Tsoy I. B., Vashchenkova N. G. et al., Geology and basic types of rocks of the Sea of Japan Floor. Vladivostok: Dalnauka, 2006, 93 p. (in Russian).
- Липкина М. И., Дриц В. А., Ципурский С. И. и др. Высокожелезистые диоктаэдрические слоистые силикаты из гидротермальных пород и осадков вулканических построек Японского моря // Известия АН СССР, серия геологическая. 1987. № 10. С. 92–111.
- Lipkina, M. I., Drits, V. A., Tsiursky, S. I., et al., High-Fe dioctahedral layered silicates from hydrothermal rocks and sediments in volcanic structures in the Sea of Japan. Izvestiya AN SSSR, Ser. Geol., 1987, No. 10, pp. 92–111 (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 Медведева (Японское море) // Тихоокеанская геология. 2014. 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, No. 5, pp. 315–329.
- Можеровский А. В., Грамм-Осипов Л. М., Волкова Т. И., Можеровская Л. В. Минералогические особенности железомарганцевых образований Японского моря // Новые данные по геологии западной части Тихого океана. Владивосток: ДВО АН СССР, 1989. С. 135–139.
- Mozherovskii A. V., Gramm-Osipov L. M., Volkova T. I., Mozherovskaya L. V. Mineralogical features of ferromanganese deposits of the Sea of Japan. In: New Geological Data on the Western Pacific. Vladivostok: FEB USSR AS, 1989, pp. 135–139 (in Russian).
- Рычагов С. Н., Главатских С. Ф., Сандимирова Е. И., Белоусов В. И. Рудные минералы в структуре гидротермально-магматических систем: состав, распределение, условия формирования // Геотермальные и минеральные ресурсы областей современного вулканизма: Материалы международного полевого Курило-Камчатского семинара. Петропавловск-Камчатский, 2005. С. 363–379.
- Rychagov S. N., Glavatskih. S. F., Sandimirova E. I., Belousov V. I. Ore minerals in the structure of hydrothermal-magmatic systems: composition, distribution, conditions of formation. Geothermal and mineral resources of the areas of modern volcanism. Materials of the International Field Kurilo-Kamchatka Seminar. Petropavlovsk-Kamchatsky, 2005, pp. 363–379. (in Russian)
- Свининников А. И., Съедин В. Т. Физические свойства пород кайнозойских вулканогенных комплексов Японского моря // Тихоокеанская геология. 1984. № 3. С. 7–15.
- Svininnikov A. I., S'edin V. T. Physical properties of the Cenozoic volcanogenic complexes of the Sea of Japan. Pacific Ocean Geology, 1984, No. 3, pp. 7–15 (in Russian).
- Скорнякова Н. С., Батулин Г. Н., Гурвич Е. Г. и др. Железомарганцевые корки и конкреции Японского моря // Докл. АН СССР. Т. 293. № 2. 1987. С. 430–434.
- Skornyakova N. S., Baturin G. N., Gurchich E. G. et al. Ferromanganese crusts and nodules of the Sea of Japan. Doklady Earth Sciences, 1987, V. 293, No. 2, pp. 430–434 (in Russian).
- Съедин В. Т. Формационно-геохимические типы кайнозойских базальтоидов Японского моря // ДАН СССР. 1987. Т. 296. № 6. С. 1441–1446.
- S'edin V. T. Formation-geochemical types of the Cenozoic basalts of the Sea of Japan. Doklady Earth Sciences, 1987, V. 296, No. 6, pp. 1441–1446 (in Russian).
- Ярошук Е. И., Астахова Н. В. Гидротермальные отложения на возвышенности Южное Ямато (Японское море) // Материалы XXII Международной научной конференции (школы) по морской геологии. М.: ИО РАН, 2017. Т. II. С. 289–291.
- Yaroshchuk E. I., Astakhova N. V. Hydrothermal deposits on the hill of the South Yamato (the Sea of Japan). Geology of seas and oceans: Proceedings of XXII International Conference on Marine Geology. V. II, Moscow: IO RAS, 2017, pp. 289–291 (in Russian).

Поступила в редакцию / Received 14.05.2025