#### — МИНЕРАЛОГИЯ —

УДК 553.2 (265.54)

# НОВЫЙ НЕТИПИЧНЫЙ СЛУЧАЙ ЖЕЛЕЗОМАРГАНЦЕВОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ В ЯПОНСКОМ МОРЕ

© 2024 г. О. Н. Колесник<sup>1,\*</sup>, А. А. Карабцов<sup>2</sup>, В. Т. Съедин<sup>1</sup>, А. Н. Колесник<sup>1</sup>, Е. П. Терехов<sup>1</sup>

Представлено академиком РАН Г.И. Долгих 25.10.2023 г. Поступило 26.10.2023 г. После доработки 13.12.2023 г. Принято к публикации 14.12.2023 г.

Описана первая в Японском море находка гидротермальных брекчиевых корок, сложенных гетитом с прожилками кварца.

*Ключевые слова:* гетит, кварц, гидротермы, брекчирование, хребет Северное Ямато, Японское море **DOI**: 10.31857/S2686739724040093

Увеличение спроса на металлы — общемировая тенденция. При этом запасы рудных месторождений суши необратимо истощаются. Как следствие, растет интерес к изучению железомарганцевых образований (ЖМО) океанов и морей. Кроме железа и марганца, они содержат медь, никель, кобальт, золото, теллур, молибден, висмут, платину, вольфрам, цирконий, ниобий, редкоземельные элементы [1].

Среди морей России широким распространением ЖМО характеризуется Японское море. В абсолютном большинстве случаев ЖМО Японского моря – это гидротермальные, гидротермально-осадочные марганцевые корки [2]. Они преимущественно черного цвета, слоистые, обнаруживаются в привершинных частях вулканических построек, которые расположены в глубоководных котловинах (наиболее продуктивный интервал глубин — 1500—2500 м). Главные рудные минералы этих ЖМО – тодорокит и бернессит. В последнее время вышла серия научных публикаций с описанием необычных для Японского моря пиролюзитовых, гетитовых и манганитовых корок [3-5], а также марганцевых конгломератов и брекчий [6, 7]. Каждый

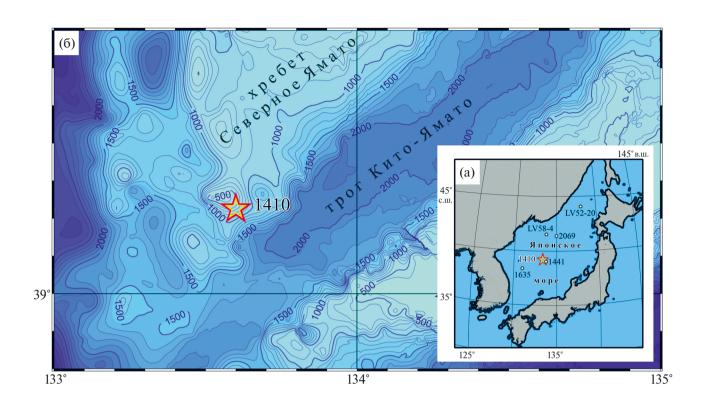
новый нетипичный случай требует особого рассмотрения.

Материалом для настоящего исследования послужили ЖМО (15 обломков рудных корок мощностью от 2.5 до 3 см) с южной оконечности хребта Северное Ямато (рис. 1), резко отличающиеся от обычных ЖМО Японского моря по цвету, плотности, строению.

Хребет Северное Ямато входит в состав крупнейшей в Японском море подводной возвышенности Ямато. Возвышенность характеризуется корой субконтинентального типа. В геологическом строении возвышенности участвуют породы разного возраста (от протерозойских до четвертичных) и генезиса (магматические, метаморфические, осадочные) [8–12]. В рельефе южной оконечности хребта Северное Ямато (рис. 1) выделяется локальное поднятие, с трех сторон ограниченное уступами высотой 300-600 м (горст?). Породы фундамента в районе исследования представлены нижнемеловыми песчаниками, алевропесчаниками, алевролитами (мощность толщи – не менее 300 м) и предположительно гранитоидами верхнего палеозоя. Кайнозойский осадочный чехол отсутствует либо имеет незначительную мощность. Образцы рудных корок драгированы на указанном локальном поднятии в пределах южного, наиболее крутого уступа (станция 1410, интервал драгирования -1000-1100 м, 28-й рейс НИС "Первенец", 1977 г.) (рис. 1). Вместе с корками подняты нижнемеловые кварцевые

\*E-mail:  $kolesnik\_o@poi.dvo.ru$ 

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской Академии наук, Владивосток, Россия <sup>2</sup>Дальневосточный геологический институт Дальневосточного отделения Российской Академии наук, Владивосток, Россия



**Рис. 1.** Карта района исследования. (а) положение станции драгирования фактического материала (звездочка) и станций, где ранее обнаружены нетипичные для Японского моря ЖМО (точки): LV58-4 — пиролюзитовые корки [3], 1635 — гетитовые корки [4], 1441 — манганитовые корки [5], LV52-20 — марганцевые конгломераты [6], 2069 — марганцевые брекчии [7]. (б) рельеф с указанием станции драгирования фактического материала (звездочка). Изобаты, м (GEBCO, 2022).

песчаники — средне- и мелкозернистые, массивные, с зеркалами скольжения.

Изучение рудных корок проводилось в лабораториях ТОИ ДВО РАН и АЦ-ЦКП ДВГИ ДВО РАН по отработанной схеме и включало в себя визуальный осмотр и световую микроскопию (строение), гидростатическое взвешивание (плотность), рентгенофазовый анализ (минеральный состав) и микрозондовое сканирование (микростроение, химический состав) [3—6].

Согласно результатам исследования, рудные корки со станции 1410 имеют сходные физические свойства, строение и вещественный состав.

Плотность рудных корок со станции 1410 в среднем составляет  $3.04 \text{ г/см}^3$ , тогда как плотность обычных тодорокит-бернесситовых ЖМО Японского моря — не более  $2 \text{ г/см}^3$  [3]. Полученные нами значения сопоставимы с плотностью редких для Японского моря гетитовых ( $3.03 \text{ г/см}^3$ ) и пиролюзитовых ( $3.35 \text{ г/см}^3$ ) корок [3, 4].

Рудные корки со станции 1410 характеризуются необычной для ЖМО Японского моря бурой окраской и почти полностью состоят из гетита (рис. 2,

3, табл. 1). Это вторая находка гетитовых корок в Японском море. Впервые они были обнаружены в виде единичных образцов на станции 1635 (рис. 1). Мощность корок со станции 1635 не превышала 2 см, гетит был представлен двумя разностями — желтой рыхлой (в основной массе) и черной плотной с матовым до алмазного блеском (в прослоях) [4]. В спилах корок со станции 1410 видно, что они плотные, массивные, с матовым блеском (зоны типа 1), следами брекчирования (зоны типа 2) и повсеместно распространенными прожилками кварца (рис. 2). Ассоциация гетита с прожилковым кварцем зафиксирована в рудных корках Японского моря впервые. Брекчиевые корки обычного для ЖМО Японского моря тодорокитбернесситового состава отмечены ранее только на станции 2069 [7]. В самой верхней части рудных корок со станции 1410 выделяется слой мощностью не более 0.3 см, который состоит из желтого рыхлого гетита без прожилков кварца. Сравнение дифрактограмм вещества разных гетитовых корок Японского моря показало практически полную идентичность положения рефлексов гетита при некотором расхождении в интенсивности, что,

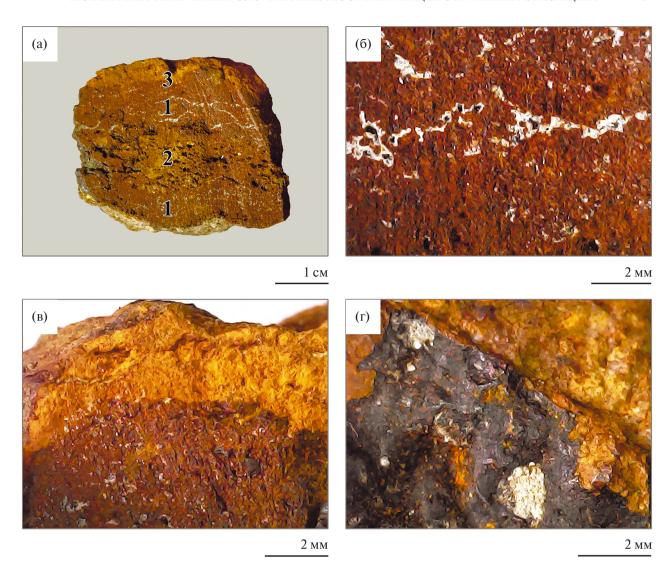
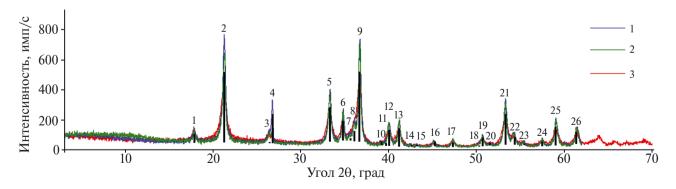


Рис. 2. Общий вид, строение и минеральный состав рудных корок со станции 1410 по результатам визуального осмотра, изучения с помощью микроскопа и рентгенофазового анализа. (а) поверхность спила с номерами выделенных зон: 1 — бурый гетит, плотная разность; 2 — бурый гетит, зона брекчирования; 3 — желтый гетит, рыхлая разность. (б) белые прожилки кварца в плотном буром гетите зоны типа 1. (в) граница между бурым гетитом зоны типа 1 и желтым гетитом зоны типа 3. (г) черная пленка тодорокита с локальными белесыми выделениями иллита на желтом гетите зоны типа 3.



**Рис.** 3. Дифрактограммы вещества гетитовых корок Японского моря (Си  $K\alpha$ -излучение, монохроматор на вторичном пучке): 1, 2 — гетитовая корка со станции 1410, бурое вещество зоны типа 1 и желтое вещество зоны типа 3 соответственно (см. рис. 2a); 3 — гетитовая корка 1635/7-3, черный прослой [4]. Расшифровка рефлексов 1-26 для корки со станции 1410, зона типа 1- см. табл. 1.

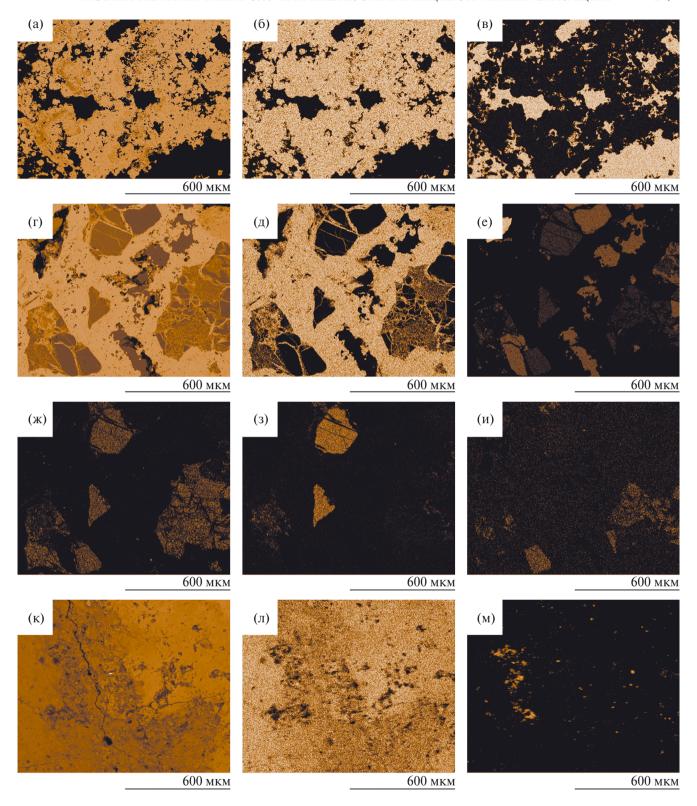
**Таблица 1.** Таблица рефлексов к дифрактограмме вещества рудной корки со станции 1410, зона типа 1 (см. рис. 2а, 3)

Номер рефлекса	Угол $2\theta$ , град	Межплоскостное расстояние $d$ , Å	Относительная интенсивность $I$ , $\%$	Минеральная фаза	Номер карточки стандарта, 00-ICDD	
1	17.89	4.95	12	Гетит	00-029-0713	
2	21.29	4.17	100	Гетит, кварц	00-029-0713, 01-070-7344	
3	26.45	3.37	1	Гетит	00-029-0713	
4	26.79	3.33	41	Кварц	01-070-7344	
5	33.33	2.69	48	Гетит	00-029-0713	
6	34.83	2.57	28	Гетит	00-029-0713	
7	35.69	2.51	3	Гетит	00-029-0713	
8	36.13	2.484	14	Гетит	00-029-0713	
9	36.69	2.447	99	Гетит, кварц	00-029-0713, 01-070-7344	
10	39.19	2.297	5	Гетит	00-029-0713	
11	39.71	2.268	3	Кварц	01-070-7344	
12	40.06	2.249	23	Гетит	00-029-0713	
13	41.19	2.190	25	Гетит	00-029-0713	
14	42.64	2.119	2	Кварц	01-070-7344	
15	43.26	2.090	2	Гетит	00-029-0713	
16	45.30	2.000	6	Гетит	00-029-0713	
17	47.35	1.918	6	Гетит	00-029-0713	
18	50.37	1.810	1	Кварц	01-070-7344	
19	50.72	1.799	12	Гетит, кварц	00-029-0713, 01-070-7344	
20	51.57	1.771	3	Гетит	00-029-0713	
21	53.34	1.716	43	Гетит	00-029-0713	
22	54.36	1.686	11	Гетит	00-029-0713	
23	55.48	1.655	2	Гетит, кварц	00-029-0713, 01-070-7344	
24	57.51	1.601	6	Гетит, кварц	00-029-0713, 01-070-7344	
25	59.03	1.564	27	Гетит	00-029-0713	
26	61.40	1.509	17	Гетит	00-029-0713	

вероятно, обусловлено наличием либо отсутствием в веществе корок кварца, рефлексы которого иногда накладываются на рефлексы гетита (рис. 3, табл. 1). Вывод подтверждается результатами предыдущих исследований, согласно которым разности лимонита/гетита не имеют принципиальных рентгенометрических отличий [13]. Верхняя поверхность корок со станции 1410 сглаженная, на некоторых ее участках отмечается тонкая черная пленка (тодорокит). На верхней и боковых поверхностях в незначительной степени развиты рыхлые выделения бледно-желтого, бледно-зеленого цвета

(иллит). Нижняя поверхность шероховатая, со следами отрыва, что может указывать на принадлежность к основной, более крупной рудной корке (залежи?).

В химическом составе рудных корок со станции 1410 резко преобладают железо и кислород (до 37 масс. % для каждого из элементов) при значительном (до 16 масс. %) количестве кремния и небольшой примеси других элементов (табл. 2). Сопоставление состава зон типа 1—3 с учетом их текстурно-структурных и минералогических характеристик (рис. 2—4) показало, что зоны типа 1



**Рис. 4.** Площадное распределение химических элементов в рудной корке со станции 1410 в "ложном" коричневом цвете по результатам микрозондового сканирования (строение корки с выделенными в ней зонами — см. рис. 2 а). (а—в) зона типа 1: (а) площадь сканирования в отраженных электронах, (б) Fe  $K\alpha_1$ , (в) Si  $K\alpha_1$ . (г—и) зона типа 2: (г) площадь сканирования в отраженных электронах, (д) Fe  $K\alpha_1$ , (е) Si  $K\alpha_1$ , (ж) Al  $K\alpha_1$ , (з) K  $K\alpha_1$ , (и) Na  $K\alpha_{1, 2}$ . (к—м) граница зон типа 1 и 3: (к) площадь сканирования в отраженных электронах, (л) Fe  $K\alpha_1$ , (м) Si  $K\alpha_1$ .

Элемент	Зона типа 1*			Зона типа 2*			Граница зон типа 1 и 3*					
	измер.	σ	норм.	σ	измер.	σ	норм.	σ	измер.	σ	норм.	σ
O	37.90	0.59	41.11	0.35	33.74	0.60	39.56	0.44	22.28	0.47	36.62	1.33
Na	_				1.34	0.11	1.57	0.12	0.23	0.10	0.38	0.15
Mg	0.25	0.09	0.27	0.10	0.35	0.08	0.41	0.10	0.36	0.05	0.59	0.07
Al	<del>-</del>				3.03	0.09	3.55	0.12	0.36	0.02	0.59	0.05
Si	16.14	0.10	17.51	0.15	9.24	0.10	10.83	0.10	4.20	0.13	6.89	0.09
P	0.45	0.05	0.48	0.05	0.39	0.03	0.46	0.03	0.40	0.06	0.66	0.10
S	<del>-</del>				_			0.13	0.03	0.21	0.06	
Cl	_				0.06	0.02	0.07	0.03	0.26	0.03	0.43	0.04
K	<del>-</del> .				0.46	0.03	0.54	0.03	0.06	0.02	0.10	0.04
Ca	0.12	0.03	0.13	0.03	0.21	0.02	0.25	0.03	0.46	0.03	0.75	0.03
Fe	37.34	0.17	40.50	0.26	36.44	0.14	42.74	0.35	32.14	1.54	52.77	1.25

**Таблица 2.** Химический состав рудной корки со станции 1410 по результатам площадного микрозондового сканирования, масс. %

Примечание. \* Площади сканирования изображены на рис. 4 а, г, к соответственно. Прочерк – элемент не обнаружен.

100.00

85.27

относительно обогащены кремнием и кислородом за счет присутствия в гетите прожилков кварца. Общая сумма элементов здесь максимальна вследствие плотного, массивного сложения вещества. В зонах типа 2, соответственно, имеет место обогащение натрием, калием и алюминием из-за присутствия в гетите, кроме кварцевых прожилков, мелких обломков нерудных минералов неправильной, угловатой формы, нередко пересеченных прожилками гетита (зоны брекчирования). Общая сумма элементов здесь более низкая ввиду пористости вещества. При переходе от зон типа 1 к зонам типа 3 несколько возрастает содержание калия, хлора и серы. Суммарное содержание элементов здесь минимально за счет рыхлой текстуры вещества.

100.00

92.19

Сумма

Ранее выполненный анализ распределения железомарганцевых, фосфоритовых и баритовых рудопроявлений в Японском море показал их приуроченность к тектонически-активным участкам дна и связь с гидротермальными процессами [2]. Данный вывод в полной мере относится к району исследования и изученным рудным коркам, на что указывает ряд фактов:

- 1) поднятие, где драгированы корки, имеет горстоподобную форму;
- 2) в материалах драгирования присутствуют обломки пород с зеркалами скольжения;
- 3) корки имеют брекчиевую, прожилковую текстуру [14];
- 4) корки резко обогащены железом (гетит) и обеднены марганцем, содержание марганца ниже аналитических возможностей микрозонда

(в гидротермальном процессе имеет место фракционирование железа и марганца с отложением чистого железистого или чистого марганцевого вещества; гидротермальные ЖМО приспрединговых океанических районов, как правило, гетитовые либо тодорокитовые [15]);

60.88

100.00

5) корки резко обеднены алюминием и титаном, содержание этих элементов в небрекчированных зонах ниже аналитических возможностей микрозонда (в гидротермальном процессе алюминий и титан практически инертны, их содержание в гидротермальных ЖМО не превышает 0.3 и 0.1% соответственно [15]).

Выявление новых нетипичных для Японского моря случаев железомарганцевой минерализации расширяет диапазон региональных вариаций вещественного состава ЖМО и условий рудогенеза.

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-00004, https://rscf.ru/project/23-27-00004/.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Выступление академика РАН Н.С. Бортникова // Вестник РАН. 2019. Т. 89. № 5. С. 513–514.
- 2. *Астахова Н.В.* Гидротермальный рудогенез Японского моря // Геология и геофизика. 2021. Т. 62. № 9. С. 1191—1203.

- 3. *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.
- 4. *Колесник О.Н., Карабцов А.А., Съедин В.Т., Колесник А.Н.* Первая находка гетитовых корок в Японском море // Доклады РАН. Науки о Земле. 2022. Т. 505. № 2. С. 159–164.
- Колесник О. Н., Карабцов А.А., Съедин В. Т., Колесник А. Н., Терехов Е. П. Первая находка манганитовых корок в Японском море // Доклады РАН. Науки о Земле. 2023. Т. 511. № 2. С. 191–197.
- 6. *Астахова Н.В., Лопатников Е.А., Цой И.Б.* Геохимия марганцевых конгломератов возвышенности Витязя (Японское море) // Вулканология и сейсмология. 2015. № 6. С. 13—23.
- 7. Михайлик П. Е., Михайлик Е. В., Зарубина Н. В., Баринов Н. Н., Съедин В. Т., Леликов Е. П. Вещественный состав и распределение РЗЭ в железомарганцевых корках подводных возвышенностей Беляевского и Медведева (Японское море) // Тихоокеанская геология. 2014. Т. 33. № 5. С. 3—16.
- 8. Геология дна Японского моря / Берсенев И.И., Леликов Е.П., Безверхний В.Л., Ващенкова Н.Г., Съедин В.Т., Терехов Е.П., Цой И.Б. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1987. 140 с.

- 9. *Леликов Е.П., Пугачев А.А.* Гранитоидный магматизм Японского и Охотского морей // Петрология. 2016. Т. 24. № 2. С. 212—230.
- 10. *Цой И.Б., Ващенкова Н.Г., Василенко Л.Н., Горовая М.Т., Вагина Н.К., Мельниченко Ю.И.* Стратиграфия и условия формирования кайнозойского осадочного чехла возвышенности Ямато Японского моря // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2020. Т. 28. № 2. С. 103—131.
- 11. *Терехов Е.П., Харченко Т.А., Ли Н.С.* Корреляция акустических характеристик и возраста базальных горизонтов кайнозойского осадочного чехла Японского моря // Тихоокеанская геология. 2022. Т. 41. № 2. С. 44—58.
- 12. *Терехов Е.П., Маркевич В.С., Цой И.Б., Баринов Н.Н.* Палеоценовые отложения возвышенности Ямато (Японское море) и условия их образования // Тихоокеанская геология. 2023. Т. 42. № 2. С. 50—67.
- 13. *Бетехтин А.Г.* Курс минералогии. М.: Изд-во КДУ, 2007. 721 с.
- 14. *Исаенко М. П.* Определитель текстур и структур руд. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1983. 261 с.
- Исследование марганцевой и железомарганцевой минерализации в разных природных обстановках методами сканирующей электронной микроскопии / Науч. ред. Г.Н. Батурин. М.: Эслан, 2012. 472 с.

## A NEW UNTIPICAL CASE OF FERROMANGANESE MINERALIZATION IN THE SEA OF JAPAN

### O. N. Kolesnik<sup>1,#</sup>, A. A. Karabtsov<sup>2</sup>, V. T. S"edin<sup>1</sup>, A. N. Kolesnik<sup>1</sup>, E. P. Terekhov<sup>1</sup>

Presented by Academician of the RAS G.I. Dolgikh October 25, 2023
Received October 26, 2023
After revision December 13, 2023
Accepted December 14, 2023

1V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch
of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russian Federation

2Far East Geological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok,
Russian Federation

#E-mail: kolesnik\_o@poi.dvo.ru

The first case of hydrothermal brecciated crusts composed of goethite with quartz veinlets for the Sea of Japan is described.

Keywords: goethite, quartz, hydrothermal vents, brecciation, North Yamato Ridge, Sea of Japan