

**Ярошук Елена Игоревна**

В 2006 г. окончила Дальневосточный государственный технический университет (ДВПИ им. В.В. Куйбышева), получив специальность «геоэколог», и была принята на работу в должности инженера в Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН. В 2009–2013 гг. прошла обучение в аспирантуре по специальности «Океанология». В настоящее время работает в лаборатории геохимии осадочных процессов в должности ведущего инженера. Научные интересы Елены Игоревны связаны с изучением этапности рудообразования на подводных возвышенностях Японского моря, исследованием гранулометрического состава донных осадков восточноарктических морей России в рамках международного проекта.

Имеет публикации в рецензируемых журналах, активно участвует в работе научных конференций всероссийского и регионального уровней.

УДК 553.2(265.54)

DOI: 10.25808/08697698.2020.209.1.015

Е.И. ЯРОШУК

## Рудные корки возвышенности Шевалдина и горы Петра Великого (Центральная котловина Японского моря)

*Приводятся данные о строении и химическом составе маломощных рудных корок, впервые поднятых при драгировании в пределах возвышенности Шевалдина и горы Петра Великого (Японское море). Образование корок на обейх подводных вулканических возвышенностях связано с цементацией марганцевыми гидроокислами мелких кусочков зеленовато-бурых глинистых минералов (железистых силикатов). По химическому составу корки относятся к марганцево-железо-кремнистым. Изменения содержания главных элементов Mn, Fe, Si связано с количеством включений бурых кусочков Fe-силикатов. Результаты химического анализа и образование рудных корок на склонах подводных вулканов позволяют отнести их к гидротермально-осадочным образованиям.*

*Ключевые слова:* марганцево-железкремнистые корки, Fe-силикаты, подводные вулканы, Японское море.

**Ore crusts of the Shevaldin Seamount and the Peter the Great Seamount (The Central Basin of the Sea of Japan).** E.I. YAROSHCHUK (V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok).

ЯРОШУК Елена Игоревна – ведущий инженер (Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН, Владивосток). E-mail: e.yaroshchuk@poi.dvo.ru

Работа выполнена по госбюджетной теме «Палеоокеанология окраинных морей Востока России и примыкающих районов Тихого океана, особенности и этапность кайнозойского осадконакопления, магматизма и рудогенеза» (№ АААА-А17-117030110033-0).

*The data are given on the structure and chemical composition of low-power crusts of the Shevaldin Seamount and the Peter the Great Seamount (the Sea of Japan). The formation of crusts on the both underwater volcanoes is associated with the cementation of the small fragments of the greenish-brown clay minerals (ferruginous silicates) by the manganese hydroxides. By chemical composition, the crusts are manganese-ferro-siliceous. The changes in the content of the main elements Mn, Fe, Si are associated with the number of inclusions of brown pieces of Fe-silicates. The results of the chemical analysis and the formation of the ore crusts on the slopes of underwater volcanoes can be attributed to the hydrothermal sedimentary formations.*

*Key words: manganese-ferro-siliceous crusts, Fe-silicates, underwater volcanoes, the Sea of Japan.*

## **Введение**

Центральная (Японская) котловина – самая большая и глубокая в Японском море. Она протягивается в северо-восточном направлении до 900 км при средней ширине 250 км. Максимальная глубина – 3669 м. Поверхность дна котловины ровная, с отдельными вулканическими возвышенностями. При драгировании привершинных частей большинства этих структур совместно с вулканитами часто поднимали железомарганцевые корки. Содержание главных рудных элементов в них варьирует в широких пределах: Mn – от 0,2 до 63,1 % (среднее – 33,4 %), Fe – от 0,007 до 42,5 % (среднее – 6,4 %) [2]. Образование железомарганцевых корок в Японском море связано с гидротермально-осадочным процессом. На это указывают приуроченность их к привершинным частям подводных вулканических построек, особенности химического состава и заполнение пор подстилающих базальтов гидроокислами марганца [2, 10, 11].

В 2013 и 2014 гг. в экспедициях Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичёва (ТОИ) ДВО РАН впервые были подняты рудные корки с возвышенности Шевалдина и горы Петра Великого. Результаты исследования этих корок приведены в данной работе.

## **Материал и методы**

Материалом для изучения послужили образцы рудных корок, впервые поднятых при драгировании в пределах возвышенности Шевалдина и горы Петра Великого в экспедициях ТОИ ДВО РАН в 2013–2014 гг.

Наиболее представительные образцы изучались с помощью бинокля Stemi 2000-C, оснащенного цифровой камерой AxioCam MRc.

Для определения содержания Fe, Mn, Si, Al, Ca, Mg, Ti в образцах использовался атомно-эмиссионный (с индуктивно связанной плазмой) метод анализа на спектрометре Agilent 7500c (Agilent Technologies, США) в Центре коллективного пользования Дальневосточного геологического института ДВО РАН. Все элементы определялись на навеску, высушенную при 105 °С.

Дополнительно производился точечный анализ количественного содержания химических элементов на портативном рентгенофлуоресцентном энергодисперсионном спектрометре Olympus Delta DPO2000 в режиме заводской калибровки «Геохимия». Проверка точности определения химических элементов проверялась по отечественным (ООПО402, ООКО301, ООКО202, ООКО302, ООКО303) и международным (HISS-1, PACS-3, MESS-4) стандартным образцам донных отложений. Корректировка заводской калибровки Delta DPO2000 проводилась с помощью уравнений регрессий, вычисленных на основе этих стандартов.

## Геологическое строение возвышенности Шевалдина и горы Петра Великого

Возвышенность Шевалдина расположена в зоне сочленения Центральной (Японской) котловины Японского моря с возвышенностью Ямато (рис. 1, а). Впервые возвышенность Шевалдина была обнаружена и описана сотрудниками ТОИ ДВО РАН как отдельная структура в 30/31-м рейсе НИС «Профессор Богоров» в 1989 г. В 2014 г. в 68-м рейсе НИС «Академик М.А. Лаврентьев», организованном ТОИ ДВО РАН, выполнены детальные морфологические исследования этой структуры и проведено дополнительное геологическое опробование (драгирование). Данные исследования показали, что возвышенность Шевалдина примыкает к северной части крупной возвышенности Северное Ямато примерно по изобате 2500 м. Она имеет изометричную форму и слегка вытянута в меридиональном направлении. Длина ее около 15 км при ширине основания около 12 км (по изобате 3000 м). Минимальная глубина над вершиной – 1685 м. Возвышенность имеет сложное строение и состоит из двух частей – пьедестала и отчетливо выраженной привершинной части. В ее западной части расположена кальдера, которая открывается на север в сторону Центральной котловины. Базальты, слагающие возвышенность, имеют позднемиоцен-плиоценовый возраст и относятся к пострифтовому типу вулканизма [7, 9].

В 2014 г. драгирование проводилось на крутых восточном и западном склонах привершинной части горы в интервале 1700–2300 м. На обеих станциях (LV68-1 и LV68-2) поднято незначительное количество (не более 5 кг) каменного материала щелнистой размерности. Среди поднятого материала совместно с базальтами и слаболитифицированными

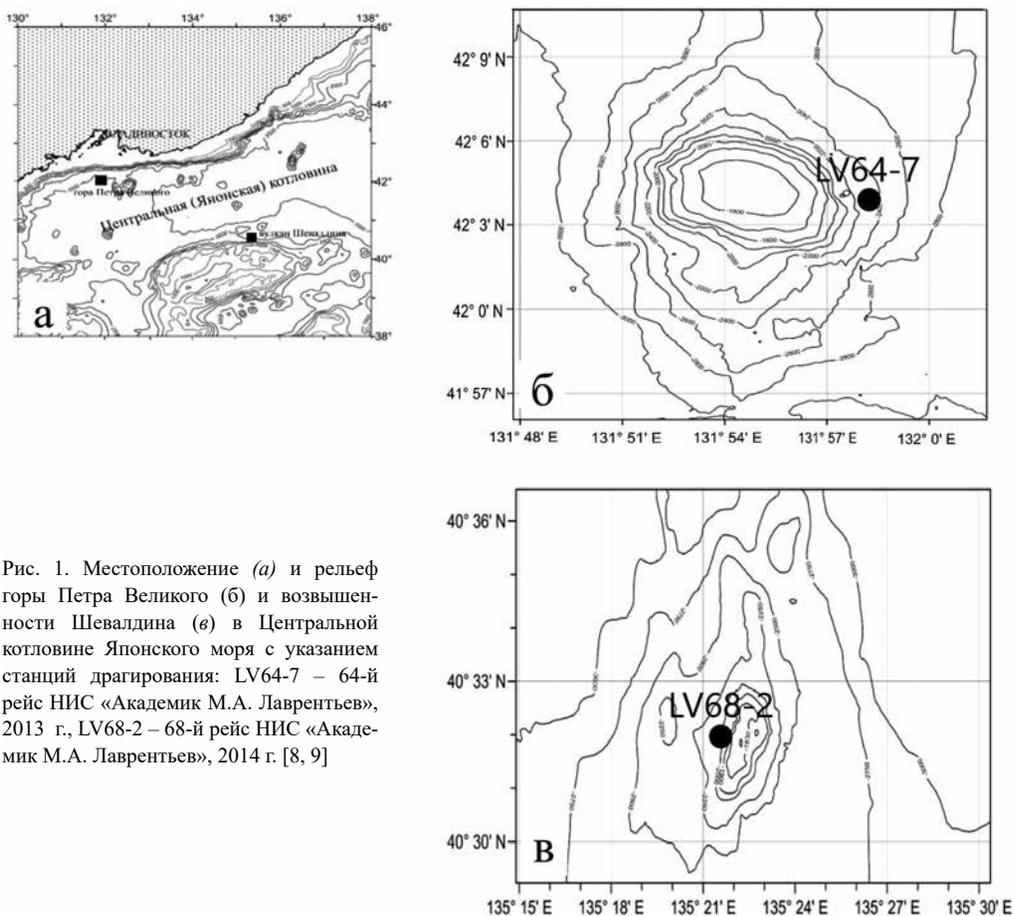


Рис. 1. Местоположение (а) и рельеф горы Петра Великого (б) и возвышенности Шевалдина (в) в Центральной котловине Японского моря с указанием станций драгирования: LV64-7 – 64-й рейс НИС «Академик М.А. Лаврентьев», 2013 г., LV68-2 – 68-й рейс НИС «Академик М.А. Лаврентьев», 2014 г. [8, 9]

осадочными породами впервые подняты обломки маломощных рудных корок толщиной до 1 см [9].

Гора Петра Великого расположена в северо-западной части Центральной котловины рядом с подножием материкового склона (рис. 1, б). Гора представляет собой вулканическую постройку округлой конусовидной формы высотой около 2000 м. Минимальная глубина над вершиной – 1430 м. Северо-западный склон вулкана крутой, а юго-восточный – более пологий. Первые исследования этой горы проводились сотрудниками ТОИ ДВО РАН геофизическими методами на НИС «Профессор Гагаринский» в 1990–2003 гг. Позже, в 2010 и 2013 гг. (52-й и 64-й рейсы НИС «Академик М.А. Лаврентьев»), изучение ее были продолжены геологическими методами [8]. Всего выполнено 5 станций драгирования на западном и восточном склонах горы. В результате этих работ были подняты базальты и слаболитифицированные осадочные породы, представленные туфодиатомидами и диатомовыми глинами с пирокластикой позднемиоцен-плейстоценового возраста [5]. В одной драге (LV64-7), отобранной на западном склоне, среди каменного материала были обнаружены маломощные рудные корки.

### Результаты и их обсуждение

Отобранные на возвышенности Шевалдина и в пределах горы Петра Великого образцы рудных корок представляют собой черные, иногда буроватые, рыхлые, редко более плотные образования толщиной примерно 1 см. Образцы изучены под бинокляром.

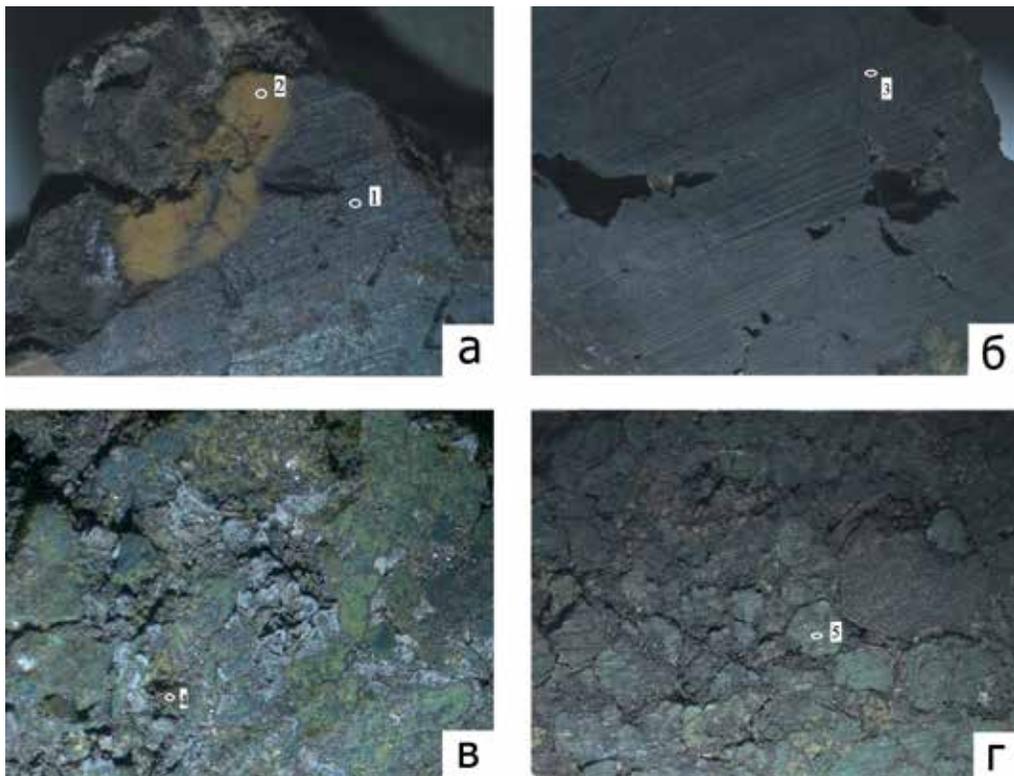


Рис. 2. Образцы рудных корок с возвышенности Шевалдина (а–в) и горы Петра Великого (г): а – цементация железомарганцевыми гидроокислами (1) бесформенных комочков Fe-Si состава (2); б – внешний вид массивного образования черного цвета преимущественно Mn состава (3); в – цементация аморфным кремнеземом бесформенных комочков Fe-Si состава (4); г – внешний вид кремнистой корки, бесформенные зеленые комочки Fe-Si состава (5) в цементе (вид под бинокляром, ув. 4)

Таблица 1

Химический состав образцов рудных корок с возвышенности Шевалдина и горы Петра Великого (Mn – п.л.л., в %, Co – Л., в г/т)

| Элемент           | LV68-2-1 | LV68-2-2 | LV64-7 | Элемент | LV68-2-1 | LV68-2-2 | LV64-7 | Элемент | LV68-2-1 | LV68-2-2 | LV64-7 |
|-------------------|----------|----------|--------|---------|----------|----------|--------|---------|----------|----------|--------|
| Mn                | 0,18     | 1,27     | 32,76  | Co      | 14,35    | 27,38    | 11,35  | La      | 3,61     | 5,74     | 46,14  |
| Fe <sub>вс.</sub> | 26,26    | 27,44    | 7,19   | Ni      | 44,50    | 80,00    | 168,50 | Ce      | 3,34     | 5,59     | 35,32  |
| Si                | 19,58    | 18,51    | 10,28  | Cu      | 31,46    | 12,00    | 20,55  | Pr      | 2,42     | 3,58     | 25,86  |
| Ti                | 0,001    | 0,003    | 0,026  | Zn      | 48,48    | 26,67    | 397,56 | Nd      | 1,79     | 2,95     | 22,08  |
| Al                | 0,01     | 0,02     | 0,68   | Pb      | 5,06     | 1,87     | 36,77  | Sm      | 1,41     | 2,25     | 13,75  |
| Mg                | 2,22     | 2,26     | 1,57   | Mo      | 2,91     | 11,33    | 131,46 | Eu      | 1,13     | 2,00     | 7,84   |
| Ca                | 0,29     | 0,29     | 1,13   | As      | 51,87    | 57,51    | 16,25  | Gd      | 1,36     | 2,27     | 11,27  |
| Na                | 1,18     | 1,02     | 2,82   | W       | 4,26     | 6,90     | 6,64   | Tb      | 1,23     | 1,61     | 10,55  |
| K                 | 4,91     | 4,53     | 1,96   | Cr      | 2,25     | 3,35     | 12,88  | Dy      | 0,91     | 1,41     | 9,93   |
| P                 | 0,12     | 0,11     | 0,05   | V       | 14,35    | 27,38    | 11,35  | Ho      | 0,89     | 1,36     | 10,40  |
| Mn/Fe             | 0,01     | 0,05     | 4,56   | Ba      | 38,13    | 63,61    | 465,64 | Er      | 1,00     | 1,58     | 10,69  |
| Fe/Si             | 1,34     | 1,46     | 0,70   | Sr      | 112,64   | 103,22   | 287,13 | Tm      | 0,88     | 1,52     | 10,72  |
| Mn/Si             | 0,01     | 0,07     | 3,19   | Li      | 32,56    | 40,00    | 352,74 | Yb      | 1,17     | 1,72     | 11,16  |
| (Mn+Fe)/Ti        | 21443    | 10071    | 1536   | Rb      | 155,60   | 152,65   | 87,45  | Lu      | 1,55     | 2,16     | 11,03  |
| Al/(Al+Mn+Fe)     | 0,0004   | 0,0006   | 0,17   | Y       | 2,99     | 4,04     | 18,65  | ΣРЗЭ    | 6,85     | 11,12    | 75,15  |

Оказалось, что они представляют собой мелкие обломки глинистого вещества (Fe-силикатов) бурого или зеленоватого цвета, сцементированные железомарганцевыми гидроокислами (рис. 2). Подобные отложения выявлены на многих подводных вулканических возвышенностях Японского моря и определены как селадонит (гидротермальный минерал) [1, 6].

Валовый химический состав рудных корок приведен в табл. 1. Согласно данным анализа рудные корки возвышенности Шевалдина (обр. LV68-2-1, LV68-2-2) относятся к железокремнистым (Fe/Si – 1,34 и 1,46, Mn/Si – 0,01 и 0,07 соответственно), а горы Петра Великого (обр. LV64-7) – к кремнисто-железомарганцевым (Fe/Si – 0,70, Mn/Si – 3,19) (рис. 3). В первом случае модули меняются: Mn/Fe – от 0,007 до 0,046, (Mn+Fe)/Ti – от 10071 до 21443 и Al/(Al+Mn+Fe) – от 0,0004 до 0,0007, а во втором – 4,56, 1536 и 0,017 соответственно.

Для гидrogenных железомарганцевых образований значения титанового модуля находятся в пределах от 25 до 60, а в гидротермальных – выше 100 [4]. Значения алюминиевого модуля менее 0,4 указывает на содержание в осадке эксгалитивной компоненты [13].

Содержание микроэлементов во всех образцах незначительно. Сумма Ni, Co, Cu для образца с горы Петра Великого равна 200 г/т, причем наибольшее содержание отмечается для Ni (169 г/т). Для образцов с возвышенности Шевалдина сумма этих элементов примерно в два раза ниже и изменяется от 90 до 119 г/т. Кроме никеля в корках горы Петра Великого фиксируется значительно более высокое

содержание цинка, молибдена, бария, стронция, лития и РЗЭ по сравнению с корками с возвышенности Шеваддина (табл. 1).

При нанесении данных на классическую треугольную диаграмму Fe–Mn–(Ni+Co+Cu)·10, разделяющую железомарганцевые образования на гидротермальные и гидротермальные, выявляется, что они размещаются в основании диаграммы (рис. 3, а), что, согласно Е. Бонатти с соавторами [12], характеризует существенно гидротермальный источник вещества, участвовавшего в железомарганцевом рудообразовании на подводных возвышенностях Центральной котловины Японского моря.

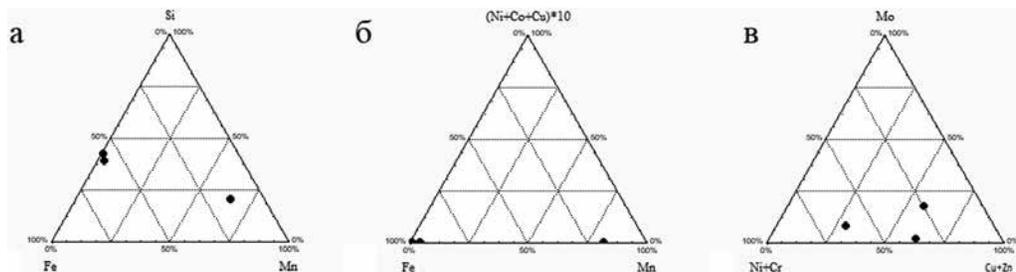


Рис. 3. Состав образцов рудных корок с возвышенности Шеваддина и горы Петра Великого на тройной диаграмме: а – Fe–Mn–Si, б – Fe–Mn–(Co+Cu+Ni) · 10, в – Cu+Zn–Mo–Ni+Cr

Для выяснения возможных источников металлов в гидротермальных железомарганцевых корках Идзу-Бонинской дуги Дж. Хейн с соавторами [14] предложили использовать тройную диаграмму Cu+Zn–Mo–Ni+Cr (рис. 3, в).

Вулканические постройки Центральной котловины сформированы в основном базальтами окраинно-морского типа, для которых, как и для ультраосновных пород Идзу-Бонинской дуги, характерны высокие содержания хрома, никеля, кобальта [3]. Следовательно, тройная диаграмма, разработанная Дж. Хейном с соавторами, применима для рудных корок Японского моря. На этой диаграмме (рис. 3, в) полученные данные занимают положение, указывающее на то, что основным источником металлов могли служить сульфиды, отложившиеся из гидротермальных растворов на более низких горизонтах в вулканических породах [14].

Распределение РЗЭ (рис. 4), нормализованных на хондрит, сравнимо с распределением их в базальтах Японского моря [5]. Вероятнее всего, источником этих элементов также являются подстилающие базальты.

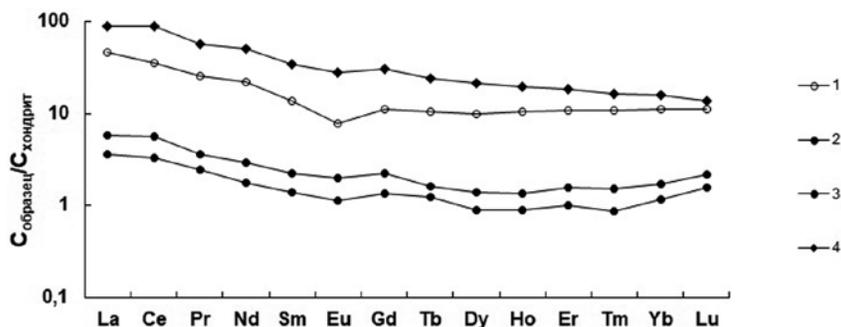


Рис. 4. Распределение хондрит-нормализованных РЗЭ в образцах рудных корок с подводных возвышенностей (1–3) и в базальтах Японского моря (4). Станции: 1 – LV64-7-1; 2 – LV68-2-1; 3 – LV68-2-2; 4 – базальты горы Петра Великого (данные по содержанию РЗЭ в базальтах взяты из работы [5])

Изучение химического состава отдельных минеральных агрегатов показало, что наибольшие содержания Mn (23,84 и 39,36 %) и Fe (2,15 и 22,02 %) отмечаются в цементе от темно-серого до черного цвета в образцах с возвышенности Шевалдина (табл. 2, рис. 2, а, б).

Таблица 2

**Результаты точечного анализа образцов рудных корок с возвышенности Шевалдина и горы Петра Великого (Fe – К, в %, Ni – Rb, в г/т)**

| Элемент | Возвышенность Шевалдина |        |        |        | Гора Петра Великого |
|---------|-------------------------|--------|--------|--------|---------------------|
|         | 1                       | 2      | 3      | 4      | 5                   |
| Fe      | 22,02                   | 30,22  | 2,15   | 19,75  | 18,68               |
| Mn      | 23,84                   | 9,47   | 39,36  | 12,61  | 6,04                |
| Si      | 5,07                    | 8,59   | 3,68   | 11,72  | 18,03               |
| Ti      | 0,19                    | 0,10   | 0,12   | н.о.   | 0,12                |
| Al      | 0,24                    | 1,32   | 0,97   | 0,49   | 0,20                |
| Mg      | н.о.                    | 2,39   | н.о.   | 1,94   | 1,65                |
| Ca      | 0,21                    | 0,20   | 0,50   | 0,31   | 0,99                |
| K       | 0,99                    | 1,09   | 0,90   | 1,90   | 1,97                |
| Ni      | 51,93                   | н.о.   | 283,38 | 185,12 | 110,89              |
| Zn      | 46,88                   | 103,01 | 108,97 | 87,01  | 425,88              |
| Pb      | 103,23                  | 226,32 | 218,42 | 81,58  | 47,90               |
| Mo      | 158,00                  | 64,31  | 328,23 | 115,05 | 46,79               |
| W       | 237,75                  | 86,07  | 144,82 | н.о.   | 59,28               |
| V       | 1255,78                 | 328,56 | 851,94 | н.о.   | 141,34              |
| Sr      | 504,63                  | 205,53 | 401,41 | 101,88 | 154,46              |
| Rb      | 37,08                   | 60,74  | 18,53  | 91,80  | 98,97               |

Примечание. Цифрами 1–5 обозначены области попадания рентгеновского луча в образцах рудных корок, фотографии которых приведены на рис. 2; н.о. – элемент не обнаружен.

Темно-коричневый обломок с прожилками марганца (табл. 2, рис. 2, а) имеет высокое содержание Fe (30,22 %) при относительно невысоких Mn и Si (9,47 и 8,59 % соответственно). В зернах зеленого цвета в образцах с горы Петра Великого и возвышенности Шевалдина содержание Fe варьирует от 18,7 до 19,8 %, Mn – от 6,04 до 12,61 %, содержание Si составляет 18,0 и 11,7 % соответственно (табл. 2, рис. 2, в, з). Следует заметить, что область точечного анализа превышает размер зерен, и поэтому захватывается окружающая матрица. В данном случае содержание марганца может быть завышено.

### Заключение

Рудные корки, поднятые при драгировании с возвышенности Шевалдина и горы Петра Великого, сформировались в результате цементации железомарганцевыми гидроокислами мелких кусочков глинистых минералов железокремнистого состава. Они образовались в позднем кайнозое, о чем свидетельствуют поднятые одновременно с ними отложения позднемiocен-плейстоценового возраста (гора Петра Великого). Значения геохимических модулей (титанового и алюминиевого) указывают на значительное содержание в рудных отложениях эксгалитивной компоненты. Расположение фигуративных точек валового химического состава в основании треугольной диаграммы Е. Бонатти также подтверждает их гидротермальное происхождение.

Источником рудного вещества являлись поствулканические гидротермальные растворы, циркулировавшие по трещинам в вулканических породах. Первичными были образования Fe-силикатов. Так как вулканизм на этих возвышенностях Японского моря имел длительный и пульсирующий характер, то состав и температура поствулканических гидротермальных растворов менялась во времени. Последующие поступления более

низкотемпературных марганцевых растворов по трещинам или ослабленным зонам в вулканических породах привели к цементации обломков Fe-силикатов гидроксидами марганца.

Автор выражает искреннюю благодарность к.г.-м.н. Н.В. Астаховой (ТОИ ДВО РАН) за обсуждение рукописи и рекомендации по ее улучшению.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Астахова Н.В. Железомарганцевые корки центральной котловины Японского моря // Литология и полезные ископаемые. 2018. № 5. С. 384–396.
3. Берсенева И.И., Леликов Е.П., Безверхний В.Л. и др. Геология дна Японского моря. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1987. 140 с.
4. Волохин Ю.Г., Мельников М.Е., Школьник Э.Л. и др. Гайоты западной Пацифики и их рудоносность. М.: Наука, 1995. 368 с.
5. Карнаух В.Н., Цой И.Б., Леликов Е.П., Емельянова Т.А., Ващенко Н.Г., Терехов Е.П. Геологическое строение подводной горы Петра Великого (Японское море) // Вестн. ДВО РАН. 2013. № 6. С. 189–198.
6. Липкина М.И., Дриц В.А., Цикурский С.И. и др. Высокожелезистые диактаэдрические слоистые силикаты из гидротермальных пород и осадков вулканических построек Японского моря // Изв. АН СССР. Серия геол. 1987. № 10. С. 92–111.
7. Отчет о результатах экспедиционных исследований в рейсе № 30/31 НИС «Профессор Богоров», Японское море (сентябрь 1989 г.). Владивосток: ТОИ ДВО РАН, 1990. 48 с.
8. Отчет о результатах экспедиционных исследований в рейсе № 64 НИС «Академик М.А. Лаврентьев», Японское море (19 октября – 1 ноября 2013 г.). Владивосток: ТОИ ДВО РАН, 2014. 151 с.
9. Отчет о результатах экспедиционных исследований в рейсе № 68 НИС «Академик М.А. Лаврентьев», Японское море (17–31 октября 2014 г.). Владивосток: ТОИ ДВО РАН, 2015. 57 с.
10. Пущин И.К., Аннин В.К., Берсенева Ю.И. и др. Новые данные о геологическом строении дна северо-западной части Японского моря (по материалам 21-го рейса НИС «Первенец») // Геологические исследования в окраинных морях северо-западной части Тихого океана. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1977. С. 3–13.
11. Скорнякова Н.С., Батулин Г.Н., Гурвич Е.Г., Успенская Т.Ю., Краснов С.Г., Гнидаш М.И. Железомарганцевые корки и конкреции Японского моря // Докл. АН СССР. 1987. Т. 293, № 2. С. 430–434.
12. Bonatti E., Honnorez J., Joensuu O., Rydell H. Classification and genesis of submarine iron manganese deposits // Ferromanganese Deposits on the Ocean Floor / ed. D.R. Horn. Washington, DC: Nat. Sci. Foundation, 1972. P. 149–166.
13. Bostrom K. The origin and fate of ferromanganese active ridge sediments // Stockholm Contrib. Geol. 1973. Vol. 27, N 2. P. 148–243.
14. Hein J.R., Schulz M.S., Dunham R.E. et al. Diffuse flow hydrothermal manganese mineralization along the active Mariana and southern Izu-Bonin arc system, western Pacific // J. Geophys. Res. 2008. Vol. 113. B08S14. – DOI: 10.1029/2007JB005432.