

# Геологическая характеристика, потенциал и генезис образования железомарганцевых руд на дне юго-западной части Южно-Китайского моря

## Ч. 2. Результаты исследований образцов руд дна Южно-Китайского моря

Ю.В. Кириченко<sup>1</sup>, Нго Чан Тхиен Кюи<sup>1,2</sup>✉, Фам Ба Чунг<sup>3</sup>, Нгуен Тхи Тхам<sup>4</sup>, Доан Тхи Туи<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup> Вьетнамский национальный университет Хошимина, г. Хошимин, Вьетнам

<sup>3</sup> Институт океанографии Вьетнамской академии наук и технологий, г. Нячанг, Вьетнам

<sup>4</sup> Вьетнамский институт нефти, г. Ханой, Вьетнам

✉ nttquy@hcmus.edu.vn

**Резюме:** В первой части статьи (<https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-1-104-109>) были приведены общие сведения о геологии морских месторождений Вьетнама, способах их разведки и проведенных научно-исследовательских экспедициях. В этой части статьи рассматриваются результаты исследований образцов, отобранных со дна Южно-Китайского моря. Дается краткое описание проведенных Вьетнамским океанографическим институтом и Вьетнамским институтом геологии и минералов методов исследований. Приведены результаты исследований петрографических шлифов образцов, вследствие чего были выделены три разновидности железомарганцевых руд. Геохимический состав определялся с помощью рентгеновской флуоресцентной спектроскопии (XRF-РФА) по 38 элементам. Для обнаружения редкоземельных элементов проводилась масс-спектрометрия индуктивно-связанной плазмы (ICP-MS), которая показала среднее содержание 364.34 г/т. Генетический анализ происхождения конкреций и корок проводился по диаграммам Бонатти и Бау, скорость роста руд определялась методом Со-флюкс (Co-flux). В статье отмечается высокая скорость роста руд (до 14 мм/млн лет). Полученные результаты позволяют сделать вывод о перспективности Южно-Китайского моря и в частности Вьетнамской его части в плане рудоносности и необходимости продолжения и расширения геологоразведочных работ в этом регионе.

**Ключевые слова:** Южно-Китайское море, отбор образцов, петрографические шлифы, конкреции, корки, рентгеновская флуоресцентная спектроскопия, спектрометрия индуктивно-связанной плазмы, содержание компонентов, железо, марганец, редкоземельные элементы, генезис, гидрогенетическое происхождение, диагенетическое происхождение, гидротермальное происхождение, возраст, скорость роста, перспективы изысканий

**Для цитирования:** Кириченко Ю.В., Нго Чан Тхиен Кюи, Фам Ба Чунг, Нгуен Тхи Тхам, Доан Тхи Туи. Геологическая характеристика, потенциал и генезис образования железомарганцевых руд на дне юго-западной части Южно-Китайского моря. Ч. 2. Результаты исследований образцов руд дна Южно-Китайского моря. *Горная промышленность*. 2022;(2):67–75. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-2-67-75>

# Geological Characteristics, Potential and Genesis of Iron-Manganese Ore Formation at the Bottom of the Southwestern Part of the South China Sea

## Part 2. Results of studying ore samples from the bottom of the South China Sea

Yu.V. Kirichenko<sup>1</sup>, Ngo Tran Thien Quy<sup>1,2</sup>✉, Pham Ba Trung<sup>3</sup>, Nguyen Thi Tham<sup>4</sup>, Doan Thi Thuy<sup>4</sup>

<sup>1</sup> National University of Science & Technology (MISIS), Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup> Vietnam National University Ho Chi Minh City, University of Science, Ho Chi Minh, Vietnam

<sup>3</sup> Institute of Oceanography, Vietnam Academy of Science and Technology, Nha Trang, Vietnam

<sup>4</sup> Vietnam Petroleum Institute, Hanoi, Vietnam

✉ nttquy@hcmus.edu.vn

**Abstract:** The aim of this article is to analyze the role of industrial policy in promoting technological modernization and economic upgrading in two mining countries, i.e. Brazil and South Africa. It analyzes the mining complex of these countries, in which they have achieved certain advantages in international markets. The main results show the significant difficulties that industrial policy faces in creating mechanisms to overcome economic and technological lags. Transition towards a higher added value and

more sophisticated and diversified economic activity forms the basis of a sustainable and healthy economy, allowing companies and industries to fully implement their potential, involves investment in a wide range of production facilities and institutional structures.

**Keywords:** South China Sea, sampling, petrographic thin sections, nodules, crusts, X-ray fluorescence spectroscopy, inductively coupled plasma mass spectrometry, content of components, iron, manganese, rare earth elements, genesis, hydrogenetic origin, diagenetic origin, hydrothermal origin, age, growth rate, exploration prospects

**For citation:** Kirichenko Yu.V., Ngo Tran Thien Quy, Pham Ba Trung, Nguyen Thi Tham, Doan Thi Thuy. Geological Characteristics, Potential and Genesis of Iron-Manganese Ore Formation at the Bottom of the Southwestern Part of the South China Sea. Part 2. Results of studying ore samples from the bottom of the South China Sea. *Russian Mining Industry*. 2022;(2):67–75. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-2-67-75>

**1. Введение. Анализ проб**

В 1995 г. предварительный анализ 4 проб, собранных во время исследовательского рейса корабля «Атланта» (L'ATALANTE, май 1993 г.), проведенный Вьетнамским Океанографическим Институтом, показал, что они относятся к корковому типу и имеют основной состав Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 18,03–27,53%, MnO 3,29–13,39%, другие элементные компоненты не анализировались [1–3].

В данном исследовании было проанализировано 18 проб (по всем аналитическим параметрам), большинство проб было отобрано драгами-волокушами на различной глубине, в диапазоне от –130 м до –1300 м на поверхности подводных гор, расположенных в юго-западном суббассейне центра Южно-Китайского моря. Место отбора проб располагалось в диапазоне долготы от 109°53'24" до 111°59'01" и широты от 8°13'54" до 10°11'30"; 2 образца были отобраны в морском районе провинции Биньдинь (VN16, VN18) и 1 образец – на острове Ту Чинь (VN-3).

Образцы были отобраны и проанализированы многи-

ми методами, такими как петрографический шлиф, XRF, ICP-MS. Петрографические шлифы были приготовлены для определения породообразующих компонентов, микробиологии и некоторых специфических характеристик процесса образования руды. Рентгеновская флуоресцентная спектроскопия (XRF) – это качественный и полуколичественный аналитический метод для определения присутствия основных элементов и некоторых редкоземельных элементов в образце.

Масс-спектрометрия индуктивно-связанной плазмы (ICP-MS) использовалась для количественного определения состава элементов в образце (металлических и редкоземельных элементов) с точностью до миллионных долей (ppm).

**2. Основные полученные результаты**

Для анализа были отобраны пробы, некоторые основные характеристики которых приведены в табл. 1.

**Таблица 1**  
Список образцов и описание основных характеристик

**Table 1**  
List of samples and description of the main properties

Название образца	Классификационная принадлежность	Некоторые характеристики	Место отбора	Год отбора проб
VN1	Железомарганцевая руда (тип корки)	Железомарганцевая руда (тип корки). Размер образца 7 x 4 x 3 см, корковый, цвет коричневый, местами темно-коричневый, изрезанный, рудные пласты в нём разного цвета и толщиной 1–3 мм	Юго-запад бассейна Южно-Китайского моря	L'Atalante, 1993
VN2	Железомарганцевая руда (тип корки) Корка растет на карбонатном субстрате	Железомарганцевая руда (тип корки). Размер 4,5 x 3,5 см, темно-коричневый, высокая пористость, местами коралловая структура; кроме того, есть остатки других организмов	Юго-запад бассейна Южно-Китайского моря	L'Atalante, 1993
VN7	Железомарганцевая руда (тип корки)	Корка, размер 30 x 11 см, темно-коричневая, шероховатая поверхность. Плотная с отдельными пустотами размером 0,2–6 см, на поверхности растет много организмов	Отмели у берегов Вунгтау	Судно «Академик Опарин», 2007
VN9	Туф с содержанием железомарганцевой руды	Конкреция, размер 6 x 4 см, темно-коричневого цвета, шероховатая поверхность, со множеством следов мелких (<2 мм) организмов	К юго-востоку от острова Фукуи	Судно «Академик Опарин», 2010
VN11	Железомарганцевая руда	Размер 5 x 4,5 см, темно-коричневый цвет с черным, шероховатая поверхность коркового типа	К юго-востоку от острова Фукуи	Судно «Академик Опарин», 2010
VN12	Железомарганцевая руда	Корка, размером 16 x 8,5 см. Цвет от темно-коричневого до черного, гладкая, малопустотная и шероховатая выпуклая поверхность, на которой прорастают организмы в виде полипов	К юго-востоку от острова Фукуи	Судно «Академик Опарин», 2010
VN13	Железомарганцевая руда. Корка растет на карбонатном субстрате	Корка, размер 14 x 6 см, цвет темно-коричневый, поверхность шероховатая, слабопористая, вокруг остатков организмов нарастает руда	К юго-востоку от острова Фукуи	Судно «Академик Опарин», 2010

VN14	Железомарганцевая руда содержит глину	Корка, размер 22 x 20 x 4,5 см, темно-коричневая, поверхность шероховатая, четко слоистая, на поверхности видны развивающиеся организмы	К юго-востоку от острова Фукуи	Судно «Академик Опарин», 2010
VN 17	Железомарганцевая руда	Железомарганцевая руда коркового типа, размером 23 x 18 см, темно-коричневого цвета, с шероховатой поверхностью и небольшими порами. Растут кораллы	Юго-запад бассейна Южно-Китайского моря	Судно «Академик Опарин», 2018
VN18	Железомарганцевая руда	Железомарганцевая руда, размером 32 x 16 x 14 см, от коричневого до черно-коричневого цвета, тяжелая, иногда с металлическим блеском, шероховатая поверхность, видны песчаные зерна	Де Ги – Провинция Биньдинь	Морское исследовательское судно «Bien Dong»



VN-1  
Железомарганцевая руда коркового типа

VN-1  
Iron-manganese ore of the crust type



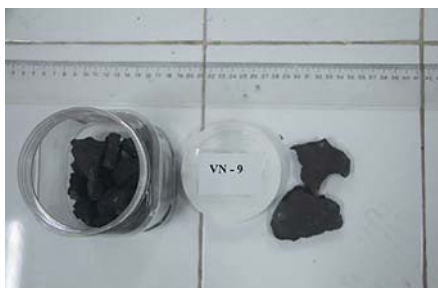
VN-2  
Железомарганцевая руда коркового типа

VN-2  
Iron-manganese ore of the crust type



VN-7  
Железомарганцевая руда (тип корки)

VN-7  
Iron-manganese ore (the crust type)



VN-9  
Железомарганцевая руда (тип конкреций)

VN-9  
Iron-manganese ore (the nodule type)



VN-12  
Железомарганцевая руда коркового типа

VN-12  
Iron-manganese ore of the crust type



VN13  
Железомарганцевая руда коркового типа

VN13  
Iron-manganese ore of the crust type



VN-14  
Железомарганцевая руда коркового типа

VN-14  
Iron-manganese ore of the crust type



VN-17  
Железомарганцевая руда коркового типа

VN-17  
Iron-manganese ore of the crust type



VN-18  
Железомарганцевая руда

VN-18  
Iron-manganese ore

Рис. 1  
Фотографии исследуемых образцов руды

Fig. 1  
Photographs of the studied ore samples

**2.1. Особенности петрографического состава и строения**

Петрографический анализ проводился на поляризационном микроскопе Carl Zeiss Axioskop 40 для 7 проб, содержащих руду, отобранных из проб VN-9, VN-10, VN-11, VN-13, VN-14, VN-15, VN-18. Результаты петрографического анализа показывают, что их можно разделить на группы руд, развитые на базальтах (5 проб: VN-10, VN-11, VN-14, VN-15, VN-18), туфы (проба VN-9) и рудные группы, развитые на известняках (проба VN-13).

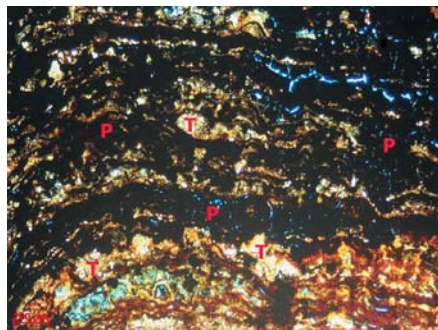
Под микроскопом видно, что объем в образцах рудообразующих минералов составляет от 45 до 90%, иногда образец содержит небольшие обломки (фрагменты) кварца, кальцит и биологические остатки (рис. 2). При просмотре руды в поляризационный микроскоп на 1 никон руда красновато-коричневая, на 2 перпендикулярных никонах руда темно-коричневая. Большинство из них не имеют четкой формы, сгруппированы вместе, некоторые из них круглые, эллиптические.

Оценивая в общем результаты анализа шлифов образцов под микроскопом, можно отметить, что исследованные руды представляют собой следующие разновидности:

1. Микроконкреции, представляющие собой и сосредоточенные включения. В известняках руды распределены неоднородно, сосредоточены в скоплениях, без определенной формы, развивающиеся в микропорах породы (образец VN-13). Такая же форма руды встречается в туфах (VN-9).

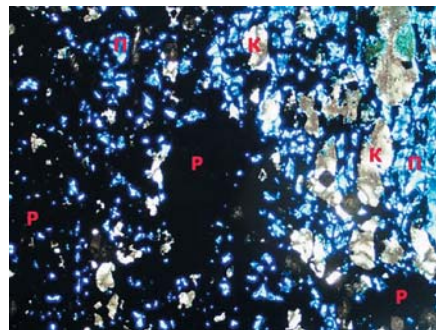
2. Слоистое строение имеет в основном концентрическую структуру (образец VN-14), руда относительно однородно распределена, и совместно с рудами представлены организмы, глинистый материал и небольшое количество незаполненных пор.

3. Развитые сети-цепочки (образцы VN-10, VN-13, VN-15). Руда образовалась на карбонатной породе-основе с остатками многих различных организмов. Руды развивались по механизму заполнения и замещения в материнских породах, таких как вулканические породы и их производные, в том числе туфы.



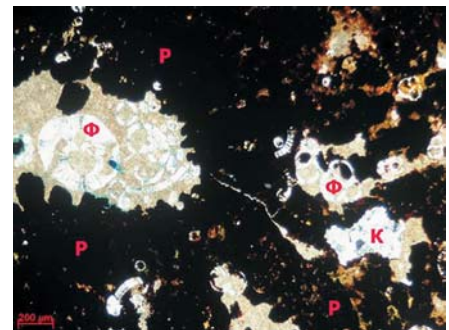
— 200 мкм (микрометров)

VN-9  
Руда растет в туфах (1N-, 5X)



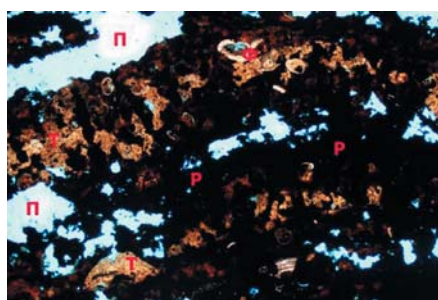
— 500 мкм (микрометров)

VN-10  
Руда развивается в виде сети, небольшого количества обломков и микропор (1N-, 2.5X)



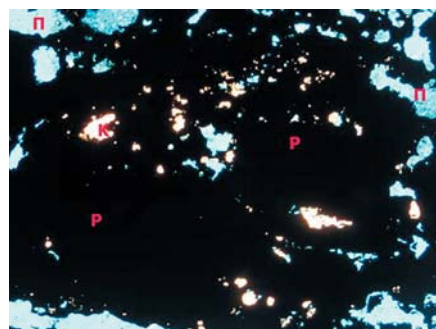
— 200 мкм (микрометров)

VN-13  
Руды растут вокруг организмов (1N-, 5X)



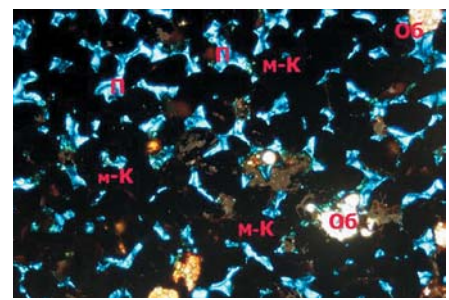
— 500 мкм (микрометров)

VN-14  
Руды произрастают в туфово-известковых породах, в которых мало организмов (1N-, 2.5X)



— 500 мкм (микрометров)

VN-15  
Руды сетчатого типа (1N-, 2.5X)



— 200 мкм (микрометров)

VN-18  
Микро-конкреция руды (1N-, 5X)

**Рис. 2**  
Фотографии некоторых образцов руды, наблюдаемых под поляризационным микроскопом  
Г: Глина, К: Карбонат, м-К: Микро-конкреции, Об: Обломочная порода, П: Поры, Р: Руда, Ф: Фораминиферы, Т: Туф

**Fig. 2**  
Photographs of some ore samples as observed under a polarizing microscope  
Г: Clay, К: Carbonate, м-К: Micro-concretions, Об: Clastic rock, П: Pores, Р: Ore, Ф: Foraminifera, Т: Tuff

**2.2. Геохимический состав**

Масс-спектрометрия флуоресцентная спектроскопия (XRF - РФА) была выполнена для 7 образцов (номера VN-1, VN-2, VN-7, VN-12, VN-13, VN-14, VN-15). Аналитические результаты по 38 элементам представлены в табл. 2.

Результаты геохимического анализа показали, что соотношение полезных компонентов Mn / Fe в образцах варьирует от 0,066 до 0,955 (все < 1). Содержание некоторых основных элементов, таких как Fe (%) = 7,63–14,8; Mn (%) = 1,34–20,9; Al (%) = 0,764–5,344; Si (%) = 1,63–13,9; Co (ppm) = 0–1820; Ni (ppm) = 572–2290; Cu (ppm) = 103–523; Mo (ppm) = 36–571; Zn (частей на миллион) = 0–1050.

Спектрометрия индуктивно-связанной плазмы (ICP-MS) для определения редкоземельных элементов в образце

проводилась на анализаторе Agilent ICP-MS 7700X во Вьетнамском институте геологии и минералов. Результаты анализа представлены в табл. 3.

Суммарное содержание редких элементов ΣРЗЭ = 162,35–781,62 г/т, в среднем 364,34 г/т. Все образцы, проанализированные с помощью ИСП-МС, относятся к участкам земной коры, расположенным на склонах и вершинах подводных гор, на континентальных склонах или в юго-западной части центрального бассейна Южно-Китайского моря.

Средняя концентрация редких элементов ΣРЗЭ в образцах из других регионов Южно-Китайского моря, таких как северо-восток Южно-Китайского моря (7 проб, 3 местоположения), 178 ppm, северо-запад Южно-Китайского моря (7 образцов, 2 местоположения) – 1218,81 ppm, Централь-

**Таблица 2**  
Анализ результатов геохимического состава методом РФА для проб руды из юго-западной части Южно-Китайского моря (Вьетнамская исключительная экономическая зона)

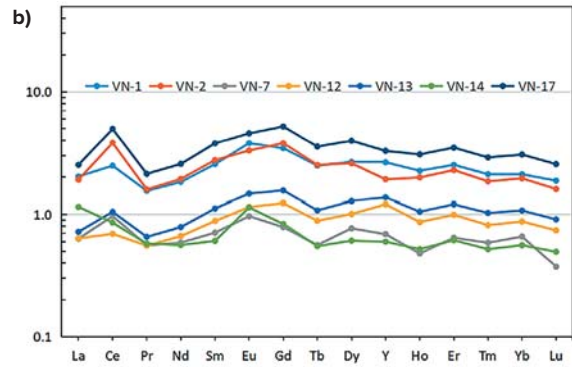
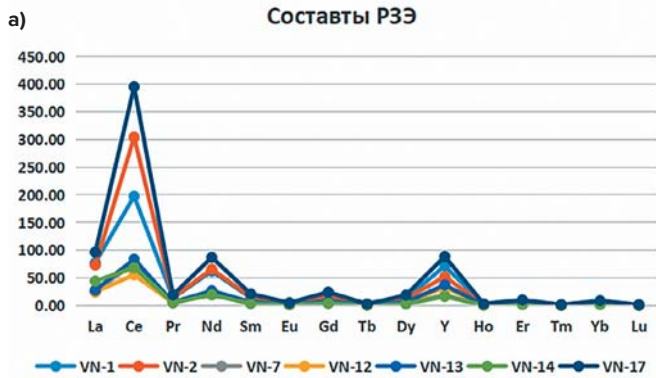
**Table 2**  
Results of X-ray fluorescence analysis of geochemical composition for ore samples from the southwestern part of the South China Sea (Vietnam Exclusive Economic Zone)

№ пп	%	VN-1	VN-2	VN-7	VN-12	VN-13	VN-14	VN-17
1	Fe	14,8	24,4	21	13	12,8	21,5	7,63
2	Mn	7,08	20,5	20,9	2,87	10,5	1,5	6,21
3	Co	0,0685	0,182	0,083	0,0023	–	0,002	–
4	Ni	0,136	0,48	0,229	0,0814	0,185	0,007	0,169
5	Al	5,34	1,36	0,764	1,98	1,49	1	1,15
6	Si	13,9	9,82	1,63	5,63	3,31	3,9	3,77
7	Mg	1,23	1,06	2,3	1,73	1,82	2	0,99
8	Ca	7,75	6,19	19,9	24,5	24,6	25	15,9
9	Ba	0,178	0,167	0,33	–	0,153	0,02	0,139
10	Ti	1,51	0,44	2,73	0,189	0,123	0,2	0,299
11	V	0,0512	0,096	–	0,0392	0,0441	0,015	0,0799
12	Cr	0,0233	–	0,0206	0,0095	–	0,01	–
13	Mo	0,013	0,0571	0,0272	0,0036	0,0167	0,0005	0,0489
14	Sn	–	–	–	–	–	0,002	–
15	As	–	–	0,0539	–	0,0473	–	–
16	Bi	–	–	–	–	–	–	0,299
17	Cu	0,0334	0,0523	0,03	0,0103	0,0235	0,01	0,0163
18	Ag	–	–	–	–	–	0,00002	–
19	Pb	0,135	0,535	–	0,0298	0,0479	0,005	0,226
20	Zn	0,0511	0,105	0,0766	0,0382	0,0807	0,003	–
21	Ga	–	–	–	–	–	0,0002	–
22	Tl	–	0,0184	–	–	–	–	–
24	Nb	0,0072	0,0045	–	–	–	–	–
25	Zr	0,0264	0,0499	0,0906	0,0021	–	0,01	–
27	Th	–	0,0222	–	–	–	–	–
28	P	0,919	1,1	1,66	3,09	3,4	5,4	1,75
29	Na	1,6	1,11	0,502	0,41	0,49	0,5	0,48
30	Ce	0,0918	0,371	–	–	–	–	0,15
31	La	–	0,0499	–	–	–	–	–
32	Y	0,0149	0,0244	–	–	–	0,002	–
33	Yb	–	–	–	–	–	0,0002	–
34	Sc	–	–	–	–	–	–	–
35	K	1,94	0,491	0,385	1,12	0,734	–	0,545
36	Cl	0,846	1,28	0,445	0,273	0,328	–	0,15
37	S	0,0598	0,233	0,164	0,184	0,224	–	0,641
38	Sr	0,124	0,194	0,194	0,122	0,172	–	0,0874
39	Rb	–	–	–	0,0051	–	–	–
40	Br	–	–	–	–	0,0075	–	–

**Таблица 3**  
Данные о составе редкоземельных элементов (РЗЭ)

**Table 3**  
Data on the rare-earth element (REE) composition

Название образца	Содержание (ppm)							
	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb
<b>Элементы</b>								
<b>VN-1</b>	77.40	197.57	13.65	61.98	14.18	4.09	16.09	1.93
<b>VN-2</b>	72.94	304.36	14.02	65.52	15.30	3.57	17.67	1.95
<b>VN-7</b>	24.26	77.22	4.95	20.00	3.94	1.05	3.68	0.44
<b>VN-12</b>	24.38	55.41	4.92	22.57	4.91	1.24	5.74	0.69
<b>VN-13</b>	27.60	83.73	5.80	26.74	6.21	1.59	7.27	0.83
<b>VN-14</b>	43.97	68.31	5.11	19.13	3.38	1.23	3.90	0.43
<b>VN-17</b>	96.43	395.57	18.80	86.96	21.00	4.93	24.19	2.75
<b>Элементы</b>								
<b>VN-1</b>	12.46	2.24	7.19	0.86	5.95	0.81	71.40	16.27
<b>VN-2</b>	12.15	1.97	6.51	0.75	5.51	0.69	51.88	6.26
<b>VN-7</b>	3.61	0.48	1.84	0.24	1.86	0.16	18.64	1.53
<b>VN-12</b>	4.72	0.86	2.83	0.33	2.47	0.32	32.60	5.25
<b>VN-13</b>	6.00	1.04	3.44	0.42	3.03	0.39	36.99	5.17
<b>VN-14</b>	2.86	0.52	1.76	0.21	1.58	0.21	16.21	3.32
<b>VN-17</b>	18.56	3.04	9.93	1.17	8.62	1.11	88.56	8.08



**Рис. 3**  
а) РЗЭ состав проб.  
б) Составы РЗЭ, нормализованные на РЗЭ в Постархейский австралийский сланец

**Fig. 3**  
а) REE composition in the samples.  
б) REE composition normalized to REE in the Postarchean Australian shale

ный бассейн Южно-Китайского моря – 697.30 ppm (1 проба) [4; 5]. Образец, полученный в центре Южно-Китайского моря, J-158, содержит 697,30 ppm на поверхности базальта, общий состав которого близок к значению самых высоких образцов во Вьетнаме (рис. 3).

гидротермальное, иногда смешанное. Для определения генезиса руд использовалась диаграмма Бонатти (1972) трех компонентов Fe-Mn- (Co + Cu + Ni) \*10 [4–6].

**3. Генетический механизм происхождения железомарганцевых конкреций и корок**

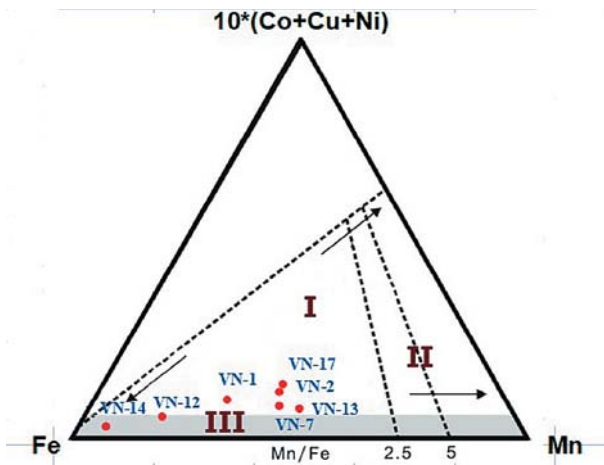
Диаграмма Бонатти свидетельствует, что большинство образцов образовалось в гидрогенетических условиях, только образец VN-14 был сформирован в гидротермальных условиях, а VN-12 представляет собой комбинацию гидрогенетических и гидротермальных условий; образцов диагенетического типа нет (рис. 4).

Происхождение морских и океанических Fe-Mn руд бывает трех типов: гидрогенетическое, диагенетическое и

**Таблица 4**  
Данные о составе редкоземельных элементов (РЗЭ)

**Table 4**  
Data on the rare-earth element (REE) composition

Название образца	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Mn/Fe	Cu+Co+Ni)*10	ΣРЗЭ	Скорость роста, мм/млн лет
<b>VN-1</b>	7.08	14.8	0.0685	0.136	0.0334	0.4784	2.379	504.06	3.91
<b>VN-2</b>	20.5	24.4	0.182	0.48	0.0523	0.8402	7.143	581.05	10.49
<b>VN-7</b>	20.9	21	0.083	0.229	0.03	0.9952	3.42	163.88	14.42
<b>VN-12</b>	2.87	13	0.0023	0.0814	0.0103	0.2208	0.94	169.23	1.42
<b>VN-13</b>	10.5	12.8	0	0.185	0.0235	0.8203	2.085	216.25	10.04
<b>VN-14</b>	1.5	21.5	0.002	0.0572	0.0124	0.0663	0.696	172.12	0.81
<b>VN-17</b>	6.21	7.63	0	0.169	0.0163	0.8139	1.853	789.71	9.89



I: гидрогенетический механизм  
II: диагенетический механизм  
III: гидротермальный механизм  
→ скорость роста

I: hydrogenetic mechanism  
II: diagenetic mechanism  
III: hydrothermal mechanism  
→ growth rate

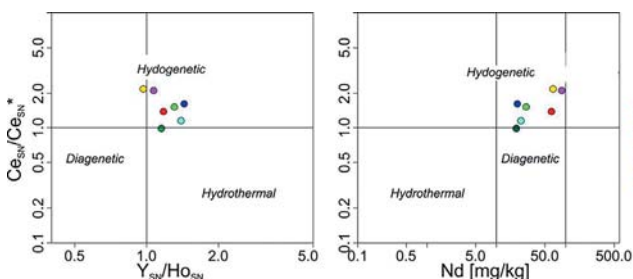
**Рис. 4**  
Схема классификации генетического происхождения согласно Бонатти (1972)

**Fig. 4**  
Genetic origin classification diagram after Bonatti (1972)

Однако этот подход не позволяет четко разграничить гидротермальные и диагенетические условия осаждения, поэтому М. Бау (M. Bau) (2014) создал классификационную диаграмму, основанную на соотношениях редких элементов  $Ce_{SN} / Ce_{SN}^* - Nd$  и  $Ce_{SN} / Ce_{SN}^* - Y_{SN} / Ho_{SN}$ , ( $SN$ : нормализация с помощью постаршейских австралийских сланцев, сокращенно – PAAS) (McLennan, 1989) [4–7]. На практике исследователи используют эти графики одновременно.

Классификационная карта М. Бау (2014) показывает, что в большинстве образцов руда формируется по гидрогенетическому механизму, только VN-14 относится к смешанному типу, а VN-12 находится вблизи границы (рис. 5). Результаты этих двух классификаций примерно одинаковы, что указывает на их надежность.

$$Ce_{SN} = Ce / Ce_{PAAS}; Ce_{SN}^* = 0,5x(La_{SN} + Pr_{SN}) [7]$$



**Рис. 5**  
Схема классификации генетического происхождения согласно М. Бау (2014)

**Fig. 5**  
Genetic origin classification diagram after M. Bau (2014)

### 3.1. Возраст и скорость роста руды

Существует несколько методов определения возраста железомарганцевых отложений на основе возраста и толщины конкреций / корок для расчета скорости роста. Методы изотопного датирования обычно имеют высокую надежность, включая  $^{10}Be/^{9}Be$  (Segl et al. 1984; Somayajulu

2000), U-Th (Reyss et al. 1985),  $^{26}Al$  (Sharma et al. 1987),  $^{87}Sr/^{86}Sr$  (Futa et al. 1988),  $^{187}Os/^{188}Os$  (Klem et al. 2005), K/Ar и  $^{40}Ar/^{39}Ar$  (Ishizuka et al. 1998), из которых наиболее широко применяется метод  $^{10}Be/^{9}Be$ . В некоторых случаях также использовались методы микропалеонтологического датирования (Cowen et al. 1993) и методы определения скорости роста, непосредственно основанные на составе Mn, Fe и Co, такие как Co-флюкс – метод (Manheim & Lane-Bostwock 1988; Puteanus & Halbach 1988), содержание Mn и Fe (Huh and Ku, 1984) [3–6; 8; 9].

Co-флюкс-метод: Скорость роста =  $0.68 / Co_n^{1.67}$ ,

где  $Co_n = Co * 50 / (Fe + Mn)$  Fe, Mn, Co выражено в масс. г [3; 8].

Большинство обследованных образцов относятся к корковому типу, собранному с флангов и вершин подводных гор. Таким образом, возраст базальтовых пород подводных гор можно рассматривать как верхнюю границу образования руд на их поверхности. Базальтовые породы на подводных горах в западной части бассейна Центрально-ЮКМ имеют возраст от среднего миоцена (13,95 млн лет) до раннего плиоцена (3,49 млн лет), а на флангах и континентальном шельфе вод Вьетнама – от 5,5 млн лет до настоящего времени (последнее извержение вулкана на острове Хон Тро произошло в 1923 г.) [10–12].

Скорость роста руды может определяться отношением возраста и толщины рудного слоя и может изменяться на каждой стадии образования руды. Один метод расчета скорости роста руды основан на эмпирическом уравнении Huh and Ku (1984):  $S$  (мм/млн лет) =  $13,8 * (Mn/Fe)^2 + 0,75$ , где содержание Mn и Fe выражено в масс. %. Результаты расчетов показывают, что скорость роста руды на исследуемой территории составляет от 0,81 мм/млн лет до 14,41 мм/млн лет (см. табл. 4). Образцы VN-2 и VN-14 дают очень низкие значения скорости образования, возможно допустимы отдельные различия, которые требуют дальнейшего изучения и объяснения. В первую очередь это потому, что все образцы (VN-12, VN-13, VN-14) взяты очень близко друг от друга, но дают весьма разные значения скорости роста. Результаты определения скорости роста образцов VN-2, VN-7, VN-13 и VN-17 дали более высокие значения, чем океанические корки (1–5 мм/млн лет) [9; 13–19].

Необходимо отметить, что такая высокая скорость роста согласуется с ранее проведенными исследованиями в Северо-Восточном море и центральном районе Южно-Китайского моря. Это можно объяснить влиянием таких факторов, как тропический климат, сильные процессы выветривания и большие реки, несущие значительное количество осадочного материала и впадающие в Южно-Китайское море, создавая богатый источник металлов в морской воде. Совокупность этих факторов способствует быстрому развитию железомарганцевых конкреций и корок несмотря на то, что большие объемы осадочных материалов, таких как песок, ил и глина, хоть и переносятся в море, но большая часть из них откладывается на континентальном шельфе. На поверхности подводных гор и глубоководных равнин (абиссальных) они немногочисленны или полностью отсутствуют, что создает благоприятные условия для образования железомарганцевых руд. Эта уникальная особенность образования руд в окраинных морях и относительно закрытых (таких как Южно-Китайское море), в которых скорость роста руды выше, чем в мировых океанах. Более точное определение границ различной скорости роста конкреций и корок (районирование) возможно после проведения дополнительных исследований морского дна.

## Выводы

1. Результаты исследований первых образцов, отобранных со дна Южно-Китайского моря, показали содержание в них железа и марганца в промышленных кондициях, и они в основном относятся к корковому типу.

2. Исследования образцов, отобранных в более позднее время, проводились по шлифам методами рентгеновской флуоресцентной спектроскопии и спектрометрии индуктивно-связанной плазмы. Установлено наличие в анализируемых пробах до 45–90% рудообразующих минералов.

3. Марганцево-железорудные образования в морской зоне Вьетнама представляют собой микроконкреции (включения), слоистую структуру и развитые сети-цепочки. Среднее содержание некоторых важных элементов, таких как Fe = 16,45%, Mn = 9,94%, Co = 559,67 частей на миллион, Ni = 1910,86 частей на миллион, Cu = 273 частей на миллион. ΣРЗЭ = 162,35–781,62 г / т, в среднем 364,34 г / т.

4. Возраст железомарганцевых руд определялся по возрасту подводных гор в этом районе, возраст базальтов в глубоком море составляет от 13,95 млн лет до 3,49 млн лет, а на континентальном шельфе – от 5,5 млн лет до настоящего времени. Учитывая вышеизложенное, можно констатировать, что скорость роста руды на исследуемой территории составляет от 0,81 мм / млн лет до 14,41 мм / млн лет. Такая высокая скорость роста характерна для окраинных морей.

5. Полученные результаты более чем тридцатилетних исследований дна ЮКМ позволяют сделать вывод о перспективности этого региона в качестве будущего источника железомарганцевого сырья и других твердых полезных ископаемых. Поэтому необходимо расширить масштабность и диапазон поисково-опробовочных работ, в первую очередь во Вьетнамской эксклюзивной зоне.

## Список литературы

1. Do Minh Tiep, Ton Nu My Du. Preliminary study on Fe - Mn nodules in deep sea bottom of South-eastern Vietnam. In: *Scientific conference on "Bien Dong 2000"*. Nhatrang; 2000.
2. Нго Чан Тхиен Кюи, Кириченко Ю.В. Минеральный потенциал подводных месторождений в Южно-Китайском море Вьетнама. *Горная промышленность*. 2020;(1):140–143. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2020-1-140-143>
3. Нго Чан Тхиен Кюи, Кириченко Ю.В., Щёкина М.В. Перспективные и разведываемые месторождения твердых минеральных ресурсов шельфа и глубинных районов Вьетнама. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;(9):103–112. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2021\\_9\\_0\\_103](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_9_0_103)
4. Zhong Y., Chen Z., González F.J., Hein J.R., Zheng X., Li G. et al. Composition and genesis of ferromanganese deposits from the northern South China Sea. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2017;138:110–128. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2017.02.015>
5. Yao Guan, Xiaoming Sun, Yingzhi Ren, Xiaodong Mineralogy, geochemistry and genesis of the polymetallic crusts and nodules from the South China Sea. *Ore Geology Reviews*. 2017;89:206–227. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.06.020>
6. Sharma R. (ed.). *Deep Sea Mining*. Springer; 2017. 535 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-52557-0>
7. Bau M., Schmidt K., Koschinsky A., Hein J., Kuhn T., Usui A. Discriminating between different genetic types of marine ferromanganese crusts and nodules based on rare earth elements and yttrium. *Chemical Geology*. 2014;381:1–9. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2014.05.004>
8. Josso P., Parkinson I., Horstwood M., Lusty P., Chenery S., Murton B. Improving confidence in ferromanganese crust age models: A composite geochemical approach. *Chemical Geology*. 2019;513:108–119. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2019.03.003>
9. Hein J.R., Koschinsky A. Deep-Ocean Ferromanganese Crusts and Nodules. *Treatise on Geochemistry (Second Edition)*. 2014;13:273–291. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.01111-6>
10. Nguyen Hoang. Synthesis of petrographic and geochemical characteristics of Neogene-Quaternary effusives and mantle dynamics of the East Sea and adjacent areas. *Journal of Geology, series A, Ha Noi*. 2009;312(5–6):39–57.
11. Pinxian Wang, Qianyu Li, Chun-Feng Li. *Geology of the China Seas*. Elsevier; 2004.
12. Mai Thanh Tan. *South China Sea*. Vol. 3: Geology and Geophysics. Hanoi: Hanoi National University Press; 2003. 458 p.
13. Гальперин А.М., Кириченко Ю.В., Щёкина М.В., Каширский А.С., Якупов И.И. Оценка возможности вовлечения железомарганцевых месторождений морского дна в разработку. Ч. 1. Минерально-сырьевые ресурсы мирового океана. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2014;(5):134–142. Режим доступа: <https://giab-online.ru/files/Data/2014/05/Galperin-Kirichenko.pdf>
14. Гальперин А.М., Кириченко Ю.В., Щёкина М.В., Каширский А.С., Якупов И.И. Оценка возможности вовлечения железомарганцевых месторождений морского дна в разработку. Ч. 2. Перспективы разработки глубоководных месторождений твердого минерального сырья. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2014;(6):361–368.
15. Кириченко Ю.В., Каширский А.С. Месторождения твердого минерального сырья Мирового океана и потенциал его использования. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2015;(9):251–259.
16. Димов Г. (ред.) *Геология и минеральные ресурсы Мирового океана*. Варшава: Intermorgeo; 1990. 756 с.
17. 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;(12):1280–1303.
18. Константинова Н.П., Черкашён Г.А., Новиков Г.В., Богданова О.Ю., Кузнецов В.Ю., Рекант П.В. и др. Железомарганцевые корки поднятия Менделеева: особенности состава и формирования. *Арктика: экология и экономика*. 2016;(3):16–28. Режим доступа: <http://eng.arctica-ac.ru/article/147/>
19. Базилевская Е.С. *Исследование железомарганцевых руд океана*. М.: Наука; 2007. 189 с.

## References

1. Do Minh Tiep, Ton Nu My Du. Preliminary study on Fe - Mn nodules in deep sea bottom of South-eastern Vietnam. In: *Scientific conference on "Bien Dong 2000"*. Nhatrang; 2000.
2. Ngo Chan Thien Quy, Kirichenko Yu. V. Mineral Potential of Subsea Deposits in Vietnamese Part of South China Sea. *Russian Mining Industry*. 2020;(1):140–143. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2020-1-140-143>
3. Ngo Tran Thien Quy, Kirichenko Yu.V., Shchyokina M.V. Promising and provable solid mineral resources in the shelf and abyssal



- deposits in Vietnam. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021;(9):103–112. (In Russ.) [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2021\\_9\\_0\\_103](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_9_0_103)
4. Zhong Y., Chen Z., González F.J., Hein J.R., Zheng X., Li G. et al. Composition and genesis of ferromanganese deposits from the northern South China Sea. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2017;138:110–128. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2017.02.015>
  5. Yao Guan, Xiaoming Sun, Yingzhi Ren, Xiaodong Mineralogy, geochemistry and genesis of the polymetallic crusts and nodules from the South China Sea. *Ore Geology Reviews*. 2017;89:206–227. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.06.020>
  6. Sharma R. (ed.). *Deep Sea Mining*. Springer; 2017. 535 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-52557-0>
  7. Bau M., Schmidt K., Koschinsky A., Hein J., Kuhn T., Usui A. Discriminating between different genetic types of marine ferromanganese crusts and nodules based on rare earth elements and yttrium. *Chemical Geology*. 2014;381:1–9. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2014.05.004>
  8. Josso P., Parkinson I., Horstwood M., Lusty P., Chenery S., Murton B. Improving confidence in ferromanganese crust age models: A composite geochemical approach. *Chemical Geology*. 2019;513:108–119. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2019.03.003>
  9. Hein J.R., Koschinsky A. Deep-Ocean Ferromanganese Crusts and Nodules. *Treatise on Geochemistry (Second Edition)*. 2014;13:273–291. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.01111-6>
  10. Nguyen Hoang. Synthesis of petrographic and geochemical characteristics of Neogene-Quaternary effusives and mantle dynamics of the East Sea and adjacent areas. *Journal of Geology, series A, Ha Noi*. 2009;312(5–6):39–57.
  11. Pinxian Wang, Qianyu Li, Chun-Feng Li. *Geology of the China Seas*. Elsevier; 2004.
  12. Mai Thanh Tan. *South China Sea. Vol. 3: Geology and Geophysics*. Hanoi: Hanoi National University Press; 2003. 458 p.
  13. Galperin A.M., Kirichenko Yu.V., Shchekina M.V., Kashirsky A.S., Yakupov I.I. Evaluation of the possibility of involvement of ferromanganese seabed deposits in the development. Part 1. Mineral resources of the World Ocean. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2014;(5):134–142. (In Russ.) Available at: <https://giab-online.ru/files/Data/2014/05/Galperin-Kirichenko.pdf>
  14. Galperin A.M., Kirichenko Yu.V., Shchekina M.V., Kashirsky A.S., Yakupov I.I. Evaluation of the possibility of involvement of ferromanganese seabed deposits in the development. Part 2. Prospects for sub ocean hard mineral mining. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2014;(6):361–368. (In Russ.)
  15. Kirichenko Yu.V., Kashirsky A.S. Hard minerals and use potential of the World Ocean. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2015;(9):251–259. (In Russ.)
  16. Dimov G. (ed.) *Geology and Mineral Resources of the World Ocean*. Warsaw: Intermorgeo; 1990. 756 p. (In Russ.)
  17. 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;46(12):1206–1227. <https://doi.org/10.1134/S0016702908120021>
  18. Konstantinova N.P., Cherkashev G.G., Novikov G.V., Bogdanova O.Y., Kuznetsov V.Y., Rekant P.V. et al. Ferromanganese crusts of Mendeleev Swell: the features of composition and formation. *Arctic: Ecology and Economy*. 2016;(3):16–28. (In Russ.) Available at: <http://eng.arctica-ac.ru/article/147/>
  19. Bazilevskaya E.S. *Investigation of the ocean ferromanganese ores*. Moscow: Nauka; 2007. 189 p. (In Russ.)

**Информация об авторах**

**Кириченко Юрий Васильевич** – доктор технических наук, профессор кафедры геологии и маркшейдерского дела, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва, Российская Федерация

**Нго Чан Тхиен Кюи** – аспирант кафедры геологии и маркшейдерского дела, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва, Российская Федерация; Вьетнамский национальный университет Хошимина, г. Хошимин, Вьетнам; e-mail: [nttquy@hcmus.edu.vn](mailto:nttquy@hcmus.edu.vn)

**Фам Ба Чунг** – инженер, Институт океанографии Вьетнамской академии наук и технологий, г. Нячанг, Вьетнам

**Нгуен Тхи Тхам** – инженер, Вьетнамский институт нефти, г. Ханой, Вьетнам

**Доан Тхи Туи** – инженер, Вьетнамский институт нефти, г. Ханой, Вьетнам

**Information about the authors**

**Yury V. Kirichenko** – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Geology and Mine Surveying, National University of Science & Technology (MISIS), Moscow, Russian Federation

**Ngo Tran Thien Quy** – Graduate Student, Department of Geology and Mine Surveying, National University of Science & Technology (MISIS), Moscow, Russian Federation; Vietnam National University Ho Chi Minh City, University of Science, Ho Chi Minh, Vietnam; e-mail: [nttquy@hcmus.edu.vn](mailto:nttquy@hcmus.edu.vn)

**Pham Ba Trung** – engineer, Institute of Oceanography, Vietnam Academy of Science and Technology, Nha Trang, Vietnam

**Nguyen Thi Tham** – Engineer, Vietnam Petroleum Institute, Hanoi, Vietnam

**Doan Thi Thuy** – Engineer, Vietnam Petroleum Institute, Hanoi, Vietnam

**Информация о статье**

Поступила в редакцию: 27.02.2022

Поступила после рецензирования: 15.03.2022

Принята к публикации: 16.03.2022

**Article info**

Received: 27.02.2022

Revised: 15.03.2022

Accepted: 16.03.2022