

Научные статьи

УДК 553.2 (265.53)

<https://doi.org/10.31431/1816-5524-2026-1-69-5-21>

МОЩНЫЕ РУДНЫЕ КОРКИ ОХОТСКОГО МОРЯ СО СВЕРХВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ НИКЕЛЯ

© 2026 О.Н. Колесник¹, А.Н. Колесник¹, А.А. Карабцов², В.Т. Съедин¹,
В.А. Рашидов³, П.Н. Постнов¹, Р.Б. Шакиров¹

¹Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,
Владивосток, Россия, 690041; e-mail: kolesnik_o@poi.dvo.ru

²Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия, 690022

³Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия, 683006

Поступила в редакцию 24.10.2025; после доработки 01.03.2026; принята в печать 27.03.2026

Изучены рудные корки мощностью до 20 см, драгированные с глубины 1500–1300 м в восточной части возвышенности Академии Наук в Охотском море. Главный рудный минерал — вернадит. Корки содержат в среднем 32 % марганца и 11 % железа. Обогащены никелем и по совокупности признаков являются гидрогенными. Содержание никеля в пробах, по данным масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой, достигает 1.3 % при среднем значении 1.0 %, в точечных микрозондовых анализах — 2.6 % при среднем значении 0.9 %. По итогам обобщения собственных и литературных данных намечен перспективный на никель центрально-южный район Охотского моря. Содержание никеля в гидрогенных железомарганцевых корках и конкрециях этого района сопоставимо с таковым в кобальтоносных марганцевых корках и полиметаллических железомарганцевых конкрециях океана.

Ключевые слова: никель, гидрогенные железомарганцевые корки и конкреции, Охотское море.

ВВЕДЕНИЕ

Железомарганцевые корки и конкреции на дне океанов и морей давно рассматриваются геологами как перспективный источник марганца, никеля, кобальта и других стратегических и критических металлов (Кобальтбогатые..., 2002; Мельников, 2005; Оганесян, Мирлин, 2023; Hein, Koschinsky, 2014; Chemical Composition..., 2014).

Несмотря на довольно длительную историю изучения железомарганцевой минерализации Охотского моря (Аникеева и др., 2005, 2008; Астахова, 2007, 2009; Батулин и др., 2011, 2012; Гавриленко, 1997; Гавриленко, Храмов, 1986; Дубинин и др., 2008; Иванова и др., 2019; Михайлик и др., 2009, 2021, 2022, 2023; Орлов, 1982; Успенская и др., 1989; Штеренберг и др., 1987; Glasby et al., 2006 и др.), сведений о составе и строении образцов из центральной части Охотского моря, в том

числе с возвышенности Академии Наук, не так много (Астахова, 2007, 2009; Иванова и др., 2019; Михайлик и др., 2009, 2021; Орлов, 1982).

Учитывая, что в последнее время не проводятся специализированные геолого-геофизические рейсы научно-исследовательских судов (НИС), которые бы были направлены на изучение вещественного состава горных пород, слагающих различные структуры дна Охотского моря, надежное хранение каменного материала, полученного в предыдущие годы, и интеграция академических организаций открывает новые возможности для исследований. Так, при ревизии каменного материала, хранящегося в Тихоокеанском океанологическом институте им. В.И. Ильичева ДВО РАН, было обнаружено пять образцов рудных корок мощностью до 20 см. Эти образцы были драгированы в 1996 г. в 27-м рейсе НИС «Академик М.А. Лаврентьев»

на вулканической постройке восточной части возвышенности Академии Наук (станция LV27-19, интервал драгирования — 1500–1300 м). Ранее о корках со станции LV27-19 было известно только то, что это рудные обрастания кремнистых губок мощностью 5–8 см (RV..., 1997). Расхождение данных по мощности можно объяснить предварительным характером измерений, выполненных в условиях экспедиции.

Цель настоящего исследования — выявить особенности строения и вещественного состава рудных корок со станции LV27-19, оценить степень обогащенности их металлами.

РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЯ

Охотское море расположено в переходной зоне от континента к Тихому океану и имеет сложное геологическое строение. В рельефе и «акустическом фундаменте» центральной части моря выделяется три крупные подводные возвышенности (Охотский свод с банкой Кашеварова, возвышенность Института Океанологии, возвышенность Академии Наук) и три глубоководные котловины, или впадины (Дерюгина, ТИПРО, Курильская) (рис. 1). Возвышенность Академии Наук со всех сторон ограничена желобами и прогибами, при этом ее южный склон является северным бортом Курильской котловины. На юго-восточном склоне возвышенности Академии Наук известно три участка проявления подводного вулканизма (Емельянова и др., 2003; Леликов и др., 2001; Съедин и др., 2002). Участки выделены по наличию в материале драгирования вулканических пород плиоцен-плейстоценового возраста и продуктов поствулканической гидротермальной деятельности (железомарганцевые корки, низкотемпературные минералы типа гидрослюда-сметит). Вулканические породы формируют ряд от базальтов до андезидацитов и принадлежат к единой дифференцированной серии пород. Специфика их химического состава — высокие концентрации литофильных рубидия, стронция, бария и низкие — титана, никеля и хрома. В 2004 г. в юго-западной части северного борта Курильской котловины выявлена ранее неизвестная цепочка положительных структур, отчетливо выраженных в рельефе дна (четыре небольшие вулканические постройки), названная хребтом Зонне (Тарарин, 2008). На некоторых из этих структур драгированы железомарганцевые корки (Иванова и др., 2019; Михайлик и др., 2021; Тарарин, 2008). Многочисленными проливами Курильской островной гряды Охотское море на юго-западе соединяется с Тихим океаном (рис. 1). Все острова гряды по сути являются вершинами крупного горного сооружения, скрытого ниже уровня моря, — островной дуги.

В состав Курильской островной дуги входят охотоморская (внутренняя вулканическая) и тихоокеанская (внешняя невулканическая) дуги. В пределах обеих дуг описаны находки железомарганцевых корок и в меньшей степени конкреций (Аникеева и др., 2005, 2008; Батулин и др., 2011, 2012; Гавриленко, 1997; Гавриленко, Храмов, 1986; Михайлик, 2024; Михайлик и др., 2021, 2023; Орлов, 1982; Успенская и др., 1989; Штеренберг и др., 1987; Glasby et al., 2006).

Охотское море среди морей России характеризуется довольно широким развитием железомарганцевой минерализации (рис. 1). Выделяются железомарганцевые образования Курильской островной дуги (изучены наиболее полно) и центральной части Охотского моря. Последнее крупное обобщение по этому вопросу выполнено П.Е. Михайликом (2024). Показано, что в Охотском море распространены гидротермальные рудные пленки, корки, цементы, в том числе с примесью водородного вещества, а также явно водородные рудные корки и конкреции. Субстратом обычно выступают вулканические и вулканокластические породы, однако корки часто драгируют без субстрата. Для некоторых конкреций не исключено формирование в процессе диагенеза. Субстратом в данном случае выступают донные осадки. Согласно одному из предыдущих обобщений (Штеренберг и др., 1987), на охотоморском склоне Курильской островной дуги преобладают корки гидротермальной природы, на тихоокеанском — водородной, при этом в целом в Охотском море наиболее широко развиты водородные корки. В пределах возвышенности Академии Наук до настоящего времени изучены образцы со станций 2117, 2120, 2121, 2122 (Орлов, 1982) и LV27-14 (Астахова, 2009). В пределах хребта Зонне изучен образец со станции SO178-5-4 (Иванова и др., 2019; Михайлик и др., 2021). Станции 2117, 2120, 2121 и 2122 выполнены в восточной части возвышенности Академии Наук в 21-м рейсе НИС «Пегас», 1980 г. Глубина моря на станциях составила 1200–1950 м. Драгированные образцы железомарганцевых образований представлены слоистыми корками мощностью до 2 см на оруденелых кремнистых губках. Выполнен химический анализ этих корок (15 элементов), опубликованы усредненные значения (Орлов, 1982). Станция LV27-14 выполнена в северной части возвышенности Академии Наук в 27-м рейсе НИС «Академик М.А. Лаврентьев», 1996 г. Железомарганцевые корки небольшой мощности драгированы в интервале глубин 3050–2540 м. Для изучения взят образец, представленный железомарганцевыми гидроксидами, которые цементируют гальку и угловатые обломки пород с формированием своеобразных конгломератов

МОЩНЫЕ РУДНЫЕ КОРКИ ОХОТСКОГО МОРЯ

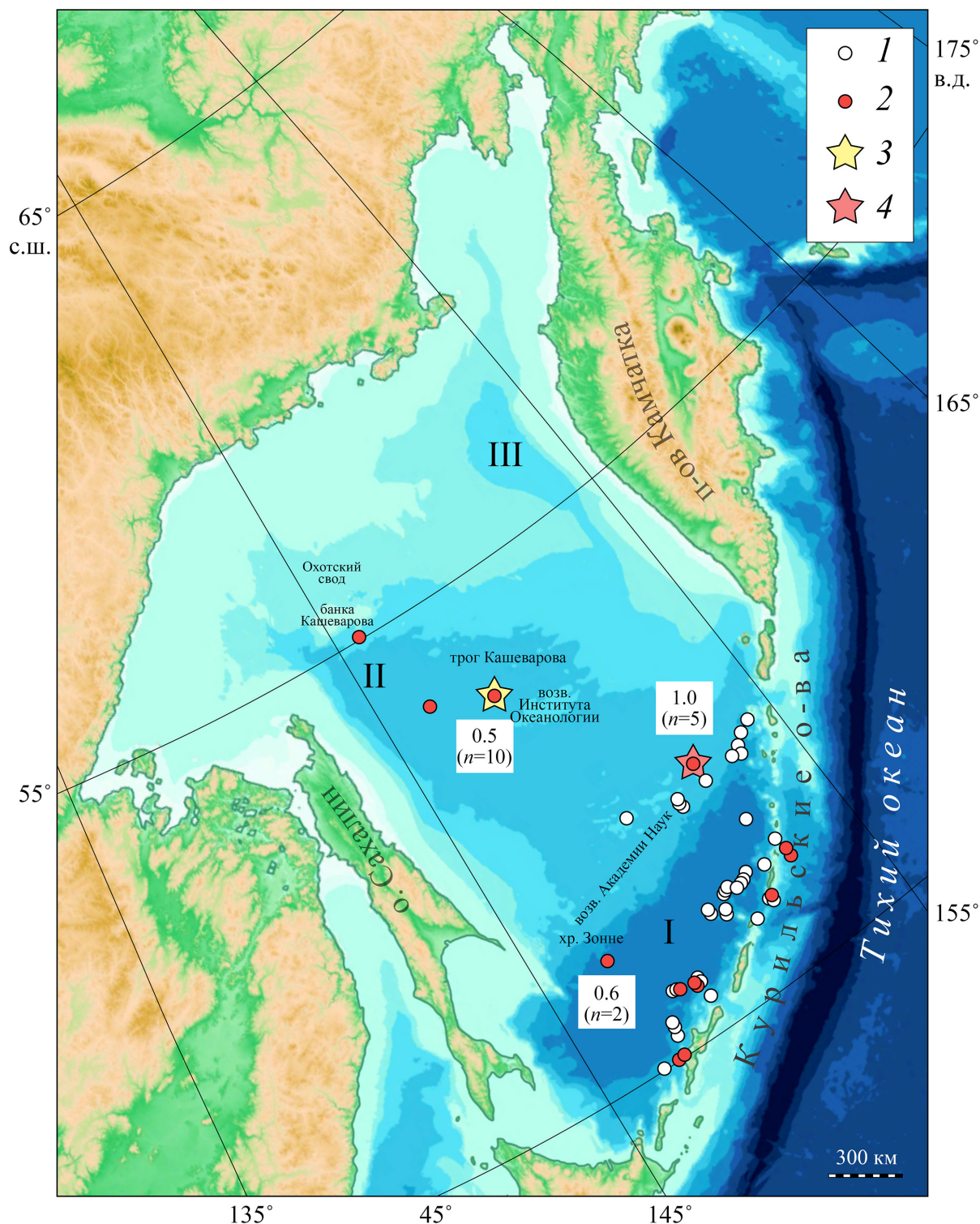


Рис. 1. Карта изученности железомарганцевых образований Охотского моря. 1–4 — точки пробоотбора, в том числе корок и конкреций с содержанием никеля не менее 0.1 % (2) и мощных корок (3, 4): 3 — до 15 см (Михайлик и др., 2009), 4 — до 20 см (настоящее исследование). Цифры рядом с точками — максимальные известные средние содержания никеля (%), n — количество анализов. I–III — глубоководные котловины: I — Курильская, II — Дерюгина, III — ТИНРО. Картографическая основа подготовлена по данным ГЕБКО (2022).

Fig. 1. Map showing the state of knowledge of ferromanganese formations from the Sea of Okhotsk. 1–4 — sampling points, including crusts and nodules with a nickel content of at least 0.1 % (2) and thick crusts (3, 4): 3 — up to 15 cm (Mikhailik et al., 2009), 4 — up to 20 cm (this study). Numbers next to sampling points mean the highest known average nickel content (%), n — number of analyses. I–III — deep-sea basins: I — Kuril, II — Deryugin, III — TINRO. The reference cartographic base was prepared using GEBCO data (2022).

и поверхностной корки мощностью до 2 см. Выполнено определение химического состава образца (единичный анализ, 16 элементов), проведена микронзондовая съемка (Астахова, 2009). Показано, что содержание железа составляет 17.7 мас. %, марганца — 3.1 мас. %, содержание рудных микроэлементов низкое — сотые доли процента и менее, основной источник рудного вещества — гидротермальный, присутствуют редкие микроразмерные зерна с высоким содержанием серебра, никеля, вольфрама, предположительно привнесенные из подстилающего субстрата. Станция SO178-5-4 выполнена в 2004 г. на одной из вулканических построек хребта Зонне (рис. 1) в 178-м рейсе НИС «Зонне». Образцы рудных корок толщиной до 4 см драгированы в интервале глубин 2346–2201 м. В рамках изучения одного из образцов выполнен рентгенофазовый анализ, анализ химического состава верхней и нижней частей (более 50 элементов), компонентный анализ, анализ изотопного состава неодима

(Иванова и др., 2019; Михайлик и др., 2021). В цитируемых работах показано, что корка имеет тонкослоистое строение, сложена вернадитом, содержит в среднем 23.75 мас. % марганца и 14.85 мас. % железа, в значительной степени обогатена рудными микроэлементами (в частности, среднее содержание никеля — 0.6 мас. %, кобальта — 0.1 мас. %, суммарное содержание редкоземельных элементов — 0.1 мас. %), которые накапливаются главным образом на оксидах марганца и гидроксидах железа. По совокупности признаков корка является гидротенной.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рудные корки со станции LV27-19 (фактический материал) представляют собой мощные и очень мощные корки (глыбы) толщиной от 10 до 20 см (рис. 2). Образцы драгированы без субстрата. Соответственно, можно говорить только

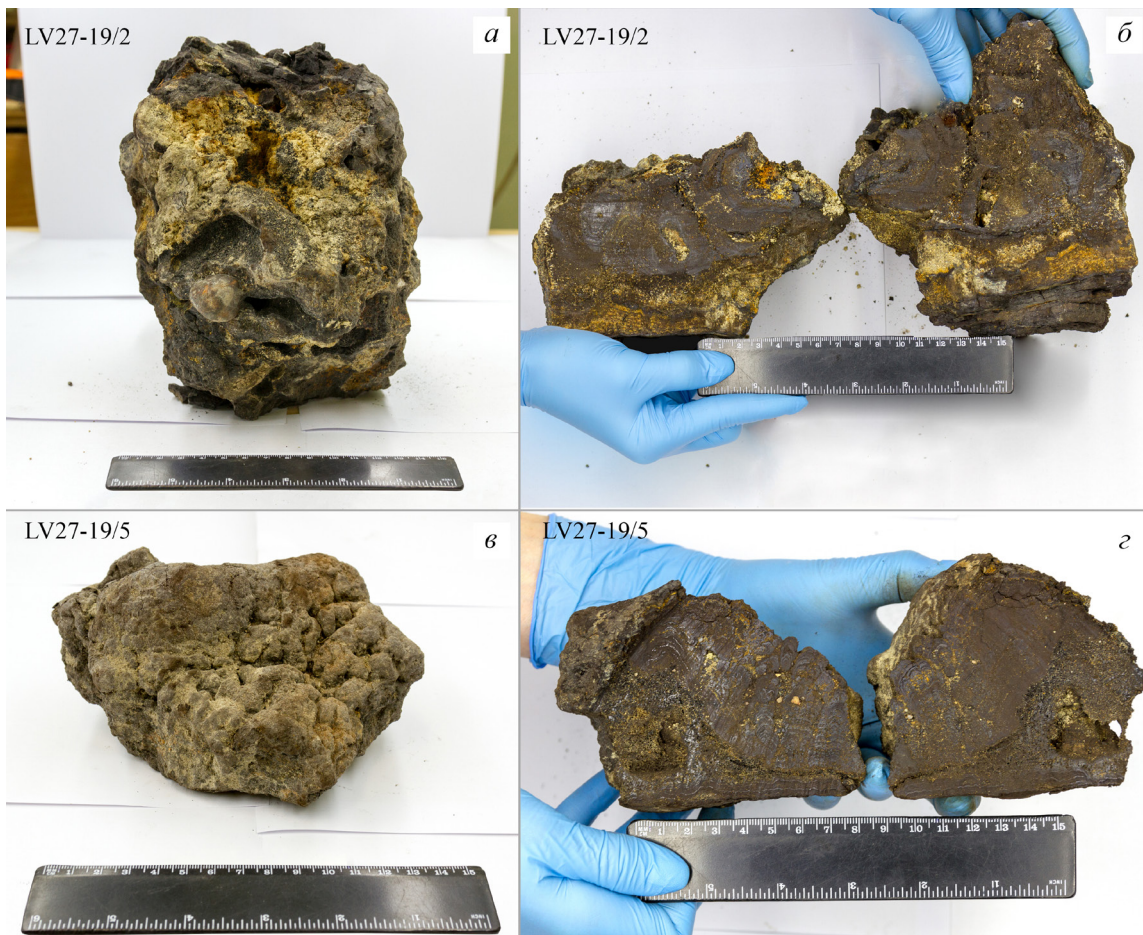


Рис. 2. Общий вид рудных корок, отобранных на станции LV27-19: *а, б* — наиболее крупный образец LV27-19/2 мощностью 20 см в исходном (*а*) и распиленном (*б*) состоянии; *в, г* — наиболее раскристаллизованный и детально изученный образец LV27-19/5 в исходном (*в*) и распиленном (*г*) состоянии.

Fig. 2. General view of ore crusts from station LV27-19: *a, б* — the largest sample LV27-19/2 with a thickness of 20 cm in the initial (*a*) and sawn (*б*) states; *в, г* — the most crystallized and detailed studied sample LV27-19/5 in the initial (*в*) and sawn (*г*) states.

о предполагаемой, а не об истинной мощности корок. Основная окраска темно-серая, сизая. На некоторых участках образцов она бурая, в порошке коричневая. Включения преимущественно желтого, бежевого цвета. Корки в целом легкие, хрупкие, сажистые (пачкают руки). Как правило, хорошо различима верхняя часть со свободным ростом рудных минералов (сглаженная, шершавая, ботроидальная, бугорчатая). На сглаженной внешней поверхности, в сколах и особенно спилах заметен тусклый блеск. Для всех образцов характерна тонкая слоистость. Цвет слоев темно-серый, темно-коричневый до черного. Иногда между слоями наблюдается ожелезнение. В спилах хорошо различима колломорфная текстура, типичная для оксидов марганца (сферические, концентрически-зональные, полосчатые рудные обособления).

Фактический материал изучен в лабораториях Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева ДВО РАН и Приморского центра локального элементного и изотопного анализа Дальневосточного геологического института ДВО РАН с применением стандартных методов и методик, описанных в работах (Зарубина и др., 2014; Колесник и др., 2023, 2024).

Плотность корок определялась методом гидростатического взвешивания воздушно-сухих непарафинированных образцов на весах ВЛТЭ-2100 (Россия). Для контроля качества проводились измерения эталонного образца из комплекта денситометра ДГП-3 с плотностью 2.78 г/см³.

Для анализа вещественного состава выбирались и при необходимости измельчались участки (фрагменты) корок, выделяющиеся по цвету. Из-за небольшого размера визуально однородных по цвету участков и, соответственно, небольшого количества извлекаемого вещества, квартование порошковых проб не проводилось.

Кристаллические фазы в составе корок определялись на минидифрактометре MiniFlex II (Япония). Условия дифрактометрической съемки: излучение — монохроматизированное медное (монохроматор на дифрагированном пучке), ускоряющее напряжение — 30 кВ, сила тока — 15 мА, скорость — 1 град/мин, диапазон углов — 3–62 град, образцы — визуально однородные по цвету фрагменты корок в исходном ненарушенном состоянии, а также изготовленные из них непрессованные и прессованные воздушно-сухие и прокаленные до 550 °С порошки. Поиск фаз и их расчет велись по набору межплоскостных расстояний d и относительным интенсивностям I соответствующих рефлексов на дифрактограммах. При этом использовался программный комплекс PDXL с подключением к международной базе дифракционных стандартов 00-ICDD (порошковая, версия 2012 г.).

Анализ потерь при прокаливании и содержания кремния в корках выполнялся методом гравиметрии, остальных макроэлементов — методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой на спектрометре Thermo iCAP 7600 Duo (США). Содержание микроэлементов определялось методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на спектрометре Agilent 8800 (Япония). Для выполнения элементного анализа отобранные из корок пробы условно чистого рудного вещества темно-серого, темно-коричневого цвета предварительно истирались, высушивались при температуре 105–110 °С до постоянного веса и подвергались открытому кислотному разложению ($\text{HF} + \text{HNO}_3 + \text{HClO}_4$). Масса навески составляла 30 мг. Для контроля качества использовались стандартные образцы железомарганцевых конкреций и корок (ГСО 5376-90 (ООПЕ 604), Россия; NOD-A-1, NOD-P-1, США). Точность элементопределений оценивалась по значениям относительного стандартного отклонения RSD. Для макроэлементов погрешность не выходила за пределы 2–5 %, для большинства микроэлементов значения RSD не превышали 15–20 %. Такие показатели соответствуют критериям качества количественного элементного анализа в геохимических исследованиях (Дворкин, 2019).

Особенности микростроения и химического состава корок, в том числе площадное распределение элементов, анализировались на микрозонде JEOL JXA-8100 (Япония) с энергодисперсионным спектрометром INCA Energy 350 (Великобритания) в режиме сканирования и точечного анализа. Содержание элементов рассчитывалось из отношения интенсивностей линий, излучаемых образцом, к интенсивностям тех же линий, полученных на стандартах. В работе был задействован пользовательский (невстроенный) набор стандартов: чистые металлы, природные минералы, стекла, синтетические соединения. Условия микрозондовой съемки: энергетическое разрешение детектора на Mn K α -линии — 137 эВ, ускоряющее напряжение — 20 кВ, сила тока — 10–5 мА, угол отбора излучения — 45 град, образцы — фрагменты условно чистого рудного вещества темно-серого, темно-коричневого цвета в исходном ненарушенном состоянии, а также изготовленные из них непрессованные и прессованные порошки с углеродным напылением. Погрешность измерений не превышала 5 отн. % при содержании элемента более 5 мас. % и 10 отн. % — при содержании менее 5 мас. %.

Генетические построения для корок выполнялись с использованием диаграмм Э. Бонатти (Bonatti et al., 1972), М. Бай (Bau et al., 2014), П. Жоско (Josso et al., 2017) и О.С. Верещагина (Vereshchagin et al., 2019). Диаграммы классифицируют

железомарганцевые образования по содержанию железа, марганца и микроэлементов (Co, Ni, Cu, Zr, Y, La–Nd). При определении генезиса учитывались и другие геохимические, минералогические и структурные индикаторы, описанные в работах (Богданова и др., 2008; Бутузова, 2003; Гайоты..., 1995; Дубинин, 2006; Исследование..., 2012). Расчет аномалий церия и европия (Se_{an} , Eu_{an}), а также отношения легких редкоземельных элементов (ЛРЗЭ) к тяжелым редкоземельным элементам (ТРЗЭ) выполнялся по стандартным формулам с нормализацией на состав постаршейского австралийского глинистого сланца PAAS (Дубинин, 2006).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Согласно результатам проведенных аналитических работ, весь рудный материал со станции LV27-19 обладает схожими характеристиками.

По результатам гидростатического взвешивания, средняя плотность корок составляет 1.80 г/см^3 при вариациях от 1.74 до 1.91 г/см^3 (образцы LV27-19/4 и LV27-19/5 относительно плотные, тяжелые и менее хрупкие, чем остальные).

По данным рентгеновской дифракции фрагментов корок и порошков, главными рудными минералами являются вернадит (преобладает) и 10 \AA марганцевая фаза (асболан?) (участки темно-серого, темно-коричневого цвета) (рис. 3, табл. 1).

Нерудные минералы представлены кварцем, полевыми шпатами, глинистыми минералами (участки преимущественно желтого, бежевого цвета).

Согласно результатам анализа методами гравиметрии и плазменной спектрометрии, рудное вещество корок имеет достаточно чистый химический состав (табл. 2). Количество марганца варьирует от 28.4 до 34.4 мас. % при среднем значении 31.8 мас. %. Для железа это соответственно 9.18, 13.0 и 10.8 мас. %. Минимальное значение модуля Mn/Fe составляет 2.31, максимальное — 3.75, среднее — 3.01. Таким образом, корки относятся к железомарганцевым образованиям с преобладанием марганца. Содержание кремния невысокое. В среднем это 4.10 мас. % при разбросе значений от 3.03 до 6.82 мас. %. Характерно повышенное содержание алюминия до 2.05 мас. % и титана до 0.38 мас. %. Значения модуля (Mn+Fe)/Ti достаточно высокие, до 141 при среднем значении 125. Основная специфика микроэлементного состава заключается в обогащенности никелем до 13155 г/т (1.3 мас. %), среднее содержание в пробах составляет 10313 г/т (1.0 мас. %) (табл. 2). Суммарное содержание меди, никеля и кобальта достигает 1.6 мас. % при среднем значении 1.2 мас. %. Кроме этих микроэлементов на уровне тысячи грамм на тонну и более содержатся (средние значения, по убыванию): барий (2404 г/т), стронций (1248 г/т), молибден (1224 г/т),

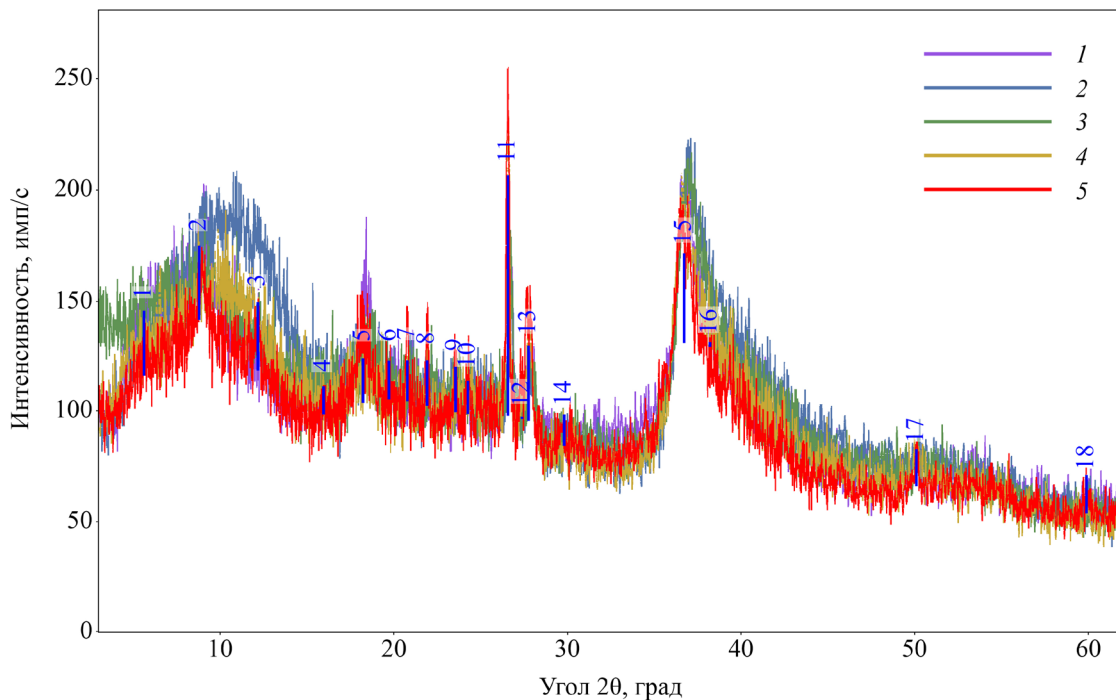


Рис. 3. Дифрактограммы вещества рудных корок 1–5, отобранных на станции LV27-19 (Cu $K\alpha$ -излучение, монохроматор на вторичном пучке). Расшифровка рефлексов 1–18 для образца LV27-19/5 — см. табл. 1.

Fig. 3. X-ray diffraction patterns of the substance of ore crusts 1–5 from station LV27-19 (Cu $K\alpha$ -radiation, secondary beam monochromator). For interpretation of reflections 1–18 for sample LV27-19/5, see Table 1.

МОЩНЫЕ РУДНЫЕ КОРКИ ОХОТСКОГО МОРЯ

Таблица 1. Таблица рефлексов к дифрактограмме вещества рудной корки LV27-19/5

Table 1. Table of reflexes for X-ray diffraction pattern of the substance from the ore crust LV27-19/5

№ п/п	2θ , град	d , Å	I , %	Фаза	Номер карточки стандарта, 00-ICDD
1	5.61	15.73	27	Mnt	01-076-8291
2	8.79	10.05	31	Asb(?)	00-043-1459
3	12.18	7.26	29	Pl	01-083-1371
4	15.97	5.55	12	Pl	01-083-1371
5	18.22	4.86	18	Vnd, Asb(?), Pl, Mnt	00-015-0604, 00-042-1319, 00-043-1459, 01-083-1371, 01-076-8291
6	19.71	4.50	16	Pl, Mnt	01-083-1371, 01-076-8291
7	20.79	4.27	17	Q, Pl, Mnt	00-001-0649, 01-083-1371, 01-076-8291
8	21.91	4.05	19	Pl	01-083-1371
9	23.56	3.77	19	Pl, Mnt	01-083-1371, 01-076-8291
10	24.27	3.66	14	Pl	01-083-1371
11	26.57	3.35	100	Q, Pl, Mnt	00-001-0649, 01-083-1371, 01-076-8291
12	27.40	3.25	1	Asb(?)	00-043-1459
13	27.77	3.21	32	Asb(?), Pl	00-042-1319, 01-083-1371
14	29.81	2.99	13	Pl	01-083-1371
15	36.73	2.445	37	Vnd, Asb(?), Q, Pl, Mnt	00-015-0604, 00-042-1319, 00-001-0649, 01-083-1371, 01-076-8291
16	38.22	2.353	2	Vnd, Asb(?), Pl	00-015-0604, 00-042-1319, 01-083-1371
17	50.11	1.819	16	Vnd, Asb(?), Q, Pl	00-015-0604, 00-042-1319, 00-001-0649, 01-083-1371
18	59.90	1.543	16	Vnd, Asb(?), Q, Pl, Mnt	00-015-0604, 00-042-1319, 00-001-0649, 01-083-1371, 01-076-8291

Примечание. Vnd — вернадит, Asb(?) — 10 Å марганцевая фаза (асболан?), Q — кварц, Pl — плагиоклаз, Mnt — монтмориллонит.

Note. Vnd — vernadite, Asb(?) — 10 Å manganese phase (asbolane?), Q — quartz, Pl — plagioclase, Mnt — montmorillonite.

Таблица 2. Химический состав рудных корок со станции LV27-19 по результатам анализа методами гравиметрии и плазменной спектроскопии

Table 2. Chemical composition of ore crusts from station LV27-19 after gravimetric and plasma spectrometry analyses

Элемент, показатель	Номер образца				
	LV27-19/1	LV27-19/2	LV27-19/3	LV27-19/4	LV27-19/5
Макрокомпоненты, мас. %					
Si	3.30	3.83	3.03	3.50	6.82
Ti	0.38	0.33	0.35	0.30	0.35
Al	0.81	0.92	0.80	0.73	2.05
Fe	9.18	13.0	10.4	10.1	11.2
Mn	34.4	30.2	33.3	32.6	28.4
Mg	1.80	1.45	1.46	1.43	1.70
Ca	2.64	2.65	2.86	2.78	1.93
Na	2.35	2.21	2.14	2.10	1.82
K	0.84	0.72	0.82	0.79	0.96
P	0.30	0.40	0.38	0.33	0.33
ППП	19.0	18.0	18.5	18.4	15.2
Микроэлементы, г/т					
Li	16.4	7.8	7.96	4.98	45.0
Sc	4.86	6.89	7.60	5.65	7.96
V	815	813	1424	892	632

Таблица 2. Окончание

Table 2. Continued

Элемент	Номер образца				
	LV27-19/1	LV27-19/2	LV27-19/3	LV27-19/4	LV27-19/5
Микроэлементы, г/т					
Cr	4.55	4.63	9.78	2.34	14.4
Co	1281	913	1181	922	1056
Ni	13155	9001	11189	10828	7392
Cu	1340	628	992	743	1119
Zn	1292	1208	969	1140	1135
As	254	281	440	265	183
Rb	5.38	4.30	5.51	4.27	11.1
Sr	1178	1359	1335	1301	1069
Y	86.9	121	110	94.8	93.3
Zr	279	298	294	272	326
Nb	24.3	14.4	21.2	13.3	15.5
Mo	1349	1103	1828	1284	555
Cd	10.6	8.44	9.11	8.73	13.9
Sn	1.68	0.92	1.79	0.80	1.04
Ba	2153	1962	2572	1942	3391
La	124	166	140	137	145
Ce	516	576	523	483	510
Pr	35.4	46.3	40.1	37.4	37.0
Nd	141	200	165	162	148
Sm	34.8	45.1	40.6	37.1	34.1
Eu	8.78	11.5	10.2	9.31	8.69
Gd	36.5	48.4	43.1	39.3	37.4
Tb	5.78	7.63	6.92	6.18	5.76
Dy	33.0	43.4	39.0	35.0	32.7
Ho	6.60	8.60	7.94	7.03	6.43
Er	19.7	25.4	23.9	20.7	19.0
Tm	2.88	3.68	3.55	3.01	2.76
Yb	18.5	23.2	23.0	19.6	17.6
Lu	2.94	3.62	3.55	3.02	2.78
Hf	3.92	4.19	3.82	3.03	6.79
Ta	0.17	0.15	0.16	0.11	0.24
W	167	136	197	132	87.5
Tl	157	106	106	80	139
Pb	475	638	561	538	474
Th	10.6	8.98	11.8	9.08	13.6
U	7.63	9.94	10.2	8.37	7.90
$\Sigma(\text{Cu,Co,Ni})$	15775	10542	13362	12492	9566
$\Sigma(\text{PЗЭ})$	986	1210	1070	999	1007
Модули, аномалии					
Mn/Fe	3.75	2.31	3.20	3.22	2.55
(Mn+Fe)/Ti	114	131	126	141	114
ЛРЗЭ/ТРЗЭ*	0.56	0.60	0.53	0.59	0.63
Ce _{an} *	1.79	1.51	1.60	1.55	1.61
Eu _{an} *	1.15	1.15	1.14	1.14	1.14

Примечание. ППП — потери при прокаливании. Звездочка означает нормализацию на состав постархейского австралийского глинистого сланца (PAAS).

Note. PПП — loss on ignition. The asterisk means normalization to Post-Archean Australian Shale (PAAS).

цинк (1149 г/т). Присутствие в количестве сотен грамм на тонну демонстрируют (средние значения, по убыванию): ванадий (915 г/т), свинец (537 г/т), церий (522 г/т), цирконий (294 г/т), мышьяк (284 г/т), неодим (163 г/т), вольфрам (144 г/т), лантан (142 г/т), таллий (117 г/т). Среднее содержание остальных микроэлементов не превышает десятков грамм на тонну. Суммарное содержание редкоземельных элементов (Σ РЗЭ) достаточно высокое. В среднем это 1054 г/т при вариациях значений от 986 до 1210 г/т. В составе редкоземельных элементов прослеживается несущественное преобладание легких редкоземельных элементов над тяжелыми: значения отношения ЛРЗЭ/ТРЗЭ изменяются от 0.53 до 0.63 при среднем значении 0.58. Аномалия церия характеризуется невысокими положительными значениями: Se_{an} — от 1.51 до 1.79, в среднем — 1.61. Аномалия европия малоинформативна: значения Eu_{an} близки к единице.

Судя по степени выраженности дифракционных рефлексов и результатам визуального осмотра, лучше всего рудное вещество раскристаллизовано в корке LV27-19/5. Площадное микронзондовое сканирование фрагментов и порошков рудного вещества этой корки дало схожие результаты, согласно которым все химические элементы можно разделить на три группы: с пятнистым неравномерным, монотонным равномерным и невыразительным распределением (рис. 4). К первой группе относятся марганец, кремний, алюминий, натрий, магний, калий, кальций, титан, ко второй — железо, никель, к третьей — все остальные. Среднее содержание марганца по пробе, согласно результатам микронзондового сканирования, составляет 24 мас. %, железа — 10 мас. % (железистый вернадит?) (табл. 3). При этом в отдельных точках пробы количество марганца может возрастать до 41 мас. %, а железо полностью отсутствовать (рис. 4, табл. 3). Подтверждена специфика микроэлементного состава: микронзондовый анализ,

как и плазменная спектрометрия, указал на высокое содержание никеля. Среднее содержание по пробе — 0.9 мас. % (основное рудное вещество железомарганцевого состава, слагающее корку), максимальное — 2.6 мас. % (безжелезистые, обогащенные марганцем участки локального распространения) (рис. 4, табл. 3).

На генетических диаграммах рудные корки со станции LV27-19 в целом тяготеют к гидрогеным железомарганцевым образованиям (рис. 5). Большинство минералогических, структурных и геохимических показателей также свидетельствуют в пользу гидрогеного происхождения (табл. 4).

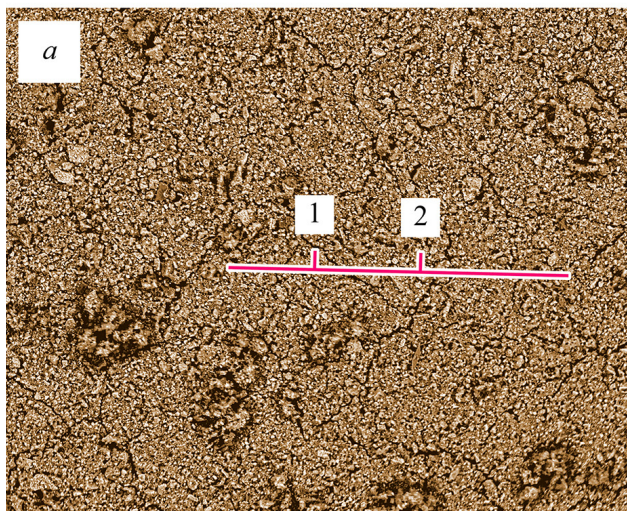
ОБСУЖДЕНИЕ

В результате изучения образцов рудных корок со станции LV27-19, выполненной на возвышенности Академии Наук в центральной части Охотского моря, отмечены следующие наиболее яркие особенности строения и вещественного состава, требующие обсуждения: значительная мощность и высокое содержание никеля.

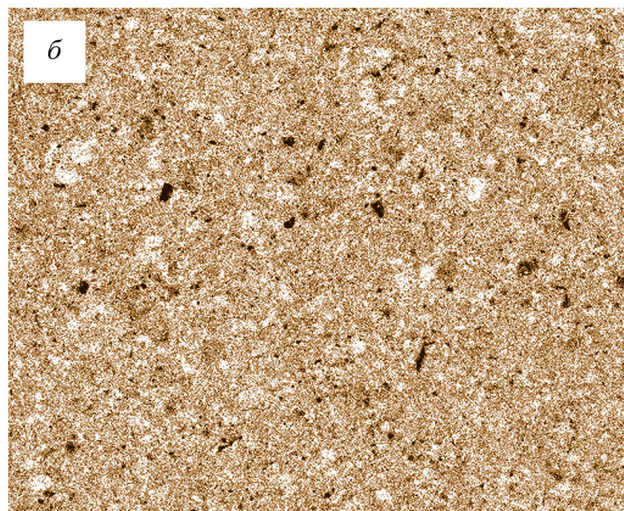
Мощность корок играет важную роль при оценке их рудного потенциала. Так, в пределах разведанных рудных залежей глубоководных океанических районов развиты корки толщиной 10–15 см, и только в редких случаях толщина корок может достигать 25 см (Кобальтбогатые..., 2002; Мельников, 2005; Оганесян, Мирлин, 2023; Hein, Koschinsky, 2014; Chemical Composition..., 2014). Мощность морских рудных корок, как правило, меньше мощности океанических и составляет в среднем несколько сантиметров. Среди морей России первое место по мощности опробованных корок занимает Японское море, второе — Охотское. Самые мощные рудные образования Японского моря зафиксированы на хребте Галагана (железомарганцевые корки толщиной до 20 см) и возвышенности

Рис. 4. Площадное, профильное и точечное распределение химических элементов в рудной корке LV27-19/5 по результатам микронзондового анализа: *a–d* — площадное распределение элементов в «ложном» коричневом цвете: *a* — проанализированная площадь в отраженных электронах с указанием профиля и точек, где светлые участки соответствуют веществу с более высоким средним порядковым номером входящих в его состав элементов, темные — с более низким; *b–d* — карты распределения элементов на площади 4*a*: светлые участки отображают наличие элемента, белые — наличие элемента в высокой концентрации, темные — отсутствие элемента (*b* — Mn $K\alpha_1$, *в* — Fe $K\alpha_1$, *г* — Si $K\alpha_1$, *д* — Ni $K\alpha_1$); *e* — распределение элементов по профилю и в точках (положение профиля и точек — см. рис. 4*a*, полный химический состав площади и точек — табл. 3, кимп — килоимпульсы).

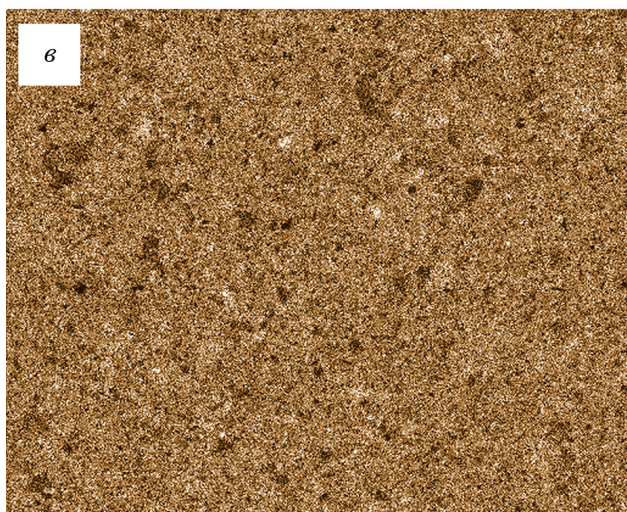
Fig. 4. Area, profile and point distribution of chemical elements in the ore crust LV27-19/5 based on results of microprobe analysis: *a–d* — area element distribution in the «artificial» brown color: *a* — backscattered electron image of the analyzed area with the profile and points, where light areas correspond to the substance with a higher average atomic number of its constituent elements, dark areas, to the a lower one; (*b–d*) maps of the element distribution over area 4*a*: light areas show the presence of the element, white areas show the presence of the element with a high concentration, and dark areas show the absence of the element (*b* — Mn $K\alpha_1$, *в* — Fe $K\alpha_1$, *г* — Si $K\alpha_1$, *д* — Ni $K\alpha_1$); *e* — distribution of elements along the profile and in points (for position of the profile and points, see Fig. 4*a*; full chemistry of the area and points, see Table 3; кимп — kiloimpulses).



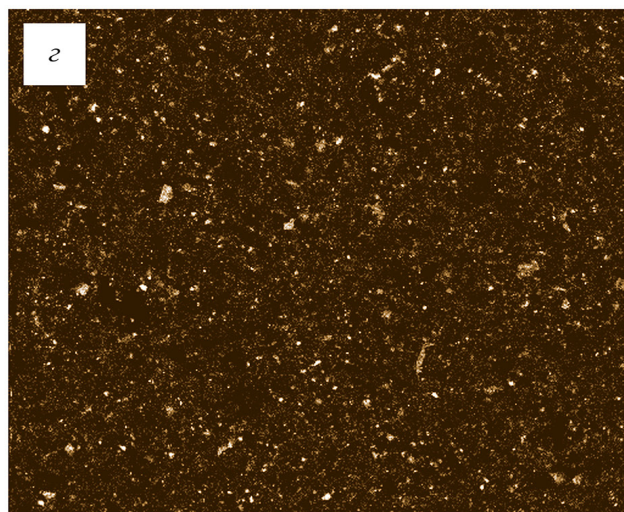
100 мкм



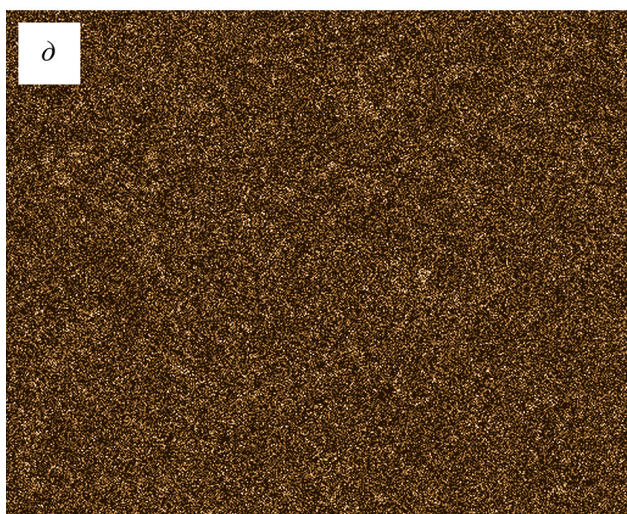
100 мкм



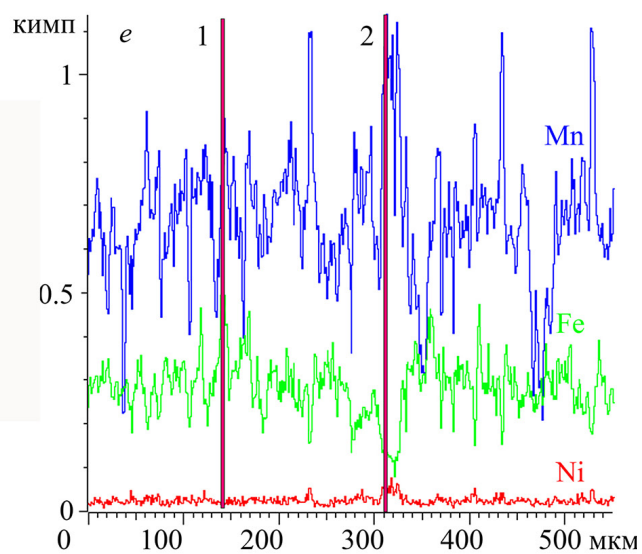
100 мкм



100 мкм



100 мкм



МОЩНЫЕ РУДНЫЕ КОРКИ ОХОТСКОГО МОРЯ

Таблица 3. Химический состав рудной корки LV27-19/5 по результатам микрозондового анализа, мас. %

Table 3. Chemical composition of the ore crust LV27-19/5 after microprobe analysis, wt. %

Элемент	Площадной анализ (сканирование)				Точечный анализ							
					Точка 1				Точка 2			
	измер.	σ	норм.	σ	измер.	σ	норм.	σ	измер.	σ	норм.	σ
O	23.27	0.76	33.02	0.75	26.94	0.83	31.62	0.69	27.71	0.61	32.99	0.51
Na	1.69	0.16	2.4	0.22	2.01	0.19	2.36	0.22	1.95	0.19	2.33	0.22
Mg	1.23	0.10	1.75	0.14	2.02	0.12	2.37	0.14	2.43	0.13	2.90	0.15
Al	1.18	0.08	1.68	0.11	1.26	0.08	1.48	0.10	1.94	0.09	2.31	0.11
Si	4.24	0.09	6.02	0.14	3.34	0.09	3.92	0.11	2.86	0.09	3.40	0.10
P	0.17	0.05	0.24	0.08	0.22	0.06	0.26	0.07	—		—	
S	0.29	0.05	0.41	0.07	0.27	0.05	0.32	0.06	—		—	
Cl	0.69	0.05	0.98	0.07	0.66	0.05	0.77	0.06	—		—	
K	0.81	0.05	1.15	0.07	1.05	0.05	1.23	0.06	1.38	0.06	1.64	0.07
Ca	1.70	0.06	2.41	0.08	1.86	0.06	2.19	0.07	1.52	0.06	1.81	0.07
Ti	0.38	0.05	0.54	0.07	0.48	0.05	0.56	0.06	—		—	
Mn	24.33	0.21	34.52	0.45	34.23	0.24	40.18	0.46	41.03	0.25	48.86	0.43
Fe	9.60	0.17	13.62	0.27	9.39	0.18	11.02	0.22	—		—	
Ni	0.88	0.09	1.25	0.13	1.46	0.11	1.72	0.13	2.60	0.12	3.10	0.15
Ba	—		—		—		—		0.57	0.12	0.68	0.14
Сумма	70.46		100		85.19		100		83.99		100	

Примечание. Площадь анализа с указанием точек 1, 2 изображена на рис. 4а. Прочерк — элемент не обнаружен.
 Note. The analyzed area with points 1 and 2 is shown in Fig. 4а. The dash means the element was not detected.

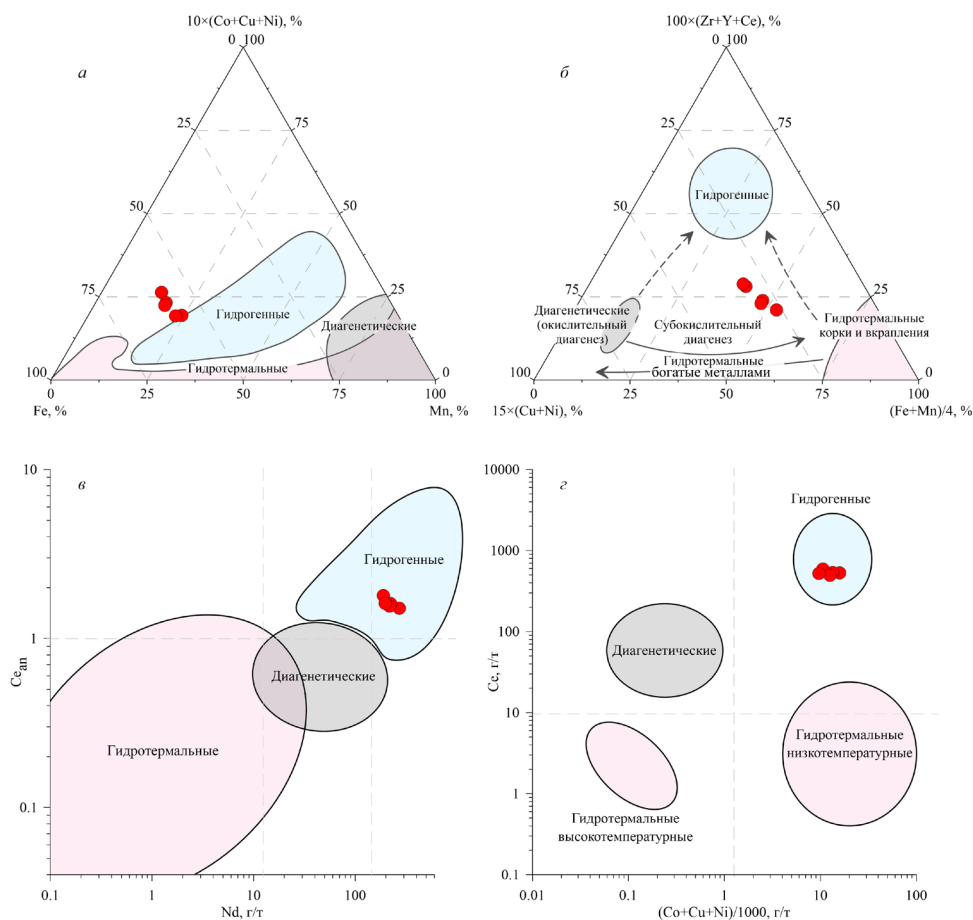


Рис. 5. Положение рудных корок со станции LV27-19 на генетических диаграммах: а — по (Bonatti et al., 1972); б — по (Josso et al., 2017); в — по (Bau et al., 2014); г — по (Vereshchagin et al., 2019).

Fig. 5. Position of ore crusts from station LV27-19 on genetic diagrams: а — by (Bonatti et al., 1972); б — by (Josso et al., 2017); в — by (Bau et al., 2014); г — by (Vereshchagin et al., 2019).

Таблица 4. Некоторые индикативные минералогические, структурные и геохимические показатели обогащенных никелем железомарганцевых образований Охотского моря в сравнении с гидротермальными и гидротермальными железомарганцевыми образованиями океана

Table 4. Some indicative mineralogical, structural and geochemical parameters of nickel-rich ferromanganese formations of the Sea of Okhotsk versus hydrogenetic and hydrothermal ferromanganese formations of the World Ocean

Показатель	Корки со станции LV27-19, n=5 (настоящее исследование)	Корки трога Каше-варова и хребта Зонне, n=12 (Михайлик, 2024)	Корки и конкреции Курильской островной дуги, n=12 (Гавриленко, Храмов, 1986; Михайлик, 2024; Штеренберг и др., 1987)	Индикаторное значение (Богданова и др., 2008; Бутузова, 2003; Гайоты..., 1995; Дубинин, 2006; Исследование..., 2012)	
				Гидротермальные корки и конкреции	Гидротермальные корки
Ni, %	1.0	0.5	0.2	Десятые доли процента, первые проценты	Сотые доли процента и менее
Главные рудные минералы	Вернадит, железистый? (11 % Fe)	Вернадит, железистый? (12 % Fe)	Вернадит, асболан-бузерит, бернессит, 10 Å манганат (тодорокит?)	Fe-вернадит, Mn-феррокситит; вернадит, асболан-бузерит, бернессит	Марганцевые корки: бернессит, вернадит, тодорокит, романешит Железистые корки: ферригидрит и его разновидности, гематит
Преобладающая структура	Тонкослоистая	Тонкослоистая	Слоистая, зонально-концентрическая	Тонкослоистая; радиально-, глобулярно-, тонкослоисто-дендритовая	Метаколлоидная
Mn/Fe	3.01	1.94	1.82	Десятые доли и единицы (сопоставимое количество Mn и Fe)	Марганцевые корки: сотни и тысячи (резкое преобладание Mn) Железистые корки: сотые и тысячные доли (резкое преобладание Fe)
Ti, %	0.34	0.38	0.28*	Более 0.1	Менее 0.1
Al, %	1.06	2.02	3.54*	Более 0.3	Менее 0.3
(Mn+Fe)/Ti	125	96.2	149*	от 26 до 60 (75)	Более 100
Σ(PЗЭ), %	0.1	0.08	0.1**	Десятые доли процента и более	Сотые доли процента и менее
С _{an}	1.61	1.75	2.02**	Более 1	Менее 1

Примечание. *(Михайлик, 2024; Штеренберг и др., 1987), n=6. **(Михайлик, 2024), n=2.

Note. *(Mikhailik, 2024; Shterenberg et al., 1987), n=6. **(Mikhailik, 2024), n=2.

Витязя (марганцевые конгломераты мощностью до 25 см) (Астахова, Колесник, 2011; Астахова и др., 2015). До настоящего времени самые мощные рудные корки Охотского моря толщиной до 15 см были описаны на одной из безымянных возвышенностей (вулканическая постройка?) в трогее Кашеварова (Михайлик и др., 2009) (рис. 1). Таким образом, на станции LV27-19 установлен новый региональный рекорд мощности рудных корок — 20 см.

Ранее для некоторых железомарганцевых образований центральной части Охотского моря и Курильской островной дуги уже отмечалась обогащенность никелем до 0.9 мас. % при среднем значении 0.4 мас. %, $n=24$ (Гавриленко, 1997; Гавриленко, Храмов, 1986; Иванова и др., 2019; Михайлик, 2024; Михайлик и др., 2009; Штеренберг и др., 1987) (рис. 1, табл. 4). Обогащенные никелем железомарганцевые образования Охотского моря представлены главным образом корками, реже конкрециями, которые сложены в основном вернадитом, асболоан-бузеритом, бернесситом и по совокупности признаков являются гидрогенными. В корках со станции LV27-19, также гидрогенных, сложенных преимущественно вернадитом (рис. 3, 5; табл. 1, 4), зафиксирован новый региональный максимум содержания никеля до 1.3 мас. % при среднем значении 1.0 мас. % в пробах условно чистого рудного вещества (табл. 2).

Ранее в рудных корках центральной части Охотского моря, в том числе возвышенности Академии Наук, были описаны мелкие включения минеральных зерен разного состава, включая зерна с содержанием никеля до 51 мас. %; зерна предположительно поступили в корки из подстилающего субстрата (Астахова, 2009). В изученном нами образце LV27-19/5 подобные зерна не обнаружены (рис. 4).

Итак, по содержанию никеля гидрогенные железомарганцевые образования центральной части Охотского моря и Курильской островной дуги (условно центрально-южный район Охотского моря, среднее содержание никеля с учетом литературных и наших данных — 0.5 мас. %, $n=29$; табл. 4) фактически конкурируют с такими перспективными океанскими рудами, как кобальтоносные марганцевые корки подводных гор и гайотов и полиметаллические железомарганцевые конкреции абиссальных котловин (средние значения по Тихому океану 0.4–0.5 и 0.97 мас. % соответственно) (Оганесян, Мирлин, 2023). Накопление никеля происходит, очевидно, в результате его сорбции на оксидах марганца. Вернадитовый и бузерит-бернессит-асболоановый сорбционные типы железомарганцевых образований считаются одними из самых перспективных, в том числе на поглощение катионов никеля

(Новиков, 2011). На это указывают и результаты компонентного анализа вернадитовой корки с хребта Зонне (Иванова и др., 2019).

То, что изученные нами образцы мощных обогащенных никелем гидрогенных корок драгированы в центрально-южном районе Охотского моря, где уже отмечались гидрогенные железомарганцевые образования с высоким содержанием никеля, в том числе корки значительной толщины (рис. 1), позволяет оконтурить данный район как перспективный на никель и сопутствующий комплекс стратегических и критических металлов. Вместе с тем следует учитывать, что выборка таких железомарганцевых образований пока небольшая. Соответственно, вывод носит предварительный характер и требует продолжения исследований для уточнения масштабов распространения гидрогенных корок и конкреций в Охотском море, а также содержания и форм нахождения в них никеля и других стратегических и критических металлов. В дальнейших оценках обязательно должно учитываться соотношение в корках и конкрециях рудного вещества и нерудной примеси, способной, особенно в условиях приконтинентального типа литогенеза, существенно разбавить рудное вещество.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплексное изучение образцов рудных корок со станции LV27-19, выполненной на возвышенности Академии Наук в центральной части Охотского моря, показало, что это преимущественно вернадитовые железомарганцевые образования (Mn/Fe — 3.01) гидрогенного происхождения, которые по своему строению, минеральному и химическому составу близки ранее изученным обогащенным никелем гидрогенным железомарганцевым образованиям центральной части Охотского моря и Курильской островной дуги (условно центрально-южный район Охотского моря).

Вместе с тем при изучении корок со станции LV27-19 удалось установить два новых региональных максимума: максимум мощности (20 см вместо прежних 15 см) и максимум содержания никеля (1.3 мас. % вместо прежних 0.9 мас. %). По мощности и содержанию никеля гидрогенные корки и конкреции центрально-южного района Охотского моря могут конкурировать с железомарганцевыми рудами океана — кобальтоносными марганцевыми корками подводных гор и гайотов и полиметаллическими железомарганцевыми конкрециями абиссальных котловин. Мощность корковых рудных залежей в океане редко превышает 15 см, среднее содержание никеля в корках и конкрециях рудных провинций Тихого океана оставляет 0.4–0.5 и 0.97 мас. % соответственно.

Центрально-южный район Охотского моря может быть рекомендован в качестве перспективного для дальнейшего изучения железомарганцевой минерализации.

Исследование выполнено в рамках госбюджетных тем НИР Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева ДВО РАН № 124072000018-9 и Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН № 124031400017-5.

Список литературы [References]

- Аникеева Л.И., Гавриленко Г.М., Рашидов В.А. и др.* Железомарганцевые корки подводного вулканического массива Эдельштейна и подводного вулкана, расположенного к западу от о. Парамушир (Курильская островная дуга) // Вулканология и сейсмология. 2005. № 6. С. 47–60 [Anikееva L.I., Gavrilenko G.M., Rashidov V.A. et al. Ferromanganese nodules found in the underwater Edelstein volcanic massif and on an underwater volcano west of Paramushir I., Kuriles // Vulkanologiya i Seismologiya. 2005. № 6. P. 47–60 (in Russian)].
- Аникеева Л.И., Казакова В.Е., Гавриленко Г.М., Рашидов В.А.* Железомарганцевые корковые образования Западно-Тихоокеанской переходной зоны // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2008. № 1. Вып. 11. С. 10–31 [Anikееva L.I., Kazakova V.E., Gavrilenko G.M., Rashidov V.A. Ferromanganese crust formations of the West Pacific transition zone // Vestnik KRAUNTs. 2008. № 1(11). P. 10–31 (in Russian)].
- Астахова Н.В.* Аутигенные образования в поздней-нзойских отложениях окраинных морей Востока Азии. Владивосток: Дальнаука, 2007. 244 с. [Astakhova N.V. Authigenic minerals of Late Cenozoic sediments East Asian marginal seas. Vladivostok: Dalnauka, 2007. 244 p. (in Russian)].
- Астахова Н.В.* Благородные и цветные металлы в железомарганцевых корках центральной части Охотского моря // Океанология. 2009. Т. 49. № 3. С. 440–452 [Astakhova N.V. Precious and nonferrous metals in the ferromanganese crusts of the central Sea of Okhotsk // Oceanology. 2009. V. 49. № 3. P. 405–417. <https://doi.org/10.1134/S0001437009030138>].
- Астахова Н.В., Колесник О.Н.* Акцессорные металлы в железо-марганцевых корках хребта Галагана (Японское море) // Тихоокеанская геология. 2011. Т. 30. № 6. С. 97–109 [Astakhova N.V., Kolesnik O.N. Accessory metals in ferromanganese crusts of the Galagan Ridge (Sea of Japan) // Russian Journal of Pacific Geology. 2011. V. 30. № 6. P. 97–109 (in Russian)].
- Астахова Н.В., Лопатников Е.А., Цой И.Б.* Геохимия марганцевых конгломератов возвышенности Витязя (Японское море) // Вулканология и сейсмология. 2015. № 6. С. 13–23. <https://doi.org/10.7868/S0203030615060024> [Astakhova N.V., Lopatnikov E.A., Tsoy I.B. The geochemistry of manganese conglomerates on the Vityaz' Rise, Japan Sea // Journal of Volcanology and Seismology. 2015. V. 9. № 6. P. 358–367. <https://doi.org/10.1134/S0742046315060020>].
- Батурич Г.Н., Дубинчук В.Т., Рашидов В.А.* Железомарганцевые корки Охотского моря // Океанология. 2012. Т. 52. № 1. С. 95–108 [Baturin G.N., Dubinchuk V.T., Rashidov V.A. Ferromanganese crusts from the Sea of Okhotsk // Oceanology. 2012. V. 52. № 1. P. 88–100. <https://doi.org/10.1134/S0001437012010031>].
- Батурич Г.Н., Дубинчук В.Т., Рашидов В.А.* Особенности распределения микроэлементов в железомарганцевых корках со дна Охотского моря // ДАН. 2011. Т. 440. № 2. С. 213–219 [Baturin G.N., Dubinchuk V.T., Rashidov V.A. Distribution of microelements in ferromanganese crusts of the Sea of Okhotsk // Doklady Earth Sciences. 2011. V. 440. Pt. 1. P. 1291–1297. <https://doi.org/10.1134/S1028334X11090121>].
- Богданова О.Ю., Горшков А.И., Новиков Г.В., Богданов Ю.А.* Минеральный состав морфогенетических типов железо-марганцевых рудных образований Мирового океана // Геология рудных месторождений. 2008. Т. 50. № 6. С. 526–534 [Bogdanova O.Yu., Gorshkov A.I., Novikov G.V., Bogdanov Yu.A. Mineralogy of morphogenetic types of ferromanganese deposits in the World Ocean // Geology of Ore Deposits. 2008. V. 50. № 6. P. 462–469. <https://doi.org/10.1134/S1075701508060044>].
- Бурузова Г.Ю.* Гидротермально-осадочное рудообразование в Мировом океане. М.: ГЕОС, 2003. 136 с. [Butuzova G.Yu. Hydrothermal sedimentary ore formation in the World Ocean. Moscow: GEOS, 2003. 136 p. (in Russian)].
- Гавриленко Г.М.* Подводная вулканическая и гидротермальная деятельность как источник металлов в железо-марганцевых образованиях островных дуг. Владивосток: Дальнаука, 1997. 164 с. [Gavrilenko G.M. Submarine volcanic and hydrothermal activity as a source of metals in island-arc ferromanganese deposits. Vladivostok: Dalnauka, 1997. 164 p. (in Russian)].
- Гавриленко Г.М., Храмов С.В.* Железомарганцевые образования подводных склонов Курильской островной дуги // Вулканология и сейсмология. 1986. № 2. С. 97–100 [Gavrilenko G.M., Khramov S.V. Ferromanganese formations of underwater slopes of the Kuril Island Arc // Vulkanologiya i Seismologiya. 1986. № 2. P. 97–100 (in Russian)].
- Гайоты Западной Пацифики и их рудоносность / Ю.Г. Волохин, М.Е. Мельников, Э.Л. Школьник и др.* М.: Наука, 1995. 368 с. [Guyots of the Western Pacific and their mineralization / Yu.G. Volokhin, M.E. Melnikov, E.L. Shkolnik et al. Moscow: Nauka, 1995. 368 p. (in Russian)].
- Дворкин В.И.* Метрология и обеспечение качества химического анализа. М.: Техносфера, 2019. 317 с. [Dvorkin V.I. Metrology and Ensuring Quality for Chemical Analysis. Moscow: Tekhnosfera, 2019. 317 p. (in Russian)].
- Дубинин А.В.* Геохимия редкоземельных элементов в океане. М.: Наука, 2006. 360 с. [Dubinin A.V. Rare Earth Element Geochemistry in the Ocean. Moscow: Nauka, 2006. 360 p. (in Russian)].
- Дубинин А.В., Успенская Т.Ю., Гавриленко Г.М., Рашидов В.А.* Геохимия и проблемы генезиса железомарганцевых образований островных дуг западной части Тихого океана // Геохимия. 2008. № 10. С. 1280–1303 [Dubinin A.V., Uspenskaya

- T.Yu., Gavrilenko G.M., Rashidov V.A.* Geochemistry and Genesis of Fe–Mn Mineralization in island arcs in the west Pacific Ocean // *Geochemistry International*. 2008. V. 46. № 12. P. 1206–1227. <https://doi.org/10.1134/S0016702908120021>].
- Емельянова Т.А., Леликов Е.П., Съедин В.Т., Нарыжный В.И.* Геология и особенности вулканизма дна Охотского моря // *Тихоокеанская геология*. 2003. Т. 22. № 4. С. 3–18 [*Emelyanova T.A., Lelikov E.P., S'edin V.T., Naryzhny V.I.* Geology and volcanic features of the Sea of Okhotsk floor // *Tikhookeanskaya Geologiya*. 2003. V. 22. № 4. P. 3–18 (in Russian)].
- Зарубина Н.В., Блохин М.Г., Михайлик П.Е., Сегренев А.С.* Определение элементного состава стандартных образцов железомарганцевых образований методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой // *Стандартные образцы*. 2014. № 3. С. 33–44 [*Zarubina N.V., Blokhin M.G., Mikhailik P.E., Segrenov A.S.* Determination of the elemental composition of ferromanganese formations certified reference materials by mass-spectrometry with inductively coupled plasma // *Certified Reference Materials*. 2014. № 3. P. 33–44 (in Russian)].
- Иванова Ю.М., Михайлик П.Е., Михайлик Е.В. и др.* Вещественный состав и условия формирования железомарганцевых корок хребта Зонне (Курильская котловина, Охотское море) // *Геология и геофизика*. 2019. Т. 60. № 9. С. 1292–1309. <https://doi.org/10.15372/GiG2019063> [*Ivanova Y.M., Mikhailik P.E., Mikhailik E.V. et al.* Chemical composition and genesis of ferromanganese crusts from the Sonne Ridge (Kuril Basin, Sea of Okhotsk) // *Russian Geology and Geophysics*. 2019. V. 60. № 9. P. 1026–1042. <https://doi.org/10.15372/RGG2019063>].
- Исследование марганцевой и железомарганцевой минерализации в разных природных обстановках методами сканирующей электронной микроскопии / Науч. ред. Г.Н. Батулин. М.: Эслан, 2012. 472 с. [Study on manganese and ferromanganese mineralization in different environmental conditions using scanning electron microscopy methods / G.N. Baturin (Sci. Ed.). Moscow: Eslan, 2012. 472 p. (in Russian)].
- Кобальтобогатые руды Мирового океана / Л.И. Аникеева, С.И. Андреев, В.Е. Казакова и др. СПб.: ВНИИОкеангеология, 2002. 167 с. [Cobalt-rich ores of the World Ocean / L.I. Anikeeva, S.I. Andreev, V.E. Kazakova et al. St. Petersburg: VNIIOkeangeologiya, 2002. 167 p. (in Russian)].
- Колесник О.Н., Карабцов А.А., Съедин В.Т. и др.* Новый нетипичный случай железомарганцевой минерализации в Японском море // *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле*. 2024. Т. 515. № 2. С. 245–251. <https://doi.org/10.31857/S2686739724040093> [*Kolesnik O.N., Karabtsov A.A., S'edin V.T. et al.* A new atypical case of ferromanganese mineralization in the Sea of Japan // *Doklady Earth Sciences*. 2024. V. 515. № 2. P. 652–657. <https://doi.org/10.1134/S1028334X23603668>].
- Колесник О.Н., Карабцов А.А., Съедин В.Т. и др.* Первая находка манганитовых корок в Японском море // *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле*. 2023. Т. 511. № 2. С. 191–197. <https://doi.org/10.31857/S2686739723600212> [*Kolesnik O.N., Karabtsov A.A., S'edin V.T. et al.* The first manganite crusts in the Sea of Japan // *Doklady Earth Sciences*. 2023. V. 511. № 2. P. 672–677. <http://dx.doi.org/10.1134/S1028334X2360069X>].
- Леликов Е.П., Емельянова Т.А., Съедин В.Т. и др.* Новые данные по радиоизотопному датированию вулканитов Японского и Охотского морей // *Тихоокеанская геология*. 2001. Т. 20. № 5. С. 118–122 [*Lelikov E.P., Emel'yanova T.A., S'edin V.T. et al.* New radioisotopic dating for volcanites from the Sea of Japan and Sea of Okhotsk // *Tikhookeanskaya Geologiya*. V. 20. № 5. P. 118–122 (in Russian)].
- Мельников М.Е.* Месторождения кобальтоносных марганцевых корок. Геленджик: ГИЦ «Южморгеология», 2005. 230 с. [*Mel'nikov M.Ye.* Mestorozhdeniya kobal'tonosnykh margantsevykh korok. Gelendzhik: GNTS «Yuzhmorgeologiya», 2005. 230 p. (in Russian)].
- Михайлик П.Е.* Железомарганцевые корки северной части Тихого океана и прилегающих дальневосточных морей: строение, состав и условия формирования: дис. ... д-ра геол.-мин. наук: 1.6.10. Новосибирск, 2024. 314 с. [*Mikhailik P.E.* Ferromanganese crusts of the Northern Pacific Ocean and adjacent Far Eastern seas: structure, composition and formation conditions: Doctoral Dissertation on Geology and Mineralogy: 1.6.10. Novosibirsk, 2024. 314 p. (in Russian)].
- Михайлик П.Е., Вишневецкая И.А., Михайлик Е.В. и др.* Генезис и изотопный состав Nd железомарганцевых образований Охотского моря и Курильской островной дуги // *Геология и геофизика*. 2021. Т. 62. № 9. С. 1309–1326. <https://doi.org/10.15372/GiG2020146> [*Mikhailik P.E., Vishnevskaya I.A., Mikhailik E.V. et al.* Genesis and Nd isotope composition of ferromanganese deposits of the Sea of Okhotsk and the Kuril Island Arc // *Russian Geology and Geophysics*. 2021. V. 62. № 9. P. 1074–1087. <https://doi.org/10.2113/RGG20194142>].
- Михайлик П.Е., Деркачев А.Н., Чудаев О.В., Зарубина Н.В.* Железомарганцевые корки подводных возвышенностей трога Кашеварова (Охотское море) // *Тихоокеанская геология*. 2009. Т. 28. № 1. С. 32–43 [*Mikhailik P.E., Derkachev A.N., Chudaev, O.V., Zarubina N.V.* Fe–Mn crusts from underwater rises of the Kashevarov Trough (Sea of Okhotsk) // *Russian Journal of Pacific Geology*. 2009. V. 3. № 1. P. 28–39. <https://doi.org/10.1134/S1819714009010047>].
- Михайлик П.Е., Ханчук А.И., Михайлик Е.В. и др.* Железомарганцевые корки северной Пацифики // *Тихоокеанская геология*. 2023. Т. 42. № 2. С. 3–35. <https://doi.org/10.30911/0207-4028-2023-42-2-3-35> [*Mikhailik P.E., Khanchuk A.I., Mikhailik E.V. et al.* Ferromanganese crusts of the North Pacific Ocean // *Russian Journal of Pacific Geology*. 2023. V. 17. № 2. P. 101–133. <https://doi.org/10.1134/S1819714023020045>].
- Михайлик П.Е., Ханчук А.И., Михайлик Е.В., Рашидов В.А.* Распределение химических элементов в минеральных фазах железомарганцевых корок С-3 Пацифики // *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле*. 2022. Т. 504. № 1. С. 34–40. <https://doi.org/10.31857/S2686739722050097> [*Mikhailik P.E., Khanchuk A.I., Mikhailik E.V., Rashidov V.A.* Distribution of chemical

- elements in the mineral fraction of ferromanganese crusts of the NW Pacific // *Doklady Earth Sciences*. 2022. V. 504. № 1. P. 259–265. <https://doi.org/10.1134/S1028334X22050099>.
- Новиков Г.В.* Сорбционные типы железомарганцевых образований Мирового океана // Минералогическая оценка месторождений полезных ископаемых и проблемы раскрытия минералов: сборник статей по материалам V Российского семинара по технологической минералогии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2011. С. 68–82 [*Novikov G.V.* Sorption types of ferromanganese formations of the World Ocean // *Mineralogical and technological evaluation of useful mineral deposits and problems in mineral opening: Proceedings of the V Russian Workshop on Technological Mineralogy*. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2011. P. 68–82 (in Russian)].
- Оганесян Л.В., Мирлин Е.Г.* Минерально-сырьевые ресурсы твердых полезных ископаемых Мирового океана: современные реалии и потенциал рудоносности // *Океанологические исследования*. 2023. Т. 51. № 4. С. 52–89. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2023.51\(4\).4](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2023.51(4).4) [*Oganesyan L.V., Mirlin E.G.* Mineral resources of solid minerals of the World Ocean: modern realities and ore potential // *Journal of Oceanological Research*. 2023. V. 51. № 4. P. 52–89 (in Russian)].
- Орлов А.А.* Формы железо-марганцевых образований Охотского моря // Геологическое строение Охотоморского региона. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1982. С. 101–106 [*Orlov A.A.* Formy zhelezo-margancevyh obrazovanij Ohotskogo morya // *Geologicheskoe stroenie Ohotomorskogo regiona*. Vladivostok: DVNC AN SSSR, 1982. P. 101–106 (in Russian)].
- Съедин В.Т., Емельянова Т.А., Леликов Е.П.* Плиоценовый вулканизм возвышенности Академии наук // Структура, геодинамика и металлогения Охотского региона и прилегающих частей Северо-Западной Тихоокеанской плиты: тез. докл. Междунар. науч. симпозиума. Т. 1. Южно-Сахалинск: ИМГиГ СахНЦ ДВО РАН, 2002. С. 264–265 [*S'edin V.T., Emelyanova T.A., Lelikov E.P.* Pliocene volcanism of the Akademii Nauk Rise // *Structure, Geodynamics and Metallogeny of the Okhotsk Region and Adjacent Parts of the Northwest Pacific Plate: Abstracts of the International Scientific Symposium*. V. 1. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGG SakhSC FEB RAS, 2002. P. 264–265 (in Russian)].
- Тарарин И.А.* Геологическое строение и модель формирования Курильской глубоководной впадины Охотского моря // Тихоокеанский рудный пояс: материалы новых исследований. Владивосток: Дальнаука, 2008. С. 308–320 [*Tararin I.A.* Geological structure and formation model of the Kuril deep-sea basin of the Sea of Okhotsk // *Pacific Ore Belt: Materials of New Research*. Vladivostok: Dalnauka, 2008. P. 308–320 (in Russian)].
- Успенская Т.Ю., Горшков А.И., Гавриленко Г.М., Сивцов А.В.* Железомарганцевые корки и конкреции Курильской островной дуги: их строение, состав, генезис // *Литология и полезные ископаемые*. 1989. № 4. С. 30–40 [*Uspenskaya T.Yu., Gorshkov A.I., Gavrilenko G.M., Sivtsov A.V.* Ferromanganese crusts and nodules of the Kuril Island Arc: their structure, composition, and genesis // *Litologiya i Poleznuye Iskopayemye*. 1989. № 4. P. 30–40 (in Russian)].
- Штеренберг Л.Е., Антипов М.П., Ильев А.Я. и др.* Железомарганцевые образования Охотского моря // *Известия АН СССР. Сер. Геологическая*. 1987. № 12. С. 106–115 [*Shterenberg L.E., Antipov M.P., Il'ev A.Ya. et al.* Ferromanganese formations of the Sea of Okhotsk // *Izvestiya AN SSSR. Seriya Geologicheskaya*. 1987. № 12. P. 106–115 (in Russian)].
- Bau M., Schmidt K., Koschinsky A. et al.* Discriminating between different genetic types of marine ferromanganese crusts and nodules based on rare earth elements and yttrium // *Chemical Geology*. 2014. 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. In: *Ferromanganese Deposits on the Ocean Floor* (Horn D., Ed.). Washington, D.C.: National Science Foundation, 1972. P. 149–165.
- Chemical Composition of Ferromanganese Crusts in the World Ocean – A Review and Comprehensive Database* (ver. 1.1, November, 2014) / F.T. Manheim, C.M. Lane-Bostwick (Eds.). U.S. Geological Survey Open-File Report 89-202014, 2014. 476 p. <http://dx.doi.org/10.3133/ofr8920V1.1>
- Glasby G.P., Cherkashov G.A., Gavrilenko G.M. et al.* Submarine hydrothermal activity and mineralization on the Kurile and western Aleutian island arcs, N.W. Pacific // *Marine Geology*. 2006. V. 231. P. 163–180. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2006.06.003>
- Hein J.R., Koschinsky A.* Deep-Ocean Ferromanganese Crusts and Nodules. In: *Treatise on Geochemistry*, 2nd Edition, 2014. P. 273–291. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.01111-6>
- 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>
- RV Akademik M.A. Lavrentyev Cruise 27: Cruise report GREGORY, German Russian Expedition for Geological/Geophysical Okhotsk Sea Research, Vladivostok - Pusan - Okhotsk Sea - Pusan - Vladivostok, September 7 - October 12, 1996 / D. Nürnberg, B.V. Baranov, B.Ya. Karp (Eds.). Kiel: GEOMAR, Research Center for Marine Geosciences, Christian Albrechts University, 1997. 152 p.*
- Vereshchagin O.S., Perova E.N., Brusnitsyn A.I. et al.* Ferromanganese nodules from the Kara Sea: Mineralogy, geochemistry and genesis // *Ore Geology Reviews*. 2019. V. 106. P. 192–204. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.01.023>

МОЩНЫЕ РУДНЫЕ КОРКИ ОХОТСКОГО МОРЯ
**THICK ORE CRUSTS OF THE SEA OF OKHOTSK
SUPER-ENRICHED IN NICKEL**

**O.N. Kolesnik¹, A.N. Kolesnik¹, A.A. Karabtsov², V.T. S''edin¹,
V.A. Rashidov³, P.N. Postnov¹, R.B. Shakirov¹**

¹*V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Vladivostok, Russia, 690041;
e-mail: kolesnik_o@poi.dvo.ru*

²*Far East Geological Institute FEB RAS, Vladivostok, Russia, 690022*

³*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, 683006*

Received October 24, 2025; revised March 01, 2026; accepted March 27, 2026

Ore crusts up to 20 cm thick dredged from a depth of 1500–1300 m in the eastern part of the Akademii Nauk Rise in the Sea of Okhotsk were studied. The main ore mineral is vernadite. The crusts contain an average of 32 % manganese and 11 % iron. They are extremely enriched in nickel and are hydrogenetic, according to the combination of features. The nickel content in samples, according to inductively coupled plasma mass spectrometry, reaches 1.3 % with an average value of 1.0 %, and point microprobe analyses yield 2.6 % with an average value of 0.9 %. Based on a summary of our own and published data, a central-southern nickel-promising region was outlined in the Sea of Okhotsk. The nickel content in hydrogenetic ferromanganese crusts and nodules of the region is comparable to that in cobalt-rich manganese crusts and polymetallic ferromanganese nodules of the World Ocean.

Keywords: nickel, hydrogenetic ferromanganese crusts and nodules, Sea of Okhotsk.